



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO
CARRERA DE ELECTRICIDAD**

**AUDITORÍA ELÉCTRICA EN INSTALACIONES INDUSTRIALES DE
LA PLANTA DE FERRERO TUMBACO BASADA EN ARCO
ELÉCTRICO, NIVEL DE CAPACIDAD DE CORTOCIRCUITO Y
COORDINACIÓN DE PROTECCIONES PARA LA
IMPLEMENTACIÓN TÉCNICA DE LA NORMA NFPA 70E.**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero Eléctrico

AUTOR: CAMILA BELÉN QUEVEDO GONZÁLEZ
TUTOR: MANUEL DARIO JARAMILLO MONGE

Quito- Ecuador
2025

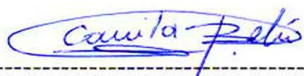
CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TTITULACIÓN

Yo, Camila Belén Quevedo González con documento de identificación N° 1725596637 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación

Quito, 11 de septiembre del año 2025

Atentamente,



Camila Belén Quevedo González

1725596637

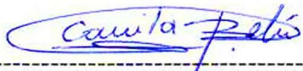
**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO
DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Camila Belén Quevedo González con documento de identificación No. 1725596637, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Proyecto Técnico: "Auditoría eléctrica en Instalaciones Industriales de la Planta de Ferrero Tumbaco basada en arco eléctrico, nivel de capacidad de cortocircuito y coordinación de protecciones para la implementación técnica de la Norma NFPA 70E", el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 11 de septiembre del año 2025

Atentamente,



Camila Belén Quevedo González

1725596637

**CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN**

Yo, Manuel Dario Jaramillo Monge con documento de identificación No. 1714298005, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: AUDITORÍA ELÉCTRICA EN INSTALACIONES INDUSTRIALES DE LA PLANTA DE FERRERO TUMBACO BASADA EN ARCO ELÉCTRICO, NIVEL DE CAPACIDAD DE CORTOCIRCUITO Y COORDINACIÓN DE PROTECCIONES PARA LA IMPLEMENTACIÓN TÉCNICA DE LA NORMA NFPA 70E, realizado por Camila Belén Quevedo González con documento de identificación N° 1725596637, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 17 de junio del año 2025

Atentamente,



Ing. Manuel Dario Jaramillo Monge, MSc

1714298005

ÍNDICE

RESUMEN	i
ABSTRACT	ii
1. INTRODUCCIÓN	1
1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	4
1.1. Antecedentes	4
1.2. Planteamiento del problema	4
1.3. Alcance.....	5
1.4. Objetivo Principal.....	6
1.5. Objetivos específicos	6
2. MARCO TEÓRICO.....	7
2.1. Fundamentos del Riesgo Eléctrico	7
2.2. Choque eléctrico	8
2.2.1. Frontera de relámpago de arco	9
2.2.2. Frontera de aproximación limitada.....	9
2.2.3. Frontera de aproximación restringida	10
2.3. Corto circuito.....	11
2.3.1. Falla Trifásica	13
2.3.2. Falla monofásica a tierra (línea-línea)	13
2.3.3. Falla bifásica (línea-línea).....	14
2.3.4. Falla bifásica a tierra (dos líneas a tierra)	14
2.4. Elementos eléctricos de protección	15
2.4.1. Fusibles.....	15
2.4.2. Disyuntores	15
2.4.3. Relés	16
2.5. Arco eléctrico	17
3. ANALISIS TÉCNICO.....	20
3.1. Coordinación de protecciones	20
3.1.1. Aspectos fundamentales de la coordinación de protecciones	20
3.1.2. Curvas tiempo corriente.....	21
3.1.3. Zona de sobrecarga (Izquierda).....	23

3.1.4.	Zona de disparo térmico (Parte inclinada)	23
3.1.5.	Zona de disparo instantáneo	23
3.1.6.	Área sombreada azul.....	24
3.1.7.	Zonas específicas de la gráfica tiempo – corriente.....	24
3.1.8.	Zona de sobrecarga térmica (Izquierda)	24
3.1.9.	Zona de fallas moderada o de cortocircuito (Centro)	24
3.1.10.	Zona de fallas tumbas o de tiempo de no operación (derecha)	24
3.1.11.	Tipos de dispositivos con curvas tiempo-corriente	25
3.1.12.	Relés de protección	25
3.2.	Análisis de arco eléctrico.....	26
3.3.	Auditoría eléctrica	27
3.4.	NORMA NFPA 70E.....	27
3.4.1.	Responsabilidades del empleador.....	28
3.4.2.	Responsabilidades del trabajador	29
3.5.	Secuencia para establecer trabajos en sistemas eléctricos.....	29
3.6.	Etiquetas establecidas por la norma NFPA70E	30
3.7.	Fundamentos de la Calidad de Energía.....	34
3.7.1.	Sobretensiones transitorias.....	34
3.7.2.	Sobretensiones de origen externo.....	35
3.7.3.	Sobretensiones de origen interno.....	35
3.7.4.	Armónicos.....	35
3.7.5.	Flicker o caídas de tensión	36
3.7.6.	Sags o caídas de tensión.....	37
3.7.7.	Norma EN 50160.....	37
3.7.8.	Analizadores de calidad	38
3.7.9.	Analizador de red portátil MYeBOX 1500.....	38
3.8.	Relación entre Calidad de Energía y Seguridad Eléctrica.....	40
4.	MARCO METODOLÓGICO	42
4.1.	Inspección técnica.....	42
4.2.	Características generales de la planta	43
4.3.	Características técnicas de la planta	44
4.4.	Ubicación	44

4.5.	Lista de transformadores y tableros.....	45
4.5.1.	Transformador TR-1.....	45
4.5.2.	Transformador TR-2.....	45
4.5.3.	Transformador TR-3.....	46
4.6.	Guía sistemática.....	46
4.6.1.	Recolección de la información.....	46
4.6.2.	Análisis de cortocircuito.....	46
4.6.3.	Coordinación de protecciones.....	47
4.6.4.	Estudio de Arco eléctrico.....	47
4.6.5.	Estudio de Calidad de Energía.....	47
4.6.6.	Auditoria Eléctrica.....	47
4.6.7.	Evaluación de riesgos eléctricos.....	47
5.	ANÁLISIS Y ESTUDIOS.....	51
5.1.	Criterios de diseño y operación.....	52
5.1.1.	Criterios generales para análisis técnicos.....	52
5.1.2.	Estudio de Cortocircuito.....	52
5.2.	Coordinación de protecciones.....	52
5.2.1.	Protección a transformadores.....	52
5.2.2.	Estudio de Arco eléctrico.....	53
5.3.	Procedimiento técnico para el cálculo de energía incidente.....	53
5.4.	Resultados del análisis de cortocircuito.....	55
5.5.	Coordinación de protecciones.....	55
5.6.	Selectividad de protecciones eléctricas.....	63
5.6.1.	Transformador 1 220V 500KVA.....	63
5.6.2.	Transformador 2 380V 800KVA.....	65
5.6.3.	Transformador 3 220V 120KVA.....	66
5.6.4.	Frontera de choque eléctrico.....	68
5.7.	Arco incidente.....	70
5.7.1.	Equipos de protección personal según su categoría:.....	71
5.8.	Cálculo de energía incidente y explicación técnica.....	71
5.9.	Pasos a seguir en ETAP para el cálculo de energía incidente.....	73
5.9.1.	Configurar la red eléctrica.....	73

5.9.2.	Determinar la corriente de cortocircuito	73
5.9.3.	Determinación de corriente de arco.....	73
5.9.4.	Calcular el tiempo de apertura de falla (FCT).....	74
5.9.5.	Cálculo de energía incidente	74
5.9.6.	Determinar distancias seguras.....	74
5.9.7.	Generar informes o tablas	75
5.10.	Acciones requeridas en tableros del transformador 1	79
5.10.1.	Barra b-28c excede el nivel de arco incidente.....	79
5.10.2.	Barra b-29c nivel de arco incidente 4.....	81
5.10.3.	Tablero 19ch excede nivel de arco incidente 4.....	82
5.10.4.	Barra b-12a nivel de arco incidente 3.....	84
5.11.	Resultados del arco incidente en tableros del transformador 2	86
5.12.	Acciones requeridas en tableros del transformador 2.....	87
5.13.	Solución propuesta:	87
5.14.	Resultados del arco incidente en tableros del transformador 3	98
5.15.	Acciones requeridas en tableros del transformador 3.....	101
5.15.1.	B-tr3 barra del trafo tr-3 excede el nivel 4 de riesgo por arco eléctrico 101	
5.15.2.	Barra b-11, excede nivel 4 de riesgo por arco eléctrico.....	102
5.15.3.	Barra b-20, presentando nivel de riesgo por arco 3 con cal. Br49.....	104
5.15.4.	Barra b-23 presentando un nivel de riesgo por arco 3 con cal. Br46.....	105
5.15.5.	Barra b-5a, con calibración actual de br31	107
5.15.6.	Barra b-6a, con calibración actual de br32	108
5.15.7.	B-6, presenta un nivel de riesgo por arco que excede el nivel 4.....	110
5.15.8.	Barra b-4, con calibración actual de br12	113
5.16.	Análisis de los resultados de arco incidente, tablas resumen.....	114
5.17.	Propuesta de ajuste de parámetros y limitaciones de implementación.....	116
5.18.	Equipamiento para protección de choque y arco eléctrico	117
5.19.	Etiquetas NFPA70E.....	123
5.20.	Acciones de mitigación específicas basadas en los datos recolectados.....	127
5.21.	Resumen puntos clave de la NFPA70E aplicados.....	128
5.22.	Cumplimiento de la norma NFPA 70E pre y post de la auditoría.....	129
6.	ANÁLISIS DE CALIDAD DE ENERGÍA.....	131

6.1.	Transformador 1 220V 500KVA.....	132
6.2.	Transformador 2 380V 800KVA.....	135
6.3.	Transformador 3 220V 120KVA.....	139
7.	CONCLUSIONES.....	142
8.	RECOMENDACIONES	143
9.	BIBLIOGRAFIA.....	144
10.	ANEXOS	150

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Valores medios de la resistencia del cuerpo humano.....	8
Figura 2. Fronteras de aproximación de choque eléctrico	10
Figura 3. Ejemplo ejes de la curva tiempo corriente breaker 62 Tictac 220V	22
Figura 4. Imagen real del breaker 62 chocolate 220V	23
Figura 5. Etiqueta real	34
Figura 6. Analizador de redes MyeBOX 1500	39
Figura 7. MyeBOX 1500 Conectado en TR1	39
Figura 8. Dimensión real del equipo de medición	40
Figura 9. Ejemplo diagrama unifilar entregado por la empresa	43
Figura 10. Ejemplo diagrama unifilar realizado	43
Figura 11. Ubicación satelital de la Planta Ferrero Tumbaco	45
Figura 12. Diagrama de flujo de la auditoría.....	50
Figura 13. Imagen real de dispositivo de protección	54
Figura 14. Explicación curva de protecciones.....	56
Figura 15. Coordinación de breaker br56 en transformador 1	57

Figura 16. Coordinación de breaker principal br101 transformador 2	58
Figura 17. Fotografía real de breaker br101	59
Figura 18. Cambio de la calibración del breaker br101 en TR2.....	60
Figura 19. Calibración actual breaker br-1 transformador 3	61
Figura 20. Fotografía real del breaker br1 TR3.....	62
Figura 21. Cambio de calibración en br1 TR3	63
Figura 22. Coordinación de protecciones del TR1	64
Figura 23. Coordinación de protecciones del TR2	66
Figura 24. Diagrama referencial de la coordinación de protecciones TR2.....	66
Figura 25. Coordinación de protecciones del TR3	68
Figura 26. Diagrama referencial de la coordinación de protecciones TR3.....	68
Figura 27. Distintos tipos de configuraciones de los electrodos	74
Figura 28. Módulo de arco eléctrico, visualización de resultados.....	75
Figura 29. Ventana de reportes para extraer datos de los estudios en formato Excel.....	76
Figura 30. Reporte de resultados TR2.....	76
Figura 31. Barra b28c y cambio de breaker en ETAP	80

Figura 32. Fotografía real breaker br70	80
Figura 33. Barra b29c en ETAP.....	81
Figura 34. Barra b29c con cambio de calibración en ETAP	82
Figura 35. Tablero 19ch ETAP.....	83
Figura 36. Tablero 19ch con cambio de calibración.....	83
Figura 37. Imagen real de breaker br73	84
Figura 38, Barra b12 en ETAP	85
Figura 39. Cambio de calibración en br12a.....	85
Figura 40. Imagen real de breaker br12a.....	85
Figura 41. Transferencias automáticas en TR2	87
Figura 42. Tablero de transferencia automática 1 Tablero 4b.....	88
Figura 43. Tablero de transferencia automática 2 Tablero 3b.....	88
Figura 44. Riesgo de arco en ETAP por cambio de breaker en transferencia automática.....	97
Figura 45. Breaker btr3 modelado en ETAP	101
Figura 46. Btr3 con cambio de calibración	101
Figura 47. Fotografía real de br1	102

Figura 48. Barra b11 modelo ETAP	103
Figura 49. Cambios en la calibración de br1	103
Figura 50. Br49 en ETAP	104
Figura 51. Br49 con cambio de calibración.....	104
Figura 52. Imagen real br49	105
Figura 53. br46 con calibración actual.....	106
Figura 54. br46 con cambio de calibración modelado en ETAP	106
Figura 55. Imagen real br46	106
Figura 56. Br31 en ETAP.....	107
Figura 57. Br 31 con cambio de calibración.....	107
Figura 58. Fotografía real br31	108
Figura 59. br32 en ETAP	108
Figura 60. Fotografía real br32.....	109
Figura 61. br32 con cambio de calibración	109
Figura 62. b6 en ETAP.....	110
Figura 63. b6 con cambio de calibración	110

Figura 64. Fotografía real br39.....	111
Figura 65. Br39 en ETAP.....	112
Figura 66. Br39 con cambio de calibración.....	112
Figura 67. Fotografía real br39.....	112
Figura 68. br12 en ETAP	113
Figura 69. Br12 con cambio de calibración.....	113
Figura 70. Imagen real br12	114
Figura 71. Guantes aislantes de caucho clase 0.....	118
Figura 72. Forma de usar los guantes aislantes y mecánicos	119
Figura 73. Guantes protectores de cuero, mecánicos.....	119
Figura 74. Guantes dieléctricos clase 3 para trabajos en media y alta tensión. Tipo 1.....	120
Figura 75. Casco rígido, capucha de protección contra arco.....	122
Figura 76. Zapatos dieléctricos.....	123
Figura 77. Equipamiento para protección de choque y arco eléctrico	123
Figura 78. Etiqueta de riesgo de choque y arco eléctrico.....	124
Figura 79. Etiquetas reales en TR1 y TR2	126

Figura 80. Etiqueta real tablero 6b Trafo 2	126
Figura 81. Etiquetas reales cámara de transformación TR3	126
Figura 82. Conexión con traje de arco eléctrico del analizador	131
Figura 83. Conexión red trifásica a 4 hilos	132
Figura 84. Voltaje fase-neutro transformador 1	133
Figura 85. Voltaje fase-neutro transformador 2	136
Figura 86. Voltaje fase-neutro transformador 3	139

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Acciones que desencadenan arcos eléctricos	11
Tabla 2. Tipos de fallas y su clasificación.....	13
Tabla 3. Dispositivos de protección.....	17
Tabla 4. Información de etiqueta según NFPA70E	30
Tabla 5. Parámetros establecidos por la Norma EN50160.....	37
Tabla 6. Tipos de analizadores	38
Tabla 7. Características del Myebox 1500	39
Tabla 8. Características técnicas de la planta	44
Tabla 9. Matriz de evaluación de riesgos eléctricos	48
Tabla 10. Calibración actual breaker br101	59
Tabla 11. Calibración actual y recomendada para breaker br1	61
Tabla 12. Explicación de las fronteras de aproximación	68
Tabla 13. Valores a usar dentro del estudio	69
Tabla 14. Recomendaciones cuando se atraviesa la frontera de relámpago de arco	70
Tabla 15. Nivel de riesgo y nivel mínimo de protección en cal/cm ²	71
Tabla 16. Categorías de equipos de protección personal	71
Tabla 17. Energía de arco incidente en barras del TR1	77
Tabla 18. Energía de arco incidente en las barras del TR1	78

Tabla 19. Energía de arco incidente en barras del TR2	86
Tabla 20. Energía del arco incidente en barras del transformador 3	98
Tabla 21. Energía del arco incidente en barras del transformador 3	99
Tabla 22. Energía del arco incidente en barras del transformador 3	100
Tabla 23. Configuración actual y recomendada del breaker br1	101
Tabla 24. Configuración actual y recomendada del breaker br49	105
Tabla 25. Calibración actual y recomendaciones breaker br46.....	107
Tabla 26. Calibración actual y recomendación breaker br39	113
Tabla 27. Calibración actual y recomendación breaker br12	114
Tabla 28. Resumen de acciones a seguir para disminuir nivel de riesgo por arco	115
Tabla 29. Resumen de porcentaje de riesgo en instalación.....	116
Tabla 30. Clasificación de guantes según su clase	119
Tabla 31. Modelo de etiqueta según la norma NFPA70E en excel	125
Tabla 32. Acciones de mitigación específicas basadas en datos recolectados	127
Tabla 33. Resumen de artículos de la Norma NFPA70E aplicados	128
Tabla 34. Resumen sistemático de la norma NFPA70E	129
Tabla 35. Tabla comparativa de cumplimiento — Antes y Después del Proyecto	130
Tabla 36. Voltajes promedio trafo 1 fase-fase.....	134
Tabla 37. Voltajes promedio trafo 1 fase-neutro	134
Tabla 38. THD en corriente transformador 1	134

Tabla 39. THD en voltaje transformador 1	134
Tabla 40. Flicker PST transformador 1	134
Tabla 41. THD en voltaje transformador 1	134
Tabla 42. Potencias transformador 1	135
Tabla 43. Voltajes promedio trafo 2 fase-fase.....	137
Tabla 44. Voltajes promedio trafo 2 fase-neutro	137
Tabla 45. THD en voltaje transformador 2	138
Tabla 46. Frecuencia transformador 2	138
Tabla 47. Flicker PST transformador 2.....	138
Tabla 48. THD en corriente transformador 2	138
Tabla 49. Potencias transformador 2.....	138
Tabla 50. Voltajes promedio trafo 3 fase-fase.....	140
Tabla 51. Voltajes promedio trafo 2 fase-neutro	140
Tabla 52. THD en voltaje transformador 3	140
Tabla 53. THD en corriente transformador 3	140
Tabla 54. THD en voltaje transformador 3	141
Tabla 55. THD en voltaje transformador 3	141
Tabla 56. Potencias transformador 3.....	141

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Tableros conectados a TR1	150
Anexo 2. Tableros conectados a TR2	152
Anexo 3. Tableros conectados a TR3	153
Anexo 4. Niveles de cortocircuito en barras TR1	156
Anexo 5. Niveles de cortocircuito en barras TR2	158
Anexo 6. Niveles de cortocircuito en barras TR3	159
Anexo 7. Fronteras de choque eléctrico en tableros del TR1.....	161
Anexo 8. Fronteras de choque eléctrico en tableros de TR2.....	163
Anexo 9. Fronteras de choque eléctrico en tableros del TR3.....	165
Anexo 10. Diagrama Unifilar TR1 Chocolate.....	170
Anexo 11. Diagrama unifilar TR2 Avellanas.....	171
Anexo 12. Diagrama unifilar TR3 Tictac	171

RESUMEN

El presente proyecto se centra en realizar una auditoría eléctrica en las instalaciones industriales de la planta de Ferrero Tumbaco, esta misma se enfoca en garantizar el cumplimiento de la norma NFPA70E. Esta es reconocida mundialmente por definir lineamientos de seguridad eléctrica en sistemas energizados. Este proyecto incluye estudios detallados de cortocircuito, coordinación de protecciones y análisis de arco eléctrico los cuales se realizan usando el software especializado ETAP. Mediante los estudios se logró evaluar el estado actual de la planta, identificar los puntos críticos del sistema y proponer soluciones prácticas basadas en mantener la operatividad y mejorar la confiabilidad.

La variedad de estudios se realizó para poder brindar la seguridad necesaria a las personas y equipos de la planta. Evitando de esta manera accidentes por choque o arco eléctrico y precautelando la integridad de los equipos y elementos eléctricos.

Entre los logros del proyecto se puede incluir la actualización del diagrama unifilar de la planta, implementación del etiquetado informativo en los tableros y generación de un reporte de recomendaciones entregado a la empresa para que puedan fortalecer la seguridad para los trabajadores y minimizar las paradas inesperadas.

Palabras clave: Norma NFPA70E, Auditoría eléctrica, cortocircuito, arco eléctrico, coordinación de protecciones, ETAP.

ABSTRACT

The present project focuses on conducting an electrical audit in the industrial facilities of the Ferrero Tumbaco plant, with an emphasis on ensuring compliance with the NFPA 70E standard. This standard is globally recognized for defining electrical safety guidelines in energized systems. The project includes detailed studies of short circuits, protection coordination, and arc flash analysis, all carried out using the specialized software ETAP. Through these studies, the current state of the plant was evaluated, critical points of the system were identified, and practical solutions were proposed to maintain operability and improve reliability.

The variety of studies was conducted to provide the necessary safety for the personnel and equipment in the plant, thereby preventing accidents caused by electrical shock or arc flash and safeguarding the integrity of electrical equipment and components.

Among the achievements of the project are the updating of the plant's single-line diagram, the implementation of informational labeling on panels, and the generation of a recommendation report delivered to the company. These measures aim to enhance worker safety and minimize unexpected downtime.

Keywords: NFPA 70E standard, electrical audit, short circuit, arc flash, protection coordination, ETAP.

1. INTRODUCCIÓN

Un aspecto crítico dentro de las instalaciones eléctricas de cualquier tipo es el riesgo eléctrico, este factor impacta de manera negativa a la seguridad de las personas como a la confiabilidad operativa de los sistemas eléctricos. El presente trabajo plantea el uso de la Norma NFPA 70E la cual en los últimos años se ha consolidado como un estándar internacional para poder referenciar las prácticas seguras en cuanto a manejo y operación de los sistemas eléctricos energizados [1].

El problema por tratar es realizar la auditoría eléctrica enfocada en riesgo eléctrico, en la planta de Ferrero Tumbaco existe un riesgo elevado por la magnitud de potencia que administran. Este es un riesgo latente para los empleados que trabajan en estas áreas directamente y para la infraestructura del lugar. El problema nace debido a la exposición de los sistemas eléctricos a fallas consideradas críticas como cortocircuitos o arcos eléctricos. Estos escenarios se vuelven posibles gracias al deterioro del aislamiento, conexiones defectuosas o tiempos de operación inadecuados. En esta planta no se han realizado previamente ningún estudio o análisis para determinar el peligro existente en base a la norma, esta es una acción que compromete con totalidad la seguridad física de las personas como la integridad de la planta.

Dentro del ámbito industrial, donde se maniobra con grandes cantidades de energía y que además se opera bajo condiciones exigentes, la probabilidad de que ocurran fallas eléctricas es alta si no se toman precauciones. Este riesgo se puede manifestar de varias formas, como choques eléctricos, cortocircuitos, sobrecargas o el más peligroso llamado arco eléctrico el cual atenta directamente contra la integridad física de los trabajadores [1].

Los fenómenos eléctricos como los cortocircuitos o sobrecargas comprometen la confiabilidad del sistema eléctrico lo que puede derivar en paradas no planificadas o daños permanentes en equipos. El riesgo eléctrico se conoce de manera natural en los sistemas eléctricos, se hace presente en barras o puntos donde se transportan grandes cantidades de energía a través de los equipos y componentes por lo tanto estos equipos deben permanecer en constante revisión y mantenimiento para garantizar su operatividad. Estas fallas ocurren de manera repentina y las

razones son muy variadas las más conocidas son fallas en el aislamiento eléctrico, sobrecargas o errores humanos. Cada escenario puede dar paso a que ocurra un evento de arco o choque eléctricos [2].

En los últimos años un tema central de investigación es el riesgo eléctrico, en especial el arco eléctrico el cual es conocido como un fenómeno peligroso en asociado directamente con las fallas, todo esto debido a su dimensión de ocurrencia. Cuando este fenómeno se desarrolla se libera de forma repentina mucha energía térmica y radiación. Ambas pueden causar lesiones graves incluso si el individuo usa equipo de protección personal. Actualmente se describen tres tipos de arco principales: abierto, en caja y expulsado. Estos pueden variar dependiendo las condiciones a las que opera el sistema y del entorno en el que se generan, lo que determinara la cantidad de energía liberada y su distribución a través de la ropa y de los materiales cercanos [3].

Un arco eléctrico ocurre entre dos conductores energizados o entre un conductor energizado y un elemento que se encuentre a tierra, en presencia de un medio conductor, como lo es el aire. Este fenómeno actúa por proximidad o degradación en el aislamiento. La energía que se libera en el arco eléctrico es suficiente para evaporar conductores, generando una onda explosiva de calor, presión y luz. Puede causar quemaduras, lesiones físicas y destrucción de equipos eléctricos. El estudio que se plantea es un análisis crítico que permite calcular la energía incidente generada durante un evento de esta categoría. Este cálculo es fundamental para determinar las medidas de protección necesarias y establecer distancias seguras de trabajo. La NFPA70E proporcionan directrices específicas para realizar estos estudios y garantizar la protección adecuada del personal y los equipos [2]. La investigación y desarrollo dentro del ámbito del riesgo eléctrico se ha extendido hacia la creación de nuevas herramientas de protección, como mantas de protección contra arco, las cuales deben cumplir con las normativas ASTM las cuales están desarrolladas por la sociedad estadounidense para pruebas y materiales respectivamente. Estos dispositivos han demostrado ser efectivos en la reducción del impacto de la energía térmica disipada. En conjunto, estos estudios y normativas forman la base para la gestión actual de los riesgos eléctricos en instalaciones industriales, asegurando practicas

seguras y eficientes, minimizando las probabilidades de accidentes eléctricos y mejorando la red del sistema ante las fallas [3].

Por otra parte, el análisis de cortocircuito el cual es una técnica indispensable para evaluar la capacidad del sistema eléctrico instalado de soportar y gestionar los eventos de falla. Un cortocircuito puede generar una corriente de falla con miles de amperios. Sin un sistema de protección adecuadamente diseñado, esta corriente sobrepasaría los límites de los equipos de maniobra y protección, aumentando el riesgo de incendios o explosiones. Este estudio permite identificar las corrientes de falla esperadas en diferentes puntos del sistema y compararlas con las capacidades establecidas de los dispositivos de protección, relés o interruptores automáticos. En esa misma línea encontramos la coordinación de protecciones, el complemento fundamental para asegurar que los dispositivos operen de manera secuencial y selectiva. Una protección bien coordinada garantiza que solo se desconecten las partes directamente afectadas por la falla, minimizando interrupciones operativas y daños a los equipos [2].

Para conocer el desempeño general de la planta se realizará el análisis de calidad de energía, este análisis de calidad se basa en la norma EN50160, norma europea la cual establece los estándares para cumplir con la calidad de energía del voltaje suministrado por las empresas distribuidoras bajo condiciones normales de operación. Esto para identificar los valores nominales a los que está trabajando la planta actualmente [4].

El propósito de este proyecto es llevar a cabo una auditoria eléctrica en las instalaciones industriales de la planta de Ferrero Tumbaco. Para lograr este objetivo será necesario recolectar información técnica de los componentes y la configuración actual del sistema eléctrico. Con base a estos datos, se actualizará el diagrama unifilar existente lo que permitirá representar de manera clara la estructura de la planta, a partir de este diagrama, se procederá a la modelación del sistema utilizando el software especializado ETAP Power Station. Dentro de este tema se propone realizar estudios técnicos que son considerados esenciales como es el análisis de cortocircuito el cual ayuda a determinar las corrientes de falla máximas existentes en una falla. Este estudio se hace bajo diversas condiciones y con distintos dispositivos de protección, lo más cercano a la realidad posible. Estos estudios se realizarán a partir de las recomendaciones

de las normas internacionales pertinentes, asegurando la correcta aplicación de la norma NFPA 70E.

1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

1.1. Antecedentes

Un aspecto crítico dentro de las instalaciones eléctricas de cualquier tipo es el riesgo eléctrico, este factor impacta de manera negativa a la seguridad de las personas como a la confiabilidad operativa de los sistemas eléctricos. El presente trabajo plantea el uso de la NORMA NFPA 70E la cual en estos últimos años se ha consolidado como un estándar internacional para poder referenciar las practicas seguras en cuanto a manejo y operación de los sistemas eléctricos energizados. Dentro del ámbito eléctrico se implementan las auditorias en forma de mejora continua esto garantiza que las instalaciones eléctricas operen de manera eficiente. Esta es una forma para minimizar los riesgos potenciales existentes. La auditoría consiste en la evaluación del estado actual de los equipos, el análisis de las corrientes de cortocircuito, la coordinación de protecciones, el estudio de arco eléctrico y análisis de calidad de energía, asegurándonos de que se cumpla con los estándares planteados por las normas establecidas. La planta Ferrero Tumbaco opera con un sistema de alta demanda, el cual se expone a diversos riesgos lo que se considera un atentado contra la continuidad operativa del sistema. A lo largo de los años esta planta ha implementado medidas de protección, pero no sé a llevado a cabo una auditoría integral que evalué de manera minuciosa el sistema eléctrico de manera puntual en equipos de maniobra y protección.

1.2. Planteamiento del problema

En las instalaciones industriales hay riesgos eléctricos los cuales van a depender de varias características entre las más conocidas encontramos nivel de cortocircuito, tiempo de despeje, conexiones dañadas, fallas en el aislamiento o mantenimiento correctivo. Estos casos pueden causar imprevistos y afectar la operatividad del sistema. El nivel de riesgo causado por arco eléctrico es crítico para el personal y la infraestructura esto causa un impacto directo a la confiabilidad del sistema eléctrico. Para determinar la severidad de los riesgos eléctricos se

usan varios estudios comúnmente conocidos, el estudio de cortocircuito y la coordinación de protecciones estos permiten garantizar que los equipos actúen de manera correcta, selectivamente y rápido. Es así que se logra minimizar la exposición ante fallas. Al implementar la norma de manera técnica permitimos mitigar los riesgos existentes y mejorar la confiabilidad del sistema, esto ocurre al establecer criterios puntuales para el estudio de arco eléctrico. Al tomar en cuenta estas medidas el sistema queda protegido ante interrupciones, sobrecargas o daño permanente.

1.3. Alcance

La implementación del proyecto, auditoria eléctrica aparece tras la necesidad de mejorar el rendimiento y la confiabilidad del sistema en general. Evaluando el arco eléctrico, el nivel de cortocircuito y la coordinación de protecciones se cumple con las recomendaciones establecidas por la NORMA NFPA70E. El alcance del proyecto incluye la elaboración de un diagrama unifilar para obtener una representación precisa del sistema eléctrico, seguido por la modelación del sistema utilizando el software especializado ETAP, que permitirá llevar a cabo el análisis de cortocircuito, la coordinación de protecciones y el cálculo de la energía incidente por arco eléctrico. Los estudios de cortocircuito y análisis de protecciones permiten asegurar una correcta secuencia de operación, minimizando interrupciones y protegiendo la infraestructura. Además, se realizará un análisis de calidad de energía para verificar la señal de la energía suministrada por la empresa distribuidora y establecer riesgos eléctricos latentes de esta forma se podrá evaluar las condiciones en general de la planta para detectar sobrecargas y desequilibrios que puedan afectar el sistema, se etiquetara cada tablero con su respectiva especificación de protección eléctrica requerida en base al estudio realizado. Este enfoque técnico garantiza una mayor confiabilidad operativa y eficiencia del sistema eléctrico, asegurando su robustez ante condiciones de alta demanda y fallas eventuales.

1.4. Objetivo Principal

Realizar la auditoría del sistema eléctrico de la planta de Ferrero Tumbaco para garantizar la correcta implementación de la norma NFPA 70E usando simulaciones digitales en el software ETAP y análisis técnico de arco eléctrico, cortocircuitos y la coordinación de protecciones.

1.5. Objetivos específicos

- Identificar riesgos eléctricos presentes en la planta de Ferrero Tumbaco basado en un análisis de calidad de energía y metodologías de evaluación del riesgo eléctrico.
- Revisar y sintetizar los puntos clave de la normativa NFPA 70E para su implementación correcta en temas de seguridad eléctrica industrial.
- Diseñar el sistema eléctrico de la Planta de Ferrero Tumbaco para el análisis de arco eléctrico, cortocircuito, y coordinación de protecciones usando simulación digital en ETAP.

2. MARCO TEÓRICO

Considerado un factor crítico, el riesgo eléctrico es un indicativo para clasificar la seguridad existente en una planta industrial. Es un factor que debe ser gestionado con cuidado para garantizar el funcionamiento adecuado de la instalación y preservar la integridad del personal. Dentro de las instalaciones industriales encontramos magnitudes de corriente peligrosas por su nivel elevado, esto hace que los equipos y las personas queden expuestas a múltiples riesgos los cuales puedes causar accidentes graves e incluso mortales. El uso a conciencia de la NORMA NFPA70E, en conjunto con todos los análisis y estudios pertinentes permite mitigar estos riesgos de manera efectiva.

En este contexto, la implementación de una auditoría eléctrica responsable, como la que se propone para la planta industrial de Ferrero Tumbaco, se vuelve esencial para evaluar y mejorar el rendimiento y la seguridad del sistema eléctrico. Esta auditoría incluye el uso de herramientas avanzadas como el software ETAP 19.0.1 para la modelación y simulación de escenarios de falla, asegurando que el sistema eléctrico esté diseñado y operado conforme a estándares de seguridad internacionales, PowerVision Plus 1.6.15 para análisis de calidad de energía, este es un software de la empresa española Circutor el cual permite gestionar los datos obtenidos de su equipo de calidad de energía [5], [6].

2.1. Fundamentos del Riesgo Eléctrico

Los fundamentos de riesgo eléctrico se engloban en factores y principios los mismos que explican cómo se producen los accidentes relacionados con instalaciones eléctricas. Nos ayudan a cuantificar efectos sobre personas y equipos, y a comprender el impacto de la corriente eléctrica sobre el cuerpo humano. Es por eso que a partir de este concepto se establecen las medidas preventivas orientadas a mitigar riesgos eléctricos en plantas industriales [7]. Hay que tener en cuenta una variable muy importante dentro de este apartado, el comportamiento de la corriente eléctrica es un factor relevante al hablar de su distribución dentro del cuerpo humano. La corriente eléctrica independientemente de que sea continua o alterna representa un riesgo significativo cuando teniendo en cuenta su intensidad y duración ante la exposición. La corriente

más común que se puede encontrar en todas las instalaciones residenciales es la corriente alterna, esta es considerada la más peligrosa pues en términos de probabilidad es la causante de fibrilación ventricular, esto debido a los cambios rápidos en el flujo de esta. El segundo factor, la intensidad es crítica ya que con corrientes relativamente pequeñas (30mA) llegan a considerarse letales si fluyen por el camino equivocado a través del cuerpo humano, todo esto en función del tiempo de exposición[8]. Por último, no se puede olvidar el factor fisiológico, en qué estado se encuentra el cuerpo ese día, la resistencia del cuerpo humano dependerá de varios factores tantos internos como externos. Normalmente influye la hidratación, la cantidad de grasa y musculo, los electrolitos del cuerpo y el estado mental de la persona. No tiene la misma resistencia una persona de contextura delgada que una de contextura gruesa como se muestra en la figura 1 [7].

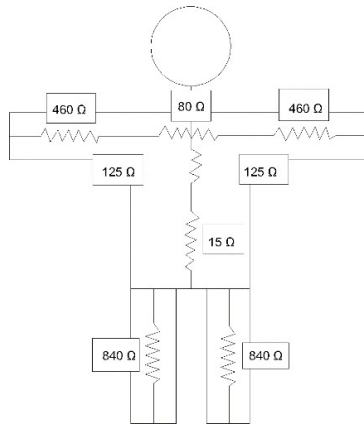


Figura 1. Valores medios de la resistencia del cuerpo humano

2.2. Choque eléctrico

Es una lesión la cual se produce cuando la corriente eléctrica atraviesa el cuerpo humano, esto puede causar una variedad de efectos los cuales van desde una ligera sensación de hormigueo hasta quemaduras severas, fibrilación o incluso la muerte. Todos estos factores van a depender de la cantidad de corriente y del tiempo de ocurrencia. La corriente puede afectar órganos importantes, hay que tener en cuenta que incluso pequeñas corrientes pueden ser peligrosas ya que pueden causar parálisis o interferir con nuestro ritmo cardiaco [7]. Al hablar de seguridad

dentro del trabajo no se puede evitar pensar en los accidentes fatales más aún si se trata de un trabajo eléctrico, todas estas percepciones hacen inevitable el pensar en medidas preventivas y considerar mejorar el conocimiento sobre el comportamiento de los fenómenos eléctricos y la seguridad en el lugar de trabajo[9]. Para mejorar nuestra comprensión, hay que relacionar las causas de la lesión. Por lo que se define que es una descarga eléctrica, varios textos dicen que una descarga eléctrica ocurre cuando la corriente eléctrica atraviesa nuestro cuerpo esto pasa cuando entramos en contacto con una pieza, cable u objeto electrificado [10].

Existe una gran cantidad de personas que no consideran los efectos existentes a largo plazo pues estos pueden ser sutiles o difíciles de diagnosticar usualmente la gente lo deja pasar. Pero es importante tener en cuenta que estos efectos pueden ocurrir en un lapso de 1 a 5 años, pueden ir desde síntomas psicológicos, neurológicos o físicos [9].

Para entender de mejor manera el alcance que tiene el choque eléctrico en nuestro cuerpo se debe tener en cuenta las fronteras de protección establecidas en la norma NFPA70E, estas dependen directamente de la cantidad de energía incidente esperada durante el fenómeno la cual se calcula mediante el estudio de Arc Flash. Si una persona se expone a una de estas fronteras sin el EPP necesario se exponen a quemaduras graves por lo que estas fronteras son consideradas de esenciales al hablar de riesgos eléctricos [2].

2.2.1. Frontera de relámpago de arco

Es la frontera límite a la que las personas pueden estar sin su equipo de protección personal, si la persona decide avanzar deberá usar el equipo apropiado de protección contra arco [2].

2.2.2. Frontera de aproximación limitada

Esta frontera hace referencia a la distancia mínima a partir de un punto energizado a la que una persona no calificada puede estar sin la supervisión de una persona calificada. Se entiende a esta frontera como la encargada de proteger a las personas no calificadas o capacitadas de riesgos eléctricos [2].

2.2.3. Frontera de aproximación restringida

Esta frontera en cambio es la distancia más cercana al punto energizado que solo puede ser cruzada por personal calificado utilizando equipo de protección personal y procedimientos seguros establecidos, esta representa un riesgo mayor que la anterior frontera y requiere la evaluación detallada de los riesgos presentes [2].

Las aproximaciones son de vital importancia para precautelar nuestra integridad, la ilustración 2 detalla la diferencia de cada una de estas. Estableciendo visualmente las distancias mínimas entre ellas.

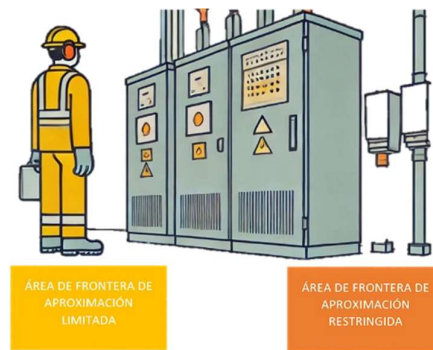


Figura 2. Fronteras de aproximación de choque eléctrico

Estas fronteras están dadas por la Norma NFPA 70E, para entender de mejor manera hay que tener claro que los niveles de corriente pueden ser letales y que estos eventos se producen por una serie de acciones como las que se enlistan a continuación:

Tabla 1. Acciones que desencadenan arcos eléctricos

Acción	Descripción	Referencia
Apertura y cierre de puertas o cubiertas	Maniobra para acceder al interior de equipos energizados mediante la manipulación de protecciones físicas, común en operaciones y mantenimientos.	[11]
Cierre o apertura de interruptores	Operación de interruptores para energizar o desenergizar circuitos o equipos. Debe ejecutarse de forma controlada y con precaución.	[11]
Inserción o retiro de equipos	Conexión o desconexión de dispositivos eléctricos, como interruptores o equipos de protección, desde su posición operativa.	[11]
Instalación de equipo de prueba	Conexión de instrumentos de medición o diagnóstico a sistemas eléctricos para verificar parámetros, detectar fallas o validar condiciones de operación.	[11]
Mantenimiento o mediciones dentro del sistema	Actividades de inspección, reparación, limpieza o medición realizadas sobre componentes eléctricos dentro del sistema.	[11]

2.3. Corto circuito

Un cortocircuito ocurre cuando la corriente eléctrica fluye por un camino no contemplado con poca resistencia o impedancia, esto sucede generalmente cuando existe un contacto directo entre conductores que tienen diferente potencial o entre un conductor energizado y tierra. Este fenómeno eléctrico genera una circulación de corriente mayor a la esperada dentro del sistema lo que termina causando daños graves en equipos, interrupciones operativas no previstas y

riesgos para la seguridad del personal. Las causas más comunes para que se genere un cortocircuito incluyen fallas en el aislamiento de los conductores, conexiones defectuosas a causa de mantenimientos deficientes, impactos externos que causan contacto accidental o sobrecargas las cuales se definen fácilmente como corrientes que superan la capacidad para la cual está diseñado del sistema [11].

El estudio de cortocircuito tiene diferentes enfoques dependiendo la situación a ser estudiada, usualmente se utiliza este estudio para analizar las fuerzas mecánicas generadas en un transformador o un generador. Esto para establecer la resistencia mecánica del transformador y poder prevenir los daños [12]. Mientras tanto en el ámbito industrial se utiliza este estudio de manera simulada donde se pueden establecer múltiples escenarios como fallas trifásicas, bifásicas o monofásicas y todas sus variantes, el objetivo de este mismo es garantizar que las protecciones existentes sean capaces de detectar y aislar fallas de forma rápida y selectiva [13].

Para definir el nivel de cortocircuito se implementa bajo este marco el estudio de cortocircuito el cual es una herramienta fundamental para garantizar la seguridad y confiabilidad del sistema eléctrico. Este análisis permite identificar las corrientes de falla que pueden ocurrir en diferentes escenarios operativos y evaluar cómo estas corrientes interactúan con los dispositivos de protección y equipos del sistema [11]. Es imprescindible considerar factores como el tipo de carga, las curvas tiempo-corriente, los ajustes de los dispositivos de protección y limitaciones o capacidades de los equipos internos ya instalados, para este estudio existe una infinidad de normas que dan procedimientos establecidos para realizar estudios de cortocircuito, dentro de este proyecto se usará como referencia la Norma IEEE std. C37 y para definir qué tipos de fallas van a estudiarse dentro del estudio de cortocircuito usaremos la norma ANSI que sugiere estudiar los escenarios de las siguientes fallas [2].

En los sistemas eléctricos, contamos con eventos que comprometen la seguridad, estabilidad y la operatividad del sistema o de las instalaciones en general. Estos eventos conocidos como fallas se clasifican según su naturaleza, frecuencia de ocurrencia y su nivel de riesgo. En la siguiente tabla se detalla los principales tipos de fallas eléctricas [14].

Tabla 2. Tipos de fallas y su clasificación

Tipo de falla	Nivel de ocurrencia	Gravedad de la corriente	Riesgo
Trifásica (Línea-Línea-Línea)	Poco común	Muy alta	Daños catastróficos en equipos e infraestructura. Pueda causar interrupciones generalizadas y sobrecargas considerables.
Línea-tierra	Muy común	Baja-moderada	Riesgo de incendios y choque eléctrico. Impacto localizado.
Línea-línea	Menos común	Alta	Daños severos a los equipos. Puede generar inestabilidad en el sistema.
Dos en tierra	Moderada	Alta	Daños múltiples en el sistema. Incrementa el riesgo de incendios

Explicación de las fallas según su característica

2.3.1. Falla Trifásica

Una falla trifásica es aquella que ocurre cuando las tres fases dentro de un sistema eléctrico entran en contacto directo entre ellas, ya sea a través de un conductor o de manera simultánea a tierra. Esta es la más severa en términos de corrientes de falla ya que se involucra directamente a las tres fases del sistema. Es un tipo de falla extraña es decir poco común en el medio ya que se requiere de un evento crítico. Como la falla simultanea del aislamiento en múltiples puntos o directamente el colapso estructural total [11].

2.3.2. Falla monofásica a tierra (línea-línea)

Esta falla ocurre cuando el conductor energizado (solo uno de ellos) entra en contacto súbito con una conexión a tierra o un elemento que esté conectado al sistema de puesta a tierra, como alguna estructura metálica o el suelo en sí. Esta falla es considerada la más común dentro de los

sistemas eléctricos, donde la corriente de falla dependerá de la resistencia del sistema de puesta a tierra y de la impedancia de arco, la resistencia de puesta a tierra es fundamental dentro de las instalaciones eléctricas ya que mediante esta las corrientes pueden fluir hacia tierra por su bajo nivel de impedancia está compuesta por dos elementos un electrodo (varilla, malla o placa) y el suelo. Por otro lado, tenemos la impedancia de arco que es un fenómeno que ocurre cuando la corriente fluye a través del aire o algún otro conductor lo que hace que se ionice el entorno, esta impedancia de arco puede ser reactiva o resistiva [15].

2.3.3. Falla bifásica (línea-línea)

Una falla bifásica se define como un cortocircuito que involucra dos fases, esto dentro del punto de la falla, los voltajes de las fases falladas serán iguales, mientras que la corriente en la fase no fallada será cero. Las corrientes de las fases falladas serán iguales en magnitud, pero con dirección opuesta [16].

Esta falla se produce cuando dos de los conductores del sistema trifásico entran en contacto directo entre sí, sin involucrar a la tierra. Este fenómeno genera una corriente de falla más alta que la falla monofásica a tierra ya que la impedancia del sistema es menor generalmente. Esta falla es menos frecuente que la bifásica a tierra, pero puede ocasionar daños severos debido a las corrientes elevadas de esta misma [15].

2.3.4. Falla bifásica a tierra (dos líneas a tierra)

Esta falla involucra dos fases y tierra simultáneamente, sus principales características técnicas son: las tensiones de las fases falladas serán igual a cero, las tensiones de la fase que no entra en falla es diferente de cero, la corriente en la fase no fallada es cero y las corrientes de las fases falladas no son cero [16].

Cuando dos conductores energizados de un sistema trifásico hacen contacto simultáneo y directo con la tierra o un elemento conectado al sistema de puesta a tierra. Genera corrientes elevadas severas más dañinas que la monofásica a tierra, pero menores que una falla trifásica. Esta falla representa mayor riesgo para el sistema ya que involucra múltiples fases [15].

2.4. Elementos eléctricos de protección

Estos elementos son dispositivos especialmente diseñados para proteger y resguardar los sistemas eléctricos y a las personas frente a condiciones de falla o anómalas (sobrecargas, cortocircuitos o fallas). Estos dispositivos basan su principio de funcionamiento en detectar y aislar. Al usar estos dispositivos se aumenta la continuidad operativa y la confiabilidad minimizando las interrupciones y reduciendo costos asociados por mantenimiento correctivo [17].

2.4.1. Fusibles

Estos son dispositivos de protección que actúan cuando la corriente fluye a través de ellos superando el nivel preestablecido, funciona desconectando o conectando el circuito, su manera de accionar se centra en un elemento conductor que se funde cuando la corriente supera el umbral definido de esta manera se interrumpe el flujo eléctrico. Operan de manera rápida y son específicamente efectivos contra corrientes de alta intensidad. Estos dispositivos no pueden ser reutilizados una vez que se activan [17]. Los fusibles son el medio más antiguo de protección de circuitos eléctricos, estos se definen por su intensidad nominal, la cual es la corriente eléctrica máxima de cortocircuito a la que se puede interrumpir [18].

2.4.2. Disyuntores

Son dispositivos de protección que interrumpen el flujo de corriente cuando detectan un escenario anómalo, como un cortocircuito o una sobrecarga. Actúan como un mecanismo electromecánico, actualmente existen unidades electrónicas que facilitan el ajuste y la precisión de operación. En el contexto de estudio de cortocircuito se usan los disyuntores para proteger a las personas y a los equipos, se evalúan sus capacidades interruptivas las cuales deben ser mayores a la corriente de cortocircuito máxima esperada en el punto de falla. Estos pueden ser reactivados tras su operación lo que los vuelve reutilizables [17]. Los disyuntores, conocidos como interruptores automáticos son más modernos que los fusibles. La principal ventaja de estos dispositivos es que no se deben reemplazar como se mencionó antes, estos pueden reiniciarse después de que se solucione su disparo [18].

Los disyuntores más conocidos son los guardamotors, esta combina las funciones de un disyuntor, un relé térmico y fusibles en un solo dispositivo. Este ofrece protección contra sobrecargas y cortocircuitos, lo malo de este dispositivo es la capacidad de ruptura la cual es muy limitada y su vida útil es menor en comparación con los contactores [19].

2.4.3. Relés

Son dispositivos netamente de control que son capaces de detectar condiciones anómalas en el sistema y enviar señales a otros dispositivos para que operen y desconecten el circuito afectado. Estos elementos son analógicos o digitales monitorean parámetros eléctricos como corriente, voltaje y frecuencia cuando los valores exceden los límites el relé envía la señal de disparo al disyuntor y aísla la falla. Son considerados como los dispositivos más sensibles y precisos, son capaces de monitorear múltiples parámetros y coordinar otros dispositivos con la única limitación de sujeción de sistemas auxiliares de energía para operar en el caso de los relés digitales [17]. Para resumir de mejor forma la actuación de los relés son dispositivos que modifican el circuito eléctrico cuando se cumplen ciertas condiciones. Estos se utilizan en control y automatización [18].

Existen diferentes tipos de relés:

- Relés electromagnéticos: estos se utilizan una bobina para crear un campo magnético que acciona el conjunto de contactos [17].
- Relé de núcleo móvil: son similares a los relés electromagnéticos, con la única diferencia en su estructura poseen un embolo enés de una armadura [19].
- Relé tipo reed: estos tienen integrado laminas metálicas selladas en un tubo de vidrio para abrir o cerrar un circuito [17].
- Relé polarizado: estos utilizan imanes permanentes y un electroimán para controlar el conjunto de contactos [19].

En resumen, para entender el papel que ocupa cada uno de estos dispositivos se debe tener en cuenta que son compatibles entre ellos, se deben estudiar en conjunto para garantizar una coordinación adecuada, los fusibles y disyuntores son los que interrumpen las corrientes de fallas calculadas en cada punto del sistema y los relés deben estar configurados para detectar fallas y disparar los dispositivos de protección en el menor tiempo posible sin comprometer la selectividad. Estos dispositivos trabajan en sinergia para asegurar que las fallas sean manejadas de manera rápida, eficiente y segura minimizando daños y tiempos de interrupción no contemplados [17]. Es de vital importancia la selección de dispositivos de protección al momento de diseñar sistemas eléctricos. Estas acciones permiten garantizar la seguridad, la continuidad del suministro y la integridad de los equipos. Cada dispositivo cumple un rol en específico, posee una respuesta característica y su aplicación se divide según las particularidades de la necesidad. La siguiente tabla resume las características principales de los fusibles, disyuntores y relés destacando su función, respuesta, reutilización y aplicación [19].

Tabla 3. Dispositivos de protección

Dispositivo	Rol	Respuesta Típica	Reutilizable	Usos
Fusibles	Protección contra sobre corrientes y cortocircuitos	Rápida	No	Protección de circuitos simples, pequeños y sistemas donde se prioriza la rapidez y el bajo costo
Disyuntores	Interrupción del flujo de corriente	Moderadamente rápida	Si	Protección de tableros, alimentadores y sistemas de distribución complejos
Relés	Monitoreo y señalización de condiciones anómalas	Depende del ajuste del sistema	No aplica	Sistemas de protección avanzada en subestaciones y redes de alta tensión

2.5. Arco eléctrico

Por su parte, el arco eléctrico es la liberación de energía térmica y luminosa, se produce cuando

una corriente fluye a través de un medio normalmente aislante, como el aire, debido a un fallo dentro del sistema eléctrico. Esta descarga genera temperaturas extremadamente altas, superiores a 20k grados Celsius en algunos puntos, lo que resulta en quemaduras graves, explosiones de presión y la ignición de material inflamable. La energía de un arco eléctrico no solo genera calor, sino que también puede lanzar material fundido a grandes distancias, causando daño a personas y equipos próximos [7].

Para comprender a detalle cómo se crea un arco eléctrico se explicará por fases su creación:

1. Fase de ignición: Esta etapa es en la cual ocurre la falla que permite el paso de corriente a través de un medio usualmente no conductor, como el aire. Durante esta fase el arco es relativamente pequeño pero la corriente hace que la energía que se disipa sea mayor gradualmente. Esta etapa es crucial pues es la que define la propagación y severidad de este mismo [20].
2. Fase de compresión: Esta fase se trata del plasma que empieza a expandirse rápidamente gracias a la temperatura, este evento tiene una gran presión. Esto hace que se cree una onda de choque esta etapa es crítica pues puede producir muchos inconvenientes en cuestión a lesiones graves a causa de explosiones [20].
3. Fase de expansión: La fase de expansión es cuando los gases ionizados y los materiales vaporizados continúan expandiéndose ocupando de esta forma todo el espacio del cubículo o celda en donde ocurrió el evento. En esta fase el riesgo de quemaduras graves es muy alto, esta fase es potencialmente peligrosa por el calor que emana, éste fácilmente supera a la capacidad de los EPP estándares [20].
4. Fase de extinción: En esta fase el arco comienza a reducir su intensidad gradualmente, no quiere decir que deje de ser peligroso el arco pues en el entorno siguen presentes gases ionizados y materiales vaporizados lo que significa que

aún son un riesgo potencial para las personas que se encuentren cerca del evento [20].

Se debe entender las fases del arco eléctrico para diseñar sistemas eléctricos de protección, hay que evaluar todos los riesgos antes de la implementación para garantizar la seguridad del entorno. Cada una de las fases son un conjunto de riesgos eléctricos específicos lo cual establece las medidas preventivas y de protección, en este apartado entra en juego la selección adecuada de equipo de protección personal (EPP), establecer las barreras físicas y configurar los dispositivos para interrumpir la corriente de la forma más rápida posible. También es fundamental conocer la forma de prevenir este fenómeno llamado arco eléctrico, por lo cual se recomienda conocer a detalle las fronteras de protección y sus distancias establecidas dentro de la norma NFPA70E, estas son importantes para las personas que trabajan en zonas de riesgo eléctrico [21].

Otro factor estratégico es tener en cuenta el deterioro gradual de los equipos de protección en particular de los equipos electrónicos, la exposición constante a corrientes de falla o a la corriente operativa hace que los elementos se desgasten creando condiciones inadecuadas de operación. Con el tiempo estos se ven afectados pues los aislamientos se ven afectados, debilitados haciéndolos menos efectivos ante fallas. El mantenimiento preventivo, junto con las auditorias periódicas deben formar parte de la mejora continua para evitar peligros innecesario y mejorar la confiabilidad del sistema [2].

3. ANALISIS TÉCNICO

3.1. Coordinación de protecciones

El análisis de coordinación de protecciones en un sistema eléctrico se refiere al diseño y la implementación de ajustes a los diferentes dispositivos de protección en el medio como los relés, disyuntores y fusibles, todas estas acciones se realizan con el fin de garantizar una respuesta ordenada y selectiva frente a las distintas fallas en el sistema eléctrico. Este proceso permite configurar las protecciones para que actúen de manera secuencial, en pocas palabras el dispositivo más cercano debe ser el primero en operar minimizando el área afectada y protegiendo la infraestructura restante [17].

Para conocer y entender de mejor manera como se realiza un análisis de coordinación de protecciones se debe enfatizar los aspectos fundamentales que este conlleva.

3.1.1. Aspectos fundamentales de la coordinación de protecciones

- Selectividad, esta característica es la capacidad de un dispositivo de protección para operar solo cuando se detecte la falla en la zona asignada a esté, evita desconexiones innecesarias en otras partes del sistema. Reduce el impacto de la falla a nivel operacional [17].
- Velocidad, al hablar de fallas esta capacidad se considera de suma importancia, la rapidez de la operación es esencial para limitar danos a los equipos y para mantener la estabilidad. La velocidad debe ser tomada en cuenta con la selectividad para mantener la operación correcta [17].
- Confiabilidad, los dispositivos de protección deben ser capaces de operar cuando se produce la falla y mantenerse inactivos bajo condiciones normales. Se requiere ajustes precisos y pruebas periódicas para garantizar la fiabilidad de estos [17].

- Redundancia, las protecciones secundarias o de respaldo son aquellas que actúan si el sistema principal falla, esto garantiza el despeje efectivo, es el resguardo en caso de que exista un mal funcionamiento por parte de los equipos primarios de protección [17].

3.1.2. Curvas tiempo corriente

Para entender de mejor manera cómo funcionan las protecciones obligatoriamente se debe conocer la manera de funcionamiento de las curvas de tiempo-corriente, estas son graficas que muestran la relación que existe entre el tiempo que un dispositivo de protección tarda en operar y la magnitud de corriente que atraviesa por él. Se utilizan para el diseño, coordinación y operación de sistemas de protección [22].

En las gráficas de tiempo corriente cada eje representa lo siguiente:

- Eje x (corriente): Representa la magnitud de la corriente que atraviesa el dispositivo, generalmente en múltiplos de su corriente nominal.
- Eje Y (tiempo): Muestra el tiempo que el dispositivo tarda en operar, normalmente en segundo o milisegundos.

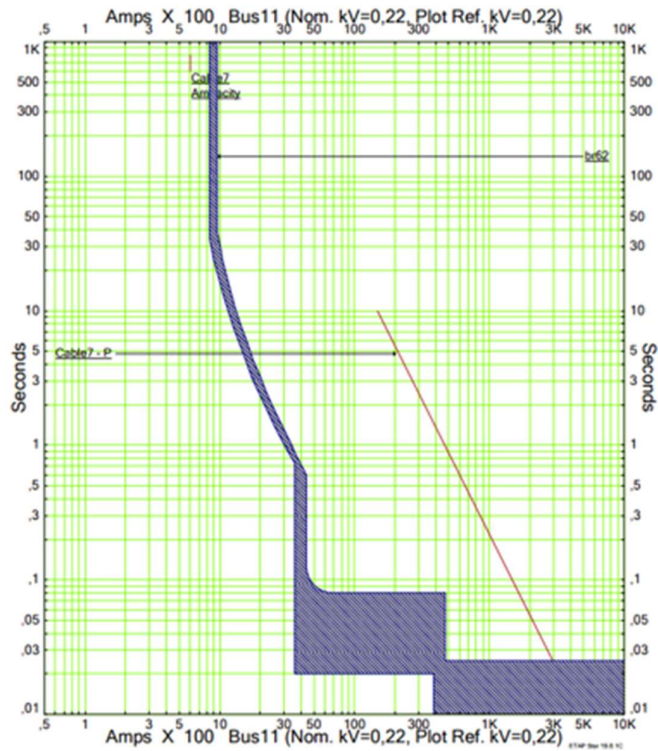


Figura 3. Ejemplo ejes de la curva tiempo corriente breaker 62 Tictac 220V

En la siguiente grafica podemos apreciar la actuación real dentro del estudio de corto circuito, la curva del breaker br62, un breaker que se ubica aguas abajo del transformador 3, esta corresponde a el dispositivo de protección en este caso un breaker fijo.

Esto nos indica que la curva solo cuenta con una curva fija sin zonas ajustables, además su disparo es instantáneo la cual está bien definida en 1500A, la curva presentada opera en la zona de disparos magnéticos fijos.



Figura 4. Imagen real del breaker 62 chocolate 220V

Para entender de mejor manera la forma en la que actúa esta protección es específico se desglosan las siguientes zonas:

3.1.3. Zona de sobrecarga (Izquierda)

En esta zona las corrientes bajas menores a 300A el breaker no va a operar rápidamente, este disparo puede tardar hasta minutos según su pendiente. En esta zona se permiten corrientes de arranque de motores o sobrecargas consideradas tolerables.

3.1.4. Zona de disparo térmico (Parte inclinada)

A medida que la corriente va superando los 300A, el tiempo de operación disminuye de manera progresiva, el disparo por protección térmica ante sobrecargas duraderas se activa.

3.1.5. Zona de disparo instantáneo

Esta zona está definida en 1600A, si la corriente supera un valor cercano a este el breaker dispara en un calor instantáneo menos de 0.1s. Protege ante cortocircuitos severos también conocidos como cortocircuitos francos.

3.1.6. Área sombreada azul

En esta área se representa la capacidad térmica del cable asociado donde lo ideal es mantener la curva del breaker por debajo de esta área, lo cual se cumple en este dispositivo de protección.

3.1.7. Zonas específicas de la gráfica tiempo – corriente

Las curvas están diseñadas en una escala logarítmica lo que le permite abarcar rangos de corriente y tiempo amplios.

3.1.8. Zona de sobrecarga térmica (Izquierda)

Esta parte de la curva representan la respuesta del dispositivo a corrientes superiores a la nominal, pero no lo suficientemente altas como para causar daños inmediatos. El tiempo de operación es más largo, ya que estas sobrecargas suelen ser tolerables por un periodo limitado. Esta zona cuenta con corrientes ligeramente superiores a la nominal, esto se atribuye al arranque de motores, los dispositivos toleran estas corrientes durante un tiempo breve evitando desconexiones innecesarias.

3.1.9. Zona de fallas moderada o de cortocircuito (Centro)

Esta zona se activa cuando las corrientes alcanzan niveles muy altos debidos a fallas graves como cortocircuitos, los tiempos de operación son extremadamente cortos (milisegundos), estos son encargados de proteger a los equipos de daños severos. En esta zona se debe operar con rapidez.

3.1.10. Zona de fallas tumbas o de tiempo de no operación (derecha)

El área de la curva en la cual el dispositivo no debe operar incluso en condiciones de sobrecarga aceptables. Pues en esta zona se presentan corrientes muy elevadas, los dispositivos se ven obligados a operar de manera casi instantánea para desconectar la carga y proteger el sistema. Representa el nivel máximo de corriente y tiempo que los componentes del sistema pueden soportar sin sufrir daños irreparables.

3.1.11. Tipos de dispositivos con curvas tiempo-corriente

1. Interruptores termomagnéticos: este dispositivo en particular cuenta con dos mecanismos de disparo, térmico que se usa para sobrecargas prolongadas y magnético el cual se cataloga como instantáneo este es de tipo magnético. La curva de este interruptor combina ambos comportamientos. Las curvas de tiempo corriente usualmente son especificadas por el fabricante, donde nosotros solo debemos verificar la aplicación específica para elegir la adecuada [19].
2. Fusibles: Estos tienen curvas de tiempo corriente específicas según su tipo puede ser rápido o retardado, muestran su capacidad para interrumpir corriente. Estos dispositivos usualmente son imprecisos ya que presentan una banda de dispersión mayor que la de los demás dispositivos. Se puede generar selectividad entre fusibles es importante contar con la precisión de que el fusible más cercano al fallo sea el primero en fundirse, esto es difícil de lograr con las corrientes elevadas debido a los tiempos de fusión extremadamente cortos [18].

3.1.12. Relés de protección

Los relés de protección cuentan con distintos comportamientos dentro de las curvas de tiempo corriente entre las más conocidas encontramos con la curva inversa, este tipo de curva se caracteriza por tener el tiempo de disparo inversamente proporcional a la magnitud de la sobre corriente. Se usan principalmente para proteger motores con arranque normal [17]. Para entender mejor se podrá decir que a mayor sobre corriente, menor tiempo de disparo.

Otra curva importante dentro de estos dispositivos es la curva extremadamente inversa la cual es similar a la inversa, se diferencian en cuando a la pendiente esta es más pronunciada que la anterior. Se usa para proteger equipos sensibles a sobre cargas [17].

¿Para qué se usan las curvas tiempo-corriente?

1. Coordinación de protecciones: Se usa para garantizar el orden de actuación de

los dispositivos de protección para evitar interrupciones no deseadas. Por ejemplo: un interruptor de aguas abajo debe disparar antes que uno aguas arriba [17].

2. Diseño de sistemas eléctricos: Se propone analizar estas curvas para determinar que dispositivos aseguran la protección adecuada para los cables, transformadores y equipos del sistema [23].
3. Análisis de fallas: Ayudan a predecir el comportamiento de nuestro sistema ante una falla, sobrecarga o cortocircuito [23].

3.2. Análisis de arco eléctrico

Un arco eléctrico es un fenómeno que ocurre cuando la corriente eléctrica fluye a través de un medio no conductor como el aire o gas. Este fenómeno genera temperaturas extremadamente elevadas. Para determinar este fenómeno y tratar de mitigarlo se ha creado el análisis de arco eléctrico el cual es un estudio técnico que evalúa el riesgo asociado con eventos como estos. El objetivo de este análisis es calcular la energía incidente a la que está expuesta una persona durante el evento de arco, determinar las zonas de protección y especificar la clase de EPP necesario para trabajar de manera segura cerca de partes energizadas [24].

La energía incidente es la cantidad de energía térmica a la que un trabajador está expuesto, es la cantidad de energía que el trabajador puede sentir sobre su piel o en su equipo de protección personal esta cantidad se expresa en calorías por centímetro cuadrado (cal/cm^2). Este cálculo es necesario para determinar el nivel de protección del EPP. A partir de este concepto se establecen las fronteras de protección, estas son parte importante dentro del análisis de arco eléctrico, en este apartado encontraremos dos fronteras principales [2]:

1. Frontera de Arc flash: Distancia a partir de la cual la energía incidente disminuye a un nivel seguro o que quiere decir que no causa quemaduras de segundo grado [2].

2. Frontera de choque: Límites que definen las zonas donde si existe riesgo de choque eléctrico [2].

Una vez que se haya calculado la energía incidente y delimitado las fronteras se debe proceder a elegir el equipo de protección personal (EPP), se escoge teniendo en cuenta el nivel de protección. Por último, se identifica áreas críticas donde la energía de arco es alta y se buscan medidas correctivas para mitigar riesgos [24].

Con este análisis se minimizan las lesiones causadas por quemaduras, explosiones y fragmentos proyectados, asegura que las instalaciones cumplan con las regulaciones de seguridad eléctrica propuesto por la NEC y la NFPA 70E. Y se cumple una de las características más importantes de los sistemas eléctricos, se mejora la confiabilidad del sistema eléctrico y se tiene una mejor operatividad ya que el sistema se encontrará preparado para eventos de falla [24].

3.3. Auditoría eléctrica

Dentro de la NORMA NFPA70E podemos encontrar un proceso detallado donde esta una guía paso a paso como llevar a cabo una auditoría eléctrica, esta sección de la norma se enfoca en garantizar la seguridad de los trabajadores y en mantener o mejorar la confiabilidad de las instalaciones eléctricas todo esto cumpliendo con sus estándares establecidos para mitigar los riesgos eléctricos. La auditoría es una actividad que ayuda a evaluar de manera técnica los procedimientos existentes y el uso actual de los EPP, todo esto permite generar un informe detallado donde se puede identificar los riesgos y asegurar un espacio de trabajo seguir.

3.4. NORMA NFPA 70E

El objetivo de esta norma es proporcionar a los trabajadores una guía donde puedan encontrar prácticas seguras cuando se mantenga contacto cercano con sistemas eléctricos. La NFPA70E abarca una gama de actividades para preservar la seguridad eléctrica las cuales van desde la identificación de los riesgos hasta la implementación de medidas preventivas y correctivas. La norma NFPA70E fue creada por National Fire Protection Association (NFPA), su objetivo mejorar y controlar la seguridad dentro del entorno industrial. Fue publicada por primera vez

en 1979 y surgió a partir de la National Electriccal Code (NEC) como una extensión. Aborda riesgos eléctricos estrechamente lindados con la operación y el mantenimiento de equipos energizados [2].

A lo largo de sus actualizaciones, se ha convertido en una referencia indispensable para los ingenieros eléctricos, debido a su enfoque integral en la gestión del riesgo eléctrico en instalaciones energizadas [2]. La norma NFPA70E define tres riesgos eléctricos: descarga eléctrica, destello de arco y explosión de arco. Y otro relacionado llamado ignición por fuego. Donde el evento más común es la descarga eléctrica, es de gran gravedad pues el cuerpo pasa a formar parte del circuito eléctrico [25].

La definición de las responsabilidades del empleador y del trabajador para la mitigación de riesgos es importante, según la NFPA70E, las responsabilidades del empleador como del trabajador son claras con el objetivo principal de mitigar los riesgos eléctricos y garantizar un entorno laboral seguro [2].

Dentro de las responsabilidades se encuentran:

3.4.1. Responsabilidades del empleador

En este apartado encontramos la identificación de peligros, el cual es un procedimiento que permite realizar estudios de arco eléctrico y evaluación de fronteras de protección. También encontramos la implementación de procedimientos la cual obliga a mantener políticas de seguridad eléctrica, incluyendo la desenergización segura y el etiquetado (LOTO), estas actividades vienen ligadas con la capacitación del personal de forma periódica y con la supervisión y auditorias. El empleador debe estar obligado a suministrar los equipos de protección personal y herramientas certificadas para trabajar en sistemas eléctricos [2]. Esta norma exige el etiquetado de puntos de peligro potencial para advertir a todos los trabajadores involucrados, estas etiquetas indicaran el nivel de riesgo y el EPP necesario [26].

3.4.2. Responsabilidades del trabajador

El trabajador por su parte debe dar cumplimiento a todos los procedimientos, políticas y prácticas establecidas por su empleador y por la norma NFPA70E. La colaboración entre trabajadores y empleadores es esencial para mitigar los riesgos y mantener la seguridad de ambos roles. La aplicación de distancias de seguridad y el uso adecuado de Equipos de Protección Personal (EPP). Dentro de la norma se definen distancias específicas a las que los trabajadores deben estar para mantener un límite seguro de trabajo, estas distancias cumplen con proteger al trabajador contra choque eléctrico y Arc flash. Dentro de estas fronteras encontramos la de choque limitado, choque restringido y arco eléctrico [2].

El uso de equipos de protección personal es una de las características más importantes, su uso está directamente ligado con la energía incidente calculada durante un análisis de arco eléctrico. Los componentes de estos EPP son de características ignífugas lo que quiere decir que es resistente al fuego y al arco eléctrico, se clasifica por niveles de energía incidente. Mientras que para la cabeza y el rostro se utilizan cascos con visores y pantallas protectoras contra radiación [2].

3.5. Secuencia para establecer trabajos en sistemas eléctricos

La planificación de trabajos en entornos con sistemas eléctricos energizados y las precauciones necesarias para minimizar los riesgos, tiene como objetivo minimizar los riesgos para los trabajadores y garantizar la implementación de procedimientos seguros manteniendo controles periódicos para mantener la seguridad. Para tener una secuencia detallada de lo que implica seguir una planificación eficiente y responsable ante trabajos en sistemas eléctricos se debe tener en cuenta los siguientes pasos:

1. Evaluación del trabajo, se debe determinar todos los peligros específicos asociados al trabajo (arco eléctrico, choque eléctrico, corrientes de falla) [2].
2. Procedimiento de seguridad, Se debe aplicar todos los procedimientos de bloqueo y etiquetado para garantizar que la energía no fluya por el área a

trabajar, si no hay la posibilidad de desenergizar el área se debe delimitar zonas de protección y usar barreras aislantes [2].

3. Uso de EPP aprobado: Uso de ropa ignífuga, guantes dieléctricos y protección facial [2].
4. Supervisión y permisos de trabajo: Hay que documentar toda la justificación técnica para realizar trabajos energizados y obtener la aprobación de supervisores calificados [2].

3.6. Etiquetas establecidas por la norma NFPA70E

Dentro de la norma aparecen apartados que se relacionan directamente con el etiquetado de tableros eléctricos. Esta misma nos muestra la información condensada de todo el estudio realizado.

Tabla 4. Información de etiqueta según NFPA70E

Apartado de la NFPA 70E	Sección Específica (NFPA 70E)	Información en la Etiqueta	Notas y Justificación
Evaluación de Riesgo de Choque Eléctrico	Artículo 130.4 (Límites de Aproximación Segura)		
Límite de Acercamiento Restringido	130.4(A) y Tablas 130.4(D)(a) y (b)	0.30 m.	Distancia a la cual se requiere EPP y capacitación adicional para personas no calificadas. Derivado

			de la tensión de operación.
Borde de Acercamiento Limitado	130.4(A) y Tablas 130.4(D)(a) y (b)	1.00 m.	Distancia desde la cual una persona no calificada no debe cruzar sin asistencia de una persona calificada. Derivado de la tensión de operación.
Peligro de CHOQUE	130.5(C)	Cuando las partes están desnudas y energizadas.	Indica la condición de riesgo de choque eléctrico. Especifica el tipo y la clasificación de los guantes aislantes requeridos para protección contra choque, según la tensión del equipo.
Guantes de PP V- Rating	130.7(C)(15) y Tabla 130.7(C)(15)	500 VAC Clase 00	Tensión de operación del equipo, fundamental para determinar los límites de aproximación y el EPP.
Tensión Nominal del Sistema	Artículo 130.5(C)	380 VAC	
Evaluación de Riesgo de Arco Eléctrico	Artículo 130.5 (Evaluación del Riesgo de Arco Eléctrico)		

Categoría de Peligro por Arco	130.7(C)(15)(a) o (b)	1	Clasificación del riesgo de arco, utilizada para seleccionar el EPP adecuado.
Energía Incidente	130.5(G)	3.05 cal/cm ²	Valor crítico para la selección del EPP resistente al arco; representa la energía térmica que podría alcanzar al trabajador.
Límite de Protección Contra Arco	130.5(H)	0.72 m.	Distancia desde el equipo donde una persona podría recibir una quemadura de segundo grado por un arco eléctrico.
Vestimenta resistente al arco	130.7(C)(1) y Tabla 130.7(C)(15)(b)	Valor mínimo de resistencia al arco requerido de 4 cal/cm ² .	Indica la clasificación mínima de protección contra arco requerida para la ropa (ATPV o EBT). Debe ser igual o superior a la energía incidente.
Requisitos Generales de Seguridad	Artículo 110 (Requisitos Generales para la Seguridad Eléctrica en el Lugar de Trabajo)		

Personal Calificado	110.2(A)(1)	Solo personal calificado, usando los EPP para CHOQUE y ARCO ELÉCTRICO adecuados, así como las herramientas y procedimientos autorizados pueden intervenir en este equipo.	Destaca la importancia de que el personal esté capacitado y use el EPP correcto para trabajar en equipos energizados.
Datos del Equipo/Sistema	No directamente de un apartado específico, pero información de la evaluación		
Barra No.	Información de diseño del tablero	b-6b	Identificación específica del busbar dentro del tablero.
Tablero	Información de diseño del tablero	T-7B	Identificación del tablero eléctrico.
MAX ICC	Información de diseño eléctrico	22.94 (KA)	Corriente de cortocircuito máxima, dato relevante para la evaluación de arco eléctrico y la selección de dispositivos de protección.

Trafo	Información de diseño eléctrico	2	Identificación del transformador asociado a este tablero.
-------	---------------------------------	---	---

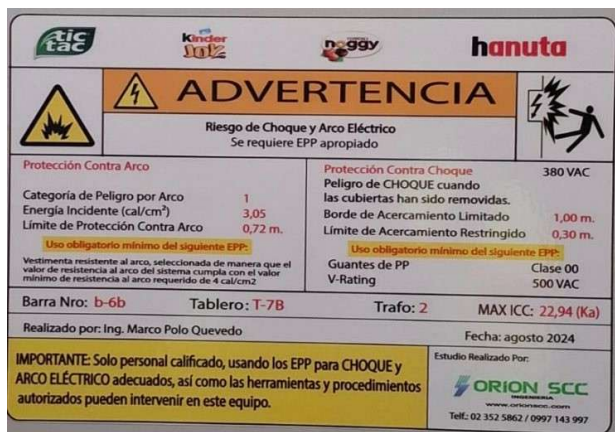


Figura 5. Etiqueta real

3.7. Fundamentos de la Calidad de Energía

La calidad de energía es fundamental dentro de la ingeniería eléctrica, su objetivo principal se centra en garantizar que la energía suministrada o usada sea adecuada para los equipos y los sistemas eléctricos. Es la capacidad de mantener un suministro continuo y estable logrando el funcionamiento óptimo de los equipos. El principal objetivo de la calidad de energía es el minimizar las perturbaciones que se pueden presentar y maximizar la eficiencia en general[6].

Para entender el contexto de los fenómenos presentes al realizar un análisis de calidad debemos tener en cuenta los siguientes conceptos:

3.7.1. Sobretensiones transitorias

Estos eventos son aumentos rápidos y de alta intensidad en el voltaje dentro de un sistema eléctrico. Estas perturbaciones son breves, generalmente aparecen en el rango de los microsegundos o milisegundos y pueden alcanzar valores extremadamente altos de voltaje en

comparación con el voltaje nominal. La onda de esta perturbación eléctrica puede ser de un solo pico o de varios incluyendo varios ciclos haciéndola oscilatoria [6].

Dentro de este apartado podemos encontrar varios tipos de sobretensiones dependiendo su origen

3.7.2. Sobretensiones de origen externo

Usualmente dentro del medio la causa de sobretensiones transitorias más común son las descargas atmosféricas, estas son extremadamente altas y peligrosas si ingresan dentro de la instalación eléctrica debido a los cambios súbitos de carga. Otra causa externa sería los cambios o fallos dentro de la red de suministro o incluso las descargas cercanas que inducen campo electromagnético. Todos estos escenarios son dañinos para los sistemas eléctricos [27].

3.7.3. Sobretensiones de origen interno

Al hablar de sobretensiones de origen interno podemos encontrar la conmutación de equipos, fallas relacionadas con las cargas inductivas como energización de motores, transformadores, etc. Y una de las más importantes las cargas no lineales como los variadores de velocidad o los sistemas electrónicos pueden darnos sobretensiones transitorias peligrosas estas pueden causar daños permanentes en circuitos sensibles, deterioro de conductores e incluso interrupciones operativas [27].

Estos eventos son extremadamente dañinos para los equipos de protección, los interruptores o relés se ven seriamente afectados ya que estos fenómenos afectan su capacidad de operar correctamente en caso de arco eléctrico o cortocircuito

3.7.4. Armónicos

Son perturbaciones que aparecen a partir de la frecuencia fundamental dentro de un sistema eléctrico, generalmente 60 Hz. Son una distorsión de la forma de onda, esto genera problemas directos que afectan directamente a la calidad de energía. Uno de los armónicos más vistos al

hablar de protecciones eléctricas el segundo armónico que sería de aproximadamente 120Hz, proveniente de las energizaciones de transformadores. Los demás armónicos en general provienen de cargas no lineales que consumen una gran cantidad de corriente, deformando de esta manera la onda del voltaje y corriente[5]. Se puede evaluar los armónicos los cuales podrían provocar disparos innecesarios o equivocados de las protecciones, esto hace que aumente el riesgo de fallas en el sistema y potencialmente crea un ambiente hostil para los trabajadores los cuales estarían bajo condiciones peligrosas [28].

Para entender de mejor forma esta distorsión se puede realizar análisis y mediciones con analizadores de redes en los cuales podremos encontrar la medida principal llamada distorsión armónica total (THD), este es un parámetro clave que mide a proporción de armónicos respecto a la frecuencia fundamental [5].

3.7.5. Flicker o caídas de tensión

El flicker por su parte se refleja en variaciones rápidas y consiguientes de voltaje dentro del sistema las cuales se perciben mediante fluctuaciones en la intensidad de las luminarias o en el rendimiento de los equipos, este fenómeno afecta de manera visual a los usuarios al hablar de iluminación. Existen dos tipos de fluctuaciones de baja magnitud y alta frecuencia en la tensión del sistema, estos valores no superan el $\pm 10\%$ de la tensión nominal. Algunas de las causas más comunes de este fenómeno son los hornos de arco, máquina de soldadura o arranque de motores de gran tamaño [29].

Los parámetros que permiten analizar esta perturbación son:

- Percepción de corto plazo (PST): Este parámetro indica la severidad del flicker en un rango de 10 minutos[29].
- Percepción de largo plazo (PLT): Este en cambio es el promedio de los valores PST en un rango de 2 horas aproximadamente [29].

Las fluctuaciones como estas pueden afectar a la operación de los elementos de protección sensibles, aumentan los tiempos de respuesta ante fallas.

3.7.6. Sags o caídas de tensión

Los sags se definen como caídas de tensión de manera momentánea por debajo de su valor nominal que va entre 10% o 90% del valor. Estos fenómenos tardan milisegundos o incluso segundos las causas más comunes para percibir estas caídas de voltaje lo son arranques de motores grandes, maniobras en caliente o cortocircuitos [4].

Los efectos de tener sags en nuestra planta se ve reflejado en el paro de equipos de manera súbita o pérdida de datos de manera intempestiva, este fenómeno comúnmente se confunde con la manera de actuar del flicker pues también existe el común parpadeo de luces [4].

3.7.7. Norma EN 50160

Esta norma es un índice para definir los parámetros normalizados de calidad de energía, entre estos entran el voltaje de suministro, la frecuencia, amplitud y forma de onda y la simetría existente entre las fases de la planta. La norma EN 50160 especifica límites aceptables como lo son:

Tabla 5. Parámetros establecidos por la Norma EN50160

Parámetros	Limite
Voltaje	±10% del valor nominal
Frecuencia	±5% del valor nominal
Flicker	PST ≤1 PLT ≤1
Armónicos	BT menor a 1Kv 8% THD MT mayor a 1Kv 5% THD
Sags	10-100 al año
Desbalance en tensión	2% en BT

3.7.8. Analizadores de calidad

Estos equipos eléctricos son herramientas que ayudan a evaluar la calidad de energía en general, algunos miden aspectos puntuales en sistemas eléctricos dependiendo su configuración. Usualmente funcionan para medir, monitorizar o analizar parámetros que estén interfiriendo con la continuidad del servicio eléctrico todo esto con el objetivo de mantener un estándar de calidad establecido [4].

En el campo de la electricidad se miden principalmente parámetros como voltajes, corrientes, potencia activa, reactiva y aparente y todos sus fenómenos como los explicados anteriormente. Estos instrumentos especializados son capaces de registrar y medir parámetros eléctricos en tiempo real durante un periodo de tiempo representativo. Estos equipos se instalan en tableros principales o en cargas consideradas críticas las cuales requieran atención especial. A continuación, tipos de analizadores de calidad[4]:

Tabla 6. Tipos de analizadores

Tipo	Uso principal	Ejemplos
Portátiles	Estudios puntuales y diagnósticos	Fluke 435 II, Qualistar, Hioki, Circutor
Fijos o de monitoreo	Supervisión permanente	PowerLogic ION9000, Janitza UMG
De laboratorio o banco	Ensayos de alta precisión	Yokogawa WT3000E, Hioki PW8001

3.7.9. Analizador de red portátil MYeBOX 1500

Este analizador forma parte de una gama de analizadores portátiles configurables de la marca CIRCUTOR, estos realizan el análisis y registro de parámetros eléctricos. Este incorpora formas de onda y estándares de calidad según la norma EN50160 se puede utilizar de forma remota mediante una APP o una aplicación de escritorio (PowerVision). Este mismo permite visualizar los datos de manera gráfica o en tablas.



Figura 6. Analizador de redes MyeBOX 1500

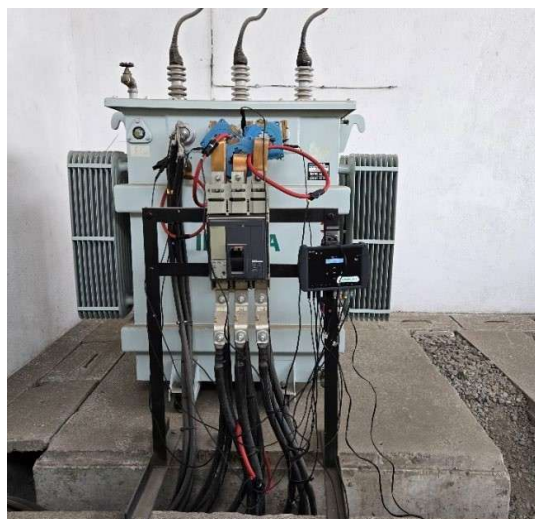


Figura 7. MyeBOX 1500 Conectado en TR1

Tabla 7. Características del Myebox 1500

Categoría	Especificación
Entradas de medida de tensión	4 (U1, U2, U3, Un)
Entradas de medida de corriente	4 (I1, I2, I3, In)
Parámetros eléctricos medidos	Principales magnitudes eléctricas
Medida de energía	Energía consumida y generada
Valor eficaz	Medida en verdadero valor eficaz (TRMS)
Medida en 4 cuadrantes (4Q)	Consumo y generación
Registro de eventos de calidad	Según norma EN 61000-4-30
Registro de transitorios	Sí
Registro de forma de onda asociada	Para eventos de calidad y transitorios
Norma de medición	EN 61000-4-30
Alimentación del equipo	Independiente a la medida
Registro de forma de onda	Cada periodo de registro
Pantalla	LCD

Teclado	Capacitivo
Conectividad para descarga	Puerto microUSB
Detección de pinzas	Automática
Identificación de fases	Con colores
Compatibilidad con pinzas	Sí
EEPROM	
Registro de eventos del sistema	EVA (Eventos de sistema)
Sincronización horaria	NTP (Network Time Protocol)
Alarmas	Envío de alarmas por e-mail
Comunicación	Wi-Fi (modo punto de acceso y terminal)

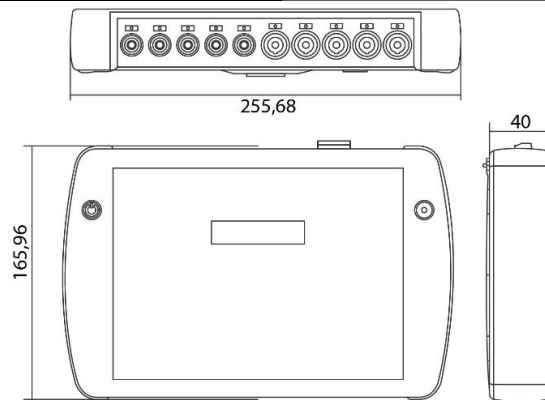


Figura 8. Dimensión real del equipo de medición

3.8. Relación entre Calidad de Energía y Seguridad Eléctrica

Los desbalances, fluctuaciones y perturbaciones de tensión o intensidad pueden causar rendimiento inestable, aumentar el riesgo de fallas y poner en riesgo la integridad de los trabajadores. Por lo cual hay que tener en cuenta que un estudio de calidad permitirá determinar el estado actual de la Planta y poder dar una solución practica y real ante las fallas eléctricas las cuales son inesperadas.

Las sobretensiones transitorias son una de las responsables de dañar equipos críticos como los dispositivos de protección, la NFPA70E establece que el sistema eléctrico debe estar protegido

para garantizar la seguridad. Si alguna de las protecciones del sistema falla eso aumentaría el riesgo de exposición al arco eléctrico [2].

Mientras tanto los armónicos generan sobrecalentamiento en dispositivos eléctricos como transformadores, daño en los conductores e incluso en motores. Este sobrecalentamiento compromete la integridad del aislamiento de manera crítica lo que aumenta la probabilidad de fallos eléctricos (cortocircuitos), a la larga puede terminar en incendios y creando condiciones peligrosas por lo que hay que evitar que los dispositivos de protección excedan sus límites nominales establecidos en cuanto a temperatura [6].

Por último las fluctuaciones rápidas de voltaje provocan interrupciones en equipos sensibles de control o monitoreo lo que pueden dar falsos positivos en cuanto a alarmas o disparos, dificulta la capacidad de diagnosticar situaciones reales de emergencia [29].

La calidad de energía comparte el mismo criterio que la norma NFPA70E en relación con la importancia de buscar la eficiencia y confiabilidad de un sistema eléctrico. El estudio de calidad identifica problemas como armónicos, sobretensiones o caídas de tensión lo que puede deteriorar a los dispositivos de protección establecidos, destacando áreas críticas. Por otra parte, se unen los conceptos al hablar de coordinación de protecciones el estudio de calidad asegura que los interruptores, fusibles o relés actúen de manera adecuada ante fallos eléctricos, esto hará que la energía liberada por el arco eléctrico sea mínima [5]. En resumen, los beneficios de integrar estudios de calidad de energía en conjunto con seguridad eléctrica en base a la norma NFPA70E ayudara a mitigar fallos que a la larga pueden resultar en situaciones extremadamente peligrosas, mejorar la estabilidad operativa al reducir eventos no deseados, asegurar que se cumplan con estándares internacionales como NFPA70E y IEE 519 y garantizar la protección del personal al evaluar todas las posibilidades de que ocurra una falla [6].

4. MARCO METODOLÓGICO

4.1. Inspección técnica

Dentro de una auditoria eléctrica hay que incorporar una inspección técnica para recopilar todos los datos existentes, este estudio en general es un pilar fundamental de seguridad para las instalaciones industriales, específicamente para aquellas que presentan un consumo eléctrico elevado y la presencia de equipos delicados. Por lo cual en base a este contexto vamos a analizar cada apartado descrito con anterioridad se va a evaluar la situación actual de la planta lo cual permite identificar áreas vulnerables del sistema eléctrico, prevenir accidentes graves y mejorar la confiabilidad.

Durante el desarrollo de la inspección técnica en las instalaciones de la planta Ferrero Tumbaco, se realizó un recorrido de las diferentes áreas de esta misma, este trabajo se lo realizo en conjunto con un trabajador del área de mantenimiento eléctrico, quien ya lleva 15 años en la planta. Al realizar este recorrido, el personal explico la ubicación, función y estado operativo de cada tablero eléctrico existente. Simultáneamente, se procedió a nombrar, etiquetar e identificar cada tablero, con el objetivo de generar un plano actualizado y un diagrama unifilar con una nomenclatura clara y normalizada, esto permite al personal tanto de mantenimiento como contratistas la ubicación rápida y precisa de cada tablero dentro de la instalación.

Paralelamente, se realizó un levantamiento fotográfico de cada breaker contenido en cada tablero de la instalación, se registró su estado físico como la configuración actual en cuanto a la calibración. Esta información fue organizada en un compendio técnico en Excel, este mismo se encuentra en Anexos, la información recaudada nos ayudó a crear una base de datos para poder incorporar los parámetros reales de ajuste de los dispositivos de protección en la simulación en el software ETAP 19.01. De esta manera se garantiza que los estudios de cortocircuito, coordinación de protecciones y el cálculo de energía incidente del arco eléctrico se ejecute de manera precisa.

y Tictac. Esta planta se dedica principalmente a la confitería y chocolates de alta calidad tanto de manera nacional como internacional. Esta planta es un referente en la región por impulsar estándares de calidad en sus procesos productivos.

4.3. Características técnicas de la planta

Tabla 8. Características técnicas de la planta

Transformador	Potencia (KVA)	Voltaje (KV)	Impedancia (%)	Ubicación
TR1	500	22,8/0,22	4,26	Área de chocolate
TR2	800	22,8/0,38	4,2	Área de chocolate y tictac
TR3	1200	22,8/0,22	8,14	Área de tictac

En cuanto, al consumo de la planta, aunque no se especifica directamente en los planos podemos dar una equivalencia según la potencia instalada de los tres transformadores dándonos un promedio de 2500KVA en total, lo que da la pauta para considerar que la planta tiene un consumo elevado, adecuado para la operación industrial compleja y automatizada que esta planta posee. Este sistema cuenta con el respaldo de dos generadores de gran capacidad (750KVA y 900KVA) respectivamente los cuales aseguran la continuidad operativa y la continuidad en el suministro eléctrico.

4.4. Ubicación

La planta industrial de Ferrero S.A. está ubicada en la calle Francisco García y el Pasaje Josefa Lozano en el valle de Tumbaco al norte de la ciudad de Quito, esta es una planta industrial, como se muestra en la imagen satelital, Ferrero S.A.



Figura 11. Ubicación satelital de la Planta Ferrero Tumbaco

Fuente: Google (S.f.) [Ferrero del Ecuador S.A.]. Recuperado el 23 de octubre del 2024 de: <https://www.google.com.ec/maps/place/Ferrero+del+Ecuador+S.A>

4.5. Lista de transformadores y tableros

4.5.1. Transformador TR-1

La tabla 1 que se muestra en el anexo 1, expresa de manera detallada los tableros eléctricos conectados al transformador 1, este opera a 220Vac con una potencia nominal de 500 KVA. Incluye especificaciones técnicas del transformador, como su tipo, tensión primaria y secundaria, impedancia, etc.

4.5.2. Transformador TR-2

La tabla 2 que se muestra en el anexo 2 presenta los tableros eléctricos conectados al transformador 2, este opera 380Vca con una potencia nominal de 800Kva. Es un transformador trifásico, la tabla muestra la combinación de elementos funcionales para las diferentes áreas dentro de la instalación.

4.5.3. Transformador TR-3

La tabla 3 que se muestra en el anexo 3 muestra un resumen detallado de los tableros eléctricos conectados al transformador 3 que opera a 220Vca con una potencia nominal de 1200kVA. Este es un transformador trifásico, asociado a un generador trifásico de 900 kVA. Incluye tableros de distribución principal, transferencia automática y transferencia general.

4.6. Guía sistemática

En este capítulo, se aborda el proceso sistemático para llevar a cabo todos los estudios planteados dentro del proyecto, se presentan instrucciones las cuales indican de manera detallada como realizar un análisis de cortocircuito, coordinación de protecciones, estudio de Arc flash, y el análisis de calidad de energía, la auditoría eléctrica en general. Dentro de esta sección se encontrará en forma de lista la manera correcta y secuencial de implementar los estudios descritos.

4.6.1. Recolección de la información

Obtener los diagramas unifilares pertinentes o actualizar si es necesario, documentar la característica técnica de los equipos, transformadores, interruptores, cables y ajustes de dispositivos de protección por último se debe identificar configuraciones típicas y extremas del sistema como la carga máxima y la generación mínima.

4.6.2. Análisis de cortocircuito

Cálculo de corrientes de falla: se debe determinar las corrientes de cortocircuito en los nodos más importantes del sistema utilizando como referencia estándares como la IEE std 37. Luego se evalúa la capacidad interruptiva: Se verifica que los dispositivos de protección soporten las corrientes mencionadas. Dentro de este apartado se recomienda usar softwares de modelación como ETAP o Power Factory para simular los escenarios necesarios.

4.6.3. Coordinación de protecciones

Análisis de curvas tiempo-corriente: Se ajustan las curvas para garantizar la selectividad y operación ordenada de los dispositivos, es decir que se abra el primer dispositivo más cercano a la falla. Se verifica la selectividad, así se logra evitar desconexiones innecesarias evitando que las curvas se superpongan. Dentro de la simulación se realizan pruebas con los ajustes reales de los dispositivos de protección para ver su comportamiento real para brindar una protección certera a los transformadores de la planta.

4.6.4. Estudio de Arco eléctrico

Cálculo de energía incidente: Se utilizan los estándares propuestos en la norma NFPA70E como el IEEE std 1584 para determinar la incidencia de energía en los puntos críticos del sistema. Se debe establecer la frontera de arco eléctrico las distancias consideradas seguras y se debe seleccionar el EPP específico según la energía incidente. Por último, se debe etiquetar los equipos.

4.6.5. Estudio de Calidad de Energía

Este estudio evalúa las condiciones reales existentes en la planta, lo usamos para verificar si la energía suministrada cumple con los parámetros establecidos por la norma EN 50160, todo esto para detectar anomalías existentes y cumplir con las normativas especificadas.

4.6.6. Auditoria Eléctrica

Se debe verificar el estado actual de los equipos, sistema de puesta a tierra y la limpieza en general, después se evalúa el cumplimiento de prácticas seguras como el etiquetado y el bloqueo (LOTO), hay que garantizar que el personal reciba la información pertinente de riesgos eléctricos, procedimientos y uso de EPP.

4.6.7. Evaluación de riesgos eléctricos

En base a las directrices de la NFPA70E se debe realizar una matriz de evaluación de riesgos

eléctricos para determinar los peligros potenciales actuales, todo esto con el fin de establecer medidas preventivas adecuadas.

En el artículo 110 – 130 de la edición 2024 se encuentra la evaluación de riesgos eléctricos en la cual se plantea la identificación de los peligros eléctricos asociados a cada tarea, la gravedad de las posibles lesiones o daños, la probabilidad de ocurrencia y protecciones necesarias para mitigar el riesgo identificado.

Tabla 9. Matriz de evaluación de riesgos eléctricos

N	Actividad	Peligro Identificado	Consecuencia	Probabilidad de ocurrencia	Nivel de Riesgo	Medidas Actuales	Recomendaciones
1	Medición de calidad de energía en tableros energizados	Arco eléctrico	Quemaduras graves, daño ocular, muerte	Alta		Uso de EPP categoría 4, procedimientos de bloqueo	Confirmar etiquetas de riesgo, delimitar área de trabajo, uso de traje categoría 4
2	Maniobra de breaker en tableros TR1, TR2, TR3	Descarga eléctrica	Choque eléctrico, lesiones graves	Media	Alto	Uso de EPP categoría 2	Verificar torquedo previo, realizar pruebas de aislamiento, señalización de áreas
3	Medición de tensión y corriente en tableros sin desenergizar	Contacto eléctrico directo	Paro cardíaco, quemaduras	Alta		Uso de guantes dieléctricos y herramientas aisladas	Revisión de aislamiento de barras, supervisión de maniobras

	Calibración de protecciones sin verificar valores de ajuste	Mal disparo de protección	Daño a equipos, arco eléctrico, incendio	Media	Alto	Revisión previa de hojas de calibración	Implementar checklist de parámetros, doble verificación
4	Análisis de calidad de energía en presencia de perturbaciones (sobretensiones, armónicos)	Fallo de equipo de medición	Daño de equipo, riesgo de incendio	Baja	Moderado	Uso de analizadores calibrados y certificados	Asegurar puesta a tierra adecuada, verificación previa de condiciones de red
5	Trabajos de mantenimiento en subestación	Arco eléctrico / Descarga	Quemaduras graves, muerte	Media		Uso de EPP categoría 4, supervisión directa	Control de acceso, revisión de mantenimiento preventivo de equipos
6	Trabajos en proximidad a cables de alta tensión	Exposición a partes energizadas	Descarga eléctrica, caída por sobresalto	Alta		Uso de EPP, señalización de zonas de riesgo	Establecer perímetros de seguridad, autorización de trabajos
7							

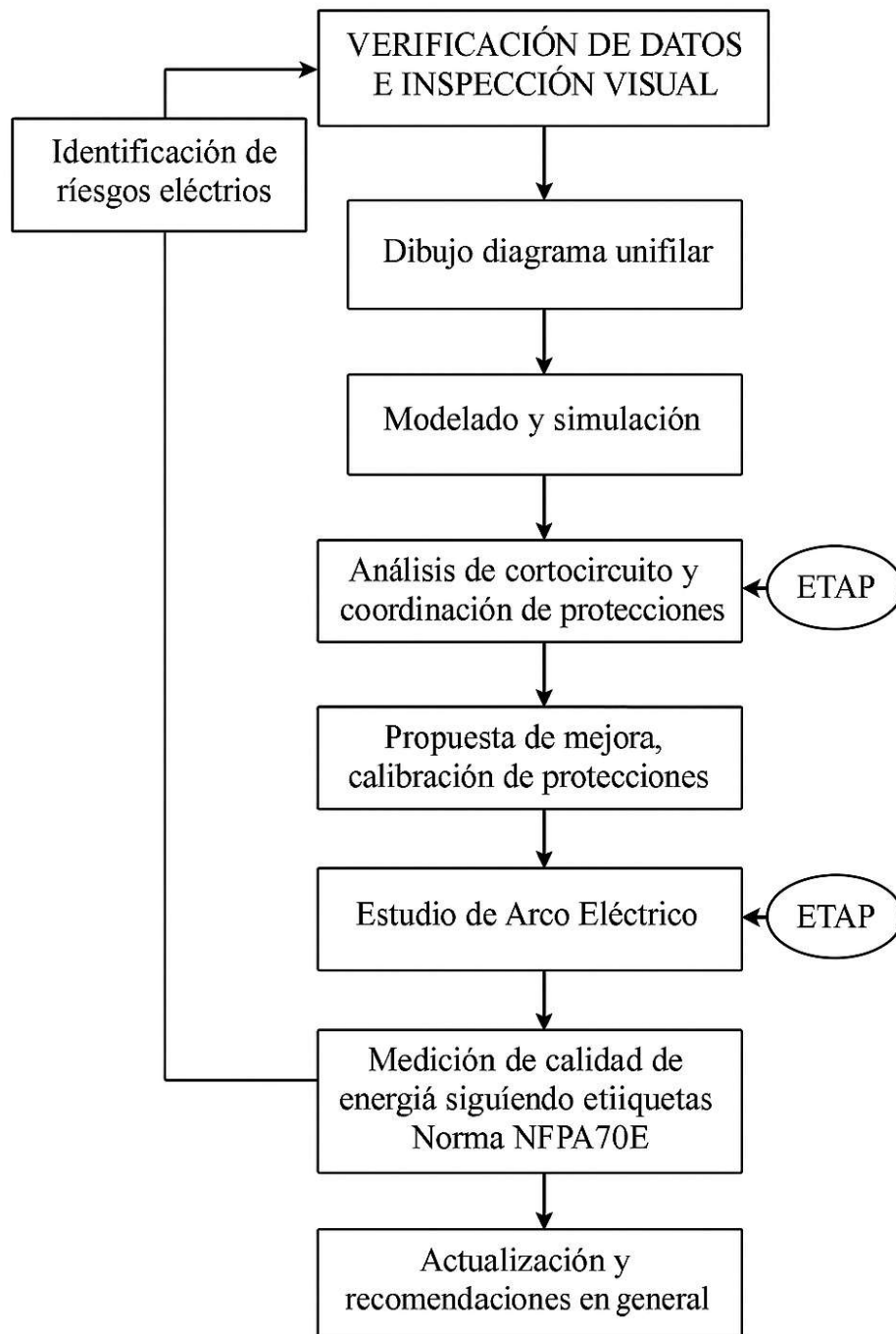


Figura 12. Diagrama de flujo de la auditoría

5. ANÁLISIS Y ESTUDIOS

El trabajo se centra en la elaboración del diagrama unifilar, se procedió con el levantamiento de información necesaria donde se definió nombres numéricos de fácil comprensión a todos los tableros existentes en la planta de Ferrero de tal forma que se los pueda identificar de manera sencilla a cada elemento de la planta. En anexos a partir de la tabla 4 hasta la tabla 6, se muestra una lista donde se recopiló la información de los tableros clasificándolos por equipo, descripción y nomenclatura.

Se realizó un esquema en AUTOCAD donde se puede encontrar la conexión entre tableros partiendo desde los transformadores principales tr-1 (500kva – 220vac), tr-2 (800kva-380 kV) y tr- 3 (1200kva), partiendo de estas nomenclaturas dadas se elabora el diagrama unifilar actualizado el cual se podrá encontrar en anexos, al tener la información ordenada y meticulosamente analizada se comenzó a modelar el mismo diagrama unifilar en ETAP.

Se usará ETAP, el cual es un software que permite analizar y estudiar diferentes fenómenos eléctricos, en nuestro proyecto actual vamos a concentrar en el módulo de cortocircuito, coordinación de protecciones y Arc flash.

El módulo de cortocircuito es el encargado de analizar efectos y cuantificar corrientes teniendo en cuenta diferentes tipos de fallas, este mismo ayuda a calcular el aporte al sistema en un punto de falla específico y también ayudara conociendo la contribución de los motores durante la falla. Este análisis se hará usando como referencia las normas ANSI/IEEE.

Mientras tanto en el módulo de coordinación de protecciones permite realizar análisis de coordinación y selectividad de dispositivos tales como interruptores termomagnéticos, interruptores de potencia, fusibles, etc.

Por último, en el módulo de Arc flash el cual permite estimar la energía incidente medida en cal/cm^2 que es liberada durante el proceso de arco en fallas, en base a este resultado se determina los límites de protección requeridos y el equipo de protección personal correspondiente.

Una vez que contemos con el estudio de arco eléctrico se puede intervenir en los tableros principales de manera segura con el equipo de protección personal necesario en estos tableros se van a conectar los analizadores de calidad para extraer información de los valores nominales a los que se maneja la planta industrial de Ferrero.

5.1. Criterios de diseño y operación

5.1.1. Criterios generales para análisis técnicos

Los conductores de baja tensión se asumen de tipo THNN al menos que, los datos obtenidos en el levantamiento de campo indiquen lo contrario. La modelación de los parámetros de los transformadores, interruptores y demás componentes del sistema eléctrico se tomaron desde las librerías correspondientes en la base de datos de ETAP comparándose con los datos obtenidos previamente en el levantamiento de campo a fin de considerar que dichos parámetros sean iguales entre sí o que se ajusten lo mayor posible a la realidad de la planta.

5.1.2. Estudio de Cortocircuito

En el estudio de cortocircuito, la tensión pre-falla se considera en 100% la tensión nominal es decir 1 p.u. Las potencias de cortocircuito de la red eléctrica en el punto de conexión de la planta de Ferrero son de 122,26 MVA para falla trifásica y de 34,398 MVA para falla monofásica. Esto según los datos suministrados por la Empresa Eléctrica Quito (EEQ). Se realiza el estudio de cortocircuito a 1,5 – 4 ciclos de duración pues es en este tiempo donde los dispositivos de protección actúan despejando la falla con un valor de corriente máximo.

5.2. Coordinación de protecciones

5.2.1. Protección a transformadores

Se considera un valor de corriente de magnetización (Inrush) del transformador de 3-6 veces la corriente nominal con una duración de 6 ciclos. Dicha corriente de magnetización debe ubicarse por debajo de la curva del dispositivo de protección asociado cuando este se ubica en media tensión.

La protección primaria del transformador debe permitir selectividad con respecto a la protección secundaria del mismo. Es decir, la curva de protección del dispositivo asociado en el lado del secundario del transformador debe estar por debajo de la curva de protección del dispositivo asociado en el primario.

El ajuste del dispositivo de protección del secundario no deberá exceder el 125% de la corriente nominal del transformador (NFPA70, Sección 450-3) [2]. La curva de daño del transformador deberá encontrarse por encima de las curvas del dispositivo de protección primario y secundario. De la misma forma, la curva de daño de cables asociados al transformador deberá encontrarse por encima de la curva de los dispositivos de protección.

5.2.2. Estudio de Arco eléctrico

La unidad utilizada para el cálculo de energía incidente es cal/cm². El valor mínimo de frontera de arco eléctrico es de 2 cal/cm². El tiempo de exposición al arco eléctrico (tiempo de apertura de las protecciones) es de por lo menos ½ ciclo.

Se determina los EPP necesarios según el valor de energía incidente obtenido del cálculo de Arc- Flash. Ver tabla 130.7 NFPA70EA pesar de que existen EPP para proteger a los trabajadores de energía mayor a 40cal/cm², por consenso no se deben llevar a cabo trabajos eléctricos o intervenir en equipos energizados que superen dichos niveles de energía incidente.

Las etiquetas con la información del estudio de Arc flash a ser colocadas en cada uno de los CDP o paneles eléctricos, serán de dimensiones 4" x 6", impresas en papel autoadherente laminado en caliente con material plástico.

5.3. Procedimiento técnico para el cálculo de energía incidente

La energía incidente es un parámetro considerado como fundamental dentro del estudio de arco eléctrico, es esencial para determinar las distancias seguras de trabajo y el EPP a usar en cada tablero, de esta manera se garantiza la seguridad eléctrica en instalaciones industriales y comerciales. En la planta de Ferrero este cálculo permitió determinar el nivel de protección

necesario tal como lo establece la norma NFPA70E.

Este parámetro evalúa el riesgo de exposición frente a arco eléctrico, la selección de equipos de protección personal, coordinación de protecciones hablando de minimizar el tiempo de exposición ante las fallas tomando en cuenta el nivel que se establezca al analizar los resultados provistos por simulación en ETAP.

El cálculo de energía incidente requiere varios pasos previos que integran más variables del sistema eléctrico y algunas características de falla recolectadas de manera manual mediante fotografías. Por ejemplo, en la siguiente imagen se puede ver la configuración de disparo de un interruptor de protección real de la planta de Ferrero.



Figura 13. Imagen real de dispositivo de protección

Donde se puede ver la configuración para la corriente de disparo esta es ajustable su configuración va de 510A a 800A y para la corriente de disparo instantáneo (Inst) la cual se ajusta con una escala en kA que varía entre 1.25kA a 14kA. En la parte derecha encontramos el botón test utilizado para verificar el funcionamiento de este mismo y la curva de disparo que indica una representación gráfica de la curva de disparo térmica y magnética, demuestra el comportamiento del interruptor bajo condiciones de diferentes valores de corriente. Estos valores se usarán como referencia dentro del programa ETAP para poder realizar los estudios pertinentes para determinar el riesgo por arco eléctrico y la energía incidente presente en cada tablero.

La energía incidente se calcula después de realizar el estudio de cortocircuito y determinar el nivel de este mismo, después se obtendrán las curvas de operación de las protecciones y de esta forma contaremos con el tiempo de operación. Una vez que se tengan estos estudios se debe elegir el método a usar para el cálculo de energía incidente. Dentro del programa ETAP se puede elegir el método de preferencia, tema del cual se hablará con más detalle a partir de la sección 8.1 Arco eléctrico.

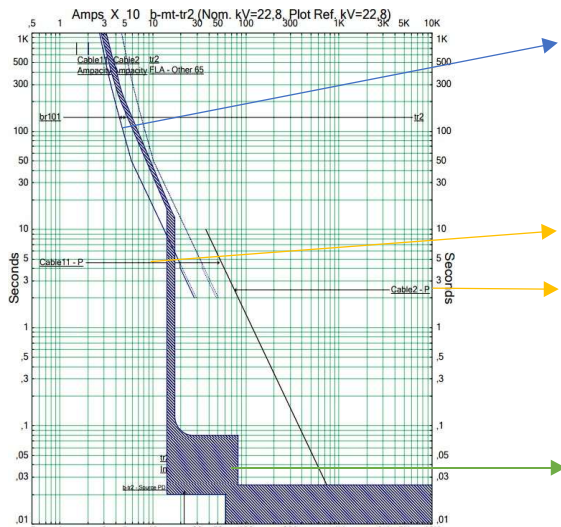
5.4. Resultados del análisis de cortocircuito

Dentro de los anexos a partir del anexo 7 podemos encontrar los resultados del análisis de cortocircuito del cual no se obtienen alarmas de que los dispositivos de protección actuales instalados tengan una capacidad de cortocircuito por debajo del valor calculado por ETAP. Por lo cual no se deberá reemplazar ninguna protección por falta de capacidad, en general han sido bien dimensionadas todas las protecciones existentes evitando satisfactoriamente cualquier escenario de falla o cortocircuito.

5.5. Coordinación de protecciones

Dentro de las curvas tiempo corriente se pueden visualizar diversas curvas y pendientes, estas mismas permiten analizar el comportamiento de la protección eléctrica ante condiciones de sobre corrientes o fallas.

En la siguiente imagen se aclara cómo funciona cada una de ellas y que representan estas mismo al momento calibrar un breaker.



La curva tr2 representa la curva térmica del transformador, indica la capacidad de soporte de este mismo a sobre corrientes antes de sufrir danos de sobrecalentamiento

Las curvas Cable 11-P y 2-P representan la curva térmica del cable, estos asociados a cada tramo del sistema en función del diagrama unifilar. Estas nos dan el tiempo máximo que soporta el revestimiento del cable antes de degradarse. Lo ideal es trabajar a la izquierda de estas.

La curva br101 representa el disparo del breaker en su configuración termomagnética y selectiva

Figura 14. Explicación curva de protecciones

En base a la gráfica anterior se puede concluir que está mal calibrado el disparo del breaker ya que está trabajando después de la curva del transformador por lo que pone en riesgo la integridad de este mismo.

- Coordinación de breaker principal br-56 con transformador 1, 500KVA, 220V y su acometida

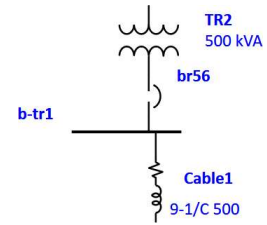
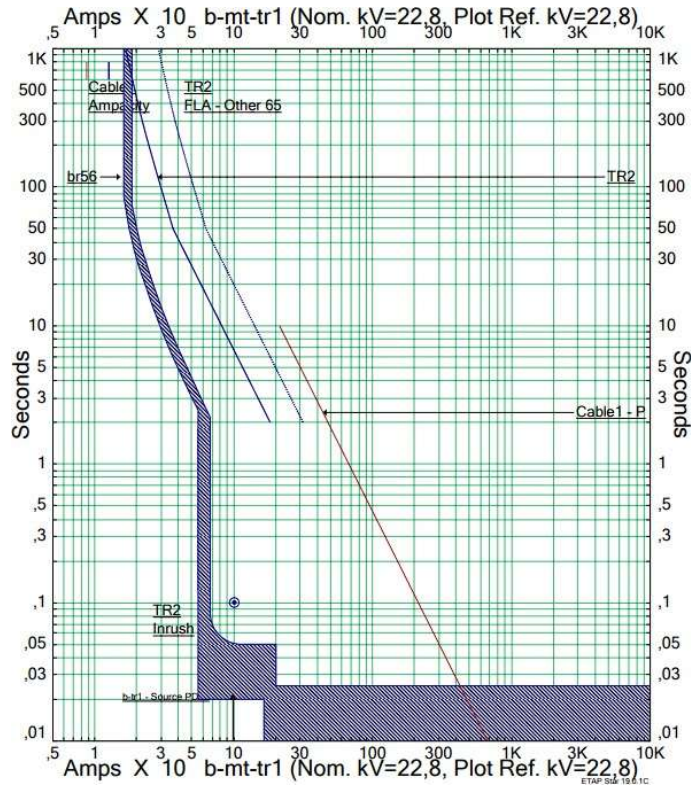


Figura 15. Coordinación de breaker br56 en transformador 1

Se evidencia que el breaker con la regulación disponible protege adecuadamente el cable y el transformador, no requiera cambios en la calibración.

- Coordinación de breaker principal br-101 con transformador 2, 800KVA, 380V

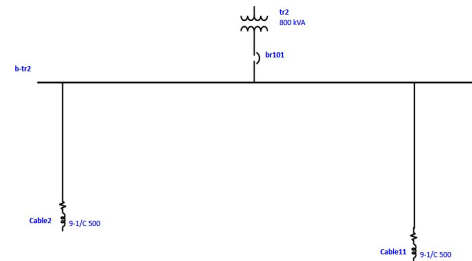
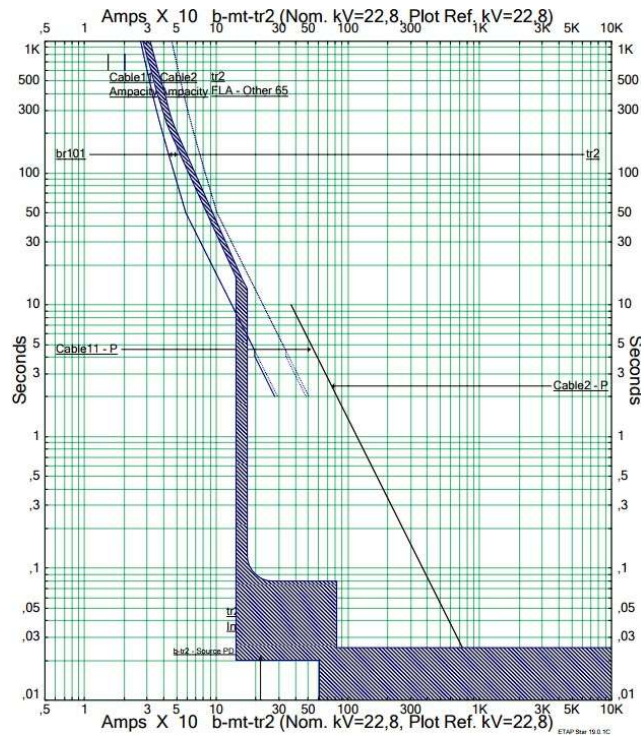


Figura 16. Coordinación de breaker principal br101 transformador 2

En este caso el breaker no protege adecuadamente el transformador por lo cual se requiere cambio de calibración. La calibración recomendada permitirá mejorar la protección del transformador lo cual garantiza la coordinación adecuada. La calibración actual no permite que actúe de la manera correcta el breaker lo que podemos evidenciar en la curva de tiempo corriente, las curvas se presentan alejadas de la zona de protección ideal. Con la calibración recomendada la cual se ajusta a los parámetros de disparo del breaker actual (br101) hará que la curva se acerque más a la zona de sobrecarga del transformador sin invadir la zona de operación segura, esto permite minimizar el tiempo de respuesta del breaker ante una falla, la respuesta será más rápida y selectiva. A continuación, la calibración actual y la calibración recomendada y la nueva curva con los cambios en su calibración:

Tabla 10. Calibración actual breaker br101

Parámetro	Calibración Actual	Calibración Recomendada	Observación
Ir (Inominal ajustada)	0.98	0.95	Valor de corriente de disparo ajustado.
tr (tiempo de retardo long time)	16 s	2 s	Disminución significativa en el retardo.
Isd (pickup short time)	6	4	Reducción en la sensibilidad de disparo instantáneo.

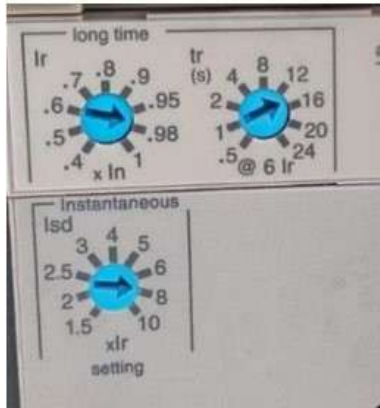


Figura 17. Fotografía real de breaker br101

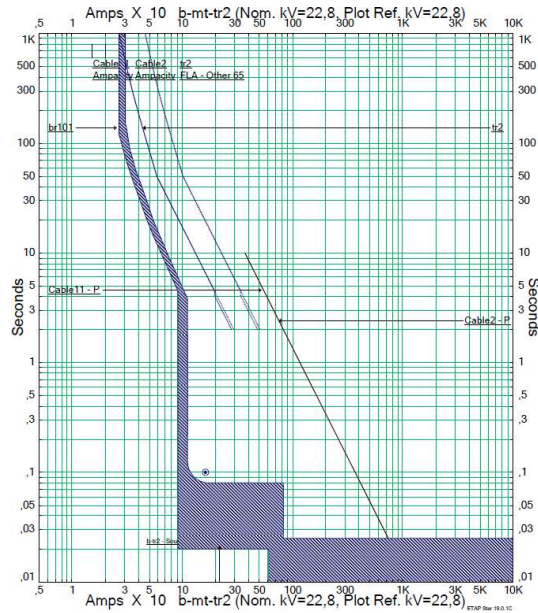


Figura 18. Cambio de la calibración del breaker br101 en TR2

Dentro de esta curva de tiempo-corriente (TCC) se pueden distinguir tres relaciones las cuales simulan el disparo de los breakers, en el caso de la curva térmica del cable línea inclinada ascendente la que soporta el conductor ante diferentes niveles de corriente antes de que su aislamiento se degrade hablando térmicamente.

Lo ideal es trabajar a la izquierda de esta curva, no cruzarla por lo que la configuración actual es correcta ya que el breaker br101 actúa antes de que se cruce esta misma.

Se comprobó que las curvas de protección de los breakers garantizan la protección térmica de los cables mediante la superposición de sus TCC sobre las curvas de capacidad térmica de los conductores, confirmando una protección integral del sistema

- Coordinación de breaker principal br-1 con transformador 3, 1200KVA y su acometida

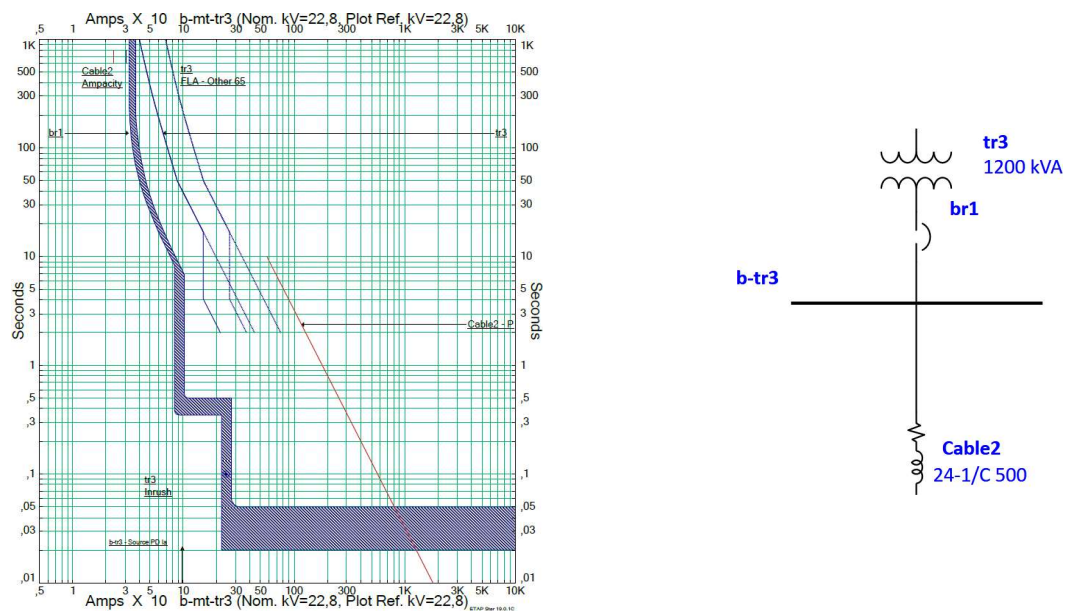


Figura 19. Calibración actual breaker br-1 transformador 3

Se requiere cambio de la calibración para mejorar el desempeño de esta protección, se propone cambiar el tiempo de respuesta (tr) el cual se reduce significativamente lo cual asegura que el breaker actúe más rápido, protegiendo al equipo y reduciendo el riesgo térmico y mecánico. También se plantea modificar el retardo de sobre corriente de corto plazo (tsd) esto permite al breaker desconectarse ante una falla de manera más rápida. Al mejorar el tr y el tsd se garantiza la protección aguas abajo para minimizar el impacto de una falla al resto del sistema.

Tabla 11. Calibración actual y recomendada para breaker br1

Parámetro	Calibración		Observación
	Actual	Recomendada	
Iu (corriente máxima utilizable)	1	1	Sin cambios.
Ir (Inominal ajustada)	1	1	Sin cambios.
tr (tiempo de retardo long time)	8 s	2 s	Disminución del tiempo de retardo.
Isd (pickup short time)	5	5	Sin cambios.

tsd (tiempo de retardo short time)	0.4 s	0.1 s	Reducción significativa en el retardo.
Ii (pickup instantáneo)	8	8	Sin cambios.

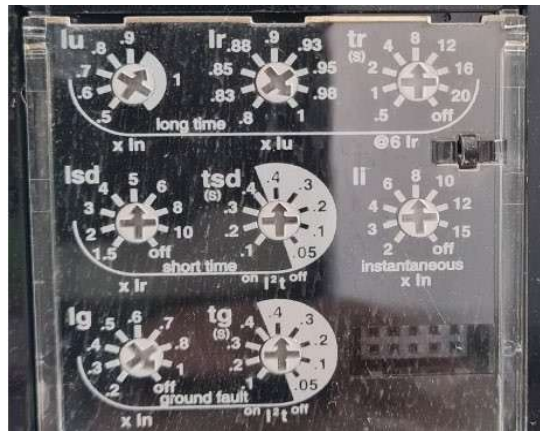


Figura 20. Fotografía real del breaker br1 TR3

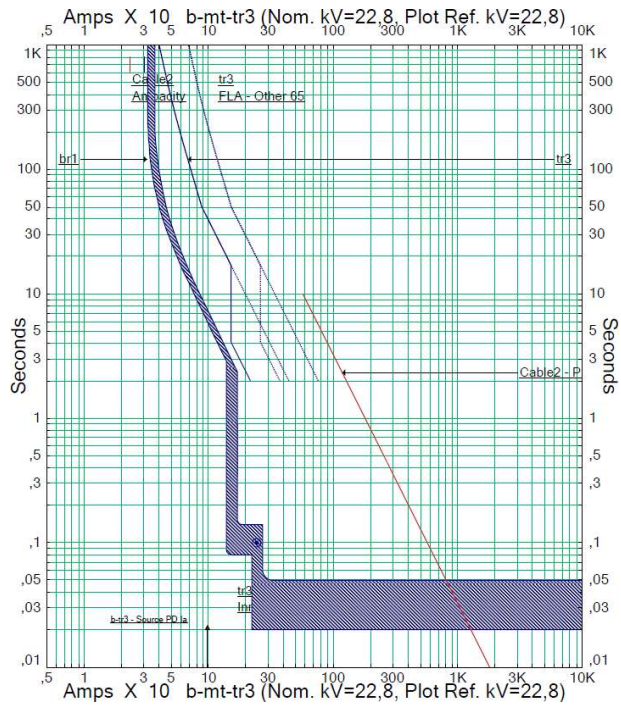


Figura 21. Cambio de calibración en br1 TR3

5.6. Selectividad de protecciones eléctricas

5.6.1. Transformador 1 220V 500KVA

Para la coordinación de protecciones de los tableros alimentados desde el transformador TR-1, se aplicó un criterio de selectividad inicial mediante escalonamiento de capacidades nominales de los disyuntores en cascada. El breaker principal BR56, ubicado a la salida del transformador TR-1, cuenta con una capacidad de 1600 A. A partir de este punto, las protecciones se distribuyen en niveles inferiores de corriente, como BR59, BR60 y BR61 de 800 A, BR63 de 800 A, BR66 de 630 A, y disyuntores secundarios como BR64, BR67, BR68, BR69, BR70 y BR71 con capacidades de 125 A, 70 A, 250 A, 160 A y similares. Esta configuración de forma jerárquica garantiza una selectividad directa, ya que ante una falla en un tablero secundario o en su acometida, el breaker más próximo a la falla, con menor capacidad nominal, actuará antes de que se vea comprometido el dispositivo ubicado aguas arriba. Por ejemplo, una falla en el

tablero T24c sería atendida inicialmente por el BR66 de 630 A, antes de alcanzar al BR60 o al BR56 de 1600 A.

Este escalonamiento de corriente es practico ya que asegura una adecuada coordinación sin requerir necesariamente ajustes avanzados de tiempo o disparo instantáneo, minimizando la afectación de áreas no involucradas ante una falla y preservando la continuidad operativa de los demás tableros. Además, esta selectividad nominal permite organizar las curvas tiempo-corriente en forma de cascada en los estudios de coordinación, donde las protecciones de mayor corriente quedan desplazadas a la derecha de las de menor capacidad, garantizando así un despeje selectivo de fallas.

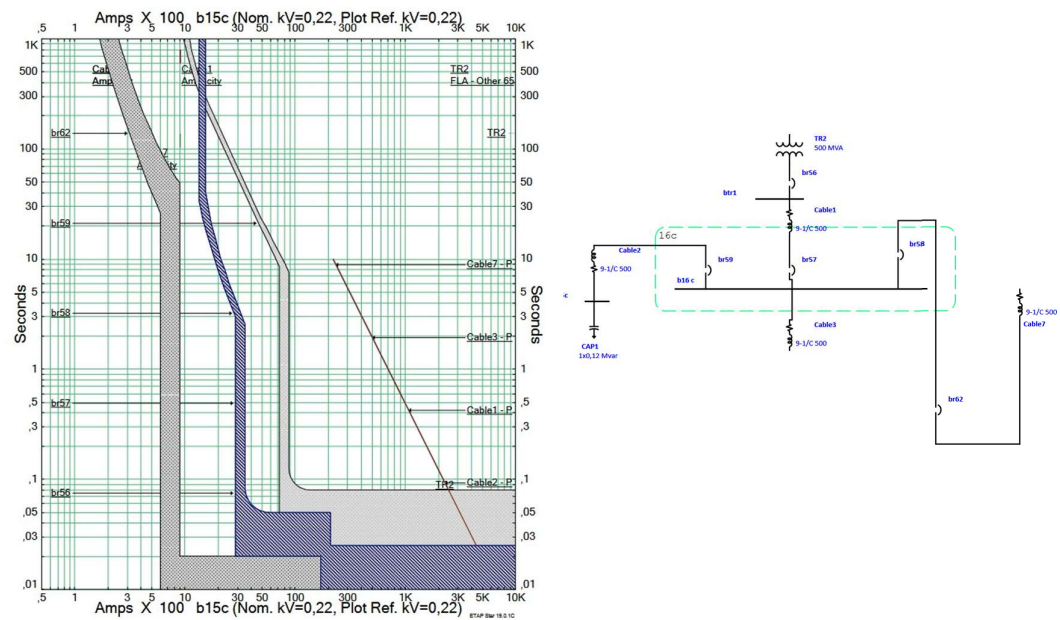


Figura 22. Coordinación de protecciones del TR1

Dentro de la gráfica de tiempo corriente se puede evidenciar que existe selectividad entre los breakers es decir que cada uno opera antes que el de arriba sin solaparse, las curvas de disparo de los breakers están bien alineadas respecto a las curvas térmicas de los cables y cumple con una coordinación adecuada de protecciones, esta grafica es de cinco breakers incluido el

principal del transformador 1 como lo muestra el diagrama en ETAP.

5.6.2. Transformador 2 380V 800KVA

En el caso del transformador TR-2, con una capacidad nominal de 800 kVA y un breaker principal BR101 de 1600 A, se aplicó el mismo criterio de selectividad escalonada basado en la corriente nominal de los disyuntores en cascada. Desde este punto se distribuyen breakers de menor capacidad nominal como BR116 y BR103 de 1250 A, BR106 de 1600 A (en paralelo para transferencia), seguidos de disyuntores BR117 y BR104 de 200 A y 1600 A respectivamente para tableros de distribución secundaria, y breakers intermedios de 800 A, 630 A, 350 A, 250 A y 125 A en tableros y centros de carga aguas abajo.

Esta disposición asegura que, ante una falla en un tablero o acometida secundaria, el dispositivo más cercano al punto de falla por tener menor corriente nominal actúe primero, antes de comprometer a los disyuntores superiores. Por ejemplo, una falla en el tablero TDS5-CH será despejada inicialmente por el BR111 de 350 A, sin afectar a BR105 de 350 A ni a BR103 o BR101 de mayor capacidad.

Esta manera de coordinar de manera jerárquica hace que la corriente tenga una selectividad directa, dado que los valores de corriente de disparo de cada breaker están configurados para mantener una secuencia lógica de actuación, favoreciendo la continuidad operativa del resto de los tableros no involucrados en el evento de falla. Adicionalmente, esta organización facilita la disposición de las curvas tiempo-corriente en cascada en el estudio de coordinación, evidenciando un correcto desplazamiento de las protecciones mayores hacia la derecha respecto a las de menor capacidad.

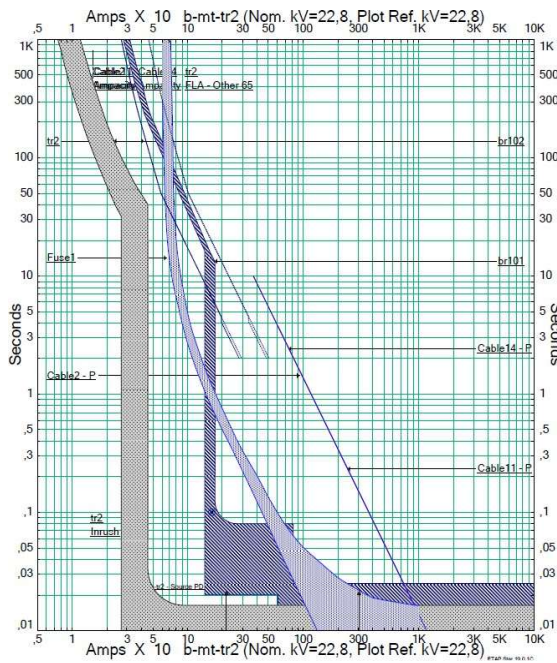


Figura 23. Coordinación de protecciones del TR2

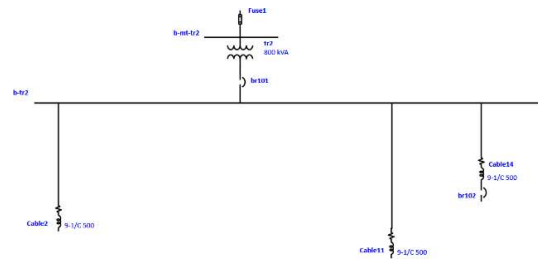


Figura 24. Diagrama referencial de la coordinación de protecciones TR2

5.6.3. Transformador 3 220V 120KVA

Para la coordinación de protecciones del transformador TR-3, con una potencia nominal de 1200 kVA y un breaker principal BR1 de 3200 A, se estructuró una selectividad escalonada mediante la correcta disposición de disyuntores en cascada según su corriente nominal. A partir de BR1 se derivan protecciones de menor capacidad como BR2, BR3 y BR5 de 1600 A, BR4 de 630 A, y en tableros secundarios protecciones que van desde 1250 A, 800 A, 400 A, 250 A hasta 160 A, 100 A, 80 A, 50 A y 40 A, conforme se avanza hacia las cargas finales y centros de carga.

Este escalonamiento de valores permite mantener una selectividad directa, ya que, ante una falla localizada en un tablero secundario, el breaker más cercano, con menor capacidad nominal, interrumpe el circuito antes de afectar a los dispositivos superiores. Por ejemplo, una falla en el

tablero T7a se despejará inicialmente con BR33 de 80 A, sin comprometer a BR32 de 160 A, ni a BR1 de 3200 A, preservando la continuidad operativa del resto de los tableros y equipos.

Esta organización también favorece la adecuada distribución de las curvas tiempo-corriente en el estudio de coordinación, ubicando las protecciones de mayor corriente desplazadas hacia la derecha respecto a las de menor capacidad, garantizando un despeje progresivo de las fallas. La selectividad nominal obtenida, respaldada por las características de disparo instantáneo y de sobrecarga de cada breaker, permite asegurar la protección integral de conductores, transformadores y equipos aguas abajo en la planta.

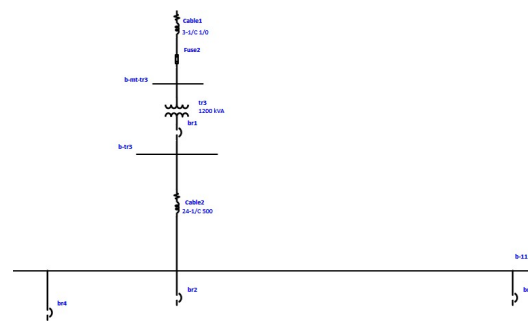
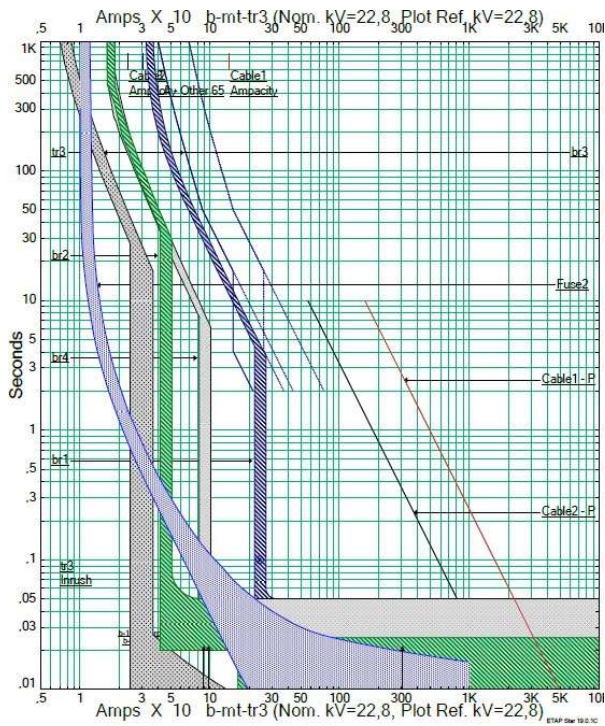


Figura 26. Diagrama referencial de la coordinación de protecciones TR3

Figura 25. Coordinación de protecciones del TR3

5.6.4. Frontera de choque eléctrico

De acuerdo a la norma NFPA70E y a lo antes visto se establece para choques eléctricos dos fronteras primordiales dentro de esta mismo. La llamada frontera de aproximación y la otra que es frontera restringida, depende de la ubicación se deberá tomar en cuenta las siguientes observaciones:

Tabla 12. Explicación de las fronteras de aproximación

PERSONAS CALIFICADAS	
DENTRO DE LA FRONTERA DE APROXIMACION	Conocimiento del trabajo o tarea que va a realizar. Identificar los peligros y riesgos asociados con la tarea
PERSONAS NO CALIFICADAS	
	En compañía de una persona calificada

DENTRO DE LA FRONTERA RESTRINGIDA	PERSONAS CALIFICADAS
	Deben contar con permiso de trabajo eléctrico energizado, utilizar EPP de acuerdo a los niveles de tensión
	PERSONAS NO CALIFICADAS Por ninguna circunstancia debe atravesar esta frontera

La norma establece estas fronteras de aproximación y restringida, de acuerdo con el nivel de voltaje presente en la planta, también se toma en cuenta si los conductores son fijos o móviles.

Dentro de la norma NFPA70E [2], se encuentra en la tabla 130. 4 (D), donde se especifica las fronteras de aproximación de conductores eléctricos o partes de circuitos energizados. Donde se pueden rescatar los siguientes valores

Tabla 13. Valores a usar dentro del estudio

Voltaje	Frontera limitada o de aproximación		Frontera restringida (m)
	Conductor Móvil (m)	Conductor Fijo (m)	
	50-300V	3	
300-750V	3	1	0,3
15,1- 36kV	3	1,5	0,7

La tabla expone las distancias de seguridad recomendadas en función del voltaje y el tipo de conductor. Las distancias presentadas son fundamentales para priorizar la seguridad del personal y minimizar el riesgo eléctrico. De acuerdo con los valores de la tabla tendremos datos clasificados para cada tablero de la planta mismos que se muestran en anexos del 7 en adelante.

Dentro de los anexos se encuentra resumido los valores del estudio de choque eléctrico, donde se definen las distancias mínimas para cada tablero. En base a estas fronteras se procede a determinar el tipo de equipo de protección personal que se debe usar para trabajar en cada tablero.

5.7. Arco incidente

El arco eléctrico o Arc Flash es la transmisión de energía a través del aire, entre un conductor vivo expuesto a otro o a tierra. Produce temperaturas extremadamente altas, calor radiante intenso, explosiones sonoras y ondas de presión, destellos de luz intensa [23]. Dependiendo de la intensidad de este fenómeno se considera catastrófico o no. Por esta razón las fronteras de arco han sido analizadas y creadas con el propósito de reducir estos riesgos que se generan cuando el personal trabaja con equipos energizados.

En este apartado encontramos otro tipo de fronteras referentes precisamente a conservar nuestra integridad física de manera segura. Esto aplica para personas calificadas o no, una vez que se cruce la frontera de arco es necesario y prácticamente obligatorio el uso de equipo de protección personal.

Tabla 14. Recomendaciones cuando se atraviesa la frontera de relámpago de arco

FRONTERA	PERSONAL
UNA VEZ QUE SE ATRAVIESA LA FRONTERA DE RELAMPAGO ARCO	<p>PERSONAS CALIFICADAS</p> <p>Equipo de protección contra arco</p> <p>PERSONAS NO CALIFICADAS</p> <p>Equipo de protección contra arco y en compañía de una persona calificada</p>

De acuerdo con la norma NFPA70E se tiene una clasificación de nivel de riesgo el cual va estrechamente ligado con la indumentaria a usar según el valor obtenido de arco incidente en

cada tablero.

Tabla 15. Nivel de riesgo y nivel mínimo de protección en cal/cm²

Nivel de Riesgo	Nivel mínimo de protección cal/cm² De la indumentaria
0	Prenda normal de algodón
1	4
2	8
3	25
4	40

5.7.1. Equipos de protección personal según su categoría:

Tabla 16. Categorías de equipos de protección personal

Categoría	Descripción	Valor Mínimo de Resistencia al Arco
0	Ropa de algodón con mangas largas	—
1	Vestimenta resistente a arco	4 cal/cm ²
2	Vestimenta resistente a arco	8 cal/cm ²
3	Vestimenta resistente a arco	25 cal/cm ²
4	Vestimenta resistente a arco	40 cal/cm ²

5.8. Cálculo de energía incidente y explicación técnica

Se calcula la energía incidente siguiendo las pautas de las normas IEEE 1584 y NFPA70E, estas toman la corriente de arco total de la barra y determina la energía utilizando el tiempo de despeje de falla del último dispositivo de protección para desenergizar la falla. La fórmula a usar es la siguiente[2].

Ecuación normalizada:

Ecuación 1 Ec. normalizada de cálculo de energía incidente

$$I_{gEn} = k_1 + k_2 + 1.081I_{g.Ic} + 0.0011G \quad (1)$$

Donde:

E_n = energía incidente (J/cm²), normalizada para tiempo y distancia

K_1 = -0.792 para arcos al aire libre; -0.555 para arcos en una caja

K_2 = 0 para sistemas sin puesta a tierra y -0.113 para sistemas con puesta a tierra

G = la separación del conductor en mm

Al realizar una conversión de energía normalizada a energía real se obtiene:

Ecuación 2 Conversión de energía

$$E = \left(\frac{E_{arco}}{4\pi D^2} \right) * k \quad (2)$$

Donde:

E = Energía incidente en cal/cm²

E_{arco} = Energía total liberada por el arco (J)

D = distancia de trabajo al arco

T = tiempo de arco en segundos

K =factor de conversión que incluye la fracción de energía radiante

Esta ecuación fue desarrollada mediante análisis empíricos de pruebas hechas con diferentes configuraciones de arco eléctrico y sistemas, las pruebas que se llevaron a cabo para determinar estas fórmulas fueron todas hechas bajo condiciones reales donde se midió corrientes de arco, energías térmicas transferida, factores influyentes como distancia, configuración de electrodos y características del sistema [30].

5.9. Pasos a seguir en ETAP para el cálculo de energía incidente

5.9.1. Configurar la red eléctrica

Se debe tener un diagrama unifilar con todos sus componentes e incorporar a cada uno de estos sus ajustes y características, se debe ser cauteloso al momento de configurar los niveles de voltaje para tener una simulación idéntica a la realidad de la planta

5.9.2. Determinar la corriente de cortocircuito

Se debe utilizar el módulo de cortocircuito de ETAP para calcular la corriente de falla de cada barra, el programa utiliza de manera automática los métodos de la norma IEEE 1584 para calcular la corriente de arco en función de la corriente de cortocircuito

5.9.3. Determinación de corriente de arco

Aquí se puede configurar que método se quiere usar, dependiendo esto el programa ajusta los valores de acuerdo a lo escogido cambiando los electrodos VCB, VCBB, HCB. Estos valores son diferentes configuraciones geométricas de los electrodos las cuales se usan para medir la dirección del flujo de plasma y la energía incidente que puede proyectarse hacia un trabajador. Existen tres métodos posibles, de media onda este utilizado para dispositivos de protección rápida, 1,5 a 4 ciclos que se usa para sistemas de media tensión y el método de decaimiento de corriente de falla el cual se usa para considerar contribuciones asíncronas y síncronas [31].

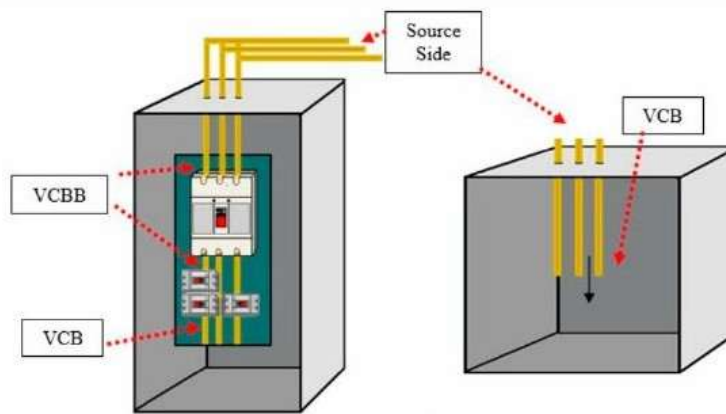


Figura 27. Distintos tipos de configuraciones de los electrodos

5.9.4. Calcular el tiempo de apertura de falla (FCT)

Se debe determinar el tiempo total de despeje de falla estos valores se sacan a través de las curvas tiempo-corriente de los dispositivos de protección, valores que se ajustan de forma automática al elegir dentro de la biblioteca del programa, ETAP también tiene establecido un límite máximo por configuración esto en caso de que no se sepa el valor de este tiempo.

5.9.5. Cálculo de energía incidente

Se usan las ecuaciones de la norma NFPA70E las cuales son referencia directa de la norma IEEE 1584 para calcular la energía incidente en calorías por centímetro cuadrado, distancias de trabajo específicas son el resultado de este estudio.

Se aplican automáticamente valores de corrección basados en el tamaño del espacio si se tienen esos datos.

5.9.6. Determinar distancias seguras

Se calcula la distancia para límites de arco basados en energía incidente de 1.2 cal/cm^2 , también se puede definir este nivel manualmente.

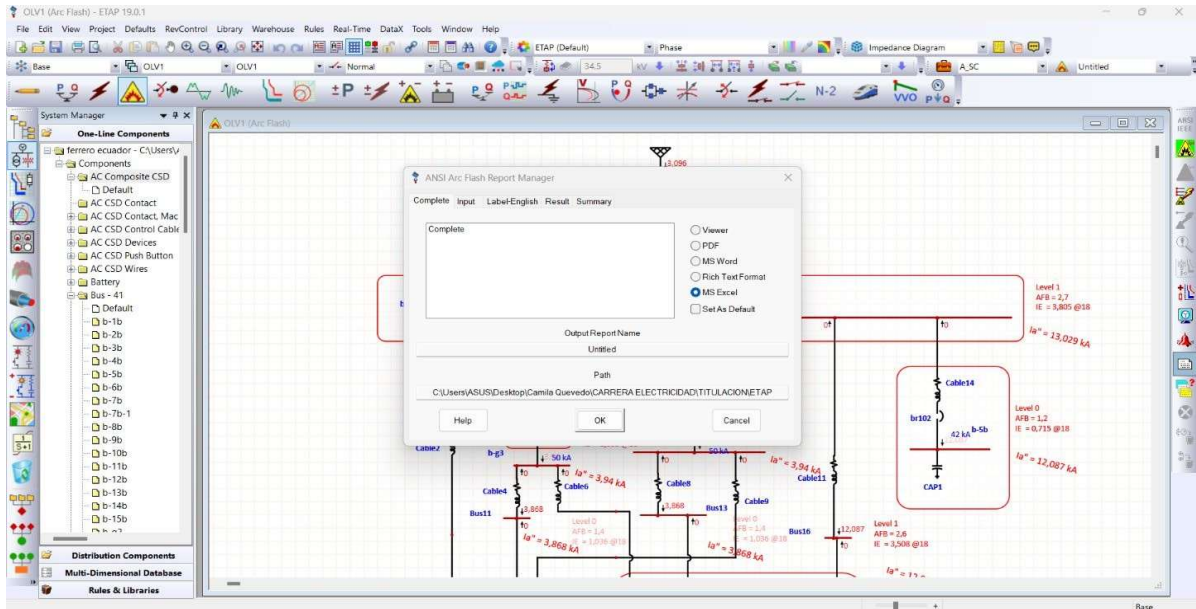


Figura 29. Ventana de reportes para extraer datos de los estudios en formato Excel

Arc Flash Result Analyzer

Output Report

Ref. Select Reports

Project Report

Active Project

ferro ecuador

Bus

Source Protective Device

Load PD (Bus Side)

Load Terminal

Info

Check All

kV

Type

Location

Connected Bus

Enclosure ID

Electrode Configuration

Equipment Name

Results

Check All

Total Energy (cal/cm²)

AFB

Energy Levels

Final FCT

Source PD ID

Prefault Voltage (kV)

Calc. Method limits

ID	kV	Total Energy (cal/cm ²)	AFB (ft-in)	Energy Levels	Final FCT	Source PD ID	% Ia Variation
1	b-1b	0,38	1,5	1,6770°	3,6	br107	
2	b-2b	0,38	2,47	2,1520°	4,8	br103	
3	b-3b	0,38	3,51	2,5640°	4,8	br101	
4	b-4b	0,38	3,51	2,5640°	4,8	br101	
5	b-5b	0,38	0,714758	1,1570°	0,98	br102	
6	b-6b	0,38	3,25	2,4690°	4,8	br116	
7	b-7b	0,38	3,05	2,390°	4,8	br103	
8	b-7b-1	0,38	0,620843	1,0790°	0,98	br105	
9	b-8b	0,38	0,436734	0,9050°	0,96	br117	
10	b-9b	0,38	0,230186	0,6570°	1	br105	
11	b-10b	0,38	0,277996	0,7220°	0,98	br105	
12	b-11b	0,38	0,099601	0,4320°	0,99	br113	
13	b-12b	0,38	0,155054	0,5390°	1,07	br109	
14	b-13b	0,38	0,323982	0,7790°	0,97	br108	
15	b-14b	0,38	0,23893	0,6690°	0,99	br105	
16	b-15b	0,38	0,768895	1,20°	3,6	br118	
17	b-g2	0,38	1,05	1,4050°	4,84	CB6	

Copy Sort

Incident Energy

Worst Case

Min

Filter Reports by Energy Levels

Filter Results By

FCT Not Determined

% Ia Variation

FCT by Secondary PD

Exceeds Max. FCT

Effect of Main PD Isolation on FCT

Device Duty Alerts

Display Options

Actual Value

Differences with Ref

Skip If Same

FCT Unit

Cycles

Reporting

Standard Label

Custom Label

Work Permit

Data Sheet

Seq. of Operation

View

One-Line-Diagram

Export... Find Help Close

Figura 30. Reporte de resultados TR2

A continuación, se muestra la categoría de peligro de arco, la energía incidente y la distancia límite de protección para cada tablero, de acuerdo con las calibraciones y protecciones establecidas actualmente.

Los valores que se usaron para el cálculo de cada uno de los estudios eléctricos se sacaron de los planos eléctricos actualizados durante el levantamiento de la información de la planta, estos mismos cuentan con la base de datos la cual la realizamos en Excel, esta consta con calibraciones actuales de la planta y características de las protecciones eléctricas. Estos documentos ayudan a obtener una simulación precisa ajustada a la realidad de la planta.

La tabla a continuación se refiere a la energía de arco incidente del transformador 1, se puede encontrar la evaluación de la energía de arco incidente asociada al TR1, la energía de arco la cual se mide en calorías por centímetro cuadrado determinara la severidad que existe en cada punto. Mientras que el nivel de riesgo que va de 0 a 4 da la pauta para determinar qué equipo de protección personal que se debe utilizar frente a ese escenario. Todo esto va de acuerdo con los estándares de la norma NFPA70E.

Tabla 17. Energía de arco incidente en barras del TR1

Energía del arco incidente en barras del sistema eléctrico del transformador 1 de 500kva,220vac - Área de chocolate					
Bus		Datos energía incidente			
ID	Nominal kV	Energía arco incidente (cal/cm²)	Nivel del riesgo	Frontera de arco (m)	breaker fuente
b-1ch	0,22	0,81046	Level 0	0,38	br57
b-2ch	0,22	0,389306	Level 0	0,26	br99
b-4ch	0,22	0,649237	Level 0	0,34	br94
b-5ch	0,22	0,889315	Level 0	0,39	br94
b-6ch	0,22	0,696383	Level 0	0,35	br74
b-7ch	0,22	0,839013	Level 0	0,38	br57

b-8ch	0,22	0,231038	Level 0	0,20	b76
b-10c	0,22	1,25	Level 1	0,47	br57
b-12a	0,22	16,45	Level 3	1,69	br91
b-12c	0,22	0,155496	Level 0	0,16	br 90
b-13a	0,22	1,27	Level 1	0,47	br87
b-13c	0,22	0,817328	Level 0	0,38	br57
b-14a	0,22	3,35	Level 1	0,76	br88
b-14c	0,22	0,967928	Level 0	0,41	br57
b15a	0,22	0,085433	Level 0	0,12	CB8
b-15c	0,22	1,44	Level 1	0,50	br57
b-16 c	0,22	1,54	Level 1	0,52	br57
b-17c	0,22	1,35	Level 1	0,48	br57
b-18c	0,22	1,18	Level 0	0,45	br57
b-19ch	0,22	101,52	> Level 4	4,20	br56
b-20ch	0,22	0,140126	Level 0	0,16	br80

Tabla 18. Energía de arco incidente en las barras del TR1

Energía del arco incidente en barras del sistema eléctrico del transformador 1 de 500kva,220vac - Área de chocolate					
Bus		Datos energía incidente			
ID	Nominal kV	Energía arco incidente (cal/cm²)	Nivel del riesgo	Frontera de arco breaker fuente (m)	
b-22ch	0,22	2,05	Level 1	0,60	br98
b-23ch	0,22	0,146121	Level 0	0,16	br84
b-24c	0,22	0,895272	Level 0	0,39	br57
b-25ch	0,22	0,115562	Level 0	0,14	br75
b-26ch	0,22	0,072423	Level 0	0,11	br82
b-27ch	0,22	0,082381	Level 0	0,12	br81

b-28c	0,22	46,6	> Level 4	2,85	br70-1
b-29c	0,22	27,14	Level 4	2,17	br71
b-30c	0,22	0,08989	Level 0	0,12	br69
b-31c	0,22	0,08548	Level 0	0,12	br67
b-32c	0,22	0,075051	Level 0	0,11	br68
b-34c	0,22	0,172742	Level 0	0,17	br 89
b-35c	0,22	0,112569	Level 0	0,14	br92
b-36	0,22	0,227844	Level 0	0,20	br64
b-38ch	0,22	0,186255	Level 0	0,18	br79
b-39ch	0,22	0,066799	Level 0	0,11	br84
b-40ch	0,22	0,10927	Level 0	0,14	CB6
b-41ch	0,22	0,720109	Level 0	0,35	br94
b-42ch	0,22	6,85	Level 2	1,09	br75
b-43ch	0,22	0,349268	Level 0	0,25	br85
b-mt-tr1	22,8	6,12	Level 2	1,03	Fuse1
b-tr1	0,22	1,87	Level 1	0,57	br56

5.10. Acciones requeridas en tableros del transformador 1

5.10.1. Barra b-28c excede el nivel de arco incidente

Inicialmente esta barra presenta un nivel de energía crítica de arco incidente, esto para por la configuración actual del breaker. Con el breaker actual el nivel de arco incidente es de nivel 4, este nivel de energía es extremadamente peligroso ya que supera los límites máximos aun con el equipo de protección personal.

En las gráficas podemos observar el cambio de nivel de arco incidente mediante la simulación en ETAP

Excede nivel 4 con breaker fijo actual → Nivel 0 con cambio de breaker

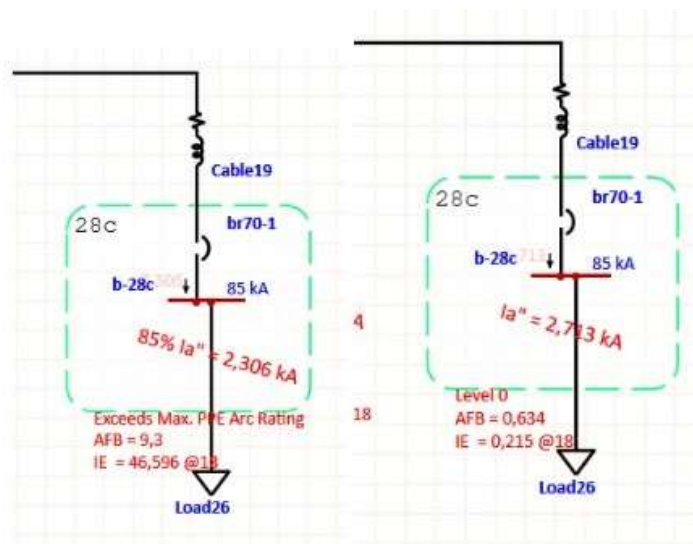


Figura 31. Barra b28c y cambio de breaker en ETAP

Al realizar la simulación y establecer el nivel de arco en cada uno de los escenarios se recomienda el cambio del breaker br70, con este cambio aseguramos del que el breaker permita disminuir la corriente instantánea a 1250A.



Figura 32. Fotografía real breaker br70

El breaker actual es de 3p-250 Amperios, corriente instantánea fija a 2500 amperio. El cambio se debería optar por un breaker que tenga unidad de disparo de corriente instantánea regulable a 1250 amperios como máximo todo esto para asegurar la selectividad de este mismo.

5.10.2. Barra b-29c nivel de arco incidente 4

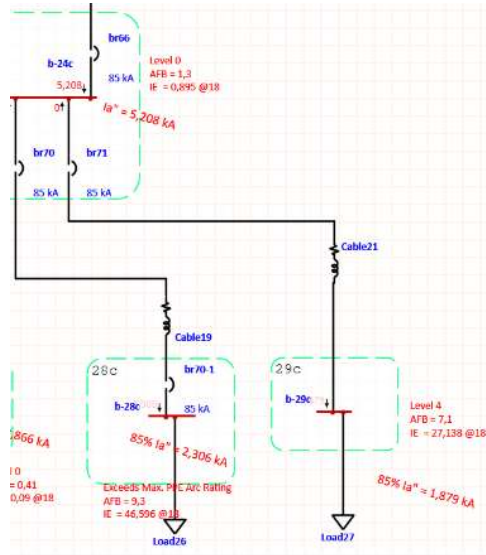


Figura 33. Barra b29c en ETAP

En la simulación presentada se analiza el comportamiento de la barra b-29c con su breaker correspondiente, se puede evidencia que el nivel de riesgo por arco llega hasta el nivel 4, con calibración actual. Este es un escenario muy peligroso ya que el nivel de energía incidente llega hasta 45.595 cal/cm^2 lo cual se cataloga como un riesgo extremo.

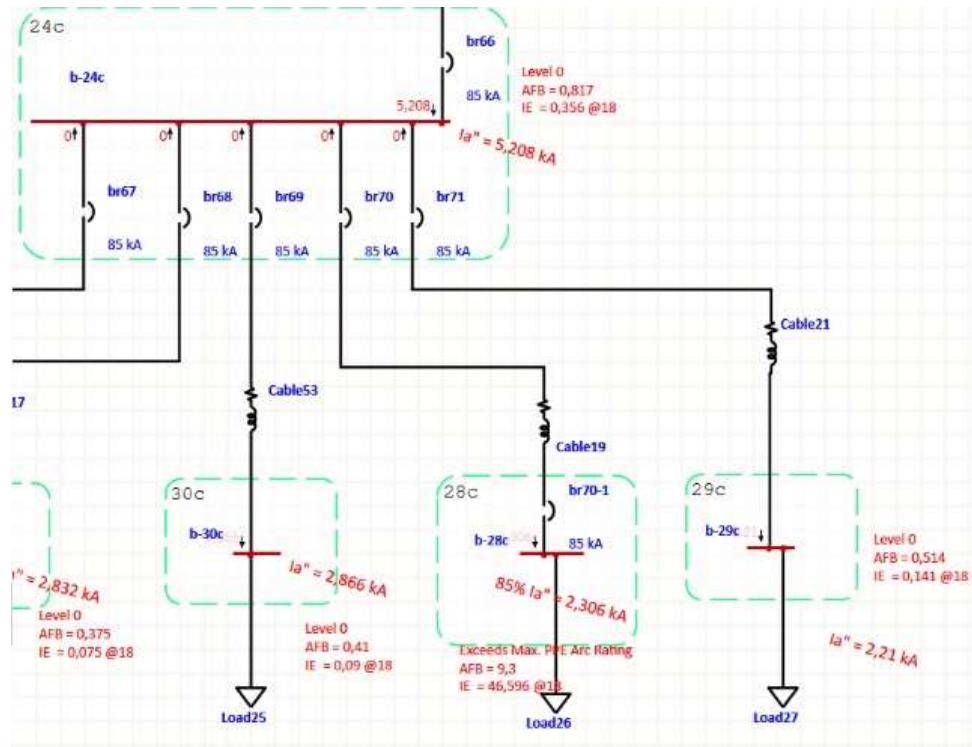


Figura 34. Barra b29c con cambio de calibración en ETAP

La corriente que alimenta al arco se calcula en 2306kA con la calibración actual, al cambiar su calibración breaker br71, baja la corriente instantánea a 800A, al realizar este cambio podemos llegar a un nivel de arco de 0 en la barra b-29c.

5.10.3. Tablero 19ch excede nivel de arco incidente 4

En la simulación de la izquierda se presenta como opera el sistema del breaker 73 con la calibración actual evidenciando el riesgo crítico que llega a nivel 4. Posteriormente se simula en la derecha el cambio en la calibración del breaker.



Figura 35. Tablero 19ch ETAP

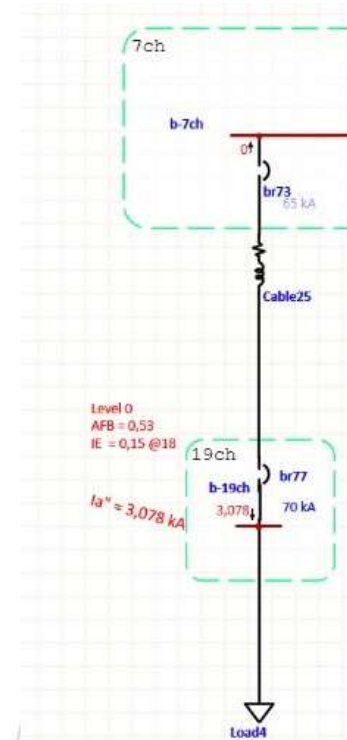


Figura 36. Tablero 19ch con cambio de calibración

Excede nivel 4 con calibración actual → Nivel 2 con cambio en calibración

El análisis presentado ayuda a recomendar el cambio de calibración de breaker br73, se debe ajustar el umbral de la corriente instantánea al nivel mínimo lo cual permitirá mejorar la respuesta de la protección y disminuir el riesgo de arco eléctrico en el tablero 19ch.



Figura 37. Imagen real de breaker br73

5.10.4. Barra b-12a nivel de arco incidente 3

En la barra b12c se evidencia que la protección actual es fija, esto quiere decir que no permite calibrar su respuesta, este mismo no es capaz de mitigar los riesgos de arco eléctrico. Este breaker fijo tiene un disparo instantáneo lo cual impide cambiar su ajuste dándonos un nivel de riesgo de tipo 3, riesgo significativo.

Dentro de las imágenes se puede ver el comportamiento de la protección con calibración actual y al lado derecho una mejor respuesta con cambio de calibración.

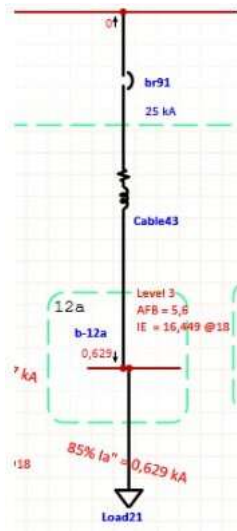


Figura 38, Barra b12 en ETAP

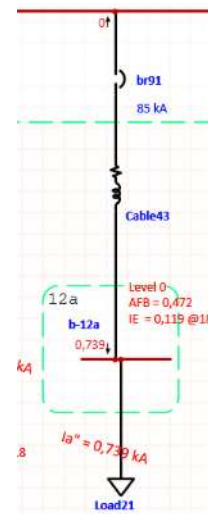


Figura 39. Cambio de calibración en br12a

Su protección es fija no hay posibilidad de regular el disparo instantáneo por lo que se recomienda cambiar el dispositivo a uno regulable. Se requiere un breaker con la posibilidad de ajustar el disparo instantáneo máximo a 500 amperios.



Figura 40. Imagen real de breaker br12a

5.11. Resultados del arco incidente en tableros del transformador 2

Tabla 19. Energía de arco incidente en barras del TR2

Energía del arco incidente en barras del sistema eléctrico del transformador 2 de 800kva,380vac - Área de chocolate y tic tac					
Bus		Datos energía incidente			
ID	Nominal kV	Energía arco incidente (cal/cm²)	Nivel del riesgo	Frontera de arco (m)	breaker fuente
b-1b	0,38	1,5	Level 1	0,51	br107
b-2b	0,38	2,47	Level 1	0,66	br103
b-3b	0,38	38,56	Level 4	2,59	Fuse1
b-4b	0,38	38,56	Level 4	2,59	Fuse1
b-5b	0,38	0,714758	Level 0	0,35	br102
b-6b	0,38	3,25	Level 1	0,75	br116
b-7b	0,38	3,05	Level 1	0,73	br103
b-7b-1	0,38	0,620843	Level 0	0,33	br105
b-8b	0,38	0,436734	Level 0	0,28	br117
b-9b	0,38	0,230186	Level 0	0,20	br105
b-10b	0,38	0,277996	Level 0	0,22	br105
b-11b	0,38	0,099601	Level 0	0,13	br113
b-12b	0,38	0,155054	Level 0	0,16	br109
b-13b	0,38	0,323982	Level 0	0,24	br108
b-14b	0,38	0,23893	Level 0	0,20	br105
b-15b	0,38	0,768895	Level 0	0,37	br118
b-g2	0,38	1,05	Level 0	0,43	CB6
b-g3	0,38	1,05	Level 0	0,43	CB2
b-mt-tr2	22,8	3,72	Level 1	0,81	Fuse1
b-tr2	0,38	4,02	Level 2	0,84	br101

5.12. Acciones requeridas en tableros del transformador 2

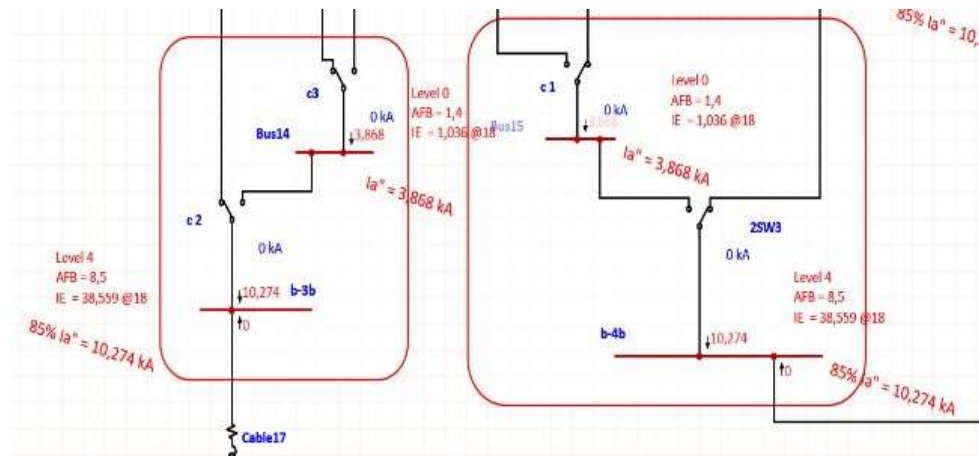


Figura 41. Transferencias automáticas en TR2

En las dos transferencias automáticas de 380vas, tableros 3b y 4b existe un nivel de riesgo 4, esto debido a que las transferencias están constituidas por seccionadores y conmutadores que no tienen la posibilidad de proteger la salida hacia la barra. Es imposible bajar el nivel de riesgo al no poder actuar sobre las protecciones ya que actualmente la planta no cuenta con estos elementos.

5.13. Solución propuesta:

Se recomienda instalar breakers con protección LSI (Long-time, Short-time, Instantaneous), la cuales una clase de protección eléctrica que se usa principalmente en interruptores automáticos para detectar y despejar diferentes tipos de sobre corrientes en sistemas eléctricos. Cuenta con tres funciones principales la función de sobrecarga prolongada, sobre corriente de corta duración y corriente instantánea. Es necesario incluir estas protecciones en cada alimentador los cuales salen de la cámara de transformación y que se dirigen a cada una de las transferencias automáticas de 380 VCA.



Figura 42. Tablero de transferencia automática 1
Tablero 4b



Figura 43. Tablero de transferencia automática 2
Tablero 3b

Al instalar los dos breakers sugeridos en las acometidas que van hacia los tableros de transferencia con calibraciones adecuadas tendremos un menor riesgo en los tableros b-3b y b-4b, estos bajaran a 1 respectivamente.

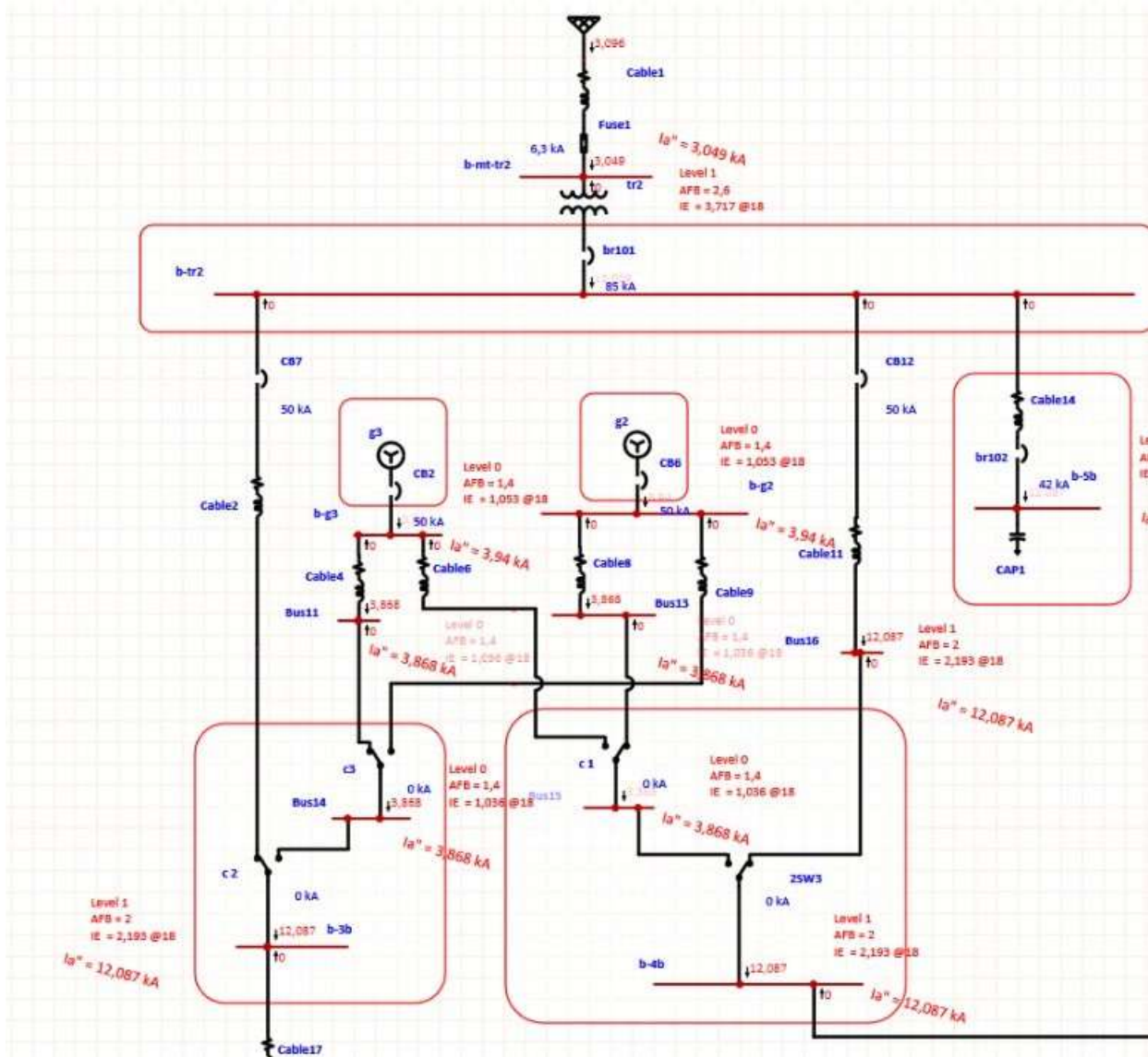


Figura 44. Riesgo de arco en ETAP por cambio de breaker en transferencia automática

5.14. Resultados del arco incidente en tableros del transformador 3

Tabla 20. Energía del arco incidente en barras del transformador 3

Energía del arco incidente en barras del sistema eléctrico del transformador 3 de 1200kva,220vac - Área tic tac					
Bus		Datos energía incidente			
ID	Nomina 1 kV	Energía arco incidente (cal/cm²)	Nivel del riesgo	Frontera de arco (m)	breaker fuente
b-1	0,22	3,52	Level 1	0,78	br24
b-1a	0,22	0,124446	Level 0	0,15	br11
b-2	0,22	0,209614	Level 0	0,19	br22
b-2a	0,22	0,064514	Level 0	0,11	br30
b-3	0,22	0,178508	Level 0	0,18	br47
b-3a	0,22	0,113495	Level 0	0,14	br27
b-4	0,22	180,24	> Level 4	5,60	br12
b-4a	0,22	0,115484	Level 0	0,14	br28
b-5	0,22	0,230273	Level 0	0,20	br48
b-5a	0,22	10,84	Level 3	1,37	br31
b-6	0,22	70,97	> Level 4	3,52	br21
b-6a	0,22	9,25	Level 3	1,27	br32
b-7	0,22	0,563415	Level 0	0,31	br15
b-7-1	0,22	0,178092	Level 0	0,18	br21
b-7a	0,22	0,115955	Level 0	0,14	br33
b-8	0,22	0,801383	Level 0	0,37	br2
b-8a	0,22	0,084999	Level 0	0,12	br35
b-9	0,22	0,137988	Level 0	0,16	br40

Tabla 21. Energía del arco incidente en barras del transformador 3

Energía del arco incidente en barras del sistema eléctrico del transformador 3 de 1200kva,220vac - Área tic tac					
Bus		Datos energía incidente			
ID	Nominal kV	Energía arco incidente (cal/cm²)	Nivel del riesgo	Frontera de arco (m)	breaker fuente
b-9a	0,22	0,067083	Level 0	0,11	br37
b-10	0,22	0,223202	Level 0	0,20	br19
b-10a	0,22	0,115068	Level 0	0,14	br34
b-11	0,22	276,76	> Level 4	6,94	Fuse2
b-11a	0,22	0,450946	Level 0	0,28	br35
b-12-tta1	0,22	1,83	Level 1	0,56	br2
b-12-tta2	0,22	0,433981	Level 0	0,27	br3
b-13	0,22	3,79	Level 1	0,81	br5
b-13.1	0,22	1,54	Level 1	0,52	br2
b-14	0,22	0,406605	Level 0	0,27	br13
b-15	0,22	0,286028	Level 0	0,22	br10
b-16	0,22	0,297951	Level 0	0,23	br17
b-17	0,22	0,370198	Level 0	0,25	br44
b-18	0,22	1,3	Level 1	0,48	br2
b-19	0,22	0,808834	Level 0	0,38	br2
b-20	0,22	8,18	Level 3	1,19	br49
b-21	0,22	0,26405	Level 0	0,21	br53
b-22	0,22	0,300523	Level 0	0,23	CB1

Tabla 22. Energía del arco incidente en barras del transformador 3

Energía del arco incidente en barras del sistema eléctrico del transformador 3 de 1200kva,220vac - Área tic tac					
Bus		Datos energía incidente			
ID	Nominal kV	energía arco incidente (cal/cm²)	Nivel del riesgo	Frontera de arco (m)	breaker fuente
b-23	0,22	80,94	> Level 4	3,75	br7
b-24	0,22	85,11	> Level 4	3,85	br18
b-26	0,22	0,064809	Level 0	0,11	br23
b-27	0,22	4,04	Level 1	0,84	br25
b-28	0,22	0,187989	Level 0	0,18	br43
b-29	0,22	0,068752	Level 0	0,11	br45
b-30	0,22	7,03	Level 2	1,11	CB15
b-31	0,22	0,229017	Level 0	0,20	br52
b-32	0,22	0,229017	Level 0	0,20	br51
b-33	0,22	0,224801	Level 0	0,20	br54
b-34	0,22	0,224801	Level 0	0,20	br55
b-35	0,22	0,501409	Level 0	0,30	br50
b-37	0,22	0,064044	Level 0	0,11	br25-1
b-g1	0,22	2,66	Level 1	0,68	CB18
b-mt-tr3	22,8	3,72	Level 1	0,81	Fuse2
b-tr3	0,22	197,95	> Level 4	5,87	Fuse2
b-tta1-g1	0,22	2,53	Level 1	0,66	CB18
b-tta2-g1	0,22	2,53	Level 1	0,66	CB18

5.15. Acciones requeridas en tableros del transformador 3

5.15.1. B-tr3 barra del trafo tr-3 excede el nivel 4 de riesgo por arco eléctrico

Se evidencia que con su protección actual (fija) no se logra mitigar correctamente los riesgos de arco eléctrico, se limita su capacidad de respuesta y no permite tener selectividad.

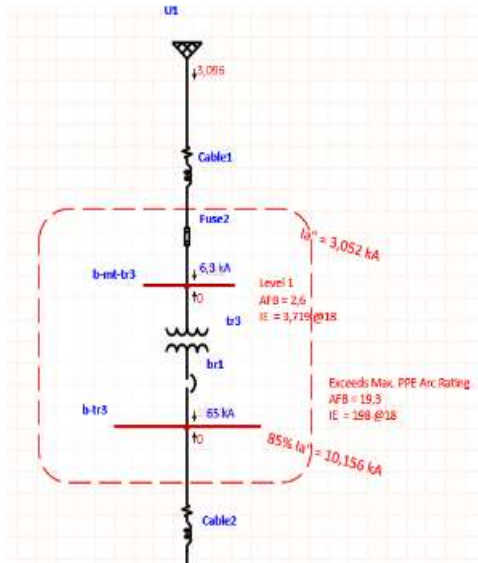


Figura 45. Breaker btr3 modelado en ETAP

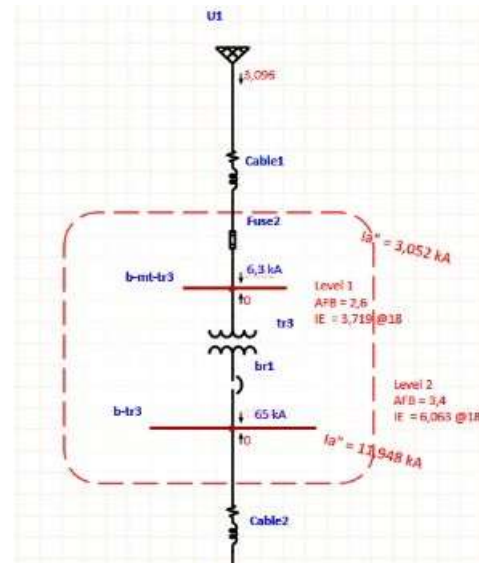


Figura 46. Btr3 con cambio de calibración

Se recomienda cambiar el breaker por uno regulable, este debe contar con capacidad de disparo instantáneo a un máximo de 500A, esto ayudara con la eficiencia en su respuesta y mejorara la seguridad de la barra btr3.

Tabla 23. Configuración actual y recomendada del breaker br1

Parámetro	Valor	Valor	Observación
	Inicial	Final	
Iu (corriente máxima utilizable)	0.1	0.1	Sin cambios.

Ir (Inominal ajustada)	1	1	Sin cambios.
tr (tiempo de retardo long time)	8 s	8 s	Sin cambios.
Isd (pickup short time)	5	2	Disminución en el valor de disparo instantáneo.
tsd (tiempo de retardo short time)	0.4 s	0.1 s	Reducción significativa del tiempo de retardo.
Ii (pickup instantáneo)	8	8	Sin cambios.

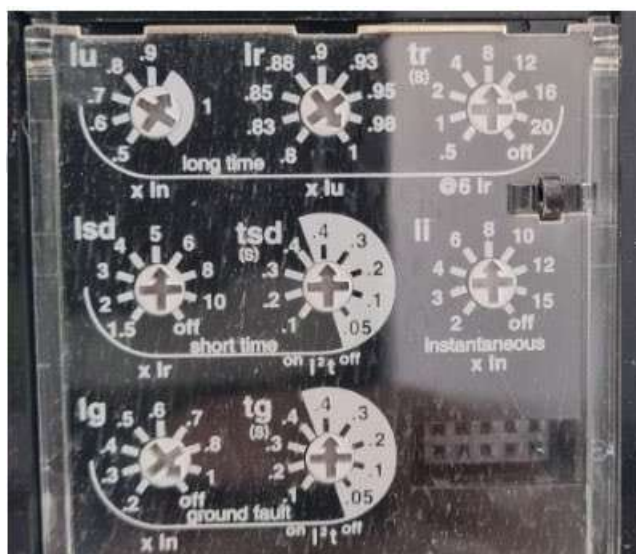


Figura 47. Fotografía real de br1

5.15.2. Barra b-11, excede nivel 4 de riesgo por arco eléctrico

Este nivel de riesgo depende de la calibración del breaker principal del transformador 3, por lo cual al cambiar de calibración a los valores recomendados anteriormente tendremos que el nivel de riesgo baja a un nivel 2.



Figura 48. Barra b11 modelo ETAP

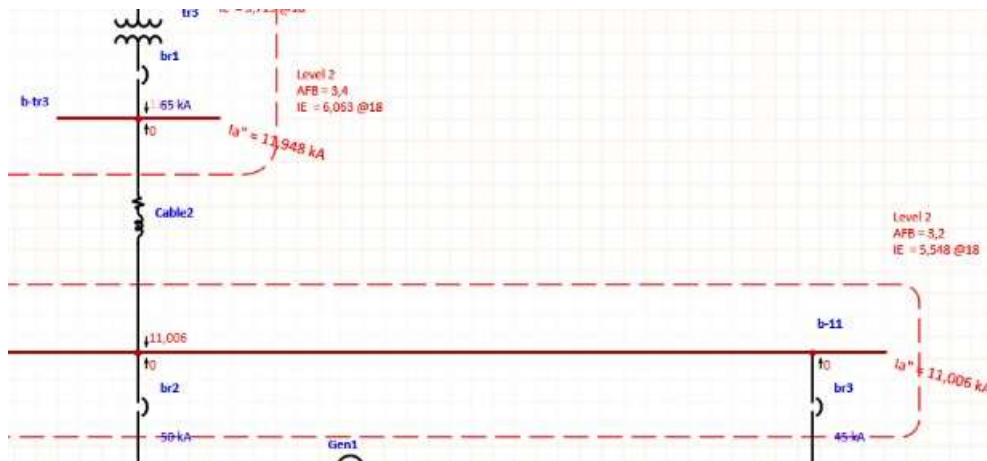


Figura 49. Cambios en la calibración de br1

Se recomienda cambiar la calibración en los breakers br1 y br49 para mejorar el nivel de riesgo por arco y lograr disminuir a nivel 2. Los cambios realizados garantizan tener más seguridad y eficiencia en estas barras. Además, se protege a los equipos y se prolonga la vida útil de estos mismo.

5.15.3. Barra b-20, presentando nivel de riesgo por arco 3 con cal. Br49

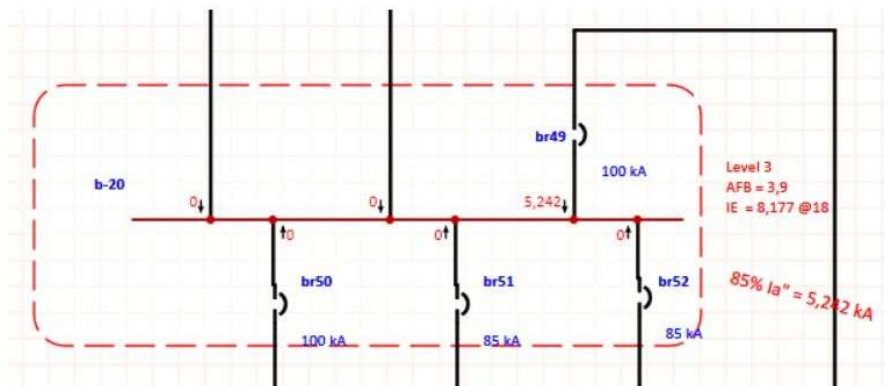


Figura 50. Br49 en ETAP

En la barra b20 tenemos un dispositivo de protección el cual permite mejorar la calibración actual de tiempo de respuesta de esta misma, con la calibración actual presenta un riesgo de arco de nivel 3.

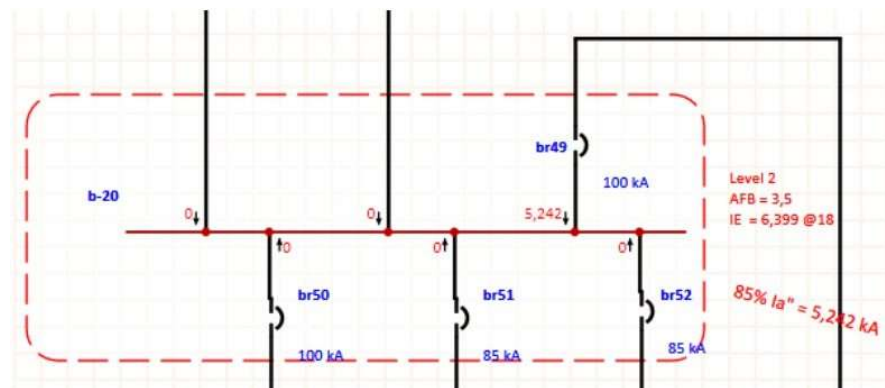


Figura 51. Br49 con cambio de calibración

Al cambiar la calibración del tiempo de respuesta del breaker br49 podemos disminuir el nivel de riesgo a 2. Se enlista los datos a ser calibrados para mejorar la confiabilidad.

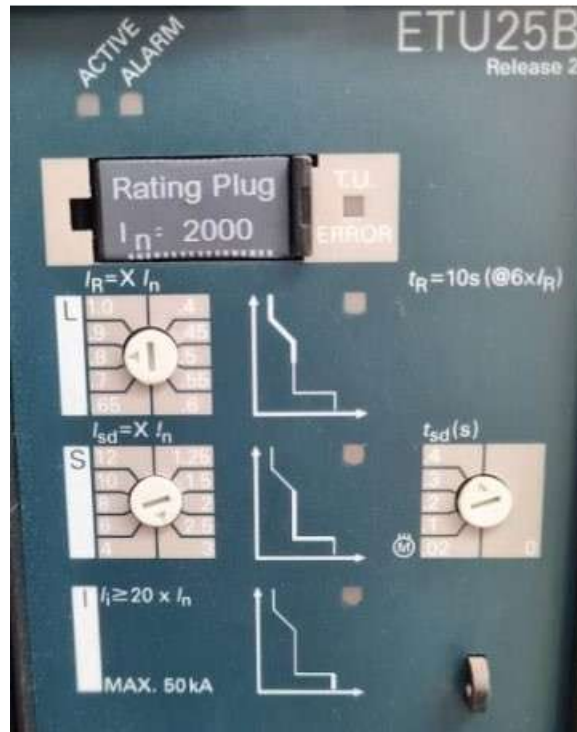


Figura 52. Imagen real br49

Tabla 24. Configuración actual y recomendada del breaker br49

Parámetro	Valor Inicial	Valor Final	Observación
Ir (Inominal ajustada)	0.8	0.8	Sin cambios.
Isd (pickup short time)	2.5	2.5	Sin cambios.
tsd (tiempo de retardo short time)	0.4 s	0.3 s	Reducción del tiempo de retardo.
Ii (pickup instantáneo)	20×In (fijo)	20×In (fijo)	Sin cambios.

5.15.4. Barra b-23 presentando un nivel de riesgo por arco 3 con cal. Br46

Con la calibración actual el breaker br46 presenta un nivel de riesgo por arco nivel 3, su corriente incrementa a 3,351kA siendo potencialmente peligroso.

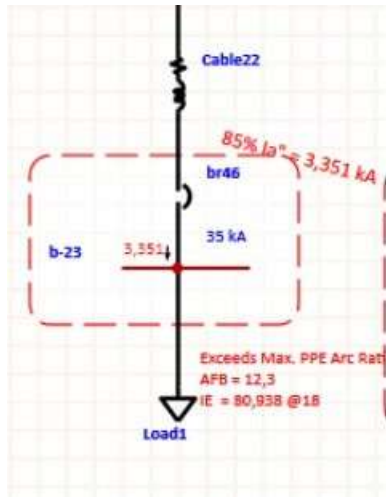


Figura 53. br46 con calibración actual

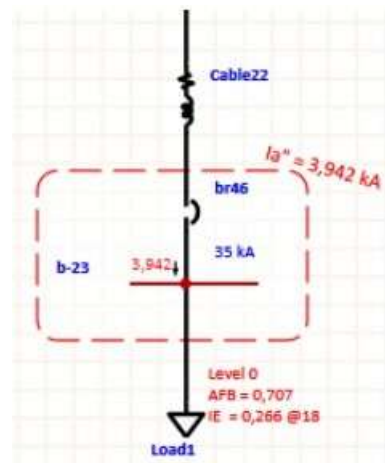


Figura 54. br46 con cambio de calibración modelado en ETAP

Se recomienda cambio de calibración de breaker br-46, para bajar nivel de riesgo a 0. Se puede modificar la calibración del mismo breaker pues este es variable.



Figura 55. Imagen real br46

Los valores propuestos para mejorar su calibración consisten en cambiar la corriente instantánea

lo cual permite controlar el disparo en cuanto a su rapidez.

Tabla 25. Calibración actual y recomendaciones breaker br46

Parámetro	Valor Inicial	Valor Final	Observación
Ir (Inominal ajustada)	1	1	Sin cambios.
Im (corriente de disparo instantáneo)	4000 A	2000 A	Reducción a la mitad en el umbral de disparo instantáneo.

5.15.5. Barra b-5a, con calibración actual de br31

El breaker br31 presenta un nivel de riesgo por arco de nivel 3, se puede mejorar la respuesta del cambiando el dispositivo de protección.

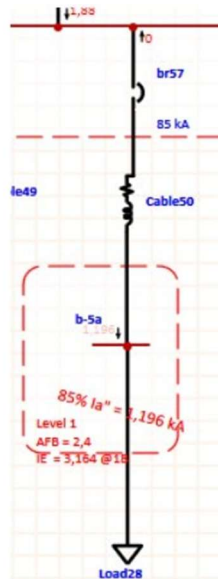


Figura 56. Br31 en ETAP

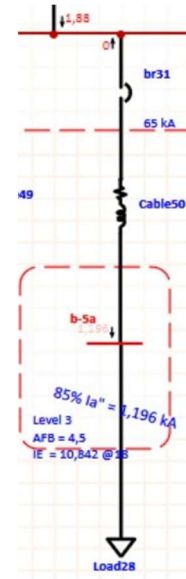


Figura 57. Br 31 con cambio de calibración

El breaker actual no permite regular el disparo de corriente instantánea, su nivel máximo es de 500A. Al cambiar el breaker por uno de 100 amperios podemos reducir el riesgo de arco, de esta forma se limita la magnitud del arco.



Figura 58. Fotografía real br31

5.15.6. Barra b-6a, con calibración actual de br32

El breaker actual presenta un nivel de riesgo por arco de 3, al tener calibración de corriente instantánea solo se recomienda cambiar la calibración para tener mayor selectividad.



Figura 59. br32 en ETAP

Requiere cambio de calibración de I_i del breaker desde $10I_n$ a $5I_n$, al ajustar la corriente de disparo instantáneo garantizamos que la corriente no va a exceder hasta 10 veces la nominal como está establecido actualmente. Ahora se limitará a 5 veces la nominal.



Figura 60. Fotografía real br32

Al modificar la corriente nominal obtenemos el riesgo asociado a arco eléctrico, bajando el nivel a 0, también la respuesta de este dispositivo será clave para proteger aguas abajo a transformadores y conductores.

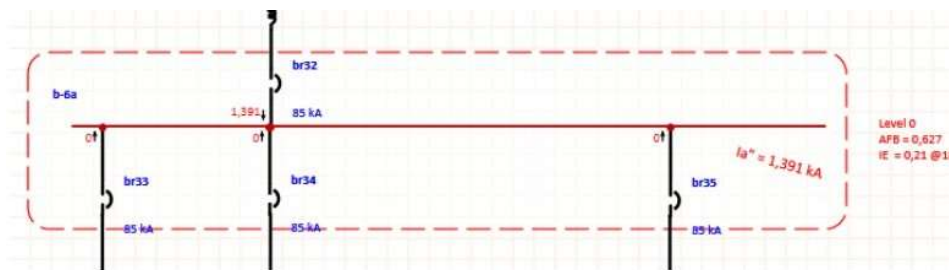


Figura 61. br32 con cambio de calibración

5.15.7. B-6, presenta un nivel de riesgo por arco que excede el nivel 4

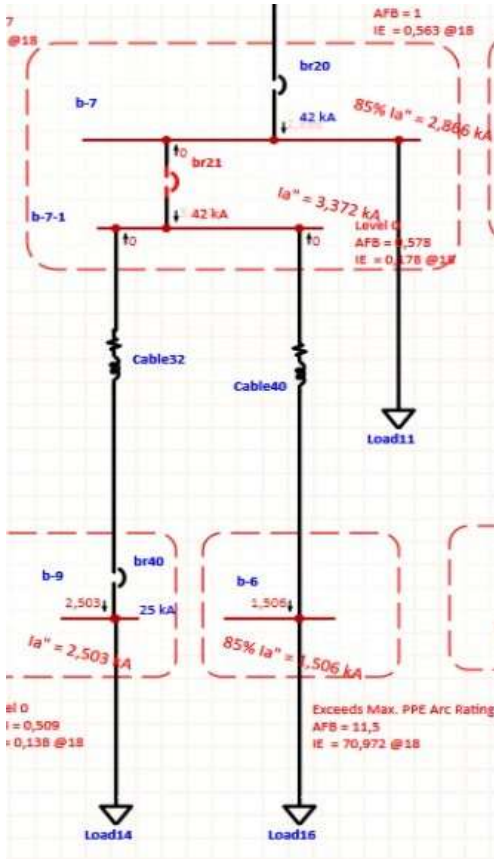


Figura 62. b6 en ETAP

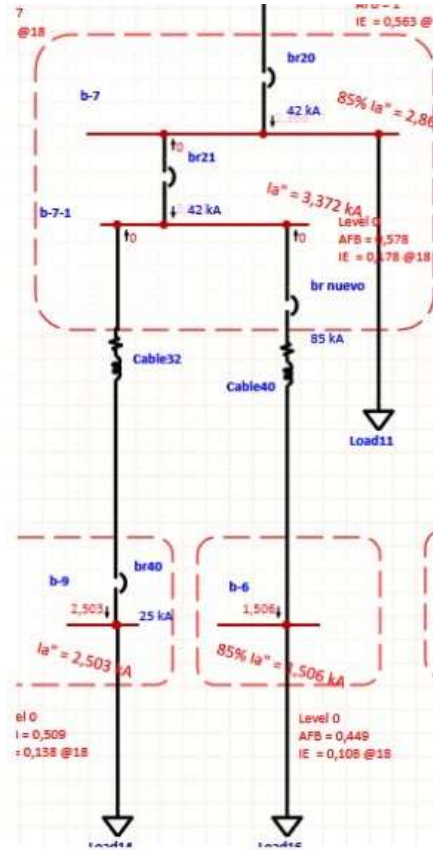


Figura 63. b6 con cambio de calibración

Este tablero tiene una protección fija compartida en b-7. No tiene una protección principal como tal en b-6, ya que se trata de un centro de carga. Se recomienda instalar una protección de 3P-80 amperios en b-7, con calibración de corriente instantánea máxima de 400 amperios con los cual se podrá bajar el riesgo a nivel 1.

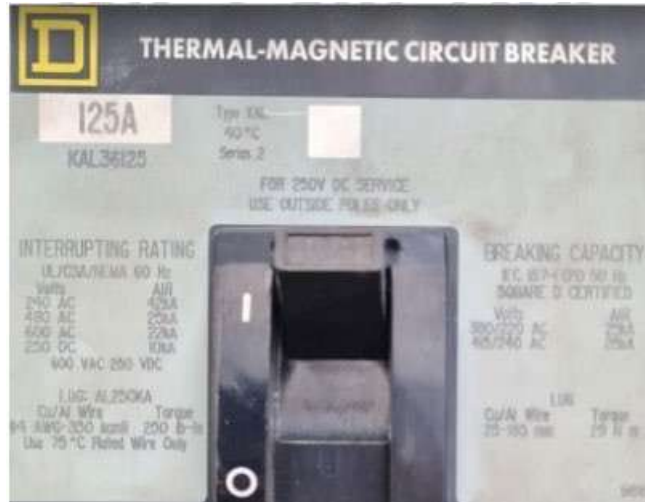


Figura 64. Fotografía real br39

Barra b-24, con calibración actual de br39 presenta un nivel de riesgo 4 por arco eléctrico debido a la calibración actual del breaker br39, esto indica que en tablero encontramos mucha energía incidente riesgosa para el personal y los equipos. Se debe procurar disminuir la energía incidente a 1.2 cal/cm^2 para clasificar como límite seguro a todo trabajo realizado en este tablero.

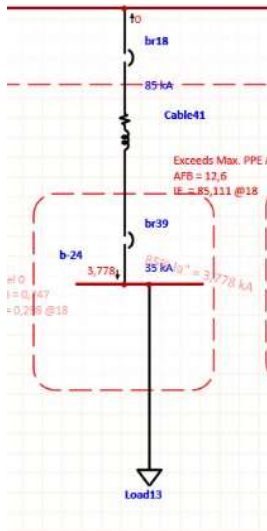


Figura 65. Br39 en ETAP

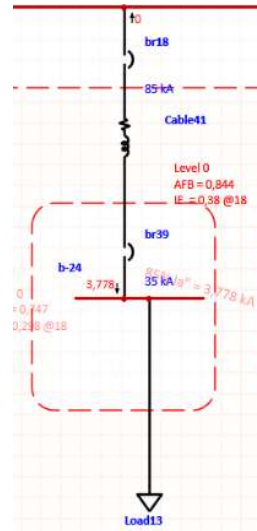


Figura 66. Br39 con cambio de calibración

Se requiere cambio de calibración de breaker br-39, para bajar nivel de riesgo a 0. Al realizar este cambio se ajusta la sensibilidad del breaker ante corriente de falla. De esta forma actuara de forma rápida limitando la energía liberada.



Figura 67. Fotografía real br39

La calibración actual y la recomendada para reducir la frontera de arco son las siguientes:

Tabla 26. Calibración actual y recomendación breaker br39

Parámetro	Valor Inicial	Valor Final
Ir (Inominal ajustada)	1	1
Im (corriente de disparo instantáneo)	4000 A	2000 A

5.15.8. Barra b-4, con calibración actual de br12

En la calibración actual del breaker br12 podemos encontrar un nivel de riesgo 4 según el estudio en ETAP, la corriente es crítica. A continuación, se argumenta la necesidad de cambiar la calibración del equipo para disminuir el riesgo a 0 todo esto en base a los resultados de la simulación.

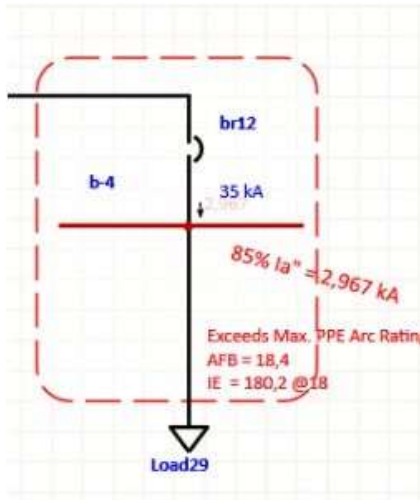


Figura 68. br12 en ETAP

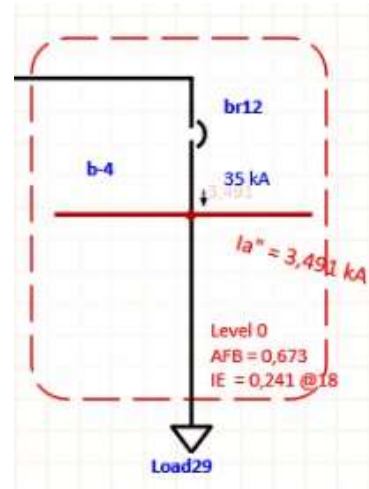


Figura 69. Br12 con cambio de calibración

Al cambiar la calibración del dispositivo de protección podemos mejorar el nivel de arco y disminuirlo hasta 0. Se debe cambiar la corriente instantánea de respuesta para poder controlar el

disparo y desconectar para impedir la expansión de energía incidente en el tablero.

Tabla 27. Calibración actual y recomendación breaker br12

Parámetro	Valor Inicial	Valor Final
Ir (Inominal ajustada)	1	1
Im (corriente de disparo instantáneo)	3200A	1600A



Figura 70. Imagen real br12

5.16. Análisis de los resultados de arco incidente, tablas resumen

La tabla resume cuales deben ser las acciones necesarias para reducir los niveles de riesgo por arco eléctrico, existen barras que tienen un nivel actual de riesgo 3, 4 o mayor. Los riesgos mayores representan un peligro crítico tanto para el personal como para los equipos. En este apartado se ha creado un resumen de cada acción necesaria dependiendo en la barra y el transformador. De esta manera se planea reducir el riesgo a valores manejables con equipo de protección personal, es decir disminuir el riesgo a 0 o 1.

Tabla 28. Resumen de acciones a seguir para disminuir nivel de riesgo por arco

	# Barra	Nivel actual riesgo por arco	Se requiere		Nivel final riesgo por arco
			Cambio de protección	Cambio de calibración	
	b-28c	mayor a 4	x		0
	b-29c	mayor a 4		x	0
Trafo 1	b-19ch	mayor a 4		x	0
	b-12a	mayor a 4	x		0
	b-3b	4	x		1
Trafo 2	b-4b	4	x		1
	b-tr3	mayor a 4		x	2
	b-11	mayor a 4		x	2
	b-20	3		x	2
	b-23	mayor a 4		x	0
	b-5a	3	x		0
	b-6a	3		x	0
Trafo 3	b-6	mayor a 4	x		0
	b-24	mayor a 4		x	0
	b-4b	mayor a 4		x	0

Considerando que por ahora solo se harán cambios de calibración en las protecciones y que quedarán pendientes los cambios o instalación de nuevas protecciones, definiremos el siguiente porcentaje según su riesgo en la instalación.

Tabla 29. Resumen de porcentaje de riesgo en instalación

Tipo de Nivel	Cantidad de barras	% según nivel
Nivel 0	81	70%
Nivel 1	22	19%
Nivel 2	7	6%
Nivel 3	1	1%
Nivel 4	2	2%
>Nivel 4	3	3%

De este análisis se puede concluir que aun cuando la mayoría de tableros tienen un nivel 0 y 1 de riesgo eléctrico también se aprecian tableros con nivel 2. Por lo cual se recomienda para las personas que van intervenir directamente en los tableros seleccionados se debe usar ropa de trabajo nivel 2.

En cuanto a los tableros que tienen niveles de riesgo por arco superiores a 3, y que son factibles de disminuir mediante la inserción de nuevas protecciones, se deberá establecer si las modificaciones recomendadas tardarían o no, ya que en caso contrario será necesario el uso de trajes de protección con nivel de riesgo 4 cuando se hagan intervenciones en los tableros que tienen esos niveles de riesgo.

5.17. Propuesta de ajuste de parámetros y limitaciones de implementación

Al obtener los resultados de los estudios de cortocircuito, coordinación de protecciones y cálculo de energía incidente realizados mediante el software ETAP, se identificaron y plasmaron en tablas resumen ciertos tableros y protecciones que presentan una configuración actual que puede mejorar para minimizar los niveles de riesgo por arco eléctrico. Se generaron propuestas de ajuste en las calibraciones y recomendaciones de cambio en algunos dispositivos que lo necesitan. Esta

información se encuentra en el informe técnico detallado por y para la empresa.

Un punto más a destacar es que durante la auditoria se identificó presencia de disyuntores fijos sin capacidad alguna de regulación de disparo, estos cuentan con disparo instantáneo. Esta condición representa una limitación significativa para el sistema eléctrico, ya que impide ajustar su comportamiento frente a cambios en la demanda, modificaciones en su configuración o incorporación de nuevos dispositivos o equipos. La imposibilidad de adecuar estos tiempos de disparo y sus umbrales de corriente se compromete la selectividad de las protecciones, lo que puede generar disparos no deseados ante corrientes elevadas de arranque o en caso de falla que se produzcan desconexiones extensivas afectando zonas que no deberían verse afectadas.

Sin embargo, es importante aclarar que conforme a la normativa NFPA70E y a los cambios de procedimientos internos de la planta Ferrero, la ejecución de ajustes, cambios de calibración o sustitución de protecciones no corresponde al auditor externo. Esta misma debe ser autorizada, planificada e implementada por el personal responsable de mantenimiento eléctrico de la empresa.

Por tal motivo, el documento en si uno incluye una versión actualizada del diagrama unifilar con los nuevos parámetros simulados, ya que dichos cambios no han sido implementados físicamente en la planta al cierre de esta auditoría.

Las propuestas quedan documentadas en forma de recomendaciones para su evaluación pertinente y eventual aprobación por parte del área técnica y proyectos de Ferrero.

5.18. Equipamiento para protección de choque y arco eléctrico

Los datos indicados en las etiquetas de Arc flash (valores calculados de energía incidente y EPP requerido) podrían quedar invalidados si el sistema de distribución de energía sufre cambios, por ejemplo: si en algún punto se agregan nuevas cargas o se migran las existentes; esto daría como resultado una nueva condición peligrosa.

Según los resultados presentados en el estudio de Arc flash, se recomienda la procura y disponibilidad al momento de realizar algún trabajo con equipos energizados, de los siguientes EPP para choque y arco eléctrico:

1. Se debe contar con dos sets de guantes tamaño 9, incluye lo siguiente:
 - Guantes aislantes de caucho para uso eléctrico clase 00 (500V).



Figura 71. Guantes aislantes de caucho clase 0

- Guantes protectores de cuero, para proteger de peligros mecánicos como cortes, pinchazos o abrasión mecánica



Figura 72. Forma de usar los guantes aislantes y mecánicos



Figura 73. Guantes protectores de cuero, mecánicos

Si se necesita trabajar dentro de un lugar con nivel de riesgo 4 se deberá usar guantes con un mayor nivel de protección.

En la tabla se especifica la clase que debe tener el guante de acuerdo con el trabajo a realizar.

Tabla 30. Clasificación de guantes según su clase

Clase	Voltaje de prueba	Voltaje máximo de uso	Aplicación típica
	AC (V)	AC (V)	
00	2 500	500	Baja tensión: tableros, control, instrumentación
0	5 000	1 000	Baja tensión: tableros, tableros de distribución
1	10 000	7 500	Baja-media tensión: distribución en plantas
2	20 000	17 000	Media tensión: celdas, subestaciones

			compactas
3	30 000	26 500	Media-alta tensión: transformadores, líneas MT/AT
4	40 000	36 000	Alta tensión: subestaciones, líneas energizadas

1. Bolsa para transporte y almacenamiento de los mismos
2. Un probador de guantes
 - Tipo portátil, este permitirá verificar que los guantes no presenten cortes mediante el inflado de los mismos, el guante se asegura al inflador con una cinta nylon y se sujeta con un cierre velcro. O se puede probar soplando dentro del guante.



Figura 74. Guantes dieléctricos clase 3 para trabajos en media y alta tensión. Tipo 1

3. Pértiga de rescate

Esta deberá estar equipada con gancho de arrastre, se usa para retirar a una persona herida del área con riesgo eléctrico, es importante tener este equipo a la mano cuando se realizan tareas en lugares confinados como salas de equipos de maniobra y tableros. Posee un mango aislante de FRP relleno con espuma, además cuenta con un gancho aislado de 460mm para tomar el operario del cuerpo y alejarlo de la zona peligrosa, su largo es de 1,8m.

4. Dos alfombras aislantes

- Estas se colocan permanentemente en el piso de los tableros principales de tictac y chocolate, brinda un nivel adicional de protección a los electricistas. Está hecha de caucho de alta calidad, sus dimensiones son 75ft y 3ft x ¼” probada a 17kV según la Norma ASTM D178, Clase 2. Catalogo Grainger #Item 3BY57, marca Notrax o similar.

5. Dos conjuntos de equipamiento de protección personal contra arco eléctrico

Estos equipos deben venir con clasificación ATPV 8 cal/cm², Categoría 2 del Catálogo de Grainger # Item 30L120, marca Salisbury o similar. Dentro del conjunto se debe tener en cuenta que debe contener

- Carreta con protector de mentón, soporte universal se adapta mediante correa plástica a los cascos rígidos
- Casco rígido de ala frontal tipo dieléctrico ANSI 289.1-2003 Tipo I clase E, con suspensión de 4 puntos de rápido ajuste
- Capucha de protección contra arcos, crea una zona de protección de 360 grados para cabeza y cuello.



Figura 75. Casco rígido, capucha de protección contra arco

- Overol con nivel de protección de arco categoría 2
 - Lentes de seguridad transparentes armazón gris, con anti-rayas, anti-empano y antiestáticas con 99,9%, de protección ultravioleta. Cumplen con las normas ANSI Z87.1, 2003.
6. Dos pares de zapatos dieléctricos
- Tomar en cuenta que la resistencia de estos deberá ser mayor a 1×10^9 ohms



Figura 76. Zapatos dieléctricos

7. Traje dieléctrico completo.



Figura 77. Equipamiento para protección de choque y arco eléctrico

5.19. Etiquetas NFPA70E

Las etiquetas son una parte fundamental dentro del estudio propuesto, son parte de la acción técnica establecida por la norma. Son elementos visuales prácticos encargados de proporcionar

información clara y detallada y sobre todo comprensible sobre los riesgos de arco eléctrico y las medidas de seguridad necesarias.

La norma en el artículo 130 sección 130.7 (Trabajos que involucran peligros eléctricos) establece que se debe etiquetar equipos o materiales con el fin de controlar la exposición del personal ante los peligros de la energía incidente. Esto se obtiene al culminar el estudio en su totalidad. El propósito de etiquetar es advertir a los empleados sobre el riesgo eléctrico presente en cada tablero eléctrico [2].

Dentro de cada etiqueta podemos encontrar información relevante como la energía incidente, la cual es la intensidad del arco a una distancia específica, límites de protección la cual es la distancia a la cual la energía incidente iguala el valor de $1,2 \text{ cal/cm}^2$, el EPP requerido el cual se separa por niveles del 1-4 como se mencionó con anterioridad.




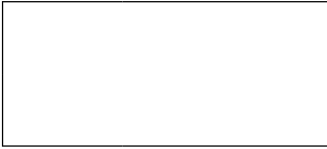
		ADVERTENCIA	
Riesgo de Choque y Arco Eléctrico Se requiere EPP apropiado			
Protección Contra Arco		Protección Contra Choque 220 VAC	
Categoría de Peligro por Arco	0	Peligro de CHOQUE cuando las cubiertas han sido removidas.	
Energía Incidente (cal/cm ²)	0,81	Borde de Acercamiento Limitado	1,00 m.
Límite de Protección Contra Arco	038 m.	Límite de Acercamiento Restringido	0,30 m.
Camisa manga larga de algodón no tratado o jean. Pantalones largos de algodón no tratado o jeans.		Guantes de PP	Clase 00
		V-Rating	500 VAC
Barra Nro: b-1ch	Equipo: Tablero Transformador 1	MAX ICC: 10,28 (Ka)	
Realizado por: Ing. Marco Polo Quevedo		Fecha: agosto 2024	
IMPORTANTE: Solo personal calificado, usando los EPP para CHOQUE y ARCO ELÉCTRICO adecuados, así como las herramientas y procedimientos autorizados pueden intervenir en este equipo.		Estudio Realizado Por:  www.orionscc.com Telf: 02 352 5862 / 0997 143 997	

Figura 78. Etiqueta de riesgo de choque y arco eléctrico

Tabla 31. Modelo de etiqueta según la norma NFPA70E en excel

b-1ch			
Protección Contra Arco			Protección Contra Choque 220Vac
Categoría de Peligro por Arco	0		Peligro de CHOQUE cuando las cubiertas han sido removidas
Energía Incidente (cal/cm²)	0,81		
Límite de Protección Contra Arco (m)	0,38		
			Borde de acercamiento limitado 1,0 m
Camisa manga larga de algodón no tratado o jean			Límite de acercamiento restringido 0,3 m
Pantalón de algodón no tratado o jeans			Guantes Clase00 V-Rating. 500Vac
BARRA #:	b-1ch		
EQUIPO:	tablero del transformador 1		
Max Icc (Ka):	10,28		
O/C:	455011001 1	Ingeniero: Marco Polo Quevedo	Fecha: agosto 2024
Importante: Solo personal calificado, usando los EPP para CHOQUE y ARCO ELECTRICO adecuados, así como las herramientas y procedimientos autorizados pueden intervenir en este equipo.			ORION SCC 

Esta etiqueta permitirá tanto al personal propio que opera y mantiene la maquinaria como a los proveedores externos tener en claro el nivel de riesgo existente en cada tablero y el nivel de protección en cada uno de ellos.

El dpto. de seguridad industrial previo la autorización para la ejecución de trabajos en tableros eléctricos revisara si los EPP están de acuerdo con el nivel de riesgo calculado y descrito en cada tablero mediante la etiqueta adhesiva.



Figura 79. Etiquetas reales en TR1 y TR2



Figura 80. Etiqueta real tablero 6b Trafo 2



Figura 81. Etiquetas reales cámara de transformación TR3

5.20. Acciones de mitigación específicas basadas en los datos recolectados

A partir de los resultados previamente obtenidos durante las mediciones de campo y las simulaciones, se identificaron varios riesgos eléctricos asociados a niveles elevados de energía incidente. Con base a estos hallazgos se establecieron acciones de mitigación específicas orientadas a reducir riesgos y mejorar la confiabilidad.

Estas acciones se presentan en la siguiente tabla, en la cual se relaciona los datos recolectados, los riesgos y la acción recomendada conforme la Norma NFPA70E.

Tabla 32. Acciones de mitigación específicas basadas en datos recolectados

NDato Recolectado	Riesgo Detectado	Acción de Mitigación
1 Energía incidente de 11,5 cal/cm ² en tablero TR2 1 barra B29C	Quemaduras graves por arco eléctrico	Ajustar el tiempo de disparo del breaker BR-101 de 0,3 s a 0,1 s. Uso obligatorio de EPP categoría 4 y delimitación física de zona de trabajo con señalización NFPA 70E.
2 Energía incidente de 8,2 cal/cm ² en tablero TR1 2 barra B28C	Exposición a relámpago de arco	Modificar el ajuste de tiempo de disparo del breaker BR-56 de 0,4 s a 0,15 s. Implementar señalización reflectiva y establecer fronteras de protección según norma.
3 Desbalance de tensiones superior al 3% en transformador TR3	Calentamiento y deterioro acelerado de equipos	Realizar balanceo de cargas en el tablero correspondiente y establecer un plan de monitoreo mensual de calidad de energía.
5 Caída de tensión del 15% durante arranque de motores en TR1	Riesgo de disparo de breaker y daños en motor	Configurar relés de mínima tensión con ajustes adecuados y establecer una secuencia de arranque escalonada para motores de gran capacidad.

6	Fronteras de relámpago de arco superiores a 1,5 m en varios tableros	Exposición de personal no calificado a zonas de riesgo	Colocar barreras físicas tipo malla dieléctrica, demarcación visible en piso y señalización reflectiva de advertencia en zonas de acceso restringido.
---	--	--	---

5.21. Resumen puntos clave de la NFPA70E aplicados

Tabla 33. Resumen de artículos de la Norma NFPA70E aplicados

N	Apartado NFPA 70E	Descripción	Aplicación en el proyecto
1	Art. 110.5(H)	Se requiere realizar una evaluación de riesgo estructurada antes de intervenir instalaciones energizadas.	Se elaboró una matriz de riesgos eléctricos para tareas críticas en planta Ferrero Tumbaco. Ubicado en la sección 4.4.6
2	Art. 130.4	Evaluación de riesgo de choque de protección.	Se calcularon fronteras de aproximación y se establecieron distancias seguras en tableros. Ubicado en la sección 3.2.1.
3	Art. 130.5	Evaluación de riesgo de arco eléctrico, cálculo de energía incidente y definición de EPP.	Se realizó el estudio de arco eléctrico con software ETAP y se determinó el nivel de EPP requerido en cada tablero según la categoría de arco presente. Ubicado en la sección 6.8.
4	Art. 130.7	Uso obligatorio de EPP según energía incidente calculada y categoría de riesgo.	Se estableció la categoría de EPP por tablero y se recomendó etiquetado de seguridad. Ubicado en la sección 6.14.

5	Art. 110.1 Implementación de procedimientos documentados para trabajos energizados.	Se propuso una secuencia de trabajo segura según NFPA 70E para trabajos en planta. Ubicado en la sección 6.15.
6	Art. 130.3 Etiquetado de advertencia de peligro eléctrico y nivel de EPP.	Se etiquetaron los tableros con datos de riesgo de choque y arco eléctrico. 8.

5.22. Cumplimiento de la norma NFPA 70E pre y post de la auditoría

Tabla 34. Resumen sistemático de la norma NFPA70E

Requisito NFPA 70E	Descripción
Evaluación de riesgo eléctrico	Realizar estudios de arco eléctrico y cortocircuito para identificar riesgos.
Determinación de categorías de EPP	Definir la categoría de ropa y equipo según la energía incidente calculada.
Etiquetado de tableros	Colocar etiquetas de advertencia con categoría de peligro de arco y distancias.
Distancias de aproximación límite y restringida	Definir y señalar distancias de seguridad según energía incidente.
Procedimiento de bloqueo y etiquetado (LOTO)	Establecer procedimientos formales para desenergizar y aislar equipos.

Mantenimiento periódico de protecciones

Verificar calibraciones y funcionamiento de interruptores y relés de protección.

Tabla 35. Tabla comparativa de cumplimiento — Antes y Después del Proyecto

Requisito NFPA 70E	Situación Antes	Situación Después del Proyecto
Evaluación de riesgo eléctrico	No se contaba con estudio de arco ni actualización de cortocircuito.	Se realizó estudio completo de arco y cortocircuito en ETAP.
Determinación de categorías de EPP	No definidas ni documentadas.	Definidas en función de energía incidente, categorizadas por tablero.
Etiquetado de tableros	Etiquetas ausentes o desactualizadas.	Instaladas etiquetas con categoría de peligro de arco y distancias en TR1, TR2, Tableros A y B. Falta TR3.
Distancias de aproximación límite y restringida	No señalizadas.	Definidas en estudio; aún no señalizadas físicamente en planta.
Procedimiento de bloqueo y etiquetado (LOTO)	No documentado formalmente.	Recomendado en informe técnico para su implementación.
Capacitación en seguridad eléctrica	Capacitación general sin enfoque específico en riesgo de arco.	Recomendación para capacitación específica en arco eléctrico y uso de EPP.
Mantenimiento periódico de protecciones	Sin registro de mantenimientos ni calibraciones actualizadas.	Calibraciones actualizadas en este proyecto y recomendación de mantenimiento anual.

6. ANÁLISIS DE CALIDAD DE ENERGÍA

El análisis de calidad de energía consiste en evaluar la energía suministrada por parte de la empresa eléctrica estableciendo límites para verificar si cumple con las condiciones mínimas de estabilidad y continuidad. Esto ayuda a verificar la calidad de la red necesarias para que los equipos funcionen de forma eficiente y segura previniendo fallos. Dentro de este apartado se usará la norma EN50160 equivalente a la norma IEEE 1159.

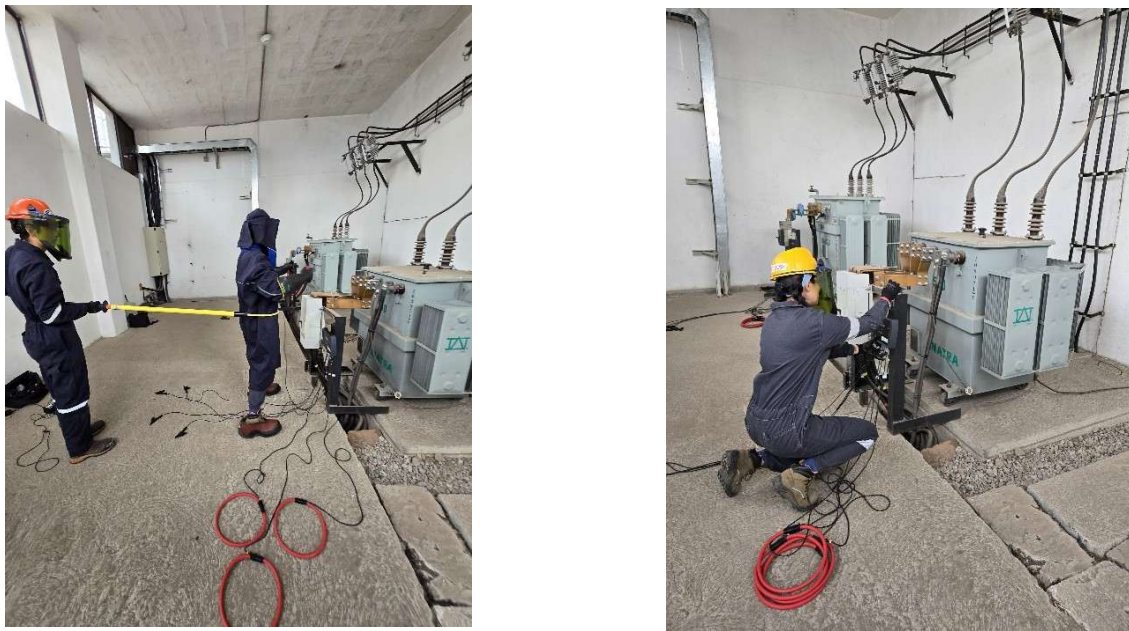


Figura 82. Conexión con traje de arco eléctrico del analizador

Dentro de la Norma EN50160 se especifica que la medición de calidad debe tener una medición con granularidad de 10 minutos los cuales deben ser evaluados durante un periodo de 7 días para determinar el cumplimiento de los valores establecidos dentro de los límites propuestos por la norma.

Para llevar a cabo el análisis de calidad de energía, se empleará el Myebox 1500, este es un analizador portátil el cual se especifica con detalle en la sección 4.4.6 Analizadores de Calidad, es

una herramienta principal en una metodología de monitoreo y auditoría eléctrica que permite registrar parámetros nominales dentro de la planta entre las funciones elegidas para este análisis en particular se puede encontrar la monitorización de voltaje, corriente, frecuencia, potencias y armónicos.

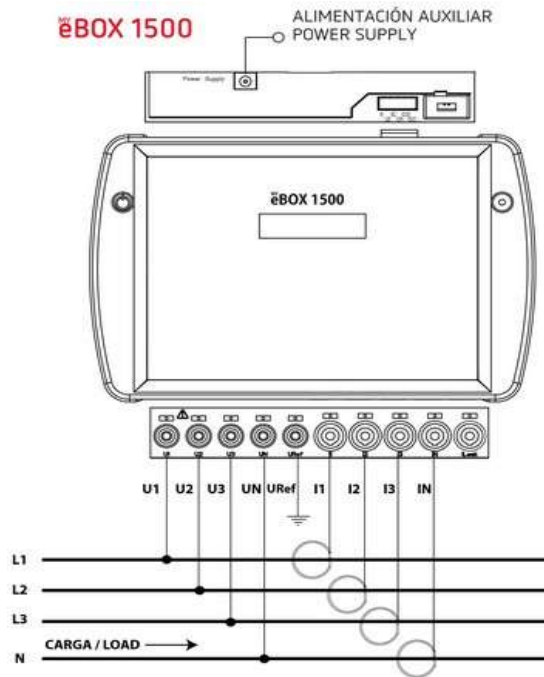


Figura 83. Conexión red trifásica a 4 hilos

6.1. Transformador 1 220V 500KVA

- Magnitud del Voltaje, +/- 10% del voltaje nominal durante el 95% de las mediciones: El voltaje fluctúa desde el +10% al -10%. Esta dentro de los límites establecidos por la norma.

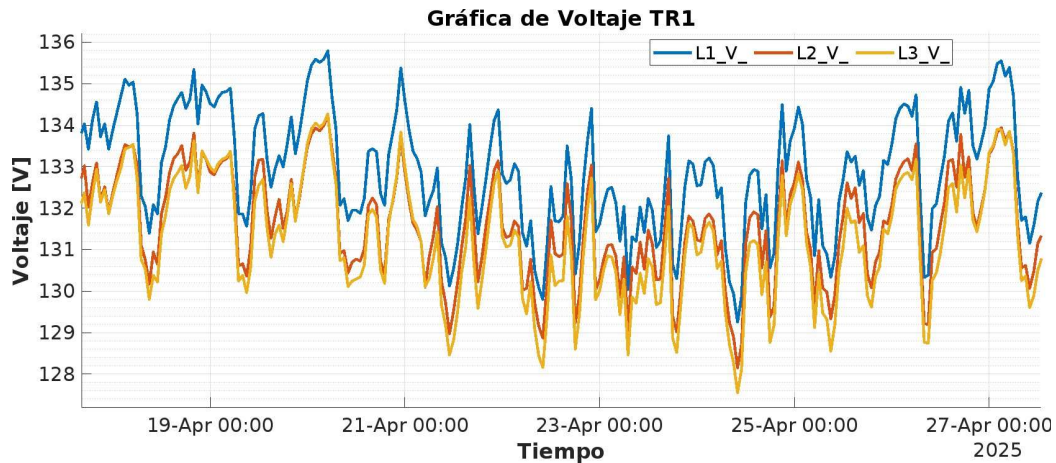


Figura 84. Voltaje fase-neutro transformador 1

- Distorsión armónica total en voltaje, THD: $< 5\%$: el THD en Voltaje se encuentra en un valor promedio de 1.09%
- Distorsión armónica total en corriente, THD: $< 8\%$: el THD en Corriente se encuentra en un valor promedio de 2.44%, el valor está dentro de la norma
- Frecuencia: Hz: $> 59,4\text{hz} < 60,6\text{hz}$ en el 99,5% de la medición: La frecuencia se encuentra en un valor de 59.99 hz el 99.5% del tiempo, por lo que está dentro de la norma.
- Flicker: Pst menor a 1 en el 95% de la medición: el valor de PST es de 0.07
- No se registraron eventos de calidad dentro de la medición de 10 minutos.

Tabla 36. Voltajes promedio trafo 1 fase-fase

VOLTAJES PROMEDIOS		
Rango de voltaje: 198<220>242 voltaje fase-fase		
	V	Cumple
Fase 1	226.14	OK
fase 2	225.34	OK
Fase 3	226.33	OK

Tabla 37. Voltajes promedio trafo 1 fase-neutro

VOLTAJES PROMEDIOS		
Rango de voltaje: 115<127>139.7 voltaje fase-neutro		
	V	Cumple
Fase 1	131.44	OK
fase 2	130.69	OK
Fase 3	129.90	OK

Tabla 38. THD en corriente transformador 1

% THD EN CORRIENTE		
Max THD A Permitido: < 8%		
	Fase 1	Fase 1
Fase 1	Fase 1	Fase 1
fase 2	fase 2	fase 2
Fase 3	Fase 3	Fase 3

Tabla 39. THD en voltaje transformador 1

% THD EN VOLTAJE		
Max THD V Permitido: < 5%		
	V	Cumple
Fase 1	1,02%	OK
fase 2	1,17%	OK
Fase 3	1,09%	OK

Tabla 40. Flicker PST transformador 1

FLICKER PST		
Max Permitido 1		
	PST	Cumple
Fase 1	0,07	OK
fase 2	0,07	OK
Fase 3	0,07	OK

Tabla 41. THD en voltaje transformador 1

FRECUENCIA		
Hz: > 59,4hz < 60,6hz en el 99,5% de la medición		
	HZ	Cumple
Sistema	59.99	Ok

Tabla 42. Potencias transformador 1

POTENCIAS MAX				
	L1	L2	L3	LIII
Potencia Activa (kW)	72	79	79	231
Potencia reactiva capacitiva (kvarC)	35	0	0	35
Potencia reactiva inductiva (kvarL)	34	29	36	100
Potencia Aparente(kva)	80	84	87	252

Todos los valores encontrados en el transformador 1 están dentro del rango permitido por la norma, cumplen con el criterio de que al menos 95% de los valores estén dentro del rango. El valor medio y los picos de flicker están muy por debajo del valor máximo permitido de 1, lo cual indica que no hay ningún síntoma notable como parpadeo en el sistema en general. Todas las fases presentan valores dentro del rango permitido por la norma, su valor medio es de 0,07 al hablar de PST lo que da como resumen un 95% de valores aceptables. No existen fluctuaciones transitorias de tensión.

En cuanto a la calidad de frecuencia hay que tener mucho cuidado con las desviaciones de esta pues puede afectar el rendimiento de toda la planta, en el análisis podemos evidenciar que la frecuencia promedio es de 59.996 Hz un valor dentro del rango completamente aceptable. Los armónicos son múltiplos de la frecuencia fundamental como anteriormente lo establecimos, un alto contenido armónico este produce sobrecalentamiento, distorsión o fallas en equipos. En nuestra medición todos los armónicos de tensión evaluados desde el No. 2 hasta el No. 17 para las tres fases presentan un valor del 100% correcto. Todos son considerados bajos, buena calidad de distorsión armónica.

6.2. Transformador 2 380V 800KVA

- Magnitud del Voltaje, +/- 10% del voltaje nominal durante el 95% de las mediciones: El voltaje fluctúa desde el +10% al -10%. Esta dentro de los límites

establecidos por la norma.

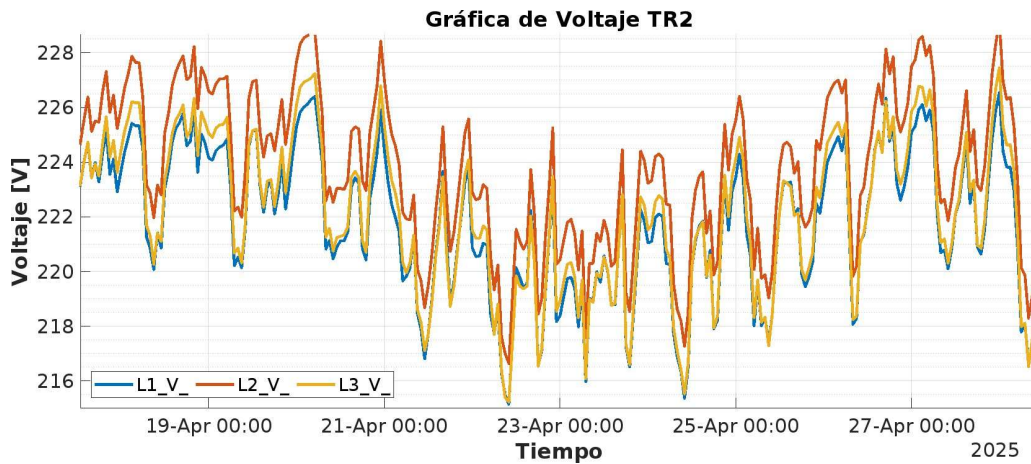


Figura 85. Voltaje fase-neutro transformador 2

- Distorsión armónica total en voltaje, THD: $< 5\%$: el THD en Voltaje se encuentra en un valor promedio de 1.083%
- Distorsión armónica total en corriente, THD: $< 8\%$: el THD en Corriente se encuentra en un valor de 6.58%, el valor está dentro de la norma
- Frecuencia: Hz: $> 59,4\text{hz} < 60,6\text{hz}$ en el 99,5% de la medición: La frecuencia se encuentra en un valor de 60.007 hz el 99.5% del tiempo, por lo que está dentro de la norma.
- Flicker: Pst menor a 1 en el 95% de la medición: el valor de PST es de 0.08
- No se registraron eventos de calidad dentro de la medición de 10 minutos

Las mediciones presentadas en la tabla 41 y 42 corresponden a un sistema trifasico alimentado desde un transformador de 800KVA con un voltaje en su secundario de 380V. Este tipo de

configuración permite tener tres fases eléctricas de las cuales se pueden obtener dos mediciones tanta fase y neutro y entre fases.

De acuerdo con la relación característica de un sistema trifásico.

Ecuación 3 Ec. característica de un sistema trifásico

$$V_f = \frac{V_{ll}}{\sqrt{3}} \quad (3)$$

Siendo en este caso el voltaje fase-fase 380V, se obtiene como voltaje fase-neutro 220V aproximadamente lo cual concuerda con los valores de las tablas 41 y 42, confirmando que las mediciones corresponden a voltajes de un sistema trifásico equilibrado con variaciones admisibles según la norma EN50160.

Tabla 43. Voltajes promedio trafo 2 fase-fase

Tabla 44. Voltajes promedio trafo 2 fase-neutro

VOLTAJES PROMEDIOS			VOLTAJES PROMEDIOS		
Rango de voltaje: 342<380>418 fase- fase			Rango de voltaje: 197<220>242 fase - neutro		
	V	Cumple		V	Cumple
Fase 1	384,5	OK	Fase 1	220,74	OK
fase 2	384,17	OK	fase 2	222,44	OK
Fase 3	381,51	OK	Fase 3	220,77	OK

Tabla 45. THD en voltaje transformador 2

% THD EN VOLTAJE		
Max THD V Permitido: < 5%		
	V	Cumple
Fase 1	1,09%	OK
fase 2	1,04%	OK
Fase 3	1,12%	OK

Tabla 46. Frecuencia transformador 2

FRECUENCIA		
Hz: > 59,4hz < 60,6hz en el 99,5% de la medición		
	Hz	Cumple
Sistema	60,007	OK

Tabla 47. Flicker PST transformador 2

FLICKER PST		
Max Permitido 1		
	PST	Cumple
Fase 1	0,08	OK
fase 2	0,08	OK
Fase 3	0,08	OK

Tabla 48. THD en corriente transformador 2

% THD EN CORRIENTE		
	%	Cumple
Fase 1	6,29%	OK
fase 2	6,77%	OK
Fase 3	6,67%	OK

Tabla 49. Potencias transformador 2

POTENCIAS MAX				
	L1	L2	L3	LIII
Potencia Activa (kW)	60	65	64	190
Potencia reactiva capacitiva (kvarC)	0	0	0	0
Potencia reactiva inductiva (kvarL)	39	44	36	120
Potencia Aparente(kva)	72	79	74	226

La calidad en tensión es constante se mantiene dentro de los límites establecidos por norma, la estabilidad de tensión es buena el 95% del tiempo se mantiene cerca del valor base. El flicker Plt, la percepción a largo plazo está por debajo de 1 lo que indica que no existen problemas significativos de flicker. Por otro lado, tenemos el flicker Pst, la percepción a corto plazo. Al igual que el Plt estos valores son muy bajos tampoco existen problemas a corto plazo. En general los valores del transformador cumplen con lo establecido por norma el 95% del tiempo.

6.3. Transformador 3 220V 120KVA

- Magnitud del Voltaje, +/- 10% del voltaje nominal durante el 95% de las mediciones: El voltaje fluctúa desde el +10% al -10%. Esta dentro de los límites establecidos por la norma.

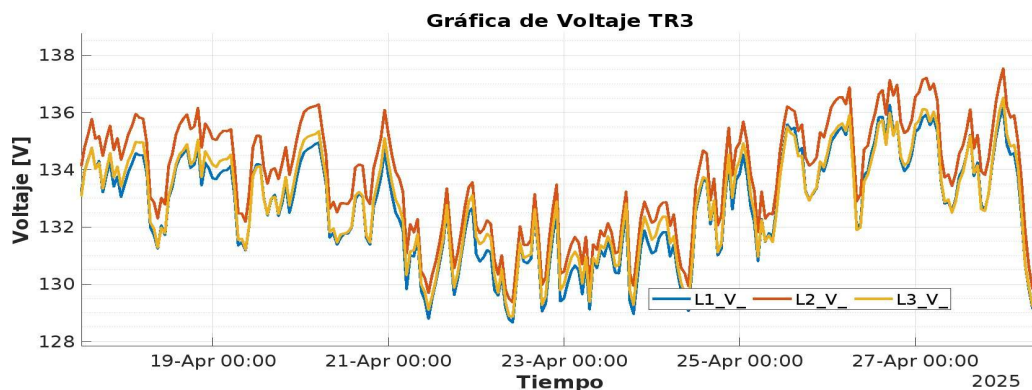


Figura 86. Voltaje fase-neutro transformador 3

- Distorsión armónica total en voltaje, THD: < 5%: el THD en Voltaje se encuentra en un valor promedio de 1.27%
- Distorsión armónica total en corriente, THD: < 8%: el THD en Corriente se encuentra en un valor de 13.53%, el valor está por fuera de la norma

- Frecuencia: Hz: $> 59,4\text{hz} < 60,6\text{hz}$ en el 99,5% de la medición: La frecuencia se encuentra en un valor de 59.99 hz el 99.5% del tiempo, por lo que está dentro de la norma.
- Flicker: Pst menor a 1 en el 95% de la medición: el valor de PST es de 0.07
- Se registra distorsión armónica como evento de calidad.

Tabla 50. Voltajes promedio trafo 3 fase-fase

VOLTAJES PROMEDIOS		
Rango de voltaje: 198<220>242 fase-fase		
	V	Cumple
Fase 1	200,1	OK
fase 2	198,26	OK
Fase 3	198,67	OK

Tabla 51. Voltajes promedio trafo 2 fase-neutro

VOLTAJES PROMEDIOS		
Rango de voltaje: 115<127>139.7 fase-neutro		
	V	Cumple
Fase 1	115,59	OK
fase 2	115,31	OK
Fase 3	113,74	NO OK

Tabla 52. THD en voltaje transformador 3

% THD EN VOLTAJE		
Max THD V Permitido: < 5%		
	V	Cumple
Fase 1	1,28%	OK
fase 2	1,25%	OK
Fase 3	1,28%	OK

Tabla 53. THD en corriente transformador 3

% THD EN CORRIENTE		
Max THD A Permitido: < 8%		
	%	Cumple
Fase 1	12,55%	NO OK
fase 2	16,05%	NO OK
Fase 3	11,99%	NO OK

Tabla 54. THD en voltaje transformador 3

FLICKER PST		
Max Permitido 1		
	PST	Cumple
Fase 1	0,07	OK
fase 2	0,07	OK
Fase 3	0,07	OK

Tabla 55. THD en voltaje transformador 3

FRECUENCIA		
Hz: > 59,4hz < 60,6hz en el 99,5% de la medición		
	Hz	Cumple
Sistema	60,005	OK

Tabla 56. Potencias transformador 3

POTENCIAS MAX				
	L1	L2	L3	LIII
Potencia Activa (kW)	13	12	14	40
Potencia reactiva capacitiva (kvarC)	22	22	24	70
Potencia reactiva inductiva (kvarL)	0	0	0	0
Potencia Aparente(kva)	24	23	25	73

La calidad en tensión se mantiene dentro de los límites establecidos por norma, presentando una estabilidad similar el 95% del tiempo, los niveles de flicker Plt en una percepción a largo plazo se mantienen por debajo de 1. No obstante, se identificó insatisfacción en la medición del THD total de corriente el cual sobrepasa el valor establecido de <8% superando el rango. El resto de los valores cumplen con lo establecido.

7. CONCLUSIONES

La auditoría eléctrica permite conocer y cumplir con estándares internacionales haciendo un entorno seguro, reduce riesgos asociados a sistemas eléctricos energizados. Donde se pudo reconocer áreas de riesgo alto, como tableros y puntos vulnerables donde se debe usar un equipo de protección personal EPP especial.

Los ajustes propuestos al realizar los estudios establecidos permiten mejorar la confiabilidad del sistema, se debe mantener la operatividad del sistema procurando no arriesgar la seguridad de las personas por lo cual la respuesta eficiente de los dispositivos de protección es esencial, la coordinación de protecciones permite ofrecer selectividad y eficiencia. De esta forma se reduce significativamente los riesgos ante fallas eléctrica.

Al usar un software para simular escenarios se logró integrar una modelación dinámica la cual permite ver la respuesta del sistema en tiempo real y analizar de manera precisa los estudios mencionados, así se mejora el tiempo y la precisión de los resultados.

A pesar de los avances logrados, existieron limitaciones las cuales se describen como ausencia de información de componentes específicos dentro del sistema, lo cual obligó a asumir valores promedio. Además, la implementación total del proyecto, es decir la incorporación de nuevos equipos o el cambio de calibración dependerá de la inversión y el compromiso por parte de la empresa.

La implementación de etiquetas con información de energía incidente y los riesgos asociados a choque y arco eléctrico garantiza seguridad al personal en zonas de trabajo electrificadas.

8. RECOMENDACIONES

Se recomienda brindar programas de capacitación en base a la norma NFPA70E, estos orientados a los empleados que trabajen cerca de zonas electrificadas. Con tema principal operación segura de los sistemas eléctricos y el uso adecuado de los EPP

En el apartado de “Equipamiento para protección de choque y arco eléctrico, se debe tener en cuenta que cada equipo necesita cuidados y manipulación especial según su característica. Por lo cual se recomienda adiestramiento practico periódico enfatizando el uso adecuado de estos mismos.

Implementar mantenimientos preventivos a dispositivos de protección, asegurando su funcionamiento adecuado en operación, estos elementos pueden fallar en condiciones críticas lo cual aumenta la probabilidad de accidentes eléctricos daños a equipos e interrupciones operativas; el mantenimiento preventivo ayuda a reducir estas probabilidades y garantizan que estos respondan correctamente.

Realizar auditorías periódicas para identificar nuevas áreas críticas, este cálculo de riesgos eléctricos es válido si el sistema eléctrico se mantiene en cuanto a potencia y configuración. Cualquier cambio en ellas requerirá una actualización del cálculo de riesgo.

Permanecer al día con las actualizaciones de la norma NFPA70E, las actualizaciones incorporan mejores prácticas y aprendizajes actualizados de incidentes eléctricos adaptándose a las nuevas tecnologías.

9. BIBLIOGRAFIA

- [1] A. C. Chacón Muñoz, “Estudio de accidentes eléctricos y peligro del arco eléctrico: introducción a un programa de seguridad eléctrica,” *Cienc. y Trab.*, vol. 17, no. 53, pp. 122–127, 2015. [Online]. Available: <https://scielo.conicyt.cl/pdf/cyt/v17n53/art05.pdf>
- [2] International Electrical Safety & Reliability Consultants, NFPA 70E. Estados Unidos, 2018, p. 118. [Online]. Available: <https://www.nfpa.org/es/codes-and-standards/nfpa-70e-standard-development/70e>
- [3] E. Hoagland, M. Golovkov, C. Maurice, and P. Clark, “Clothing in Arc Flash: Four Types of Arc Exposure and the Effect of Moisture on Garment Appearance After an Arc Event,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 50, no. 4, pp. 2370–2374, 2014, doi: 10.1109/TIA.2014.2300414.
- [4] S. Electric and M. Gerin, “Seminario de Calidad de energía,” Schneider Electric, Merlin Gerin, p. 65, 2000. [Online]. Available: http://automata.cps.unizar.es/bibliotecaschneider/BT/Calidad/Calidad_de_Energia.pdf
- [5] R. Pinyol, “Armónicos: Causas, Efectos Y Minimización,” *Salicru*, vol. 2, no. 2, pp. 1–32, 2016. [Online]. Available:

https://www.salicru.com/files/pagina/72/278/jn004a00_whitepaper-armonics_.pdf

[6] M. A. Sánchez, “Calidad de la Energía Eléctrica,” p. 492, 2009. [Online]. Available: <https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/54642250/libro-de-calidad-de-energia2.pdf>

[7] J. Cadick, M. Capelli-Schellpfeffer, and D. Neitzel, Electrical Safety Handbook. McGraw-Hill, 2006. [Online]. Available: <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9781260134858>

[8] M. Villar, “Seguridad eléctrica: efectos de la corriente eléctrica sobre el cuerpo humano,” *Energuaia*, pp. 51–59, 2018. [Online]. Available: <https://www.ing.unp.edu.ar/electronica/asignaturas/ee016/anexo/s-BIB851.pdf>

[9] G. T. Cole and J. Knoll, “Electrical Shock Sequela,” *IEEE IAS Electr. Saf. Work.*, vol. 2022-March, pp. 1–7, 2022, doi: 10.1109/ESW49146.2022.9925032.

[10] N. Ichikawa, “Electrical Fatal Accident By Electric Shock and Epidemiology in 2018,” *2024 IEEE IAS Electr. Saf. Work.*, pp. 216–221, 2024, doi: 10.1109/ESW52258.2024.10752755.

- [11] Q. J. C. Barrantes, “Estudio de cortocircuito y coordinación de protecciones en CVG ALUNASA,” p. 165, 2014. [Online]. Available: <https://ruie.ucr.ac.cr/catalogo/Record/INII-UIR-CD-13557/Description>
- [12] X. Luo, Q. Xiao, Q. Wang, W. Gan, B. Deng, and C. Fang, “Research on Short-Circuit Force of Distribution Transformer Based on Short-Circuit Test by Single-Phase Power and Three-phase Power,” 2021 3rd Asia Energy Electr. Eng. Symp. (AEEES), pp. 89–93, 2021, doi: 10.1109/AEEES51875.2021.9403173.
- [13] A. Valdivieso, “Análisis de cortocircuito en un sistema industrial bajo normativas ANSI e IEC, simulados en DIgSILENT PowerFactory,” Universidad Politécnica Salesiana, 2024. [Online]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/28685>
- [14] L. A. Meza, “Construcción de monitor de falla a tierra para sistemas de C.A,” Universidad Autónoma del Estado de México, 2016. [Online]. Available: https://www.academia.edu/123008850/Construcción_De_Monitor_De_Fallas_a_Tierra_Para_Sistemas_De_C_A

- [15] J. F. Arauz, “Identificación de fallas en sistemas eléctricos de potencia basado en el reconocimiento de patrones,” p. 20, 2020. [Online]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/18559>
- [16] G. Schwab, *Sistemas Eléctricos de Potencia*. México, 2016. [Online]. Available: <https://proingenieriasa.com/sistemas-electricos-de-potencia-analisis-de-fallas-electricas/>
- [17] P. M. Anderson, C. Henville, R. Rifaat, B. Johnson, and S. Meliopoulos, *Power System Protection*, 2nd ed. 2021. doi: 10.1002/9781119513100.
- [18] A. L. Pozada, “El mundo del automatismo,” pp. 29–54, 2017. [Online]. Available: <https://grudilec.com/wp-content/uploads/2.automatismos-29-54.pdf>
- [19] A. Pérez París, “Relés electromagnéticos y electrónicos. Parte I: relés y contactores,” *Vivat Acad. Rev. Comun.*, no. 2003, pp. 1–24, 2003, doi: 10.15178/va.2003.50.1-24.
- [20] K. Aguilar Pizarro, “Estudio de arco eléctrico en redes eléctricas industriales,” *Universidad de Tarapacá*, 2020. [Online]. Available: <https://repositorio.uta.cl/xmlui/handle/20.500.14396/789>

- [21] Brady Corporation, “Arco Eléctrico,” 2017. [Online]. Available: https://d37iyw84027v1q.cloudfront.net/Common/Arc_Flash_Guidebook_Latin_America.pdf
- [22] A. Gómez Expósito et al., *Análisis y Operación de Sistemas Eléctricos*. p. 788, 2002.
- [23] E. Sangoi, U. Manassero, A. S. Loyarte, J. P. Fernandez, L. D. Rossi, and M. M. Cea, “Estudio de Riesgo por Arco Eléctrico Según AEA 92606. Análisis de Sensibilidad de Resultados,” in *Proc. 2022 IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON)*, 2022. doi: 10.1109/ARGENCON55245.2022.9939790.
- [24] J. L. Montoya, “Formular un programa de prevención de riesgo eléctrico,” *J. Chem. Inf. Model.*, pp. 1–102, 2021. [Online]. Available: <https://repository.ucc.edu.co/entities/publication/c73e5e7d-c552-489b-9bd7-8103409224e1>
- [25] J. Bonilla, “Seguridad eléctrica bajo la norma NFPA70E (sensibilización),” vol. 3, p. 46, 2016. [Online]. Available: <https://www.collegesidekick.com/study-docs/16446558>

- [26] L. Rivadeneira, “Análisis de fallas y control de protecciones como prevención de riesgos eléctricos,” 2015. [Online]. Available: <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/13681>
- [27] Iberdrola Distribución Eléctrica, “Perturbaciones eléctricas: Efectos y Soluciones en Instalaciones Industriales,” Neg. Redes España, 2018. [Online]. Available: https://iiev.net/wp-content/uploads/documents-and-technical-tools/perturbaciones_electricas_castellon_2018.pdf
- [28] S. Madane and S. A. Deokar, “Harmonic mitigation in traction supply system by using half bridge converter,” in Proc. 2017 Int. Conf. Data Manag. Anal. Innov. (ICDMAI), pp. 161–165, 2017, doi: 10.1109/ICDMAI.2017.8073503.
- [29] H. Ramiro and P. Pila, “Estudio del flicker en una instalación eléctrica,” p. 63, 2010. [Online]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/2142/14/UPS-GT000154.pdf>
- [30] M. M. Switch et al., “Calculation Methods - Arc Flash,” ETAP Documentation, pp. 1–84, 2025. [Online]. Available: <https://etap.com/es>

- [31] I. Operation Technology, Electrical Power System Analysis & Operation ETAP, 2025.

10. ANEXOS

Anexo 1. Tableros conectados a TR1

Tableros conectados a transformador TR-1 , 500kva, 220vac, chocolate		
Equipo	Descripción	Nomenclatura
	Transformador chocolate 220vac Potencia: 500Kva Trifásico	
Trafo	Voltaje: 22800/220vac Impedancia de CC: 4,26% generador trifásico Potencia: 569Kva	Tr-1
Gen	Voltaje: 220vac caterpillar	G1
T-16c	Tablero transferencia, sala de tableros	TTA1-CH
T-15c	Banco de capacitores, exterior a sala de tableros	TCFP6-CH
T-17c	Tablero distribución principal-sala tableros	TDP-220
T-14c	Tablero distribución secundario-plásticos	TDS2-PL
T-13c	Tablero distribución secundario-plásticos	TDS3-PL

T-36	Centro carga entrada a tic tac	CCA6-TT
T-24c	Tablero distribución secundario-plásticos	T-BOD-IND
T31c	Tablero servicios generales, área de chilers	TDS7-SGG
T32c	Tablero servicios generales, gradas bodega	TDS8-SGG
T30c	Tablero servicios generales, losa equipos de aire	TDS6-SGG
T28c	Tablero principal bodega	TDS4-SGG
T29c	Tablero servicios generales, área plásticos	TDS5-SGG
T-7ch	Tablero servicios generales, bassinas noggy	TDS2-CH
T-19ch	Tablero ubicado en exteriores de chocolate	
T-6ch	Tablero secundario distribución, pallino	TDS4-CH
T-38ch	Centro carga ubicado exteriores chocolate	
T-20ch	Tablero envalvado kinder joy	
T-27ch	Tablero hornos galleta	
T-26ch	Tablero hornos galleta	
T-25ch	Tablero tostado avellana	
T-42ch	Tablero pasillo baños	
T-8ch	Tablero en tostado avellanas	
T-23ch	Tablero en hanuta	
T-43ch	Tablero oficina mecánico	
T-11c	Tablero distribución principal-sala tableros	
T-18c	Tablero distribución principal-sala tableros	
T-1ch	Tablero distribución principal, exterior chocolate	
T-5ch	Tablero estampado noggy	
T-41ch	Tablero bassina noggy	
T-4ch	Tablero empaque noggy	
T-22ch	Tablero enrobado noggy	
T-2ch	Tablero distribución secundario, exterior chocolate	
T-10c	Tablero distribución principal-sala tableros	
T-13a	Tablero sala de capacitación	
T-14a	Tablero cancelas	
T-34c	Tablero taller mecánico	
T-15a	Tablero garita principal	
T-12c	Tablero calderas	
T-12a	Tablero comedor	
T-35c	Tableros cargadores	
T-39ch	Tablero área de reciclaje	

Anexo 2. Tableros conectados a TR2

Tableros conectados a transformador TR-2 , 800kva, 380vac, chocolate y tic tac		
Equipo	Descripcion	Nomenclatura
trafo	Transformador chocolate 380vacPotencia: 800Kva Trifásico Voltaje : 22800/380vacImpedancia de CC: 4,2%	Tr-2
generador Kholer	generador trifasicoKholer Potencia: 750Kva Voltaje : 380vac	G2
generador modasa	generador trifasicomodasa Potencia: 750Kva Voltaje : 380vac	G3
3b	Tablero transferencia 2 - 380v, area exterior a la sala se tableros	TTA2-380
4b	Tablero transferencia 1 - 380v, area exterior a la sala de tableros	TTA1-380
5b	Banco capacitores area exterior a sala de tableros	TCFP4-380
6b	Tablero distribucion principal 1, en sala de tableros	TDP1-CH

7b	Tablero distribucion principal 2, en sala de tableros	TDP2-CH- 380
2b	Tablero de distribucion principal area de plasticos	TDP1-PL-380
1b	Tablero de distribucion secundario area de plasticos	TDS1-PL-380
13b	Tablero de chillers	tablero chiller
12b	Tablero ubicado en envolvedora de palets de tic tac	TD380SGG
10b	Tablero camara fria prodotto	TDS5-CH
14b	Subtablero camara fria prodotto	hanuta-380v
11b	Tablero tostadura de avellana	hanuta-380v
9b	Tablero preparacion de chocolate	hanuta-380v

Anexo 3. Tableros conectados a TR3

Tableros conectados a transformador TR-3 , 1200kva, 220vac, tic tac		
Equipo	Descripción	Nomenclatura
	Transformador tic tac 220vac Potencia: 1200Kva Trifásico	
trafo	Voltaje : 22800/220vac Impedancia de CC: 8,14%	Tr-3
	generador trifasico	
gen	Potencia: 900Kva Voltaje : 220vac	G4
T-11	Tablero distribucion principal en sala de tableros	TDP-TT
T-12	Tablero transferencias automaticas en sala de tableros	TTA1-TT y TTA2- TT
T-13	Transferencia gaudino en sala de tableros	TTA3-Gaudino
T-13.1	Tablero distribucion principal en sala de tableros	TDP1-TT
T-4	Tablero en area de bombas de gaudino	TD7SGG-TT
T-8	Tablero distribucion en sala atrás de bassinas neutras	TDP5-TT
T-19	Banco capacitores en sala atrás de bassinas neutras	TCFP5-TT

T-14	Tablero distribucion secundaria en sala de tableros	TDP2-TT
T-10	Tablero area de empaque tic tac	TDS3-TT
T-7	Tablero area de estuchadora 2	TDS5-TT
T-9	Tablero area de estuchadora 1	CCA1-TT
T-6	Tablero area WOP	CCA2-TT
T-2	Tablero area de envolvedora automatica	TDS8-TT
T-16	Banco capacitores en sala de tableros	TCFP2-TT
T-24	Tablero en 2do piso junto a molino de azucar	TDS4-TT
T-26	Tablero area WOP	CCA5-TT
T-1	Tablero pasillo	CCA4-TT
T-27	Tablero area BIN	CCA3-TT
T-1a	Tablero principal administración bloque 1 y 2	TD7SGG , administración
T-3a	Tablero cafeteria bloque 2	caf-b2
T-4a	Tablero cafeteria laboratorio 2	lab-b2
T-2a	Tablero oficina bloque 2	ofic-b2
T-5a	Tablero microbiologia bloque 2	micro-b2
T-6a	Tablero distribucion principal bloque 1 administración	TDP-B1, administración
T-7a	Tablero distribucion secundaria bloque 1 administración	TDP1-b1
T-10a	Tablero baño bloque 1	baño-b1
T-8a	Tablero distribucion secundaria bloque 1 administración	TDP2-B1, administración
T-9a	Tablero cafeteria bloque 1	caf-b1
T-11a	Tablero garita secundaria posterior	garita
T-18	Tablero distribucion en sala atrás de bassinas neutras	TDS2-TT, bassinas acidas
T-28	Tablero bassinas acidas	TDS4SGG

T-17	Tablero distribucion en sala atrás de bassinas neutras,	TDS1-TT, bassina neutras
T-15	Banco capacitores en sala de tableros	TCFP1-TT
T-23	Tablero en 2do piso junto a molino de azucar	TDS7-TT
T-3	Tablero area de envolvedora automatica	TDS6-TT
T-5	Tablero area WOP	TDS9-TT
T-20	Tableor distribucion en gaudino	TDP3-TT
T-35	Tablero compresor gaudino	TDP3-TT
T-32	Tablero bombas gaudino	TDP3-TT
T-31	Tablero bombas gaudino	TDP3-TT
T-21	Tablero distribucion en gaudino	
T-33	Tablero bombas prana	
T-34	Tablero bombas prana	
T-22	Banco capacitores en gaudino	TCFP3-TT
T-29	Tablero bassinas neutras	
T-30	Tablero cibec	

Anexo 4. Niveles de cortocircuito en barras TR1

Niveles de cortocircuito en barras del sistema electrico del transformador 1de 500kva, 220vac - Area de chocolate				
Bus ID	Nominal kV	Cortocircuito (kilo amperios)		
		Simetrico	Asimetrico	
b-1ch	0,22	9,738045	10,28916	
b-2ch	0,22	8,530503	8,863665	
b-4ch	0,22	4,395032	4,398979	
b-5ch	0,22	6,722355	6,868651	
b-6ch	0,22	7,094115	7,160144	
b-7ch	0,22	10,96778	11,32717	
b-8ch	0,22	8,825775	8,946591	
b-10c	0,22	20,57882	23,71991	
b-12a	0,22	0,8276156	0,8276156	
b-12c	0,22	5,223395	5,22344	
b-13a	0,22	0,3243389	0,3243389	
b-13c	0,22	13,05121	13,64149	

b-14a	0,22	0,7027149	0,7027149
b-14c	0,22	14,20363	15,15471
b15a	0,22	2,455466	2,455466
b-15c	0,22	25,34821	31,67989
b-16 c	0,22	28,26081	37,23201
b-17c	0,22	2,95136	27,638
b-18c	0,22	18,9844	21,35714
b-19ch	0,22	5,854756	6,015231
b-20ch	0,22	4,641843	4,649453

**Niveles de cortocircuito en barras del sistema electrico del transformador 1de 500kva,
220vac - Area de chocolate**

Bus		Cortocircuito (kilo amperios)	
ID	Nominal kV	Simetrico	Asimetrico
b-22ch	0,22	0,9761603	0,9761603
b-23ch	0,22	4,890338	4,894113
b-24c	0,22	12,50873	13,17307
b-25ch	0,22	3,149592	3,149592
b-26ch	0,22	1,984618	1,98462
b-27ch	0,22	2,352679	2,35269
b-28c	0,22	2,431456	2,431459
b-29c	0,22	3,650938	3,650976
b-30c	0,22	5,23499	5,235529
b-31c	0,22	7,916493	7,962067
b-32c	0,22	5,171125	5,176824
b-34c	0,22	6,245305	6,245471

b-35c	0,22	3,499948	3,500444
b-36	0,22	6,883153	6,892683
b-38ch	0,22	3,205619	3,205749
b-39ch	0,22	1,80732	1,80732
b-40ch	0,22	2,443854	2,443856
b-41ch	0,22	5,103153	5,166498
b-42ch	0,22	1,154251	1,154251
b-43ch	0,22	2,403674	2,403674
b-tr1	0,22	33,45706	52,57061

Anexo 5. Niveles de cortocircuito en barras TR2

**Niveles de cortocircuito en barras del sistema electrico del transformador 2 de 800kva,
220vac - Area de chocolate y tic tac**

Bus ID	Nominal kV	Cortocircuito (kilo amperios)	
		Simetrico	Asimetrico
b-1b	0,38	12,31776	13,06266
b-2b	0,38	15,5489	17,05195
b-3b	0,38	22,93425	32,88617
b-4b	0,38	22,93425	32,88617
b-5b	0,38	22,93425	32,88617
b-6b	0,38	21,08517	28,52149
b-7b	0,38	19,61977	22,94364
b-7b-1	0,38	19,61977	22,94364

b-8b	0,38	13,56298	13,6616
b-9b	0,38	6,409692	6,412566
b-10b	0,38	8,054328	8,08949
b-11b	0,38	2,543442	2,543442
b-12b	0,38	3,822546	3,82261
b-13b	0,38	9,628633	9,71076
b-14b	0,38	6,74036	6,748765
b-15b	0,38	5,867802	6,179095
b-g2	0,38	5,989117	9,349258
b-g3	0,38	5,989117	9,349258
b-tr2	0,38	25,09191	38,90598

Anexo 6. Niveles de cortocircuito en barras TR3

Niveles de cortocircuito en barras del sistema electrico del transformador 3de 1200kva-380v, area chocolate y tic tac

Bus	Cortocircuito (kilo amperios)			
	ID	Nominal kV	Simetrico	Asimetrico
b-1		0,22	3,37026	3,37086
b-1a		0,22	2,948743	2,95155
b-2		0,22	4,34295	4,345027
b-2a		0,22	2,056959	2,05705
b-3		0,22	6,437962	6,438517
b-3a		0,22	2,157637	2,157888
b-4		0,22	6,986395	7,024982
b-4a		0,22	2,045114	2,04528

b-5	0,22	4,830818	4,83178
b-5a	0,22	1,982662	1,98304
b-6	0,22	2,704995	2,704999
b-6a	0,22	1,953289	1,953816
b-7	0,22	6,61485	6,617453
b-7-1	0,22	6,61485	6,617453
b-7a	0,22	1,903792	1,904258
b-8	0,22	12,18923	12,32956
b-8a	0,22	1,725386	1,725522
b-9	0,22	4,364339	4,365346
b-9a	0,22	1,611194	1,611275

**Niveles de cortocircuito en barras del sistema electrico del transformador 3 de 1200kva-380v,
area chocolate y tic tac**

Bus ID	Nominal kV	Cortocircuito (kilo amperios)	
		Simetrico	Asimetrico
b-10	0,22	4,779961	4,780752
b-10a	0,22	1,658449	1,658601
b-11	0,22	42,1906	55,85372
b-11a	0,22	0,5146388	0,5146388
b-12-tta1	0,22	36,8956	45,79676
b-12-tta2	0,22	32,72722	38,94976
b-13	0,22	40,08527	53,27539
b-13.1	0,22	28,11364	30,64096
b-14	0,22	24,19387	26,40017

b-15	0,22	17,39822	17,81232
b-16	0,22	19,01847	19,72765
b-17	0,22	16,00186	17,09396
b-18	0,22	21,71328	23,84553
b-19	0,22	9,910906	9,956708
b-20	0,22	16,61216	17,86775
b-21	0,22	14,01089	14,26913
b-22	0,22	13,84453	14,18278
b-23	0,22	8,311042	8,36405

Anexo 7. Fronteras de choque eléctrico en tableros del TR1

Fronteras de choque electrico en tableros del transformador 1 de 500kva, 220vacArea de chocolate				
ID	Nominal kV	Borde de aproximacion limitada (m)	Borde de aproximacion restringida (m)	clase de guantes
b-1ch	0,22	1	0,3	00
b-2ch	0,22	1	0,3	00
b-4ch	0,22	1	0,3	00
b-5ch	0,22	1	0,3	00
b-6ch	0,22	1	0,3	00
b-7ch	0,22	1	0,3	00
b-8ch	0,22	1	0,3	00
b-10c	0,22	1	0,3	00
b-12a	0,22	1	0,3	00
b-12c	0,22	1	0,3	00

b-13a	0,22	1	0,3	00
b-13c	0,22	1	0,3	00
b-14a	0,22	1	0,3	00
b-14c	0,22	1	0,3	00
b15a	0,22	1	0,3	00
b-15c	0,22	1	0,3	00
b-16c	0,22	1	0,3	00
b-17c	0,22	1	0,3	00
b-18c	0,22	1	0,3	00
b- 19ch	0,22	1	0,3	00
b- 20ch	0,22	1	0,3	00

Fronteras de choque electrico en tableros del transformador 1 de 500kva, 220vacArea de chocolate

ID	Nominal kV	Borde de aproximacionlimitada (m)	Borde de aproximacion restringida (m)	clase de guantes
b-22ch	0,22	1	0,3	00
b-23ch	0,22	1	0,3	00
b-24c	0,22	1	0,3	00
b-25ch	0,22	1	0,3	00
b-26ch	0,22	1	0,3	00
b-27ch	0,22	1	0,3	00
b-28c	0,22	1	0,3	00
b-29c	0,22	1	0,3	00
b-30c	0,22	1	0,3	00

b-31c	0,22	1	0,3	00
b-32c	0,22	1	0,3	00
b-34c	0,22	1	0,3	00
b-35c	0,22	1	0,3	00
b- 36	0,22	1	0,3	00
b-38ch	0,22	1	0,3	00
b-39ch	0,22	1	0,3	00
b-40ch	0,22	1	0,3	00
b-41ch	0,22	1	0,3	00
b-42ch	0,22	1	0,3	00
b-43ch	0,22	1	0,3	00
b-tr1	0,22	1	0,3	00

Anexo 8. Fronteras de choque eléctrico en tableros de TR2

Fronteras de choque electrico en tableros del transformador 2 de 800kva, 380vacArea de chocolate y tic tac				
ID	Nominal kV	Borde de aproximacion limitada (m)	Borde de aproximacion restringida (m)	Clase de guantes
b- 1b	0,38	1	0,3	00
b- 2b	0,38	1	0,3	00
b- 3b	0,38	1	0,3	00
b- 4b	0,38	1	0,3	00
b- 5b	0,38	1	0,3	00
b- 6b	0,38	1	0,3	00

b- 7b	0,38	1	0,3	00
b-7b- 1	0,38	1	0,3	00
b- 8b	0,38	1	0,3	00
b- 9b	0,38	1	0,3	00
b- 10b	0,38	1	0,3	00
b- 11b	0,38	1	0,3	00
b- 12b	0,38	1	0,3	00
b- 13b	0,38	1	0,3	00
b- 14b	0,38	1	0,3	00
b- 15b	0,38	1	0,3	00
b-g2	0,38	1	0,3	00
b-g3	0,38	1	0,3	00
b- tr2	0,38	1	0,3	00

Anexo 9. Fronteras de choque eléctrico en tableros del TR3

Fronteras de choque eléctrico en tableros del transformador 3 de 1200kva, 220vac Area de tic tac

ID	Nominal kV	Borde de aproximación limitada (m)	Borde de aproximación restringida (m)	clase de guantes
b-1	0,22	1	0,3	00
b- 1a	0,22	1	0,3	00
b-2	0,22	1	0,3	00
b- 2a	0,22	1	0,3	00
b-3	0,22	1	0,3	00
b- 3a	0,22	1	0,3	00
b-4	0,22	1	0,3	00
b- 4a	0,22	1	0,3	00
b-5	0,22	1	0,3	00
b- 5a	0,22	1	0,3	00

b-6	0,22	1	0,3	00
b- 6a	0,22	1	0,3	00
b-7	0,22	1	0,3	00
b-7-1	0,22	1	0,3	00
b- 7a	0,22	1	0,3	00
b-8	0,22	1	0,3	00
b- 8a	0,22	1	0,3	00
b-9	0,22	1	0,3	00

**Fronteras de choque eléctrico en tableros del transformador 3 de 1200kva, 220vacArea
de tic tac**

ID	Nominal kV	Borde de aproximación limitada (m)	Borde de aproximación restringida (m)	clase de guantes
b-9a	0,22	1	0,3	00
b-10	0,22	1	0,3	00
b-10a	0,22	1	0,3	00
b-11	0,22	1	0,3	00
b-11a	0,22	1	0,3	00
b-12-tta1	0,22	1	0,3	00
b-12-tta2	0,22	1	0,3	00
b-13	0,22	1	0,3	00

b- 13.1	0,22	1	0,3	00
b-14	0,22	1	0,3	00
b-15	0,22	1	0,3	00
b-16	0,22	1	0,3	00
b-17	0,22	1	0,3	00
b-18	0,22	1	0,3	00
b-19	0,22	1	0,3	00
b-20	0,22	1	0,3	00
b-21	0,22	1	0,3	00
b-22	0,22	1	0,3	00
b-23	0,22	1	0,3	00

Fronteras de choque eléctrico en tableros del transformador 3 de 1200kva, 220vac Area de tic tac

ID	Nominal kV	Borde de aproximación limitada (m)	Borde de aproximación restringida (m)	clase de guantes
b-24	0,22	1	0,3	00
b-26	0,22	1	0,3	00
b-27	0,22	1	0,3	00
b-28	0,22	1	0,3	00
b-29	0,22	1	0,3	00
b-30	0,22	1	0,3	00
b-31	0,22	1	0,3	00
b-32	0,22	1	0,3	00
b-33	0,22	1	0,3	00
b-34	0,22	1	0,3	00

b-35	0,22	1	0,3	00
b-37	0,22	1	0,3	00
b-g1	0,22	1	0,3	00
b-tr3	0,22	1	0,3	00
b- tta1- g1	0,22	1	0,3	00
b- tta2-g1	0,22	1	0,3	00

Anexo 12. Diagrama unifilar TR3 Tictac

