



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE GUAYAQUIL

CARRERA DE ELECTRICIDAD

“ESTUDIO DE ARCO ELÉCTRICO EN BAJA TENSION DEL BLOQUE E DE LA
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA MEDIANTE EL SIMULADOR ETAP”

Trabajo de titulación previo a la obtención del

Título de Ingeniero Eléctrico

AUTORES: Carlos Alexander Suquinahua Portilla

Mirela Jamilet Montero Díaz

TUTOR: Ing. Otto Washington Astudillo Astudillo, MSC

Guayaquil – Ecuador

2024

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN

Nosotros, Carlos Alexander Suquinahua Portilla con documento de identificación N° 0944029081 y Mirela Jamilet Montero Díaz N° 0954385647 manifestamos que: Somos los autores y responsables del presente trabajo y autorizamos 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.

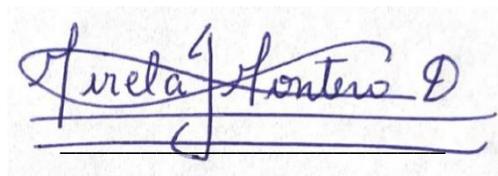
Guayaquil, 15 de febrero del año 2024

Atentamente;



Carlos Alexander Suquinahua Portilla

0944029081



Mirela Jamilet Montero Díaz

0954385647

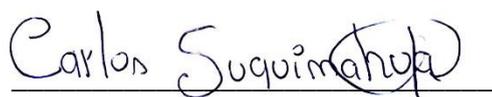
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Nosotros, Carlos Alexander Suquinahua Portilla con documento de identificación N° 0944029081 y Mirela Jamilet Montero Díaz N° 0954385647, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de lo que somos autores del proyecto técnico: “ESTUDIO DE ARCO ELÉCTRICO EN BAJA TENSIÓN DEL BLOQUE E DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA MEDIANTE EL SIMULADOR ETAP”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de INGENIERO EN ELECTRICIDAD, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

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

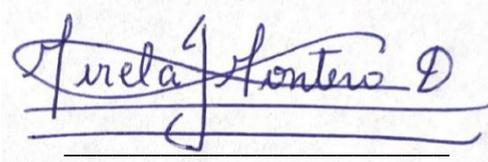
Guayaquil, 15 de febrero del año 2024

Atentamente;



Carlos Alexander Suquinahua Portilla

0944029081



Mirela Jamilet Montero Díaz

0954385647

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Otto Astudillo Astudillo con documento de identificación N° 0102054871 docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: “ESTUDIO DE ARCO ELÉCTRICO EN BAJA TENSION DEL BLOQUE E DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA MEDIANTE EL SIMULADOR ETAP”, realizado por Carlos Alexander Suquinahua Portilla con documento de identificación N° 0944029081 y Mirela Jamilet Montero Díaz N° 0954385647, 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.

Guayaquil, 15 de febrero del año 2024

Atentamente;



Ing. Otto Astudillo Astudillo

0102054871

DEDICATORIA

Dedico a mis padres Carlos Enrique Suquinahua y Gloria Portilla, por haberme inculcado valores desde niño , por haberme brindado educación para poder convertirme en Ingeniero en Electricidad, al Ing Otto Astudillo, por proporcionar sus conocimiento para poder implementarlos en mi trabajo de titulación, al Ing Roy Santana, por ayudarme a descubrir la implantación de mis conocimientos de electricidad en los diferentes software, al Ing Ervin Solano, por llevar su labor docente mucho más allá, por ser un amigo en momentos difíciles y extender en gran medida mis conocimiento.

Y principalmente dedico este trabajo a mí, ya que encuentra mi esfuerzo y mi dedicación plasmada en el mismo.

Carlos Alexander Suquinahua Portilla

Este logro se lo dedico en primer lugar a Dios por darme sabiduría, salud y sobre todo las fuerzas para poder culminar con éxitos la carrera. A mi padre Wilmer Montero por enseñarme a ser fuerte, valiente, a armarme de coraje y valentía, a nunca darme por vencida, a siempre confiar en mí y en jamás limitarme a soñar. Ha sido mi ejemplo a seguir desde niña y siempre luchare por hacerlo sentir orgulloso de mi. A mi mamá Ana Díaz y a mi hermano Sebastián Montero por siempre estar presentes en mis noches de desvelos, por enseñarme a ser paciente y sobre todo a hacer las cosas con amor y entusiasmo. A Melannie Pinos y a Aarón Chalen por ser mis confidentes, por siempre estar pendientes de mí y nunca soltar mi mano cuando sentía que ya no daba para más. Les dedico este logro porque son mi mayor fuente de motivación y felicidad, mis logros son los suyos y tratare de siempre hacerlos sentir orgullosos en cada paso que dé en mi vida, los amo.

Mirela Jamilet Montero Díaz

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi Madre, por apoyarme e incentivar me en cada aspecto de mi vida sin importar las adversidad las cuales atravesamos durante todo este tiempo, a mi Padre, por inculcarme sus conocimientos en el ámbito de la ingeniería., a mi Hermana, por estar presente en cada momento en cual necesitaba ayuda, a mis profesores, ya que fueron los guías de mi vida académica y son las bases de mi vida profesional, al Ing Evin Solano, por sus grandes consejos y motivaciones cuando más las necesitaba el cual fue un pilar fundamental en mi crecimiento académico, a Roxana Aguilera, la cual fue mi mayor motivación para ser quien soy en estos momentos y por contribuir en cada aspecto de mi vida.

Carlos Alexander Suquinahua Portilla

Agradezco a mi padre Wilmer Montero por enseñarme que no importa que tan grande sea mi sueño, siempre lograre realizarlo porque sé que estará a mi lado sin importar las adversidades, los desafíos, en la salud y en la enfermedad. A mi madre Ana Díaz y hermano Sebastián Montero por siempre brindarme su cariño en mis momentos de tristeza y por hacerme esos postres tan ricos que hacen feliz a mi corazón. Gracias por ser personas de amor en mi vida. A Melannie Pinos y Aarón Chalen por darme sus palabras de apoyo en mis momentos más difíciles, por siempre escucharme y por ser uno de los pilares más fundamentales de mi vida. Gracias por ser personas de luz en mi vida. Al Ing. Ervin Solano por orientarme con mi tema de tesis desde 7mo semestre y al Ing. Otto Astudillo por ayudarme a culminar mi tesis con sus conocimientos.

Mirela Jamilet Montero Díaz

INDICE

| | |
|---|-------|
| CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN | ii. |
| CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA | iii |
| CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN | iv |
| DEDICATORIA | v |
| AGRADECIMIENTO | vi |
| INDICE..... | vii |
| INDICE DE FIGURAS..... | xiii |
| INDICE DE TABLAS | xvi |
| RESUMEN | xvii |
| ABSTRACT..... | xviii |
| CAPITULO I | 1 |
| 1.TITULO | 1 |
| 1.1.INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.2.PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 2 |
| 1.3.JUSTIFICACIÓN | 2 |
| 1.4.DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA | 3 |
| 1.5.BENEFICIARIOS DE LA PROPUESTA | 3 |
| 1.6.OBJETIVOS | 3 |
| 1.6.1.Objetivo General..... | 3 |
| 1.6.2.Objetivos Específicos..... | 4 |
| 1.7.METODOLOGÍA Y MEDIOS | 4 |
| CAPITULO II..... | 5 |

| | |
|--|----|
| 2.FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA | 5 |
| 2.1.NFPA 70 E1 NFPA 70..... | 5 |
| 2.2.MÉTODOS MATEMÁTICOS DE CÁLCULO SEGÚN LA NFPA 70E – IEEE 1584..... | 6 |
| 2.1.1.Cálculos manuales: | 7 |
| 2.1.2.Hoja de cálculo: | 7 |
| 2.1.3.Programas informáticos: | 7 |
| 2.3.FALLAS DE TABLEROS DE BAJA TENSIÓN | 7 |
| 2.4.DEFINICIÓN DE ARCO ELÉCTRICO | 7 |
| 2.1.4.Fase de Compresión..... | 8 |
| 2.1.5.Fase de Expansión..... | 8 |
| 2.1.6.Fase de Emisión | 9 |
| 2.1.7.Fase Térmica..... | 9 |
| 2.5.LÍMITES DE APROXIMACIÓN | 10 |
| 2.6.LÍMITES DE APROXIMACIÓN SEGÚN LA NFPA70E:..... | 11 |
| 2.7.EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL (EPP) | 11 |
| 2.8.CAUSAS DEL ARCO ELÉCTRICO | 12 |
| 2.9.AUTO CAD | 15 |
| 2.10.ETAP..... | 15 |
| CAPITULO III..... | 16 |
| 3.ESQUEMAS DE REDES ELÉCTRICAS | 16 |
| 3.1.CLASIFICACIÓN DE REDES ELÉCTRICAS | 16 |
| 3.1.1.Redes radiales | 16 |
| 3.1.2.Redes malladas..... | 16 |
| 3.1.3.En bucle | 17 |

| | |
|--|----|
| 3.1.4Redes aéreas:..... | 17 |
| 3.1.5Redes subterráneas:..... | 18 |
| 3.2.CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO | 18 |
| 3.3.CLASES DE CORTO CIRCUITO | 19 |
| 3.4.DESEMPEÑO DE FUSIBLES EN REDES ELÉCTRICAS..... | 19 |
| 3.5.FALLAS EN TABLEROS DE BAJA TENSIÓN | 19 |
| 3.6.DURACIÓN DEL ARCO PARA FUSIBLES | 20 |
| 3.7.ETIQUETAS DE ADVERTENCIA DE LA NFPA 70E | 20 |
| 3.8.CÁLCULO DE ARCO ELÉCTRICO (NFPA 70E) PELIGROS | 20 |
| 3.9.MODELADO DEL RANGO PARA ARCO ELECTICO..... | 20 |
| 3.10.SEPARACIÓN TÍPICA Y EL TAMAÑO DEL RECINTO SEGÚN LOS VOLTAJES DEL SISTEMA Y LAS CLASES DE EQUIPO..... | 21 |
| 3.11.CORRIENTES PROMEDIO INTERMEDIAS DE ARCO | 22 |
| 3.12.FACTOR DE CORRECCIÓN DE VARIACIÓN DE CORRIENTE DE ARCO..... | 23 |
| 3.13.ENERGÍA INCIDENTE INTERMEDIA (E):..... | 24 |
| 3.14.LÍMITE DE DESTELLO DE ARCO INTERMEDIO (AFB)..... | 25 |
| 3.15.EL TAMAÑO DEL RECINTO DE FACTOR DE CORRECCIÓN | 27 |
| 3.16.EQUIVALENTES DE ALTURA Y ANCHURA DE RECIENTO | 27 |
| 3.17.FACTOR DE CORRECCIÓN DEL TAMAÑO DEL RECINTO (CF)..... | 28 |
| 3.18.CORRIENTE DE ARCO (IARC) | 29 |
| 3.19.ENERGÍA INCIDENTE (E)..... | 30 |
| 3.20.LÍMITE DE ARCO ELÉCTRICO (AFB) | 30 |
| 3.21.DETERMINAR LAS DISTANCIAS DE TRABAJO..... | 30 |
| CAPITULO IV..... | 31 |
| 4.SIMULACIÓN DEL SISTEMA EN ETAP | 31 |

| | |
|---|----|
| 4.1.PLANTEAMIENTO DEL SISTEMA EN ETAP..... | 31 |
| 4.2.DIAGRAMA UNIFILAR BLOQUE E EN ETAP..... | 32 |
| 4.3.SIMULACIÓN DE ARCO ELÉCTRICO IEEE – 1485 PARA EL BLOQUE E - CB1 | 33 |
| 4.4.CÁLCULOS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS PARA CB1..... | 34 |
| 4.5.CÁLCULO CORRIENTES DE ARCO PROMEDIO INTERMEDIAS PARA CB1..... | 34 |
| 4.6.CORRIENTE DE ARCO (IARC) PARA CB1 | 35 |
| 4.7.DATOS DE LA BARRA DE CASO DE ESTUDIO – PARA CB1 | 35 |
| 4.8.FACTOR DE CORRECCIÓN DEL TAMAÑO DEL RECINTO PARA CB1 | 35 |
| 4.9.DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE CORRECCIÓN DEL TAMAÑO DEL RECINTO(CF) PARA CB1..... | 36 |
| 4.10.CÁLCULO DE LA ENERGÍA INCIDENTE INTERMEDIA (E) PARA CB1 | 37 |
| 4.11.CÁLCULO DEL LÍMITE DE DESTELLO DE ARCO INTERMEDIO (AFB) PARA CB1 | 37 |
| 4.12. ENERGÍA INCIDENTE (E) PARA CB1..... | 37 |
| 4.13.LÍMITE DE ARCO ELÉCTRICO (AFB) PARA CB1 | 38 |
| 4.14.SUMMARY DE ENERGÍA INCIDENTE CB1 | 38 |
| 4.15.CÁLCULO DE FACTOR CORRECCIÓN DE VARIACIÓN DE CORRIENTE DE ARCO..... | 38 |
| 4.16.ETIQUETAS GENERADAS POR ETAP PARA CB1..... | 39 |
| 4.17. RESULTADO DE ARCO ELÉCTRICO SIMULADO PARA CB1 | 40 |
| 4.18.ANALIZADORES DE RESULTADOS PARA CB1..... | 40 |
| 4.19.SIMULACIÓN DE ARCO ELÉCTRICO IEEE – 1485 PARA EL BLOQUE E PARA TABLERO DE MOTORES Y GENERADORES | 42 |
| 4.20.DIAGRAMA UNIFILAR SIMULADO EN ETAP PARA TABLEROS DE MOTORES Y GENERADORES | 43 |
| 4.21.CÁLCULO CORRIENTES DE ARCO PROMEDIO INTERMEDIAS PARA TABLERO DE TRANSFORMADORES | 43 |

| | |
|--|----|
| 4.22.CORRIENTE DE ARCO (IARC) PARA TABLERO DE TRANSFORMADORES | 43 |
| 4.23.DATOS DE LA BARRA DE CASO DE ESTUDIO – TABLERO DE MOTORES Y GENERADORES | 44 |
| 4.24.FACTOR DE CORRECCIÓN DEL TAMAÑO DEL RECINTO PARA TABLERO DE TRANSFORMADORES..... | 44 |
| 4.25.DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE CORRECCIÓN DEL TAMAÑO DEL RECINTO(CF) PARA TABLERO DE TRANSFORMADORES | 45 |
| 4.26.CÁLCULO DE LA ENERGÍA INCIDENTE INTERMEDIA (E) PARA TABLERO DE TRANSFORMADORES..... | 45 |
| 4.27.CÁLCULO DEL LÍMITE DE DESTELLO DE ARCO INTERMEDIO (AFB) PARA TABLERO DE TRANSFORMADORES | 46 |
| 4.28.ENERGÍA INCIDENTE (E) PARA TABLERO DE TRANSFORMADORES..... | 46 |
| 4.29.LÍMITE DE ARCO ELÉCTRICO (AFB) PARA TABLERO DE TRANSFORMADORES | 46 |
| 4.30.SUMMARY DE LA BUS 6 – ENERGIA INCIDENTE..... | 47 |
| 4.31.CÁLCULO DE FACTOR CORRECCIÓN DE VARIACIÓN DE CORRIENTE DE ARCO PARA TABLERO DE TRANSFORMADORES | 47 |
| 4.32.ETIQUETAS GENERADAS POR ETAP PARA TABLERO DE MOTORES Y TRANSFORMADORES | 48 |
| 4.33.RESULTADO DE ARCO ELÉCTRICO SIMULADO PARA TABLERO DE TRANSFORMADORES | 48 |
| 4.34.ANALIZADOR DE RESULTADOS PARA TABLERO DE MOTORES Y GENERADORES | 51 |
| 4.35.TECNICAS DE MEJORAS PARA LA MITIGACION DE ARCO ELECTRICOS | 54 |
| ANEXOS. | 56 |
| 5.CONFIGURACION DE TIPOS DE ELECTRODOS..... | 56 |
| 5.1.PANELES DE DISTRIBUCIÓN DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA | 58 |

| | |
|--|----|
| 5.1.1.Tablero de distribución piso 1 (TD-1P) | 58 |
| 5.1.2.Tablero de distribución piso 2 (TD-2P) | 60 |
| 5.1.3.Tablero de distribución piso 3 (TD-3P) | 62 |
| 5.1.4.Tablero de distribución piso 4 (TD-4P) | 64 |
| 5.2.DIAGRAMAS UNIFILARES DE LOS SUBTABLERO E UBICACIÓN | 66 |
| 5.2.1.Subtablero - Bioinstrumentacion | 66 |
| 5.2.2.Subtablero - Resistencia de materiales | 67 |
| 5.2.3.Subtablero - Circuitos Eléctricos | 68 |
| 5.2.4.Subtablero - Transformadores..... | 69 |
| 5.2.5.Subtablero - Termodinámica..... | 70 |
| 5.2.6.Subtablero - Alta Tensión | 71 |
| 5.2.7.Subtablero - Protecciones Eléctricas..... | 72 |
| 5.2.8.Subtablero - Generación | 73 |
| 5.2.9.Subtablero - Motores y Generadores | 74 |
| 5.3.DIAGRAMA UNIFILAR DEL SISTEMA, UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA, EDIFICIO E – BLOQUE E | 75 |
| CONCLUSIONES | 76 |
| RECOMENDACIONES..... | 77 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS: | 78 |

INDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Símbolo ISO arco eléctrico [12]..... | 8 |
| Figura 2. Escala de tiempo de las fases de arco eléctrico [12]..... | 9 |
| Figura 3. Límite de aproximación [6]..... | 10 |
| Figura 4. Distancias mínimas de aislamiento NFPA 70E..... | 11 |
| Figura 5. Categorías de EPP según la norma NFPA 70E-2018..... | 11 |
| Figura 6. Etiquetas de Arco Eléctrico..... | 12 |
| Figura 7. Módulo de Arc Flash en ETAP [5]..... | 13 |
| Figura 8. Analizador de resultados de arco eléctrico en Etap [5]..... | 14 |
| Figura 9. Etiquetas generadas por Etap para seguridad [5]..... | 14 |
| Figura 10. Pantalla de inicio AutoCAD [13]..... | 15 |
| Figura 11. Inicio Etap[12]..... | 15 |
| Figura 12. Esquema de red radial [14]..... | 16 |
| Figura 13. Esquema de red mallada [14]..... | 16 |
| Figura 14. Esquema de red en bucle [14]..... | 17 |
| Figura 15. Redes de distribución aéreas..... | 18 |
| Figura 16. Redes de distribución subterráneas..... | 18 |
| Figura 17. Tamaños de gabinetes para cada clase de voltaje..... | 21 |
| Figura 18. Distribución de los diferente elementos físicos presentes en el Bloque E..... | 32 |
| Figura 19. ANSI Arc Flash..... | 33 |
| Figura 20. Diagrama unifilar Arco Eléctrico simulado..... | 33 |
| Figura 21. Curva de disparo CB1 Prim..... | 34 |
| Figura 22. Datos de la bus 4 para CB1..... | 35 |
| Figura 23. Energía Incidente para CB1 Summary CB1..... | 38 |
| Figura 24. Etiqueta de seguridad generada por Etap – CB1..... | 39 |
| Figura 25. Arc Flash Analysis CB1..... | 40 |

| | |
|---|----|
| Figura 26. Diagrama unifilar simulado para tablero de motores y transformadores | 42 |
| Figura 27. Diagrama unifilar Arco Eléctrico - Tablero de motores y generadores | 43 |
| Figura 28. Data bus 6 tablero de motores y generadores | 44 |
| Figura 29. Summary Incident energy Bus 6 | 47 |
| Figura 30. Etiqueta de seguridad generada por Etap | 48 |
| Figura 31. Arc Flash Analysis Bus 6 | 49 |
| Figura 32. Arc Flash Analysis Bus 6 - CBS | 50 |
| Figura 33. Arc Flash Analysis CB27 – Bus 6..... | 50 |
| Figura 34. Categorías de EPP según la norma NFPA 70E-2018..... | 54 |
| Figura 35. Ejemplos de etiquetas de seguridad para eléctrico..... | 55 |
| Figura 36. Tableros de distribución piso 1- Bloque E | 58 |
| Figura 37. Tablero de distribución Bloque E - Piso 2..... | 60 |
| Figura 38. Plano Estructural Bloque E - Piso 2 | 61 |
| Figura 39. Tablero de distribución Bloque E - Piso 3..... | 62 |
| Figura 40. Plano Estructural Bloque E - Piso 3 | 63 |
| Figura 41. Tablero de distribución Bloque E - Piso 4..... | 64 |
| Figura 42. Plano Estructural Bloque E - Piso 4 | 65 |
| Figura 43. Subtablero Bioinstrumentacion Bloque E – Piso 2 | 66 |
| Figura 44. Plano Estructural - Ubicación de subtablero Bloque E - Piso 2..... | 66 |
| Figura 45. Subtablero Resistencia de los materiales..... | 67 |
| Figura 46. Plano Estructural - Ubicación del subtablero resistencia de materiales | 67 |
| Figura 47. Subtablero Circuitos Eléctricos | 68 |
| Figura 48. Plano Estructural - Ubicación del subtablero Circuitos | 68 |
| Figura 49. Subtablero de transformadores | 69 |
| Figura 50. Plano Estructural - Ubicación de subtablero Transformadores | 69 |
| Figura 51. Subtablero termodinámica..... | 70 |

| | |
|---|----|
| Figura 52. Plano estructural - Ubicación de subtablero termodinámica | 70 |
| Figura 53. Subtablero de Alta tensión..... | 71 |
| Figura 54. Plano estructural - Ubicación de subtablero Alta tensión | 71 |
| Figura 55. Subtablero Protecciones eléctricas | 72 |
| Figura 56. Plano estructural - Ubicación subtablero Protecciones eléctricas | 72 |
| Figura 57. Subtablero generación | 73 |
| Figura 58. Plano estructural - Ubicación subtablero Generación | 73 |
| Figura 59. Subtablero Motores y generadores | 74 |
| Figura 60. Plano estructural - Ubicación Motores y generadores..... | 74 |
| Figura 61. Diagrama Unifilar Universidad Politécnica Salesiana Bloque E | 75 |

INDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Categorías de EPP..... | 11 |
| Tabla 2. Categorías/Nivel de protección..... | 12 |
| Tabla 3. Características de tipos de redes [14] | 17 |
| Tabla 4. Dimensiones del recito según Voltaje del sistema..... | 21 |
| Tabla 5. Coeficientes para Ecuaciones | 22 |
| Tabla 6. Coeficientes para Ecuaciones | 23 |
| Tabla 7. Coeficiente para Ecuación (2)..... | 24 |
| Tabla 8. Coeficientes para Energía Incidente Intermedia 600V | 26 |
| Tabla 9. Coeficientes para Energía Incidente Intermedia 2700V | 26 |
| Tabla 10. Coeficientes para Energía Incidente Intermedia 14300V | 26 |
| Tabla 11. Directrices para determinar la altura y anchura equivalentes | 27 |
| Tabla 12. Directrices para determinar la altura y anchura equivalentes | 28 |
| Tabla 13. Coeficientes para factor de corrección..... | 29 |
| Tabla 14. Distancia de trabajo según los equipos los equipos | 30 |
| Tabla 15. Tabla de elementos referenciales del sistema eléctrico de Bloque E,..... | 31 |
| Tabla 16. Resultados para CB1 entregado por Etap | 40 |
| Tabla 17. Resultados para CB1 entregado por Etap | 41 |
| Tabla 18. Análisis de resultados para centro de carga de motores y generadores | 51 |
| Tabla 19. Análisis de resultados para centro de motores y generadores | 52 |
| Tabla 20. Analisis de resultados para centro de carga de motores y generadores | 52 |
| Tabla 21. Análisis de resultados para centro de carga de motores y generadores | 53 |
| Tabla 22. Análisis de resultados para centro de carga de motores y generadores | 53 |
| Tabla 23. Categorías de EPP..... | 54 |
| Tabla 24. Ejemplos de configuración de electrodos | 57 |

RESUMEN

En este informe, se aborda detalladamente la importancia de seguir y respetar las normas de seguridad relacionadas con la generación de arcos eléctricos debido a corrientes de falla. Se centra específicamente en el punto de ocurrencia de la falla y en el interruptor de protección contra sobre corrientes. El análisis se realiza en el contexto de arcos eléctricos en bajo voltaje, siguiendo las pautas establecidas por la norma IEEE 1564 – 2018. El estudio se lleva a cabo aplicando estas normas al Edificio E de la UPS-G en el campus centenario. La herramienta utilizada para este propósito es el software Etap, que permite la simulación de dos metodologías de fallas a tierra. Estas simulaciones se realizan tanto a la salida del transformador principal como en el centro de carga del laboratorio de motores y generadores, con el objetivo de evaluar los arcos eléctricos generados en ambos escenarios.

Los resultados obtenidos proporcionan una visión clara de los riesgos asociados con las corrientes de falla y los arcos eléctricos en el entorno analizado. A partir de estos hallazgos, se formulan recomendaciones de seguridad específicas tanto para el disyuntor principal como para el centro de carga del laboratorio mencionado. Estas recomendaciones están diseñadas para minimizar los riesgos potenciales y garantizar un entorno de trabajo seguro en relación con la generación de arcos eléctricos, este trabajo destaca la importancia de la observancia rigurosa de las normas de seguridad en el manejo de corrientes de falla y arcos eléctricos, brindando una aplicación práctica de estas normas en un entorno específico y proponiendo medidas concretas para mitigar los riesgos identificados.

ABSTRACT

In this report, the importance of following and respecting safety rules related to arcing due to fault currents is discussed in detail. It focuses specifically on the point of occurrence of the fault and the overcurrent protection switch. The analysis is performed in the context of low voltage arcing, following the guidelines established by IEEE 1564 - 2018. The study is carried out by applying these standards to the UPS-G Building E at the centennial campus. The tool used for this purpose is the Etap software, which allows the simulation of two ground fault methodologies. These simulations are performed both at the output of the main transformer and at the load center of the motors and generators laboratory, with the objective of evaluating the electric arcs generated in both scenarios. The results obtained provide a clear view of the risks associated with fault currents and arcing in the analyzed environment.

Based on these findings, specific safety recommendations are formulated for both the main circuit breaker and the load center of the aforementioned laboratory. These recommendations are designed to minimize potential risks and ensure a safe working environment in relation to arc flash generation. This work highlights the importance of rigorous observance of safety standards in the handling of fault currents and electric arcs, providing a practical application of these standards in a specific environment and proposing concrete measures to mitigate the identified risks.

CAPITULO I

1. TITULO

Estudio de arco eléctrico en baja tensión del bloque E de la Universidad Politécnica Salesiana mediante el simulador Etap.

1.1. INTRODUCCIÓN

El reconocimiento del peligro de los arcos eléctricos ha permitido su uso en todas las actividades de la vida diaria. La creciente dependencia de la electricidad ha hecho que las interrupciones del suministro, incluso breves, sean cada vez más inaceptables. Esto ha llevado a que los trabajadores del sector eléctrico realicen tareas de mantenimiento en equipos eléctricos energizados, incluso si están en funcionamiento [1]. Los trabajadores del sector eléctrico están expuestos a una serie de riesgos, algunos de los cuales son evidentes, como el contacto eléctrico. Sin embargo, también existe un riesgo menos evidente, pero igualmente grave: "Arco Eléctrico". Los cuales son una de las causas de muerte de muchos trabajadores y son uno de los accidentes más peligrosos en la industria. Los arcos eléctricos son un peligro grave que ha sido subestimado durante mucho tiempo, pero que ahora está siendo reconocido como tal en los programas de seguridad eléctrica y códigos de seguridad [2] los accidentes eléctricos en el área laboral han sido tratados tradicionalmente como accidentes por contacto eléctrico [3].

El adjetivo arco eléctrico se acuñó en los años ochenta, se descubrió que los accidentes eléctricos pueden causar tanto lesiones internas como externas graves. El ingeniero estadounidense Ralph Lee fue el primero en identificar este nuevo riesgo eléctrico y en introducir el concepto de arco eléctrico en el artículo *The Other Electrical Hazard: Electric Arc Blast Burns*[4]. Este evento puede ocurrir cuando falla el sistema eléctrico. Es muy peligroso porque puede generar temperaturas muy altas y calor radiante intenso [5].

Los trabajadores que realizan tareas en instalaciones eléctricas energizadas están expuestos al riesgo de sufrir un accidente por arco eléctrico. Un accidente por arco eléctrico se produce cuando se produce un contacto entre dos puntos con distinto potencial eléctrico. Las consecuencias de un accidente por arco eléctrico pueden ser graves, incluso mortales. Los accidentes por arco eléctrico pueden provocar quemaduras graves, pérdida de visión, pérdida de audición, lesiones por materiales expulsados e inhalación de gases tóxicos [6].

Los estudios de riesgo de arco eléctrico se realizan generalmente de acuerdo con dos normas internacionales: NFPA 70E [7] y IEEE 1584 [8], los estudios asociados a riesgo por arco

eléctrico son realizados en el ámbito de la norma AEA 92606 [9], la versión 2016 de la norma es una actualización de dos estándares internacionales anteriores: IEEE 1584 (2002) y NFPA 70E (2012). Estos estándares establecen los principios básicos para calcular la cantidad de energía térmica que puede llegar a un trabajador en caso de arco eléctrico. La norma 2016 utiliza Ecuaciones empíricas que han sido ampliamente aceptadas por la comunidad científica[6]. La presencia de arcos eléctricos en las industrias de refinación representa un riesgo grave para los trabajadores que manipulan equipos eléctricos energizados. Los arcos eléctricos pueden generar energías caloríficas extremadamente altas, que pueden provocar quemaduras graves, incluso mortales, en los trabajadores expuestos. Además, los arcos eléctricos pueden causar daños a los equipos y procesos industriales, lo que puede provocar pérdidas económicas significativas [10].

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La falta de evaluaciones de mitigación de riesgos relacionados con arcos eléctricos en las actividades de laboratorio realizadas en el Bloque E de la Universidad Politécnica Salesiana ha resultado en una deficiencia en la seguridad eléctrica. La falta de un análisis completo de los sistemas eléctricos de baja tensión utilizados en el laboratorio ha expuesto a los usuarios a posibles incidentes de arco eléctrico. Esto representa una preocupación significativa sobre el cumplimiento de las regulaciones de seguridad eléctrica y la integridad de las personas que interactúan con estos sistemas en el entorno universitario.

1.3. JUSTIFICACIÓN

La implementación de medidas de seguridad eléctrica se ha vuelto crítica, no sólo para cumplir con la normativa aplicable, sino también para reducir significativamente los riesgos y prevenir incidentes que puedan colocar en peligro la integridad y bienestar de estudiantes, docentes y personal de apoyo por tanto la imperiosa necesidad de reforzar la seguridad académica en el Bloque E de la Universidad Politécnica Salesiana se fundamenta en la protección de la comunidad universitaria de los riesgos asociados a los arcos eléctricos de baja tensión. Además, este estudio aspira a realizar una contribución significativa a los ámbitos académico y técnico. La documentación académica resultante contribuirá al conocimiento en el campo de la seguridad eléctrica, a su vez se convertirá en un valioso recurso para profesionales e investigadores interesados en los sistemas eléctricos, fomentando futuras investigaciones y avances en este campo crítico. En este sentido, el estudio sirve no sólo como herramienta práctica, sino también como recurso técnico de referencia para sistemas eléctricos similares, proporcionando un enfoque sólido y validado para prevenir la propagación de líneas eléctricas en entornos educativo.

1.4. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

Este estudio se enfoca en el Bloque E de la Universidad Politécnica Salesiana, incluidos todos los pisos y áreas donde se encuentran sistemas de baja tensión y paneles de distribución de energía eléctrica. Con el fin de garantizar la seguridad ocupacional de la comunidad universitaria y establecer un marco técnico de referencia para profesionales y empresas relacionadas con la ingeniería eléctrica y el mantenimiento de instalaciones.

1.5. BENEFICIARIOS DE LA PROPUESTA

Este estudio no sólo protege al alumnado de la Universidad Politécnica Salesiana, sino que también beneficia a profesionales y empresas al mejorar la seguridad eléctrica y reforzar las competencias técnicas en la gestión de riesgos eléctricos, lo que redundará en un entorno más seguro y en un sector eléctrico más profesional y eficiente. La aplicación de medidas de prevención contra los arcos eléctricos es fundamental para mejorar significativamente la seguridad académica en el Bloque E de la Universidad Politécnica Salesiana, la cual incluye a estudiantes, profesores y personal técnico de la institución. Esta dedicación no sólo protegerá sus vidas y su bienestar, sino que también garantizará un entorno educativo más seguro y libre de riesgos.

Además, los beneficios se extienden más aun allá, ya que así tendrán acceso a tecnología punta de gestión de riesgos en arcos eléctricos. Esto reforzará sus competencias técnicas, preparándolos para garantizar entornos eléctricos seguros tanto en su vida académica como en su futura carrera profesional. Estos conocimientos avanzados les proporcionarán una ventaja competitiva en el mercado laboral, al tiempo que contribuirán a la mejora de la seguridad eléctrica en el sector en su conjunto. También, las empresas especializadas en mantenimiento eléctrico se beneficiarían enormemente de este estudio. Esto les permitiría prestar servicios de seguridad eléctrica de alta calidad a sus clientes, al tiempo que mejorarían la eficacia operativa y la capacidad de proporcionar entornos de trabajo seguros.

1.6. OBJETIVOS

1.6.1. Objetivo General

Realizar un estudio del arco eléctrico en el Bloque E de la Universidad Politécnica Salesiana mediante la simulación del esquema eléctrico en ETAP para reconocer y mitigar el impacto del riesgo al momento de maniobrar los equipos eléctricos.

1.6.2. Objetivos Específicos

- Simular mediante ETAP el sistema eléctrico del Bloque E, analizando escenarios de falla por arcos eléctricos y su impacto en componentes críticos.
- Generar propuestas de mejoras en el sistema eléctrico del Bloque E, identificando puntos débiles ante arcos y recomendando soluciones específicas para mitigar su propagación.
- Colocar etiquetas de riesgo eléctrico en áreas del Bloque E, clasificándolas según nivel de peligro determinado en simulaciones. Capacitar al personal sobre su significado como medida de prevención de accidentes.

1.7. METODOLOGÍA Y MEDIOS

Implementar un enfoque completo para gestionar la prevención de los arcos eléctricos, desde una evaluación inicial de riesgos hasta el cumplimiento efectivo de las medidas de seguridad en el ambiente universitario.

- Revisar los documentos existentes sobre el sistema eléctrico del Bloque E, como diagramas unifilares, planos de distribución y manuales de operación.
- Realizar visitas al sitio para obtener información sobre las condiciones actuales del sistema eléctrico, como la ubicación de los equipos y cables.
- Modelar el sistema eléctrico del Bloque E en el software ETAP.
- Configurar los escenarios de falla que se desea simular.
- Evaluar los niveles de corriente y temperatura en los componentes del sistema eléctrico para identificar los componentes más vulnerables a los arcos eléctricos.
- Identificar los componentes del sistema eléctrico que tienen más probabilidades de sufrir daños por arcos eléctricos.
- Recomendar soluciones para mitigar la propagación de arcos eléctricos en los componentes identificados como vulnerables.
- Colocar etiquetas de riesgo eléctrico en lugares visibles y accesibles en las áreas del Bloque E que se hayan identificado como de alto riesgo de arco eléctrico

CAPITULO II

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1. NFPA 70 E1 NFPA 70

El Código Eléctrico Nacional (NEC) es una norma de seguridad que establece los requisitos para el diseño, la instalación y la inspección de instalaciones eléctricas. El objetivo del NEC es proteger a las personas y los bienes materiales de los peligros eléctricos. El NEC se aplica a una amplia gama de instalaciones eléctricas, incluidas las instalaciones en edificios públicos y privados, las infraestructuras de fibra óptica y las instalaciones en construcciones empleadas por las compañías de suministro eléctrico.

Los requisitos del NEC incluyen el uso de materiales y equipos eléctricos adecuados, la implementación de dispositivos para prevenir sobretensiones, la instalación de sistemas de puesta a tierra y la instalación de sistemas de protección contra incendios. El cumplimiento del NEC es obligatorio en muchos países, y su aplicación contribuye a reducir el riesgo de incendios, electrocuciones y otros accidentes eléctricos [11].

- Instalaciones eléctricas interiores: Son las instalaciones que se encuentran dentro de los edificios o construcciones, y se utilizan para suministrar energía eléctrica a los usuarios finales.
- Instalaciones eléctricas exteriores: Son las instalaciones que se encuentran fuera de los edificios o construcciones, y se utilizan para transportar o distribuir energía eléctrica.
- Instalaciones eléctricas especiales: Son las instalaciones que tienen características especiales, como las instalaciones de alta tensión o las instalaciones de ferrocarriles [12].

Norma de Seguridad Eléctrica para el lugar de trabajo (NFPA 70E) es un conjunto de requisitos que ayudan a los empleadores a proteger a sus trabajadores de los peligros eléctricos. La norma establece que el objetivo principal es operar bajo la condición de riesgo nula o de óptima seguridad, es decir, desenergizando los equipos eléctricos antes de trabajar en ellos. En situaciones de alto riesgo donde no se pueda trabajar en forma desenraizada, es prescindible evaluar los riesgos por choque eléctrico y por arco eléctrico, para establecer las distancias seguras y los EPP adecuados a utilizar.

La norma también establece que los empleadores deben capacitar a sus trabajadores sobre los peligros eléctricos y las medidas de prevención. El propósito de la norma NFPA 70E es establecer un entorno seguro para los trabajadores que están expuestos a los peligros eléctricos. Para ello, se establece que el objetivo principal es trabajar con los equipos eléctricos desenergizados. En los casos en donde no sea posible, es necesario evaluar los riesgos eléctricos y tomar las medidas de seguridad necesarias, como el uso de aislamiento y EPP adecuado [12].

En el ámbito laboral, es imposible eliminar todas las amenazas presentes. Sin embargo, se puede trabajar para reducir el riesgo al mínimo posible, evitando se presenten accidentes. La norma NFPA 70E establece una serie de requisitos para ayudar con el objetivo. Estos requisitos incluyen la evaluación de los riesgos eléctricos, la implementación de controles para reducir los eventos riesgosos, la capacitación del personal técnico y el uso de equipos de protección personal (EPP) adecuados. La norma NFPA 70E también incluye requisitos específicos para prevenir el arco eléctrico. Estos requisitos incluyen la desenergización de los equipos eléctricos antes de trabajar en ellos, el uso de herramientas y equipos eléctricos diseñados para prevenir el arco eléctrico y el uso de EPP adecuado para proteger al trabajador de las quemaduras del arco eléctrico [12].

2.2. MÉTODOS MATEMÁTICOS DE CÁLCULO SEGÚN LA NFPA 70E – IEEE 1584

En 1982, Ralph H. Lee [4] publicó un documento que cambió la comprensión del origen de las quemaduras eléctricas. Hasta entonces, se creía que las quemaduras eléctricas las causaban solo el efecto Joule, pero Lee propuso que el arco eléctrico también podía causarlas. Lee desarrolló un modelo teórico para estimar la energía incidente producida por un arco eléctrico, la energía incidente es la energía liberada por el arco eléctrico y que puede ser absorbida por un objeto cercano. Este enfoque permitió la determinación de las distancias de seguridad respecto al origen de un arco eléctrico. Este modelo parte de la base de los documentos utilizados actualmente para calcular la energía incidente por un arco eléctrico. La NFPA 70E y la IEEE 1584 se caracterizan por utilizar diferentes métodos al momento de realizar el cálculo de la energía incidente, pero ambos métodos consideran variables como el voltaje, la corriente y el tipo de aislante.

Calcular de manera precisa la energía incidente resulta crucial, ya que este cálculo proporciona datos fundamentales para identificar los equipos de protección personal necesarios (EPP) a utilizar por sus operarios. Los EPP precisan proteger a los operarios de las quemaduras causadas por el arco eléctrico. Los cálculos de energía incidente pueden realizarse de forma manual o utilizando software. La elección del método de cálculo depende de las necesidades específicas del proyecto.

2.1.1. Cálculos manuales:

2.1.1.1. Son sencillos porque se basan en la aplicación de fórmulas simples. Son económicos porque no requieren de equipos o software especializados. Sin embargo, pueden ser imprecisos si no se cuenta con el conocimiento técnico necesario para interpretar los resultados.

2.1.2. Hoja de cálculo:

2.1.2.1. La norma IEEE 1584 incluye una planilla de cálculo para mayor precisión que los cálculos manuales para hacerlos más simples porque incluyen fórmulas más complejas que pueden tener en cuenta más factores. Sin embargo, la precisión se reduce con la complejidad del sistema porque las fórmulas pueden ser más difíciles de aplicar correctamente.

2.1.3. Programas informáticos:

2.1.3.1. Son muy precisos para sistemas complejos porque incluyen algoritmos sofisticados que pueden considerar muchos factores. Sin embargo, pueden ser costosos porque requieren de la compra de un software especializado. Además, requieren de una computadora para su funcionamiento [12].

2.3. FALLAS DE TABLEROS DE BAJA TENSIÓN

Los tableros de baja tensión (BT) se pueden producir dos clases de fallas eléctricas: la falla de contacto y la falla de arco. La falla de contacto se produce cuando dos conductores a diferentes potenciales entran en contacto, dando lugar a un cortocircuito. Los efectos más dañinos de este tipo de falla son de tipo electrodinámico, y se relacionan con la fuerza que ejerce la corriente eléctrica sobre los conductores. La generación de un arco eléctrico tiene lugar cuando la capacidad dieléctrica del material aislante entre dos conductores con potenciales distintos se reduce. Este tipo de falla produce daños de tipo térmico, y se relacionan con el calor que se genera por el arco eléctrico. Las causas técnicas de los fallos en arco pueden deberse a defectos de aislamiento, los error humano, las implementación de servicio no acertada, déficit de mantenimiento y condicionales climáticas e higiénicas, presencia de insectos o la contaminación [12].

2.4. DEFINICIÓN DE ARCO ELÉCTRICO

El arco eléctrico surge cuando la tensión entre dos puntos excede la rigidez dieléctrica del aislante, resultando de un mal funcionamiento o desperfecto del equipo, como fallas entre fases o entre fase y tierra. Esto desencadena la liberación rápida de una gran cantidad de energía, con temperaturas que pueden llegar a varios miles de grados Celsius, provocando consecuencias

negativas tales como pérdida de visión, deterioro auditivo y lesiones por quemaduras.

La expansión del arco eléctrico, que resulta de la sublimación de los materiales conductores en la instalación afectada, experimenta una transformación volumétrica de 1 a 66.000 partes, proyectando al operario y ocasionándole daños físicos significativos. En situaciones críticas, la energía térmica o la onda expansiva pueden incluso llevar al fallecimiento de los empleados expuestos al arco eléctrico. Su símbolo es el que se muestra Figura 1, la cual está vinculado con la liberación de energía del relámpago y los perjuicios [12].

Las causas de generación son:

- Manipulación errónea del personal, como contacto involuntario o maniobras incorrectas en interruptores.
- Intrusión de animales, como roedores, felinos u otros, que ingresan a los tableros eléctricos.
- Factores ambientales como humedad, lluvias ácidas, condensación y corrosión.
- Deterioro del aislamiento debido al tiempo expuestos a contaminantes, el cuál es el último factor significativo que puede provocar arcos eléctricos sin intervención humana [12].



Figura 1. Símbolo ISO arco eléctrico [12]

Fuente. Estudio de choque y arco eléctrico-Ultratechinvestment

Primeras fases del arco eléctrico dentro del interior de un tablero se encuentran ejemplificados en la Figura 2. Estas fases se pueden diferenciar en:

2.1.4. Fase de Compresión

- 2.1.4.1. El aire que rodea al arco eléctrico se calienta rápidamente debido a la energía que fluye constantemente a través del arco.

2.1.5. Fase de Expansión

- 2.1.5.1. La energía interna del sistema aumenta desde el inicio, alcanzando su valor máximo en esta fase.

2.1.6. Fase de Emisión

2.1.6.1. Prácticamente la totalidad del aire es eliminada mediante una ligera y constante sobrepresión, por la energía del arco.

2.1.7. Fase Térmica

2.1.7.1. Después de que el aire es expulsado, la temperatura dentro del tablero alcanza la temperatura del arco. Esta fase continúa hasta que el arco se extingue, el material aislante y metálico que estuvieron involucrados en el arco se degradan, formando humos, gases y partículas de materia fundida [12].

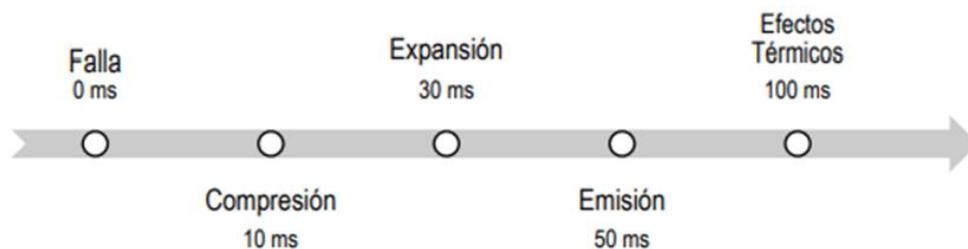


Figura 2. Escala de tiempo de las fases de arco eléctrico [12]

Fuente. Estudio de choque y arco eléctrico-Ultratechinvestment

El arco se ve como una luz brillante que conecta los dos electrodos, la luz se produce por la descomposición del gas aislante del medio, que se convierte en plasma [12]. Este fenómeno que se presenta en la Figura 3 es un peligro grave debido a que puede causar explosiones de altas temperaturas y quemaduras graves llegando a producir un calor intenso el cual puede encender la ropa como a su vez puede presentarse explosiones sonoras y ondas de presión dependiendo de la magnitud del mismo, ocasionando incluso la muerte [1].



Figura 3. Arco Eléctrico generado por una maniobra de CCM [2]

Fuente. Estudio de choque y arco eléctrico-Ultratechinvestment

Un arco eléctrico es una descarga de electricidad que se produce entre dos objetos conductores como se evidencia en la Figura 4. El riesgo primario de un arco eléctrico es la liberación de energía, que se manifiesta en forma de energía calórica intenso y una onda de presión.



Figura 4. Riesgo por destello de arco eléctrico [3]

Fuente. Estudio de choque y arco eléctrico-Ultratechinvestment

2.5. LÍMITES DE APROXIMACIÓN

Contar con una cultura de seguridad es esencial para prevenir accidentes. Para lograrlo, es esencial tener conciencia sobre la relevancia de mantener una distancia adecuada al aproximarse a conductores eléctricos y circuitos expuestos con energía. Es factible que inicialmente no se presente un incidente fatal, no obstante, es necesario considerar la situación más desfavorable, el personal encargado de las labores de mantenimiento eléctrico debe estar familiarizado con los límites de aproximación situado en la Figura 3 [5].

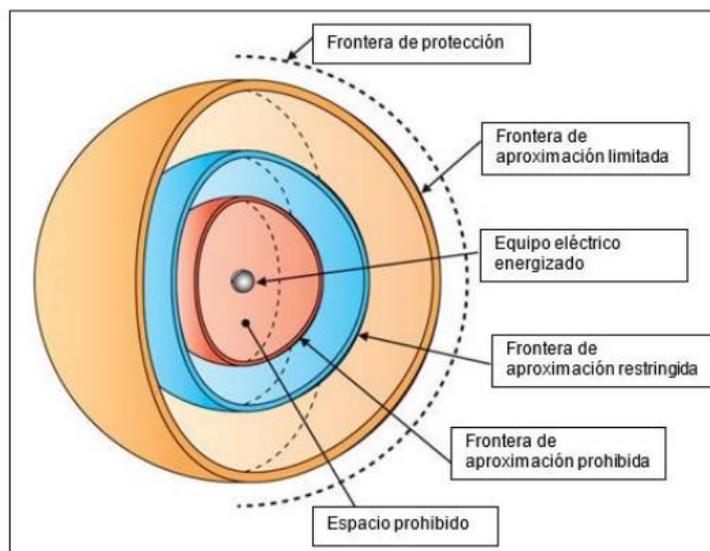


Figura 3. Límite de aproximación [6]

Fuente. NFPA 70 ED-2015

2.6. LÍMITES DE APROXIMACIÓN SEGÚN LA NFPA70E:

La distancia mínima de aislamiento de aire el cual se requiere para evitar el riesgo, implementadas por la norma NFPA70E-2015 son [11]:

| Nro | Tensión (V) | d (mm) | d (pies) + d (pulgadas) |
|-----|---------------------|---------|----------------------------|
| 1 | ≤ 300 | 1 | 0 0.03 |
| 2 | > 300 a ≤ 750 | 2 | 0 0.07 |
| 3 | > 750 a ≤ 2kV | 5 | 0 0.19 |
| 4 | > 2kV a ≤ 15kV | 39 | 0 1.5 |
| 5 | > 15kV a ≤ 36kV | 161 | 0 6.3 |
| 6 | > 36kV a ≤ 48.3kV | 254 | 0 10.0 |
| 7 | > 48.3kV a ≤ 72.5kV | 381 | 1 3.0 |
| 8 | > 72.5kV a ≤ 121kV | 640 | 2 1.2 |
| 9 | > 138kV a ≤ 145kV | 778 | 2 6.6 |
| 10 | > 161kV a ≤ 169kV | 915 | 3 0.0 |
| 11 | > 230kV a ≤ 242kV | 1.281 m | 4 2.4 |
| 12 | > 345kV a ≤ 362kV | 2.282m | 7 5.8 |
| 13 | > 500kV a ≤ 550kV | 3.112m | 10 2.5 |
| 14 | > 765kV a ≤ 800kV | 4.225m | 13 10.3 |

Figura 4. Distancias mínimas de aislamiento NFPA 70E

Fuente. Trabajo de Investigación, Alexander Junior Huaynate Sánchez

2.7. EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL (EPP)

La compañía RADTHINK, se especializa en servicios de protección eléctrica, señala en una publicación de su sitio web el grado de seguridad el cual se debe tener según el tiempo de categoría como se muestra en la Figura 5, requerido en el equipo de protección personal (EPP) está definido en la Tabla 1 del estándar NFPA-70E 2018.

| CATEGORÍA DE PPE 1 | CATEGORÍA DE PPE 2 | CATEGORÍA DE EPP 3 | CATEGORÍA DE EPP 4 |
|---|---|--|---|
| <p>CLASIFICACIÓN DE ARCO MÍNIMO ENTRE 4 - 8 CAL/CM2</p> <p>ROPA DE PROTECCIÓN CONTRA ARCO ELÉCTRICO</p> <ul style="list-style-type: none"> • Camisa de manga larga y pantalones o traje entero aptos para arcos eléctricos • Protector facial o capucha para traje aptos para arcos eléctricos • Chaqueta, parka, gabardina o revestimiento para cascos aptos para arcos eléctricos (según sea necesario) <p>OTROS EQUIPOS DE PROTECCIÓN:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Casco • Lentes o gafas de seguridad • Protección auditiva (dentro del oído) • Guantes de cuero resistentes • Calzado de cuero (según sea necesario) | <p>CLASIFICACIÓN DE ARCO MÍNIMO ENTRE 8 - 25 CAL/CM2</p> <p>ROPA DE PROTECCIÓN CONTRA ARCO ELÉCTRICO</p> <ul style="list-style-type: none"> • Camisa de manga larga y pantalones o traje entero aptos para arcos eléctricos • Capucha para traje o protector facial y pasamontañas aptos para arcos eléctricos • Chaqueta, parka, gabardina o revestimiento para cascos aptos para arcos eléctricos (según sea necesario) <p>OTROS EQUIPOS DE PROTECCIÓN:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Casco • Lentes o gafas de seguridad • Protección auditiva (dentro del oído) • Guantes de cuero resistentes • Calzado de cuero | <p>CLASIFICACIÓN DE ARCO MÍNIMO ENTRE 25 - 40 CAL/CM2</p> <p>ROPA DE PROTECCIÓN CONTRA ARCO ELÉCTRICO</p> <ul style="list-style-type: none"> • Según sea necesario: Camisa de manga larga, pantalones traje entero, chaqueta y pantalones de traje aptos para arcos eléctricos • Capucha para traje apta para arcos eléctricos • Guantes aptos para arcos eléctricos • Chaqueta, parka, gabardina o revestimiento para cascos aptos para arcos eléctricos (según sea necesario) <p>OTROS EQUIPOS DE PROTECCIÓN:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Casco • Lentes o gafas de seguridad • Protección auditiva (dentro del oído) • Calzado de cuero (según sea necesario) | <p>CLASIFICACIÓN DE ARCO MÍNIMO 40 CAL/CM2</p> <p>ROPA DE PROTECCIÓN CONTRA ARCO ELÉCTRICO</p> <ul style="list-style-type: none"> • Según sea necesario: Camisa de manga larga, pantalones traje entero, chaqueta y pantalones de traje aptos para arcos eléctricos • Capucha para traje apta para arcos eléctricos • Guantes aptos para arcos eléctricos • Chaqueta, parka, gabardina o revestimiento para cascos aptos para arcos eléctricos (según sea necesario) <p>OTROS EQUIPOS DE PROTECCIÓN:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Casco • Lentes o gafas de seguridad • Protección auditiva (dentro del oído) • Calzado de cuero (según sea necesario) |

Figura 5. Categorías de EPP según la norma NFPA 70E-2018

Tabla 1. Categorías de EPP

Fuente. Norma NPFA-70E de seguridad eléctrica

La clasificación de riesgo, como se ilustra en la Figura 9, estará siempre determinada por el valor inmediato superior del nivel de energía incidente calculado mediante el análisis del arco eléctrico. Además, el autor nos presenta la Tabla 2 realizado por su autoría, la cual nos presenta de forma resumida la cooperativa entre la categoría y el nivel de protección [5].

| Categoría | Nivel de Protección cal/cm ² |
|-----------|--|
| 1 | 4 |
| 2 | 8 |
| 3 | 25 |
| 4 | 40 |

Tabla 2. Categorías/Nivel de protección

Fuente. Trabajo de Investigación, Alexander Junior Huaynate Sánchez

Las etiquetas de riesgo de arco eléctrico tal como se muestra en la Figura 6 proporcionan información importante tal como se muestran en la sobre los peligros potenciales asociados con el trabajo en sistemas eléctricos energizados. Esta información incluye la categoría de riesgo del sistema y el equipo de protección personal (EPP) [5].

| PELIGRO | |
|--|---|
| <small>Norma NFPA 70E-2018</small> | |
| RIESGO DE ARCO ELÉCTRICO Y ELECTROCUCIÓN PRESENTE | |
| <small>Se requiere EPP de acuerdo a categoría</small> | |
| RIESGO DE ARCO ELÉCTRICO | RIESGO DE ELECTROCUCIÓN |
| Distancia de arco (m) 0.737 | 480 VCA Cuando la tapa es removida |
| Energía incidente (cal/cm ²) 3.13 | Límite de aproximación (m) 1.067 |
| Categoría de riesgo # 1 | Distancia restringida (m) 0.305 |
| A la distancia de trabajo (cm) 45.72 | GUANTES |
| | Clase 00 Protección con guantes de piel |
| EPP REQUERIDO | |
| Camiseta de algodón, protección auditiva, lentes y zapatos dieléctricos | |
| Camisa de manga larga y pantalón resistentes al arco de 4 cal/cm ² | |
| Pasamontañas (protección de cuello) resistentes al arco de 4 cal/cm ² | |
| Casco de protección facial resistente al arco de 4 cal/cm ² | |
| <small>Tablero: Ejemplo 1</small> | <small>Fecha: 01/01/2018</small> |

Figura 6. Etiquetas de Arco Eléctrico

Fuente. Categorías de riesgo y EPP requerido - RADTHINK

2.8. CAUSAS DEL ARCO ELÉCTRICO

Los arcos eléctricos se producen principalmente por errores humanos, como la falta de precaución al trabajar con equipos eléctricos energizados. También pueden ser causados por el mantenimiento deficiente de las instalaciones eléctricas, así como por los siguientes factores [3].

- La existencia de oxidación en las partes metálicas de los equipos resulta en la producción de impurezas en la superficie del material aislante, debilitando la conexión entre las terminales de los alimentadores.

- El contacto con las partes energizadas o la caída de herramientas que ocasionen un cortocircuito momentáneo pueden iniciar un arco eléctrico.
- En el Manual de ETAP nos dice que: ETAP [12] es un software de ingeniería de alto rendimiento que permite a los ingenieros eléctricos analizar, diseñar, simular y evaluar sistemas de potencia. El software tiene más de 60 módulos que abarcan aspectos de los sistemas de potencia, desde la generación hasta la distribución y la gestión de residuos.

La empresa matriz de ETAP, Operation Technology Inc., tiene su sede en Irvine, California. Es un programa estándar para los ingenieros eléctricos de todo el mundo. Esto se debe a sus numerosas aplicaciones que permiten a los usuarios realizar estudios de manera más óptima que otros softwares del mercado, también ofrece una rápida realización de los análisis eléctricos logrando resultados confiables y una administración eficiente de la información. Además, es una herramienta estándar en la industria eléctrica, ya que permite a los usuarios llevar a cabo estudios de forma rápida y fiable. El software también cuenta con una amplia biblioteca de datos de fabricantes que proporciona una representación realista de los sistemas eléctricos [4].

El módulo Arc Flash de ETAP como es mostrada en la Figura 7 [12], es una herramienta que posibilita el cálculo de la energía producida por un arco eléctrico. Esta información se puede utilizar para determinar las medidas de protección necesarias para evitar lesiones a las personas y daños a los equipos. El análisis de cortocircuitos trifásicos, que son los que generan más arco eléctrico, se realiza de acuerdo con las normas ANSI/IEEE o IEC, el Arc Rating (ATPV) se calcula utilizando el método que mejor se ajuste a los límites que se aproximan a las componentes energizadas en una protección frente a choques eléctricos determinados en la norma NFPA 70E [5].

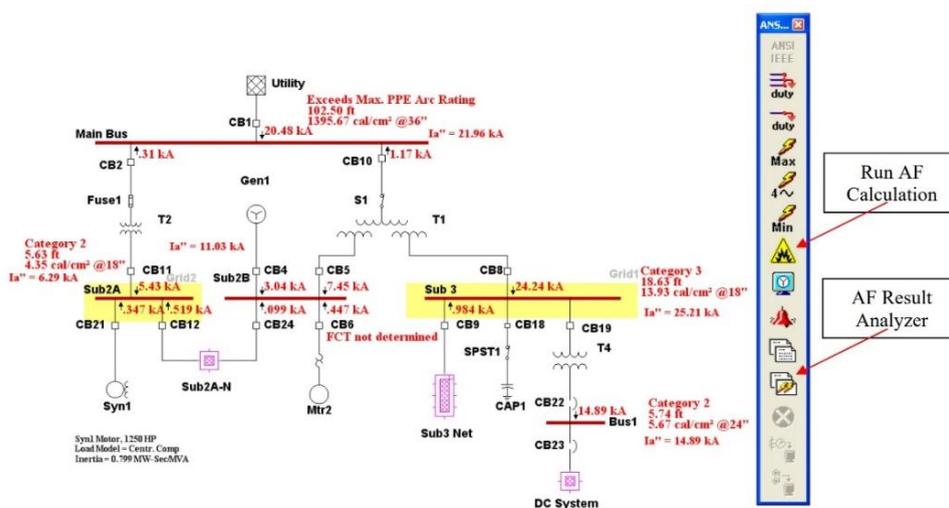


Figura 7. Módulo de Arc Flash en ETAP [5]

Fuente. Etap.es – Arco eléctrico

El Analizador de resultados de ETAP es un recurso fundamental que permite visualizar de forma rápida y sencilla los resultados de varios análisis de arco eléctrico en una sola pantalla. Esto facilita la respectiva evaluación de riesgos por arco eléctrico. Adicionalmente, posibilita la comparación de los resultados tal como se muestra Figura 8 el cuál es el análisis de arco eléctrico en proyectos semejantes almacenados en el mismo directorio. Esto es útil para identificar similitudes y diferencias entre los sistemas eléctricos [5].

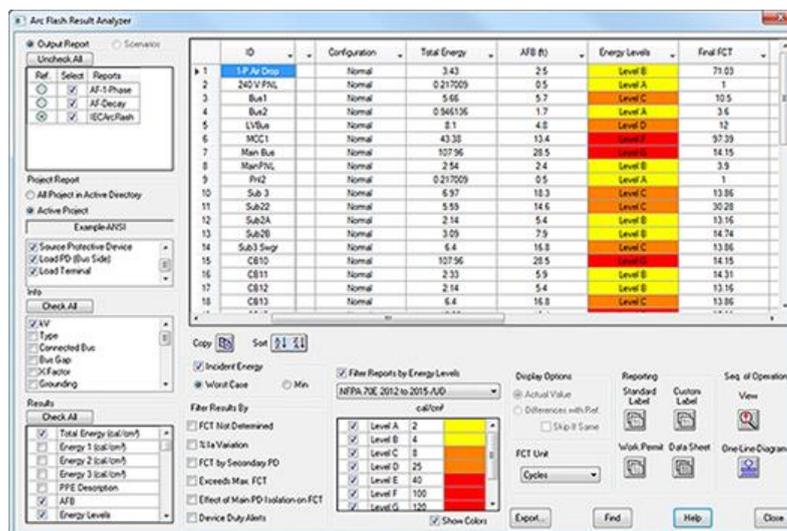


Figura 8. Analizador de resultados de arco eléctrico en Etap [5]

Fuente. Etap.es Arco eléctrico-analizador de resultados

El programa rellena automáticamente la información necesaria, como la energía incidente y los límites de proximidad, y el usuario puede personalizar las etiquetas según sea necesario tal como es demostrada en la Figura 9.



Figura 9. Etiquetas generadas por Etap para seguridad [5]

Fuente. Etap.es – Arco eléctrico

2.9. AUTO CAD

AutoCAD como se muestra en la Figura 10, desarrollado por Autodesk, es un programa de diseño asistido por ordenador ampliamente diseñada para la creación de dibujos en 2D y 3D. Desde su debut en 1982 en COMDEX (Computer Dealers' Exhibition), ha mantenido su reconocimiento a nivel internacional gracias a su destacada capacidad de edición, permitiendo la elaboración de planos digitales y la creación de imágenes tridimensionales. Este manual se centra en la versión 2020 de AutoCAD de Autodesk, que destaca como el software más utilizado en varias empresas y sirve como base inicial para otros programas CAD/CADD disponibles en el mercado [13].



Figura 10. Pantalla de inicio AutoCAD [13]

Fuente. Autodeks. Latinoamérica. autodesk

2.10. ETAP

El software ETAP como se muestra en la Figura 11, es una herramienta informática versátil que posibilita la realización de análisis avanzados de sistemas eléctricos de potencia, en el cual se pueden realizar los siguientes análisis de flujo de carga, cortocircuito y coordinación de protecciones [12].



Figura 11. Inicio Etap[12]

Fuente. Mendieta Yepes, S. B. Universidad de La Salle, Bogotá

CAPITULO III

3. ESQUEMAS DE REDES ELÉCTRICAS

La red eléctrica es un sistema interconectado de líneas eléctricas, subestaciones y otros equipos que transportan y distribuyen energía eléctrica desde las centrales eléctricas hasta los consumidores. La red eléctrica se divide en dos partes principales: la red de transporte y la red de distribución. Transporta energía eléctrica a alta tensión desde las centrales eléctricas hasta las subestaciones transformadoras. Las subestaciones transformadoras reducen la tensión de la energía eléctrica para que pueda distribuirse a los consumidores, la red de distribución transporta energía eléctrica a baja tensión desde las subestaciones transformadoras hasta los consumidores [14], las redes se pueden clasificar en:

3.1. CLASIFICACIÓN DE REDES ELÉCTRICAS

3.1.1. Redes radiales

- Las líneas eléctricas se ramifican desde el punto de alimentación como es demostrada en la Figura 12:

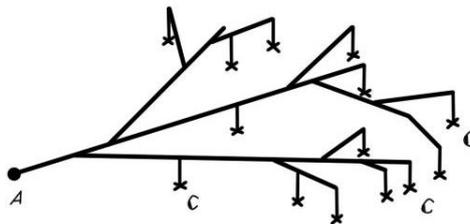


Figura 12. Esquema de red radial [14]

Fuente. Estudio de sistemas proyectivos en redes eléctricas en alta tensión,

3.1.2. Redes malladas

- La red está constituida por bucles cerrados entre sí como es demostrada en la Figura 13:

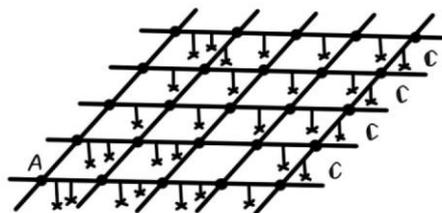


Figura 13. Esquema de red mallada [14]

Fuente. Estudio de sistemas proyectivos en redes eléctricas en alta tensión

3.1.3. En bucle

- La red en bucle es una configuración intermedia entre las redes radiales y malladas. En condiciones normales, la red se encuentra abierta en un punto, pero en caso de falla, se cierra el punto de apertura y se desconecta el elemento en falla. Esto permite mantener el suministro eléctrico al resto del sistema como es demostrada en la Figura 14.

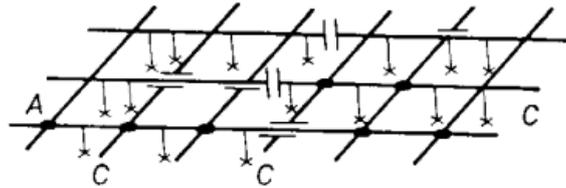


Figura 14. Esquema de red en bucle [14]

Fuente. Estudio de sistemas proyectivos en redes eléctricas en alta tensión

Las redes presentadas cada una de ellas representa una serie de ventajas e inconvenientes la cual será resumida en la Tabla 3.

| | Ventajas | Desventajas |
|---------------------------|---|--|
| Radial o en antena | <ul style="list-style-type: none"> - Simplicidad en las protecciones (selectividad) - Sencillez de explotación - Bajo coste de instalación | <ul style="list-style-type: none"> - Falta de garantía de suministro ante faltas o paradas programadas para mantenimiento |
| Mallada | <ul style="list-style-type: none"> - Seguridad de suministro - Flexibilidad de alimentación - Facilidad de mantenimiento | <ul style="list-style-type: none"> - Mayor coste de instalación - Mayor potencia de cortocircuito - Complejidad del sistema de protección |

Tabla 3. Características de tipos de redes [14]

Fuente. Sistemas proyectivos en redes eléctricas en alta tensión

Además, dentro de las redes eléctricas también tenemos otra clasificación de redes la cuales pueden realizarse en base a redes aéreas o redes subterráneas.

3.1.4. Redes aéreas:

- Las redes eléctricas aéreas tal como la Figura 15 tienen la ventaja de ser menos costosas de instalar y mantener que las redes subterráneas. Sin embargo, están expuestas a las inclemencias del tiempo, lo que puede provocar fallas y cortes de energía [14].

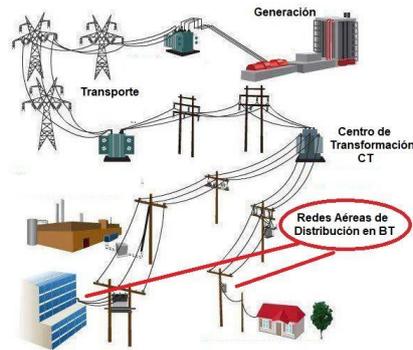


Figura 15. Redes de distribución aéreas

Fuente. Redes áreas baja tensión-areatecnologia

3.1.5. Redes subterráneas:

- Las redes eléctricas subterráneas la como la Figura 16 son más costosas de instalar que las redes aéreas, pero tienen la ventaja de ser más duraderas y requerir menos mantenimiento. Además, ofrecen una mejor calidad de servicio, ya que están menos expuestas a las condiciones climáticas [14].

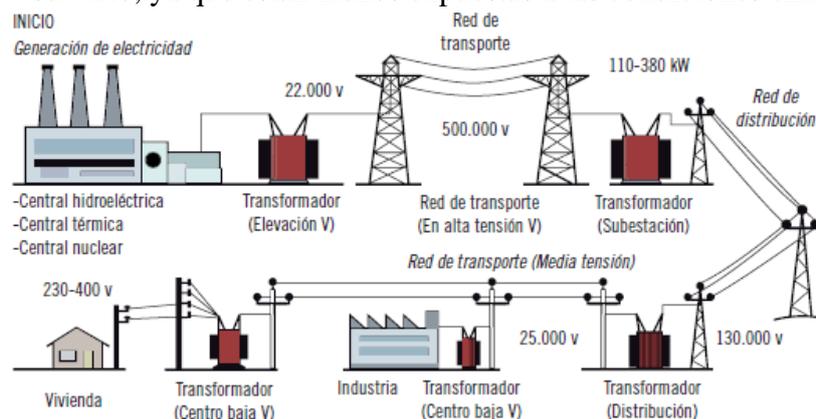


Figura 16. Redes de distribución subterráneas

Fuente. Reader – digitalbooks – book 18870

3.2. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO

Un cortocircuito se produce en el instante en que se presente un contacto no deseado entre conductores o elementos conductores conectados a tierra, el análisis es fundamental en cualquier instalación, pues es una de las fallas más perjudiciales que pueden ocurrir. Diversas situaciones pueden provocar un cortocircuito, como una falla $1\emptyset$ a tierra, una falla $2\emptyset$, una falla $2\emptyset$ con contacto a tierra, una falla $3\emptyset$ o una falla $3\emptyset$ a tierra. Las fallas simétricas son aquellas que afectan a todas las fases del sistema eléctrico. Aunque este tipo de falla es la más grave, ya que genera corrientes de mayor magnitud, las fallas asimétricas afectan a una a dos fases y generalmente ocurren entre una fase y tierra o entre fases.

3.3. CLASES DE CORTO CIRCUITO

Para que una persona experimente una descarga eléctrica, es necesario que establezca una conexión entre dos puntos de su cuerpo que estén a diferentes niveles de potencial eléctrico.

Razones las cuales se produce el cierre de un circuito eléctrico [15]:

- Ocurre un cortocircuito entre dos conductores activos, ya sea entre fases o entre fase y neutro.
- Hay un cortocircuito entre conductores activos y la tierra.

3.4. DESEMPEÑO DE FUSIBLES EN REDES ELÉCTRICAS

Los fusibles son elementos esenciales para la protección de las redes eléctricas los cuales operan bajo el principio del efecto Joule, por consiguiente indica que si la corriente que atraviesa el fusible sobrepasa un valor específico durante un tiempo determinado, la temperatura en ciertas zonas del fusible se eleva hasta alcanzar el punto de fusión del material del fusible, esto genera la ruptura y apertura el fusible, aislando la red en cuestión de la fuente de energía hasta que se solucione la posible falla y se sustituya el fusible [15].

3.5. FALLAS EN TABLEROS DE BAJA TENSION

En los tableros de baja tensión se pueden observar dos tipos de fallas que generan corrientes de gran magnitud: la falla por contacto, también llamada falla atornillada, y la falla por arco eléctrico, conocida como falla de arco, la falla por contacto se produce cuando dos o más elementos conductores con diferentes potenciales entran en contacto. En esta situación, los efectos más perjudiciales son principalmente electrodinámicos, y son proporcionales al cuadrado de la corriente, por otro lado la falla por arco se presenta cuando la capacidad dieléctrica del medio aislante que separa dos o más elementos conductores con diferentes potenciales disminuye.

Los daños son de naturaleza térmica y se encuentran directamente relacionados con la resistencia de arco (R_a), la cual alcanza un valor elevado. Esto genera una corriente que circula a través de un aislante altamente ionizado, lo que provoca un rápido e intenso aumento de la temperatura en el mismo, el aumento de temperatura genera gradientes térmicos abruptos, ondas de presión con gradientes de presión y una elevada ionización del aislante, lo que finalmente reduce su capacidad dieléctrica [16].

3.6. DURACIÓN DEL ARCO PARA FUSIBLES

Si ambos están disponibles, se debe utilizar el tiempo total de despeje que representa la peor duración. Si la curva solo consta del tiempo promedio de fusión, se deben agregar 10% del tiempo más 0.004 segundos adicionales para determinar el tiempo total de despeje. Si el tiempo total de despeje a la corriente de falla del arco es menor a 0.01 segundos, entonces se puede usar 0.01 segundos para el tiempo.

3.7. ETIQUETAS DE ADVERTENCIA DE LA NFPA 70E

La norma NFPA 70E [11], exige que los equipos eléctricos, como tableros, paneles de control industrial, recintos de medición y centros de control de motores ubicados en diferentes unidades de vivienda y que probablemente requieran inspección, ajuste de los mismos.

3.8. CÁLCULO DE ARCO ELÉCTRICO (NFPA 70E) PELIGROS

La norma NFPA-70E [11], establece un procedimiento para realizar el cálculo de la energía calorífica potencial presente (cal/cm²) en un tablero eléctrico, tomando como base los niveles de falla presentes y la velocidad de operación de los elementos de interrupción. A partir de este cálculo, se determina el equipo de protección individual requerido para trabajar de forma segura en un tablero energizado.

3.9. MODELADO DEL RANGO PARA ARCO ELECTICO.

El siguiente modelo derivado empíricamente, basado en análisis estadístico y programas de ajuste de curvas, así como en la comprensión de la física del arco eléctrico, es aplicable a sistemas con el siguiente rango de parámetros:

- Voltajes en el rango de 208 V a 15000 V, trifásicos (fase a fase).

Las pruebas se llevaron a cabo en un entorno de laboratorio con voltajes de circuito abierto específicos (Voc). Si bien el modelo se basa en Voc, es posible usar el voltaje previo al fallo (voltaje nominal del sistema, voltaje de utilización, etc.) los valores de las pruebas de encuentran en la Tabla 4.

- Frecuencia:
 - 50 Hz - 60 Hz
- Corriente de falla bajo cortocircuito
 - 208 V a 600 V: 500 A - 106000 A
 - 601 V a 15000 V: 200 A - 65000 A

- Espacios entre conductores:
 - 6.35 mm a 76.2 mm – 208/600V
 - 19.05 mm a 254 mm – 601/15000V
- Distancias de trabajo:
 - mayores o iguales a 305 mm (12 pulgadas)
- Recintos probados
 - Altura o ancho máximo: 1244.6 mm (49 pulgadas).
 - Área de apertura máxima: 1.549 m² (2401 pulgadas²).
 - Ancho mínimo: El ancho del recinto debe ser mayor que cuatro veces la brecha entre conductores (electrodos).

| Open-circuit voltage (V) | Enclosure dimensions (H × W × D) | |
|--------------------------|----------------------------------|-----------------------|
| | SI units (metric) | Imperial units |
| 600 | 508 mm × 508 mm × 508 mm | 20 in × 20 in × 20 in |
| 2 700 | 660.4 mm × 660.4 mm × 660.4 mm | 26 in × 26 in × 26 in |
| 14 300 | 914.4 mm × 914.4 mm × 914.4 mm | 36 in × 36 in × 36 in |

Tabla 4. Dimensiones del recinto según Voltaje del sistema

Fuente. IEEE Guide Arc-Flash Hazard Calculations

3.10. SEPARACIÓN TÍPICA Y EL TAMAÑO DEL RECINTO SEGÚN LOS VOLTAJES DEL SISTEMA Y LAS CLASES DE EQUIPO.

El estudio, el voltaje del sistema y la clasificación del equipo permiten establecer distancias típicas entre conductores (o entre barras). La medición o la obtención de estas distancias del fabricante puede ser compleja. Los valores de separación de la Figura 17 se basan en las pruebas de arco eléctrico realizadas.

| Equipment class | Typical bus gaps (mm) | Enclosure Size (H × W × D) | |
|--|-----------------------|--|--|
| | | SI units (metric) | Imperial units |
| 15 kV switchgear | 152 | 1143 mm × 762 mm × 762 mm | 45 in × 30 in × 30 in |
| 15 kV MCC | 152 | 914.4 mm × 914.4 mm × 914.4 mm | 36 in × 36 in × 36 in |
| 5 kV switchgear | 104 | 914.4 mm × 914.4 mm × 914.4 mm | 36 in × 36 in × 36 in |
| 5 kV switchgear | 104 | 1143 mm × 762 mm × 762 mm | 45 in × 30 in × 30 in |
| 5 kV MCC | 104 | 660.4 mm × 660.4 mm × 660.4 mm | 26 in × 26 in × 26 in |
| Low-voltage switchgear | 32 | 508 mm × 508 mm × 508 mm | 20 in × 20 in × 20 in |
| Shallow low-voltage MCCs and panelboards | 25 | 355.6 mm × 304.8 mm × ≤203.2 mm | 14 in × 12 in × ≤8 in |
| Deep low-voltage MCCs and panelboards | 25 | 355.6 mm × 304.8 mm × >203.2 mm | 14 in × 12 in × >8 in |
| Cable junction box | 13 | 355.6 mm × 304.8 mm × ≤203.2 mm or 355.6 mm × 304.8 mm × >203.2 mm | 14 in × 12 in × ≤8 in or 14 in × 12 in × >8 in |

Figura 17. Tamaños de gabinetes para cada clase de voltaje

Fuente. IEEE Guide Arc-Flash Hazard Calculations

3.11. CORRIENTES PROMEDIO INTERMEDIAS DE ARCO

Las corrientes de arco promedio intermedias pueden calcularse empleando la ecuación 1 de la manera descrita, junto con los coeficientes suministrados en la Tabla 5. Las corrientes de arco se calculan a tres voltajes de circuito abierto (V_{oc}) diferentes [8]:

(Ecuación 1)

$$I_{arcV_{oc}} = 10^{(k1+k2 \lg I_{bf} + k3 \lg G)} (k4I_{bf}^6 + k5I_{bf}^5 + k6I_{bf}^4 + k7I_{bf}^3 + k8I_{bf}^2 + k9I_{bf} + k10)$$

Donde:

I_{bf} es la corriente de cortocircuito con conexión a tierra para fallas trifásicas simétricas rms(kA); I_{arc600} corriente de arco rms promedio a $V_{oc} = 600 V$ (kA); $I_{arc2700}$ corriente de arco rms promedio a $V_{oc} = 2700 V$ (kA); $I_{arc4300}$ corriente de arco rms promedio a $V_{oc} = 14300 V$ (kA); G separación entre electrodos (mm); $k1$ a $k10$ constantes proporcionados en la tabla 5; \lg log 10.

| | E.C. / V_{oc} | $k1$ | $k2$ | $k3$ | $k4$ | $k5$ |
|-------------|-----------------|-----------|--------|---------|------------|------------|
| VCB | 600 V | -0.04287 | 1.035 | -0.083 | 0 | 0 |
| | 2700 V | 0.0065 | 1.001 | -0.024 | -1.557E-12 | 4.556E-10 |
| | 14300 V | 0.005795 | 1.015 | -0.011 | -1.557E-12 | 4.556E-10 |
| VCBB | 600 V | -0.017432 | 0.98 | -0.05 | 0 | 0 |
| | 2700 V | 0.002823 | 0.995 | -0.0125 | 0 | -9.204E-11 |
| | 14300 V | 0.014827 | 1.01 | -0.01 | 0 | -9.204E-11 |
| HCB | 600 V | 0.054922 | 0.988 | -0.11 | 0 | 0 |
| | 2700 V | 0.001011 | 1.003 | -0.0249 | 0 | 0 |
| | 14300 V | 0.008693 | 0.999 | -0.02 | 0 | -5.043E-11 |
| VOA | 600 V | 0.043785 | 1.04 | -0.18 | 0 | 0 |
| | 2700 V | -0.02395 | 1.006 | -0.0188 | -1.557E-12 | 4.556E-10 |
| | 14300 V | 0.005371 | 1.0102 | -0.029 | -1.557E-12 | 4.556E-10 |
| HOA | 600 V | 0.111147 | 1.008 | -0.24 | 0 | 0 |
| | 2700 V | 0.000435 | 1.006 | -0.038 | 0 | 0 |
| | 14300 V | 0.000904 | 0.999 | -0.02 | 0 | 0 |

Tabla 5. Coeficientes para Ecuaciones

Fuente. IEEE Guide Arc-Flash Hazard Calculations

| <i>k6</i> | <i>k7</i> | <i>k8</i> | <i>k9</i> | <i>k10</i> |
|------------|------------|------------|-----------|------------|
| -4.783E-09 | 1.962E-06 | -0.000229 | 0.003141 | 1.092 |
| -4.186E-08 | 8.346E-07 | 5.482E-05 | -0.003191 | 0.9729 |
| -4.186E-08 | 8.346E-07 | 5.482E-05 | -0.003191 | 0.9729 |
| -5.767E-09 | 2.524E-06 | -0.00034 | 0.01187 | 1.013 |
| 2.901E-08 | -3.262E-06 | 0.0001569 | -0.004003 | 0.9825 |
| 2.901E-08 | -3.262E-06 | 0.0001569 | -0.004003 | 0.9825 |
| -5.382E-09 | 2.316E-06 | -0.000302 | 0.0091 | 0.9725 |
| 4.859E-10 | -1.814E-07 | -9.128E-06 | -0.0007 | 0.9881 |
| 2.233E-08 | -3.046E-06 | 0.000116 | -0.001145 | 0.9839 |
| -4.783E-09 | 1.962E-06 | -0.000229 | 0.003141 | 1.092 |
| -4.186E-08 | 8.346E-07 | 5.482E-05 | -0.003191 | 0.9729 |
| -4.186E-08 | 8.346E-07 | 5.482E-05 | -0.003191 | 0.9729 |
| -3.895E-09 | 1.641E-06 | -0.000197 | 0.002615 | 1.1 |
| 7.859E-10 | -1.914E-07 | -9.128E-06 | -0.0007 | 0.9981 |
| 7.859E-10 | -1.914E-07 | -9.128E-06 | -0.0007 | 0.9981 |

Tabla 6. Coeficientes para Ecuaciones

Fuente. IEEE Guide Arc-Flash Hazard Calculations

3.12. FACTOR DE CORRECCIÓN DE VARIACIÓN DE CORRIENTE DE ARCO

Calcular un segundo conjunto de tiempos de duración de arco utilizando la corriente de arco reducida $I_{arc_{min}}$, con el objetivo de evaluar si la fluctuación en la corriente de arco afecta el tiempo de operación de los dispositivos de protección y, por consiguiente, la energía incidente. Para establecer un margen inferior de la corriente de arco rms promedio, utilice la ecuación 2 según lo indicado junto con los coeficientes proporcionados en la Tabla 7 [8]:

(Ecuación 2)

$$I_{arc_{min}} = I_{arc} * (1 - 0.5 * VarC_f)$$

$$VarC_f = (k1V_{oc}^6 + k2V_{oc}^5 + k3V_{oc}^4 + k4V_{oc}^3 + k5V_{oc}^2 + k6V_{ov} + k7)$$

Donde:

$VarC_f$ factor de corrección; I_{arc} corriente de arco (kA) ; $I_{arc_{min}}$ mínima corriente de arco (kA); V_{oc} tensión de circuito abierto; $k1$ a $k7$ constantes proporcionados en la Tabla 7.

| E.C. | k1 | k2 | k3 |
|------|------------|---------------|-------------|
| VCB | 0 | -0.0000014269 | 0.000083137 |
| VCBB | 1.138e-06 | -6.0287e-05 | 0.0012758 |
| HCB | 0 | -3.097e-06 | 0.00016405 |
| VOA | 9.5606E-07 | -5.1543E-05 | 0.0011161 |
| HOA | 0 | -3.1555e-06 | 0.0001682 |
| | k4 | k5 | k6 |
| | -0.0019382 | 0.022366 | -0.12645 |
| | -0.013778 | 0.080217 | -0.24066 |
| | -0.0033609 | 0.033308 | -0.16182 |
| | -0.01242 | 0.075125 | -0.23584 |
| | -0.0034607 | 0.034124 | -0.1599 |
| | k7 | | |
| | 0.30226 | | |
| | 0.33524 | | |
| | 0.34627 | | |
| | 0.33696 | | |
| | 0.34629 | | |

Tabla 7. Coeficiente para Ecuación (2)

Fuente. IEEE Guide Arc-Flash Hazard Calculations

NOTA: El factor de corrección $(1-(0.5 \times \text{VarCf}))(1-(0.5 \times \text{VarCf}))$ se aplica; $208 \text{ V} \leq \text{Voc} \leq 600 \text{ V}$; $208 \text{ V} \leq \text{Voc} \leq 600 \text{ V}$; I_{arc} (solo corriente final) $600 \text{ V} < \text{Voc} \leq 15000 \text{ V}$; $600 \text{ V} < \text{Voc} \leq 15000 \text{ V}$; $A I_{\text{arc}600}, I_{\text{arc}2700}, I_{\text{arc}14300}$. El coeficiente "0.5" indica que la variación se aplica a la corriente de arco promedio para obtener un valor mínimo de la corriente de arco.

3.13. ENERGÍA INCIDENTE INTERMEDIA (E):

El método presentado permite anticipar la energía incidente en arcos eléctricos trifásicos, tanto al aire libre como en celdas. Sin embargo, su validez se limita a tensiones inferiores a 600V. Para tensiones superiores, solo se aplica al caso de arcos trifásicos al aire libre, las ecuaciones que lo sustentan se derivaron a partir de un estudio realizado por la IEEE [17]. Para tensiones menores a 600v, utilizaremos las ecuación 3 o ecuación 4.

(Ecuación 3)

$$E_{MA} = 5271 * D_a^{-1.9593} * t_A [0.0016 * F^2 - 0.0076 * F + 0.8939]$$

(Ecuación 4)

$$E_{MB} = 1038.7 * D_B^{-14738} * t_A [0.0093 F^2 - 0.3453 * F + 5.9675]$$

Donde:

E_{MA} energía incidente al aire cal/cm^2 ; E_{MB} energía incidente a caja cal/cm^2 ; DA separación de electrodos pulg; DB separación de electrodos de arco pulg; t_A tiempo de duración S; F corriente de cortocircuito kA.

3.14. LÍMITE DE DESTELLO DE ARCO INTERMEDIO (AFB)

Utiliza la ecuación 5 hasta la ecuación 8 de la siguiente manera usaremos las Tabla 8, Tabla 9, Tabla 10, para determinar los valores intermedios del límite de destello de arco (AFB) [8]:

(Ecuación 5)

$$AFB_{600}=10 \left(\frac{k1+k2 \lg G + \frac{k3I_{arc600}}{k4I_{bf}^7+k5I_{bf}^6+k6I_{bf}^5+k7I_{bf}^4+k8I_{bf}^3+k9I_{bf}^2+k10I_{bf}+k11 \lg I_{bf}+k13 \lg I_{arc600} + \lg\left(\frac{1}{CF}\right) - \lg\left(\frac{20}{T}\right)}}{-k12} \right)$$

(Ecuación 6)

$$AFB_{2700}=10 \left(\frac{k1+k2 \lg G + \frac{k3I_{arc2700}}{k4I_{bf}^7+k5I_{bf}^6+k6I_{bf}^5+k7I_{bf}^4+k8I_{bf}^3+k9I_{bf}^2+k10I_{bf}+k11 \lg I_{bf}+k13 \lg I_{arc2700} + \lg\left(\frac{1}{CF}\right) - \lg\left(\frac{20}{T}\right)}}{-k12} \right)$$

(Ecuación 7)

$$AFB_{14300}=10 \left(\frac{k1+k2 \lg G + \frac{k3I_{arc14300}}{k4I_{bf}^7+k5I_{bf}^6+k6I_{bf}^5+k7I_{bf}^4+k8I_{bf}^3+k9I_{bf}^2+k10I_{bf}+k11 \lg I_{bf}+k13 \lg I_{arc14300} + \lg\left(\frac{1}{CF}\right) - \lg\left(\frac{20}{T}\right)}}{-k12} \right)$$

(Ecuación 8)

$$AFB_{\leq 600}=10 \left(\frac{k1+k2 \lg G + \frac{k3I_{arc600}}{k4I_{bf}^7+k5I_{bf}^6+k6I_{bf}^5+k7I_{bf}^4+k8I_{bf}^3+k9I_{bf}^2+k10I_{bf}+k11 \lg I_{bf}+k13 \lg I_{arc} + \lg\left(\frac{1}{CF}\right) - \lg\left(\frac{20}{T}\right)}}{-k12} \right)$$

Donde:

AFB_{600} límite de destello de arco ; AFB_{2700} límite de destello de arco; AFB_{600} límite de destello de arco; $AFB_{\leq 600}$ límite de destello; G separación de electrodos mm; I_{arc600} corriente de arco kA; $I_{arc2700}$ corriente de arco eficaz; $I_{arc14300}$ corriente de arco eficaz; I_{arc} corriente de arco eficaz; I_{bf} corriente de falla; CF factor de corrección para el tamaño del recinto; \lg logaritmo en base 10; $k1$ a $k3$ coeficientes proporcionados en las Tabla 8, Tabla 9, Tabla 10; Para la ecuación 5 usamos la Tabla 8, Tabla 9, Tabla 10; Para la ecuación 6 usamos la Tabla 8, Tabla 9, Tabla 10; Para la ecuación 7 usamos la Tabla 8, Tabla 9, Tabla 10; Para la ecuación 8 usamos la Tabla 8, Tabla 9, Tabla 10.

| 600 V | k1 | k2 | k3 | k4 | k5 | k6 |
|--------------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|
| VCB | 0.753364 | 0.566 | 1.752636 | 0 | 0 | -4.783E-09 |
| VCBB | 3.068459 | 0.26 | -0.098107 | 0 | 0 | -5.767E-09 |
| HCB | 4.073745 | 0.344 | -0.370259 | 0 | 0 | -5.382E-09 |
| VOA | 0.679294 | 0.746 | 1.222636 | 0 | 0 | -4.783E-09 |
| HOA | 3.470417 | 0.465 | -0.261863 | 0 | 0 | -3.895E-09 |
| k7 | k8 | k9 | k10 | k11 | k12 | k13 |
| 0.000001962 | -0.000229 | 0.003141 | 1.092 | 0 | -1.598 | 0.957 |
| 0.000002524 | -0.00034 | 0.01187 | 1.013 | -0.06 | -1.809 | 1.19 |
| 0.000002316 | -0.000302 | 0.0091 | 0.9725 | 0 | -2.03 | 1.036 |
| 0.000001962 | -0.000229 | 0.003141 | 1.092 | 0 | -1.598 | 0.997 |
| 0.000001641 | -0.000197 | 0.002615 | 1.1 | 0 | -1.99 | 1.04 |

Tabla 8. Coeficientes para Energía Incidente Intermedia 600V

Fuente. IEEE Guide Arc-Flash Hazard Calculation

| 2700 V | k1 | k2 | k3 | k4 | k5 | k6 |
|---------------|------------|-----------|------------|------------|------------|------------|
| VCB | 2.40021 | 0.165 | 0.354202 | -1.557E-12 | 4.556E-10 | -4.186E-08 |
| VCBB | 3.870592 | 0.185 | -0.736618 | 0 | -9.204E-11 | 2.901E-08 |
| HCB | 3.486391 | 0.177 | -0.193101 | 0 | 0 | 4.859E-10 |
| VOA | 3.880724 | 0.105 | -1.906033 | -1.557E-12 | 4.556E-10 | -4.186E-08 |
| HOA | 3.616266 | 0.149 | -0.761561 | 0 | 0 | 7.859E-10 |
| k7 | k8 | k9 | k10 | k11 | k12 | k13 |
| 8.346E-07 | 5.482E-05 | -0.003191 | 0.9729 | 0 | -1.569 | 0.9778 |
| -3.262E-06 | 0.0001569 | -0.004003 | 0.9825 | 0 | -1.742 | 1.09 |
| -1.814E-07 | -9.128E-06 | -0.0007 | 0.9881 | 0.027 | -1.723 | 1.055 |
| 8.346E-07 | 5.482E-05 | -0.003191 | 0.9729 | 0 | -1.515 | 1.115 |
| -1.914E-07 | -9.128E-06 | -0.0007 | 0.9981 | 0 | -1.639 | 1.078 |

Tabla 9. Coeficientes para Energía Incidente Intermedia 2700V

Fuente. IEEE Guide Arc-Flash Hazard Calculation

| 14 300 V | k1 | k2 | k3 | k4 | k5 | k6 |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|
| VCB | 3.825917 | 0.11 | -0.999749 | -1.557E-12 | 4.556E-10 | -4.186E-08 |
| VCBB | 3.644309 | 0.215 | -0.585522 | 0 | -9.204E-11 | 2.901E-08 |
| HCB | 3.044516 | 0.125 | 0.245106 | 0 | -5.043E-11 | 2.233E-08 |
| VOA | 3.405454 | 0.12 | -0.93245 | -1.557E-12 | 4.556E-10 | -4.186E-08 |
| HOA | 2.04049 | 0.177 | 1.005092 | 0 | 0 | 7.859E-10 |
| 14 300 V | k1 | k2 | k3 | k4 | k5 | k6 |
| VCB | 3.825917 | 0.11 | -0.999749 | -1.557E-12 | 4.556E-10 | -4.186E-08 |
| VCBB | 3.644309 | 0.215 | -0.585522 | 0 | -9.204E-11 | 2.901E-08 |
| HCB | 3.044516 | 0.125 | 0.245106 | 0 | -5.043E-11 | 2.233E-08 |
| VOA | 3.405454 | 0.12 | -0.93245 | -1.557E-12 | 4.556E-10 | -4.186E-08 |
| HOA | 2.04049 | 0.177 | 1.005092 | 0 | 0 | 7.859E-10 |

Tabla 10. Coeficientes para Energía Incidente Intermedia 14300V

Fuente. IEEE Guide Arc-Flash Hazard Calculation

3.15. EL TAMAÑO DEL RECINTO DE FACTOR DE CORRECCIÓN

Se determina un conjunto de valores equivalentes de altura y ancho basados en la tensión del sistema. La profundidad se utiliza para clasificar el tipo de recinto como "Típico" o "Superficial", para VCB, VCBB y HCB están normalizados para 508 mm – 508 mm.

3.16. EQUIVALENTES DE ALTURA Y ANCHURA DE RECINTO

Para realizar los equivalente se tiene que fijar la altura y anchura correspondiente. Para ello, se comparan sus cifras con rangos específicos predefinidos para cada una de las tres configuraciones de electrodos. Se calculan mediante las ecuaciones 9 y 10, que se presentan a continuación [8]:

(Ecuación 9)

$$\text{Width}_1 = \left(660.4 + (\text{Width} - 660.4) \times \left(\frac{V_{oc} + A}{B} \right) \right) \times 25.4^{-1}$$

(Ecuación 10)

$$\text{Height}_1 = \left(660.4 + (\text{Height} - 660.4) \times \left(\frac{V_{oc} + A}{B} \right) \right) \times 25.4^{-1}$$

Donde:

Height_1 altura equivalente del recinto; Width_1 ancho equivalente del recinto; Width es el ancho real del recinto (mm); Height altura real del recinto mm; V_{oc} tensión del sistema kV en la Tabla 12 se encuentran las constantes para el cálculo.

| E.C. | Range | <508 (mm) | ≥508 and ≤660.4 (mm) |
|------|-------------------|---|-------------------------|
| VCB | Width_1 | = 20 (if Typical) = 0.03937 × Width (if Shallow ^a) | = 0.03937 × Width |
| | Height_1 | = 20 (if Typical) or = 0.03937 × Height (if Shallow ^a) | = 0.03937 × Height |
| VCBB | Width_1 | = 20 (if Typical) or = 0.03937 × Width (if Shallow ^a) | = 0.03937 × Width |
| | Height_1 | = 20 (if Typical) or = 0.03937 × Height (if Shallow ^a) | = 0.03937 × Height |
| HCB | Width_1 | = 20 (if Typical) or = 0.03937 × Width (if Shallow ^a) | = 0.03937 × Width |
| | Height_1 | = 20 (if Typical) or = 0.03937 × Height (if Shallow ^a) | = 0.03937 × Height |

Tabla 11. Directrices para determinar la altura y anchura equivalentes

Fuente. IEEE Guide Arc-Flash Hazard Calculations

| >660.4 and ≤1244.6 (mm) | >1244.6 (mm) |
|--|--|
| obtained from Equation (11) and actual Width | obtained from Equation (11) with Width = 1244.6 mm |
| = 0.03937 × Height | = 49 |
| obtained from Equation (11) and actual Width | obtained from Equation (11) with Width = 1244.6 mm |
| obtained from Equation (12) and actual Height | obtained from Equation (12) with Height = 1244.6 mm |
| obtained from Equation (11) and actual Width | obtained from Equation (11) with Width = 1244.6 mm |
| obtained from Equation (12) and actual Height | obtained from Equation (12) with Height = 1244.6 mm |

Tabla 12. Directrices para determinar la altura y anchura equivalentes

Fuente. IEEE Guide Arc-Flash Hazard Calculations

El tamaño equivalente del recinto (EES) el cual se calcula utilizando la ecuación 11:

(Ecuación 11)

$$EES = \frac{Height_1 + Width_1}{2}$$

Donde:

$Height_1$ altura equivalente del recinto; $Width_1$ ancho equivalente del recinto; EES tamaño equivalente del recinto.

3.17. FACTOR DE CORRECCIÓN DEL TAMAÑO DEL RECINTO (CF)

El factor de corrección (CF) para un "Recinto Típico" se obtiene utilizando la Ecuación 14 de la siguiente manera [8]:

(Ecuación 12)

$$CF = b_1 \times EES^2 + b_2 \times EES + b_3$$

Use la Ecuación 15 para el factor de corrección de un Recinto Superficial [8]:

(Ecuación 13)

$$CF = \frac{1}{b_1 \times EES^2 + b_2 \times EES + b_3}$$

Donde:

b1, b2, b3 son los coeficientes para la ecuación 1 y la Ecuación 13 proporcionados en la superficial; CF es el factor de corrección del tamaño del recinto utilizado en la ecuación 13; EES tamaño equivalente del recinto.

Para cajas de recinto típicas, el valor mínimo de EES es 20

La Tabla 13 proporciona los coeficientes b1 hasta b3 para ambos tipos de recinto, típico superficial.

| Box type | E.C. | b1 |
|----------|-----------|------------|
| Typical | VCB | -0.000302 |
| | VCBB | -0.0002976 |
| | HCB | -0.0001923 |
| Shallow | VCB | 0.002222 |
| | VCBB | -0.002778 |
| | HCB | -0.0005556 |
| | b2 | b3 |
| | 0.03441 | 0.4325 |
| | 0.032 | 0.479 |
| | 0.01935 | 0.6899 |
| | -0.02556 | 0.6222 |
| | 0.1194 | -0.2778 |
| | 0.03722 | 0.4778 |

Tabla 13. Coeficientes para factor de corrección

Fuente. IEEE Guide Arc-Flash Hazard Calculations

3.18. CORRIENTE DE ARCO (IARC)

Para realizar el cálculo de la corriente I_{arc} , utilizamos ecuación 14:

(Ecuación 14)

$$I_{arc} = \frac{1}{\sqrt{\left[\frac{0.6}{V_{oc}}\right]^2 \times \left[\frac{1}{I_{arc600}^2} - \left(\frac{0.6^2 - V_{oc}^2}{0.6^2 \times I_{bf}^2}\right)\right]}}$$

Donde:

V_{oc} voltaje de circuito kV; I_{bf} corriente de falla kA; I_{arc} corriente de arco final kA; I_{arc600} corriente de Arco.

3.19. ENERGÍA INCIDENTE (E)

La energía incidente se expresa de la siguiente manera con la ecuación 17 [8]:

(Ecuación 15)

$$E = E_{600}$$

Donde:

E_{600} energía incidente $\left(\frac{J}{cm^2}\right)$; E es la energía incidente final en Voc especificado $\left(\frac{J}{cm^2}\right)$.

3.20. LÍMITE DE ARCO ELÉCTRICO (AFB)

Este se expresa de la siguiente manera con la Ecuación 18 [8]:

(Ecuación 16)

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

Donde:

$AFB_{\leq 600}$ límite de arco eléctrico mm ; AFB es el límite de arco eléctrico final mm [8].

3.21. DETERMINAR LAS DISTANCIAS DE TRABAJO

La Tabla 14 presenta las distancias de trabajo comunes según la clasificación del equipo. Estas distancias se utilizan para calcular la energía incidente, aunque también se pueden considerar alternativas dependiendo de la tarea que se esté realizando.

| Equipment class | Working distance | |
|--|------------------|----|
| | mm | in |
| 15 kV switchgear | 914.4 | 36 |
| 15 kV MCC | 914.4 | 36 |
| 5 kV switchgear | 914.4 | 36 |
| 5 kV MCC | 914.4 | 36 |
| Low-voltage switchgear | 609.6 | 24 |
| Shallow low-voltage MCCs and panelboards | 457.2 | 18 |
| Deep low-voltage MCCs and panelboards | 457.2 | 18 |
| Cable junction box | 457.2 | 18 |

Tabla 14. Distancia de trabajo según los equipos los equipos

Fuente. IEEE Guide Arc-Flash Hazard Calculations

CAPITULO IV

4. SIMULACIÓN DEL SISTEMA EN ETAP

La aplicación de la herramienta ETAP se revela como un recurso fundamental en la gestión y evaluación de los riesgos asociados al sistema eléctrico presente en el bloque E de la Universidad Politécnica Salesiana. Este sistema, crucial para el desenvolvimiento cotidiano de las actividades académicas y administrativas, demanda un enfoque proactivo en términos de seguridad.

4.1. PLANTEAMIENTO DEL SISTEMA EN ETAP

El sistema eléctrico del Edificio E de la Universidad Politécnica Salesiana se presenta mediante un diagrama unifilar que incluye diversos componentes y detalles técnicos. A continuación, en Tabla 15 se muestra los elementos clave del planteamiento del sistema eléctrico:

| Componente | Especificaciones |
|----------------|--|
| Grid | Tensión: 13,8 kV, U1, Capacidad de cortocircuito: 20,9 kA, Potencia cortocircuito: $3\phi=500$ MVA, $X/R=19,89$, $K_{Asec}=20,918$, $Sec.3f=500$ MVA, $R=0,19$ $X=3,78$, $X/R=19,89$, $Sec.1f=167$ MVA, $Z1=3,78$, $Z2=3,79$, $R0=0,02$, $X1=3,78$, $Z2/Z1=1$, $X0/X1=0,3095$, $R0/X0=0,017$ |
| Fuse 1 | ABB - 15 KV max, Size: 592B81G0, Continuous Amp: 225, Interrupting: 65, Tes1PF: 12,4 |
| Bus 1 | Tensión: 13,8 kV, Corriente: 3000 A, Protección contra arco eléctrico: Sí, Estándar: ANSI/OIEC, Tipo: Panelboard, Aislamiento del recinto: Sí, Refuerzo: Continuo, Corriente nominal: 3000 A, Corriente asimétrica: 37 kA, Tensión máxima: 62,44 kV, Distancia entre conductores/barras: 152 mm, Factor de distancia X: 0,973, Distancia entre conductores L-G: 51 mm, Configuración de electrodos: VCB, Tipo de conductor: Cobre, Altura: 1143 mm, Anchura: 762 mm, Profundidad: 762 mm, Coeficientes de reflectividad: $a = 1050$ mm, $k = 0,395$, Límite de aproximación con las tapas retiradas: 3,048 m, Límite de aproximación con partes fijas del circuito: 1,524 m, Límite de aproximación restringida: 0,658 m. |
| Cable 1 | XLPE - Non-Mag - 100% - 60 Hz - 3C - 25 mm ² , Conductor: Cobre, Aislamiento: XLPE (Polietileno reticulado), Pantalla: Cobre, Tensión nominal: 15 kV, Sección transversal: 25 mm ² , Información del conductor: Tipo: Concéntrico, Número de hilos: 1, Diámetro: 0,59 cm, Información del aislamiento: Espesor: 4,5 mm, Tensión máxima de servicio: 2913,39 V/mm, Información de la pantalla: Espesor: 0,127 mm, Tipo de puesta a tierra: Abierta, Información de la armadura: Material: No se especifica, Diámetro: 0 mm, Información de la cubierta: Material: XLPE, Espesor: 2,6 mm, Información adicional: Resistencia CC: 741,28 micro ohmios por metro, Peso: 4770 kg/km, Tensión máxima de tracción: 7 kg/mm ² , Tensión máxima lateral: 500 kg/m, Diámetro exterior del cable: 5,3 cm |
| Bus 2 | Tensión: 13,8 kV, Corriente: 2000 A, Protección contra arco eléctrico: Sí, Estándar: ANSI/OIEC, Tipo: Panelboard, Aislamiento del recinto: Sí, Refuerzo: Continuo, Corriente nominal: 2000 A, Corriente asimétrica: 37 kA, Tensión máxima: 62,44 kV, Distancia entre conductores/barras: 152 mm, Factor de distancia X: 0,973, Distancia entre conductores L-G: 51 mm, Configuración de electrodos: VCB, Tipo de conductor: Cobre, Altura: 1143 mm, Anchura: 762 mm, Profundidad: 762 mm, Coeficientes de reflectividad: $a = 1050$ mm, $k = 0,395$, Límite de aproximación con las tapas retiradas: 3,048 m, Límite de aproximación con partes fijas del circuito: 1,524 m, Límite de aproximación restringida: 0,658 m. |
| Transformer T1 | 750 MVA ANSI Liquid-Fill Other 65C, Prim. 13,8 kV - FLA=31,38 - Nominal Bus= 13,8, Sec. 0,22 kV - FLV=1968 - Nominal bus = 0,22, Voltage Rating , Prim. 13,8 kv - FLA=31,38 - Nominal Bus= 13,8, Sec. 0,22 kv - FLV=1968 - Nominal bus = 0,22 Power Rating - Rated= 0.75, Derated = 0,684 Impedance - Pos- %Z=5 - X/R= 3.96 - R/X= 0.253 - %X4.848 - %R 1.224 , Zero. - %Z=5 - X/R= 3.96 - R/X= 0.253 - %X4.848 - %R 1.224 |
| Bus 3 | Tensión: 0,22 kV, Corriente: 2000 A, Protección contra arco eléctrico: Sí, Estándar: ANSI/OIEC, Tipo: Panelboard, Aislamiento del recinto: Sí, Refuerzo: Continuo, Corriente nominal: 2000 A, Corriente asimétrica: 37 kA, Tensión máxima: 62,44 kV, Distancia entre conductores/barras: 152 mm, Factor de distancia X: 0,973, Distancia entre conductores L-G: 51 mm, Configuración de electrodos: VCB, Tipo de conductor: Cobre, Altura: 508 mm, Anchura: 508 mm, Profundidad: 508 mm, Coeficientes de reflectividad: $a = 600$ mm, $k = 0,295$, Límite de aproximación con las tapas retiradas: 3,048 m, Límite de aproximación con partes fijas del circuito: 1,067 m, Límite de aproximación restringida: 0,305 m. |
| Cable 2 | Tipo de cable: THHN, Tensión nominal: 600 V, Material del conductor: Cobre, Calibre del conductor: 1/C CU Número de fases: 1, Tipo de aislamiento: PVC, Espesor del aislamiento: 70 mil, Espesor de la cubierta: 9 mil, Diámetro exterior del cable: 1.31 pulgadas, Peso del cable: 3.363 libras por 1000 pies, Resistencia CC: 10.817 microohmios por pie, Tensión máxima de tracción: 450 libras, Conductor: Cobre, 1000 kcmil, Aislamiento: XLPE, 100%, Resistencia: 0,018 ohmios/km, Reactancia: 0,046 ohmios/km. |
| CB1 PRIM | Marca: Siemens, Modelo: 5SX2, Tipo: Moldeado, Tamaño: 15, Corriente continua: 2500 A, Tensión nominal: 0,24 kV. Trip device Type: Thermal magnetic, TM Manufacture: Siemens, TM ID: 15 A, Thernal- Trip: FIXED, Magnetic-Trip:FIXED. |
| Bus 4 | Tensión: 0,22 kV, Corriente: 2000 A, Protección contra arco eléctrico: Sí, Estándar: ANSI/OIEC, Tipo: Panelboard, Aislamiento del recinto: Sí, Refuerzo: Continuo, Corriente nominal: 2000 A, Corriente asimétrica: 37 kA, Tensión máxima: 62,44 kV, Distancia entre conductores/barras: 152 mm, Factor de distancia X: 0,973, Distancia entre conductores L-G: 51 mm, Configuración de electrodos: VCB, Tipo de conductor: Cobre, Altura: 508 mm, Anchura: 508 mm, Profundidad: 508 mm, Coeficientes de reflectividad: $a = 600$ mm, $k = 0,295$, Límite de aproximación con las tapas retiradas: 3,048 m, Límite de aproximación con partes fijas del circuito: 1,067 m, Límite de aproximación restringida: 0,305 m. |

Tabla 15. Tabla de elementos referenciales del sistema eléctrico de Bloque E,

Fuente. Elaboración Suquinahua - Montero

4.2. DIAGRAMA UNIFILAR BLOQUE E EN ETAP

Plantemos el diagrama unifilar de la Universidad Politécnica Salesiana sobre el bloque E , en cual se puede apreciar en la Figura 18.

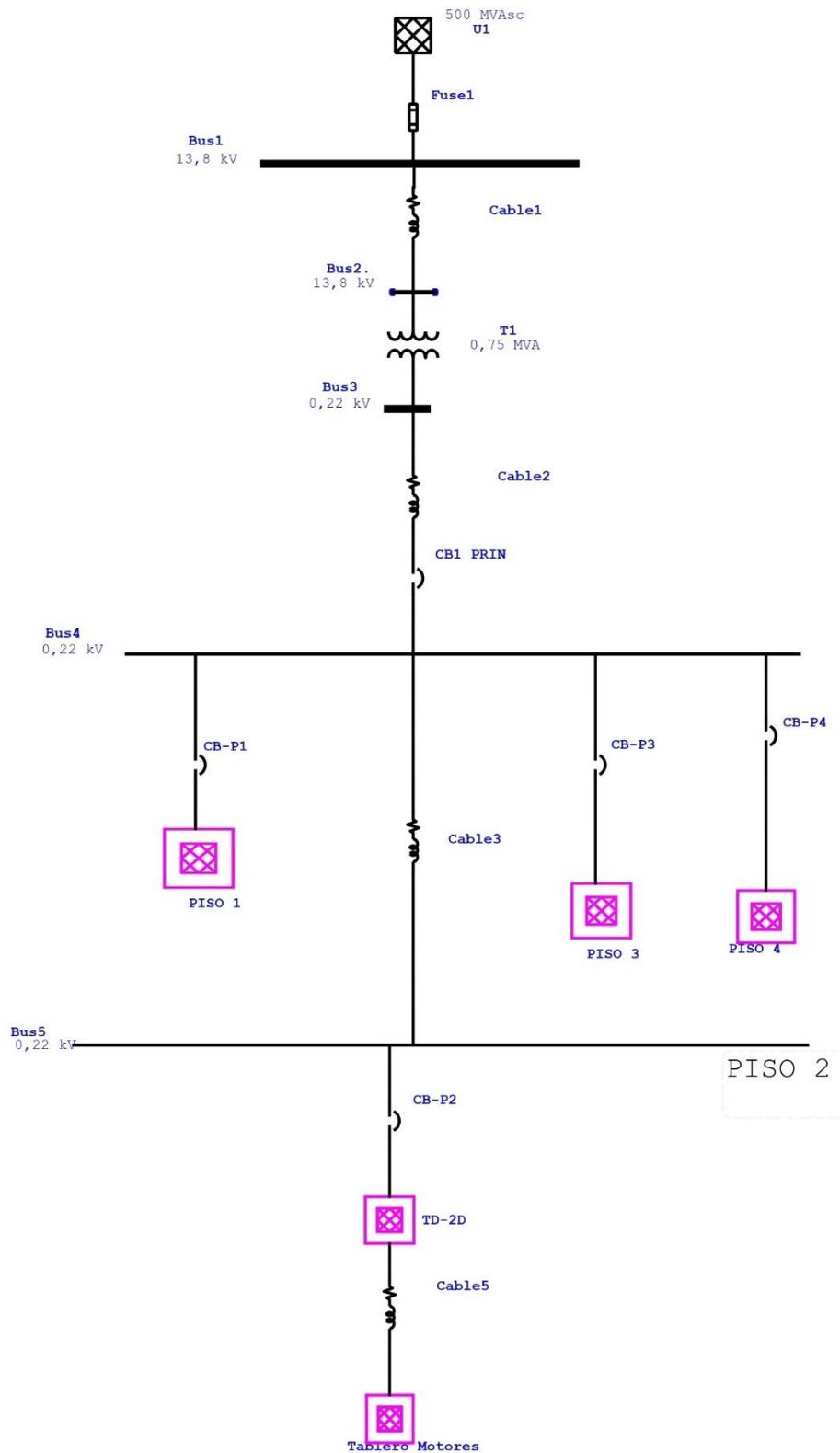


Figura 18. Distribución de los diferentes elementos físicos presentes en el Bloque E

Fuente. Elaboración Suquinhua – Montero

4.3. SIMULACIÓN DE ARCO ELÉCTRICO IEEE – 1485 PARA EL BLOQUE E - CB1

Después de explicar el esquema unifilar del Bloque E en ETAP, pasamos a una simulación detallada del arco eléctrico según las normas IEEE-1485. Un modelo preciso, basado en los parámetros eléctricos, la topología de la red y las condiciones operativas es necesario para la ejecución en ETAP. Según IEEE-1485, la opción de arco eléctrico en ETAP la cual se muestra en la realiza una evaluación detallada de la respuesta del sistema a eventos de arco eléctrico. Estos resultados brindarán información sobre la seguridad eléctrica, la identificación de áreas críticas y cómo evitar problemas.



Figura 19. ANSI Arc Flash

Fuente. Etap.es IEEE 1584-2018

Una vez simulado el Arco Eléctrico, se nos presenta en la Figura 20, los siguientes resultados en la el cual nos ayudara interpretar el comportamiento de arco eléctrico.

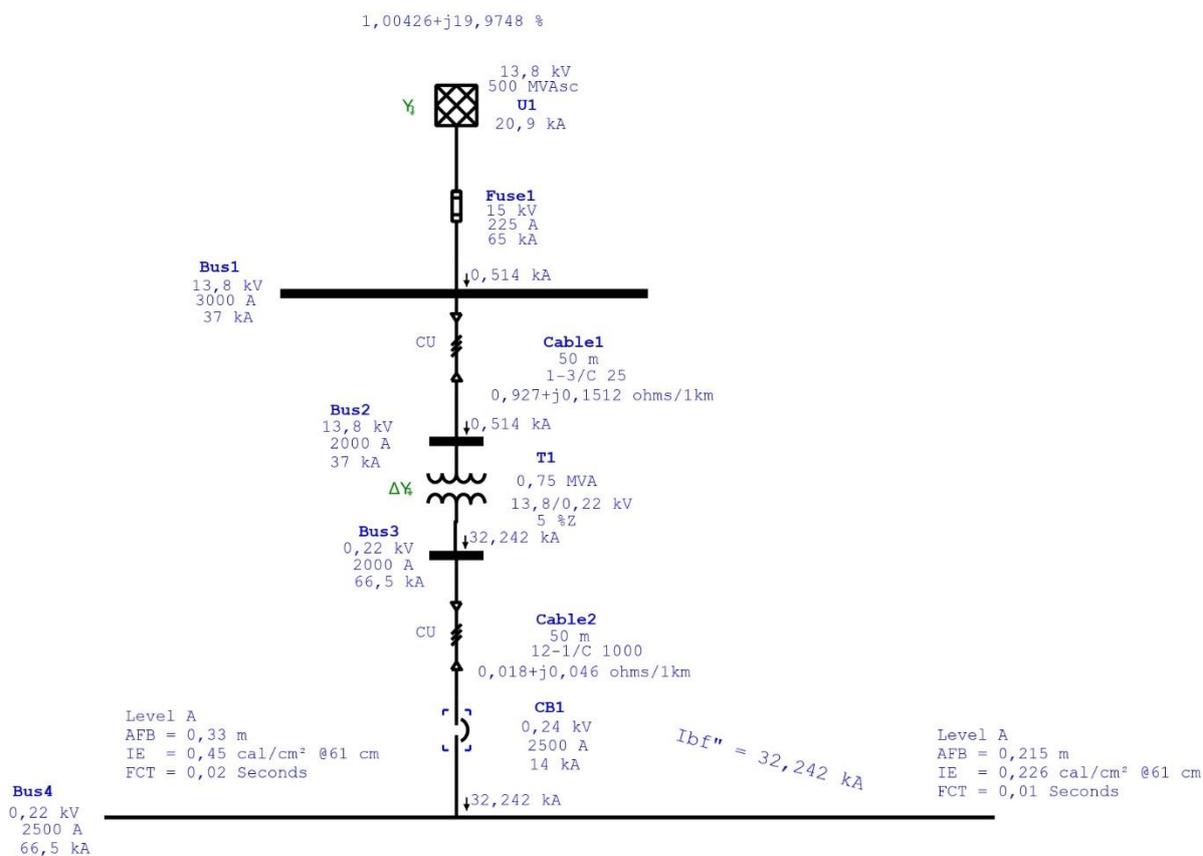


Figura 20. Diagrama unifilar Arco Eléctrico simulado

Fuente. Elaborado Suquinahua - Montero

4.4. CÁLCULOS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS PARA CB1

Las Ecuaciones previamente establecidas se utilizan para respaldar los resultados del análisis de Arc Flash. Estas Ecuaciones sirven como base analítica para fundamentar y medir los efectos encontrados en el análisis. La implementación de fórmulas específicas proporciona una base técnica sólida, lo que garantiza una interpretación precisa y detallada de los hallazgos. Este método tiene como objetivo proporcionar una justificación técnica sólida que respalde la confiabilidad y validez de los hallazgos del análisis de arco eléctrico.

4.5. CÁLCULO CORRIENTES DE ARCO PROMEDIO INTERMEDIAS PARA CB1

Hacemos el caculo de la corriente de arco promedio para calcular la corriente de arco eléctrico al momento que se genera el arco eléctrico.

$$I_{\text{arcVoc}} = 10^{(k1+k2 \lg I_{\text{bf}}+k3 \lg G)} (k4I_{\text{bf}}^6+k5I_{\text{bf}}^5+k6I_{\text{bf}}^4+k7I_{\text{bf}}^3+k8I_{\text{bf}}^2+k9I_{\text{bf}}+k10)$$

$$I_{\text{arcVoc}} = 10^{((-0,04287)+(1,035) * \log (32,242)+(-0,083) * \log (32))}$$

$$*(0+0+(-4.783*10^{-9})*32.242^4+1,962*10^{-6}*32.242^3+(-0.000229)*32,242^2+(0.003141)*32.242+1.092)$$

$$I_{\text{arcVoc}} = 25.1322 \text{ kA}$$

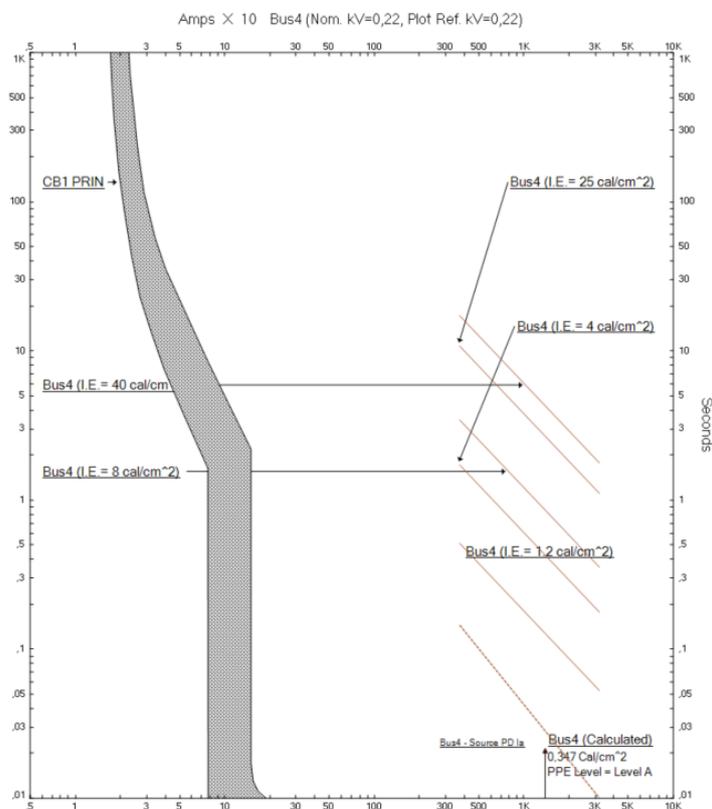


Figura 21. Curva de disparo CB1 Prim

Fuente. Etap Arch Flash IEEE-1485 – 2018

4.6. CORRIENTE DE ARCO (IARC) PARA CB1

Una vez calculada la corriente de arco promedio, hacemos uso de la ecuación para calcular la corriente de arco, ya que es la corriente que se genera al momento que existe una falla a tierra en el sistema, para este estudio es en la barra principal que se encuentra a la salida del transformador del edificio.

$$I_{\text{arc}} = \frac{1}{\sqrt{\left[\frac{0.6}{V_{\text{oc}}}\right]^2 \times \left[\frac{1}{I_{\text{arc600}}^2} - \left(\frac{0.6^2 - V_{\text{oc}}^2}{0.6^2 \times I_{\text{bf}}^2}\right)\right]}}$$

$$I_{\text{arc}} = \frac{1}{\sqrt{\left[\frac{0.6}{0.22}\right]^2 \times \left[\frac{1}{25.1322^2} - \left(\frac{0.6^2 - 0.220^2}{0.6^2 \times 32.242^2}\right)\right]}}$$

$$I_{\text{arc}} = 13.38 \text{ kA}$$

4.7. DATOS DE LA BARRA DE CASO DE ESTUDIO – PARA CB1

Se presente los datos del caso de estudio para poder seguir con los caculos siguiente para el centro de carga de motores y generadores, por tanto necesitamos los valores de figura 22.

| Faulted Bus | | | | |
|--------------|------|---------|----------------|-------------------------|
| Enclosure ID | ID | Nom. kV | Equipment Type | Electrode Configuration |
| | Bus4 | 0.220 | Switchgear | VCB |

| Arc Flash Ratings | | | | | | |
|-------------------------|-----------|----------|---------------------------|-------|-------|-----------------------|
| Electrode Configuration | Conductor | | Enclosure Dimentions (mm) | | | Working Distance (cm) |
| | Type | Gap (mm) | Height | Width | Depth | |
| VCB | Copper | 32 | 508 | 508 | 508 | 61 |

Figura 22. Datos de la bus 4 para CB1

Fuente. Etap.es IEEE – 1584 CB1

4.8. FACTOR DE CORRECCIÓN DEL TAMAÑO DEL RECINTO PARA CB1

Para realizar el cálculo de factor de corrección, necesitamos hacer un cálculo del tamaño del recinto para obtener los datos para el factor de corrección.

$$\text{Width}_1 = 0.03937 * \text{wight}$$

$$\text{Height}_1 = 0.03937 * \text{Height}$$

$$EES = \frac{\text{Height}_1 + \text{Width}_1}{2}$$

$$\text{Width}_1 = 0.03937 * 508$$

$$\text{Width}_1 = 19.99$$

$$\text{Height}_1 = 0.03937 * 508$$

$$\text{Height}_1 = 19.99$$

$$EES = \frac{19.99 + 19.99}{2}$$

$$EES = 19.99$$

4.9. DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE CORRECCIÓN DEL TAMAÑO DEL RECINTO(CF) PARA CB1

En base al cálculo de tamaño del recinto hacemos el cálculo del factor de corrección:

$$CF = b1 \times EES^2 + b2 \times EES + b3$$

$$CF = \frac{1}{b1 \times EES^2 + b2 \times EES + b3}$$

$$CF = 0.000302 * 19.99^2 + 0.03441 * 19.99 + 0.4325$$

$$CF = 0.999$$

$$CF = \frac{1}{0,000302 * 19,99^2 + 0,03441 * 19,99 + 0,4325}$$

$$CF = \frac{1}{0.999}$$

$$CF = 1,000$$

4.10. CÁLCULO DE LA ENERGÍA INCIDENTE INTERMEDIA (E) PARA CB1

Ahora hacemos el cálculo de la energía incidente que existe al momento del arco eléctrico, la cual usamos la ecuación para tablero dentro de caja ya que para nuestro caso de estudio es la ecuación que se requiere.

$$E_{MB}=1038.7 \cdot D_a^{-1,4738} \cdot t_A [0,0093F^2 - 0.3453 \cdot F + 5.9675]$$

$$E_{MB}=1038.7 \cdot 24^{-1,4738} \cdot 0,10 [0,0093F^2 - 0.3453 \cdot F + 5.9675]$$

$$E_{MB}=0,4322 \text{ cal/cm}^2$$

4.11. CÁLCULO DEL LÍMITE DE DESTELLO DE ARCO INTERMEDIO (AFB) PARA CB1

El cálculo del límite de destello de arco intermedio se hace uso de la ecuación presente, además de los datos previamente cálculos dentro del estudio presente, el cual nos indica la distancia mínima para evitar lesiones en la piel por el calor disipado por un arco eléctrico.

$$AFB_{600}=10 \left(\frac{k1+k2 \lg G + \frac{k3I_{arc600}}{k4I_{bf}^7+k5I_{bf}^6+k6I_{bf}^5+k7I_{bf}^4+k8I_{bf}^3+k9I_{bf}^2+k10I_{bf}+k11 \lg I_{bf}+k13 \lg I_{arc600} + \lg\left(\frac{1}{CF}\right) - \lg\left(\frac{20}{T}\right)}{-k12} \right)$$

$$AFB_{600}=10 \left(\frac{0,753364+0,566 \cdot \log 32 + \frac{1,752636 \cdot 25,64}{0+0+(-4,783 \cdot 10^{-9}) \cdot 32,242^5 + 0.000001962 \cdot 32,242^4 + (-0.000229) \cdot 32,242^3 + 0.003141 \cdot 32,242^2 + 1,092 \cdot 32,242} + 0+0,957 \cdot \log 13,914 + \log\left(\frac{1}{0,99967}\right) - \log\left(\frac{20}{10}\right)}{-(-1,598)} \right)$$

$$AFB_{600}=10 \left(\frac{1,6055 + \frac{44,937}{52,853} + 0,7959}{-(-1,598)} \right)$$

$$AFB_{600}=310,58 \text{ mm}-0,310\text{m}$$

4.12. ENERGÍA INCIDENTE (E) PARA CB1

La energía incidente esta dado por el resultado presentado anteriormente en nuestro calculo previo.

$$E=E_{600}$$

$$E=E_{MB}=0,4322 \text{ cal/cm}^2$$

4.13. LÍMITE DE ARCO ELÉCTRICO (AFB) PARA CB1

El límite de arco eléctrico esta dado por el resultado presentado anteriormente en nuestro calculo previo del límite de destello de arco intermedio.

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

$$AFB=0,310m$$

4.14. SUMMARY DE ENERGÍA INCIDENTE CB1

| Bus | | | Total Fault Current (kA) | |
|------|---------|------------|--------------------------|--------|
| ID | Nom. kV | Type | Bolted | Arcing |
| Bus4 | 0.220 | Switchgear | 32.242 | 13.383 |

| Total Fault Current (kA) | | Arc-Flash Analysis Results | | | |
|--------------------------|--------|----------------------------|-----------------------------------|---------|--------------|
| Bolted | Arcing | FCT (cycles) | Incident E (cal/cm ²) | AFB (m) | Energy Level |
| 32.242 | 13.383 | 0,598 | 0.226 | 0.21 | Level A |

Figura 23. Energía Incidente para CB1 Summary CB1

Fuente. Etap.es IEEE – 1584- 2018

4.15. CÁLCULO DE FACTOR CORRECCIÓN DE VARIACIÓN DE CORRIENTE DE ARCO

$$I_{arc \min}=I_{arc} *(1-0.5 *VarC_f)$$

$$VarC_f=(k1V_{oc}^6+k2V_{oc}^5+k3V_{oc}^4+k4V_{oc}^3+k5V_{oc}^2+k6V_{ov}+k7)$$

$$I_{arc \min}=13,957 *(1-0.5 *VarC_f)$$

$$VarC_f= (0+(-0.0000014269) * 0.220^5+0.000083137 * 0,220^4+(-0.0019382) * 0,220^3+0.022366 * 0,220^2+(-0.12645) * 0.220+0.30226)$$

$$VarC_f=0.863$$

$$I_{arc \min}=13.957 *(1-0.5 *0.863)$$

$$I_{arc \min}=12,075 \text{ kA}$$

4.16. ETIQUETAS GENERADAS POR ETAP PARA CB1

De acuerdo al estudio realizado, se han identificado parámetros fundamentales relacionados con la posible generación de un arco eléctrico en el disyuntor principal ubicado a la salida del transformador. La evaluación detallada revela aspectos críticos, como la corriente de cortocircuito, el tiempo de operación y la energía incidente en caso de un evento de arco eléctrico. Estos datos son esenciales para comprender y abordar adecuadamente los riesgos asociados, permitiendo así implementar medidas preventivas y de seguridad eficaces en conformidad con las normativas vigentes.

- Límite del destello de arco eléctrico: 33 cm
- Energía incidente: 0,4 cal/cm²
- Distancia de trabajo: 61cm
- Recomendaciones IEEE 1584 – 2018
- Enfoque limitado: 1,07 m
- Enfoque restringido: 0,30 m

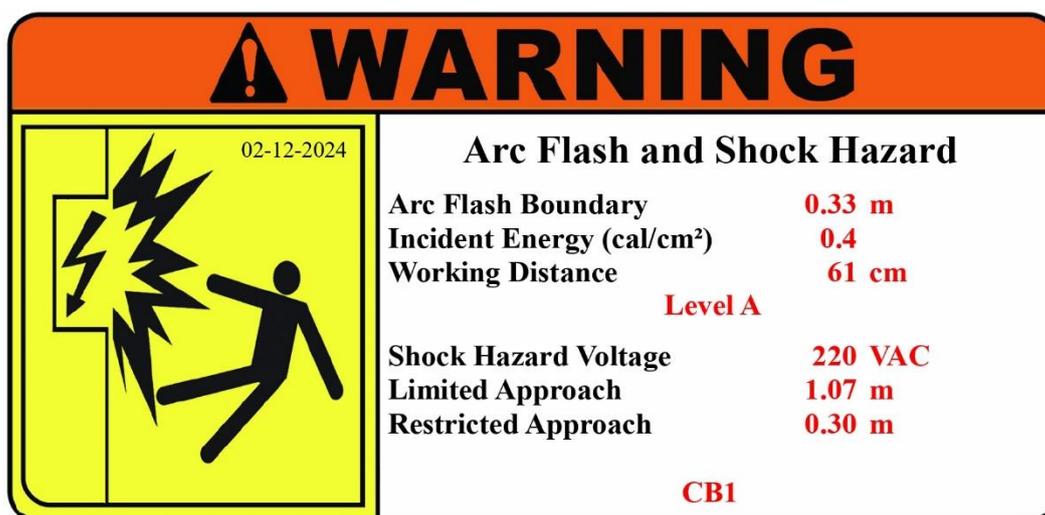


Figura 24. Etiqueta de seguridad generada por Etap – CB1

Fuente. Etap IEEE-1485 2018

4.17. RESULTADO DE ARCO ELÉCTRICO SIMULADO PARA CB1

| Arc Fault Location | | | | | Correction Factors | | |
|--------------------|------------------|-----------|---------------------|-------------------|--------------------|---------------|---------------|
| Element ID | Connected Bus ID | Enclosure | | Electrode Config. | Prefault kV | Iarc Var. (%) | Encl. CF (pu) |
| | | ID | Type | | | | |
| Bus4 | Bus4 | | Bus Arc Fault | VCB | 0.220 | 0 | 1.000 |
| CB1 | Bus4 | | Source PD Line Side | VCB | 0.220 | 0 | 1.000 |

| Ibf" (kA) | Ia" (kA) | Source PD Ia" (kA) | FCT (Cycles) | Source PD ID | IE (cal/cm ²) | AFB (m) |
|-----------|----------|--------------------|--------------|--------------|---------------------------|---------|
| 32.242 | 13.383 | 13.383 | 0.6 | CB1 | 0.226 | |
| | | FCT = | 0.6 | Total = | 0.226 | 0.21 |
| 32.242 | 13.383 | 0.213 | 1.2 | Fuse1 | 0.450 | |
| | | FCT = | 1.2 | Total = | 0.450 | 0.33 |

Figura 25. Arc Flash Analysis CB1

Fuente. Etap IEEE-1485 2018

4.18. ANALIZADORES DE RESULTADOS PARA CB1

La investigación actual se basa en un análisis de seguridad eléctrica detallado que se lleva a cabo a través del software ETAP, que aborda varios componentes importantes del sistema. Se han evaluado minuciosamente los resultados de varios componentes, incluidos el disyuntor principal, la barra principal de salida del transformador y los centros de carga de motores y generadores. Las tablas presentadas, creados de acuerdo con la norma IEEE 1584-2018, brindan un análisis completo de la seguridad eléctrica del centro de carga de motores y generadores

| ID | kV (kV) | Type | Location | Connected Bus | Electrode Configuration | Conductor Gap LL (mm) | Working Distance LL (cm) |
|---------|---------|------------|---------------------|---------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------|
| Bus4 | 0,2 | Switchgear | Bus Arc Fault | Bus4 | VCB | 32 | 61 |
| CB-P1 | 0,2 | LV CB | Load PD Line-side | Bus4 | VCB | 32 | 61 |
| CB-P3 | 0,2 | LV CB | Load PD Line-side | Bus4 | VCB | 32 | 61 |
| CB-P4-A | 0,2 | LV CB | Load PD Line-side | Bus4 | VCB | 32 | 61 |
| CB1 | 0,2 | LV CB | Source PD Line-side | Bus4 | VCB | 32 | 61 |

| Height (mm) | Width (mm) | Depth (mm) | LAB to Exp. Mov. Conductor (m) | Total Energy (cal/cm ²) | AFB (m) | Energy Levels | Final FCT (ms) | Source PD ID | Prefault Voltage (kV) |
|-------------|------------|------------|--------------------------------|-------------------------------------|---------|---------------|----------------|--------------|-----------------------|
| 508 | 508 | 508 | 3,048 | 0,226426 | 0,22 | Level A | 10 | CB1 | 0,22 |
| 508 | 508 | 508 | 3,048 | 0,226426 | 0,22 | Level A | 10 | CB1 | 0,22 |
| 508 | 508 | 508 | 3,048 | 0,226426 | 0,22 | Level A | 10 | CB1 | 0,22 |
| 508 | 508 | 508 | 3,048 | 0,226426 | 0,22 | Level A | 10 | CB1 | 0,22 |
| 508 | 508 | 508 | 3,048 | 0,449527 | 0,33 | Level A | 19,8 | Fuse1 | 0,22 |

Tabla 16. Resultados para CB1 entregado por Etap

Fuente. Etap 1584- 2018

| Ia at FCT (kA) | Total Ia" (kA) | Source PD Ia at FCT (kA) | Source PD Ia" (kA) | Total Ibf at FCT (kA) | Total Ibf" (kA) | Source PD Ibf at FCT (kA) | Source PD Ibf" (kA) | Energy 1 (cal/cm ²) | FCT 1 (ms) | Trip Time (ms) |
|----------------|----------------|--------------------------|--------------------|-----------------------|-----------------|---------------------------|---------------------|---------------------------------|------------|----------------|
| 13,383 | 13,383 | 13,383 | 13,383 | 32,242 | 32,242 | 32,242 | 32,242 | 0,226426 | 10 | 10 |
| 13,383 | 13,383 | 13,383 | 13,383 | 32,242 | 32,242 | 32,242 | 32,242 | 0,226426 | 10 | 10 |
| 13,383 | 13,383 | 13,383 | 13,383 | 32,242 | 32,242 | 32,242 | 32,242 | 0,226426 | 10 | 10 |
| 13,383 | 13,383 | 13,383 | 13,383 | 32,242 | 32,242 | 32,242 | 32,242 | 0,226426 | 10 | 10 |
| 13,383 | 13,383 | 0,213 | 0,213 | 32,242 | 32,242 | 0,514 | 0,514 | 0,449527 | 19,8 | 19,8 |

| PD Ia at FCT (kA) | PD Ibf at FCT (kA) | PD Ia" (kA) | PD FCT 1 (ms) | Effect Main PD Isolation on FCT | Enclosure Classification | Enclosure Correction Factor |
|-------------------|--------------------|-------------|---------------|---------------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| | | | | Main PD is Isolated | Typical | 1 |
| 0 | 0 | 0 | | Main PD is Isolated | Typical | 1 |
| 0 | 0 | 0 | | Main PD is Isolated | Typical | 1 |
| 0 | 0 | 0 | | Main PD is Isolated | Typical | 1 |
| 13,383 | 32,242 | 13,383 | 10 | | Typical | 1 |

Tabla 17. Resultados para CB1 entregado por Etap

Fuente. Etap 1584 - 2018

4.19. SIMULACIÓN DE ARCO ELÉCTRICO IEEE – 1485 PARA EL BLOQUE E PARA TABLERO DE MOTORES Y GENERADORES

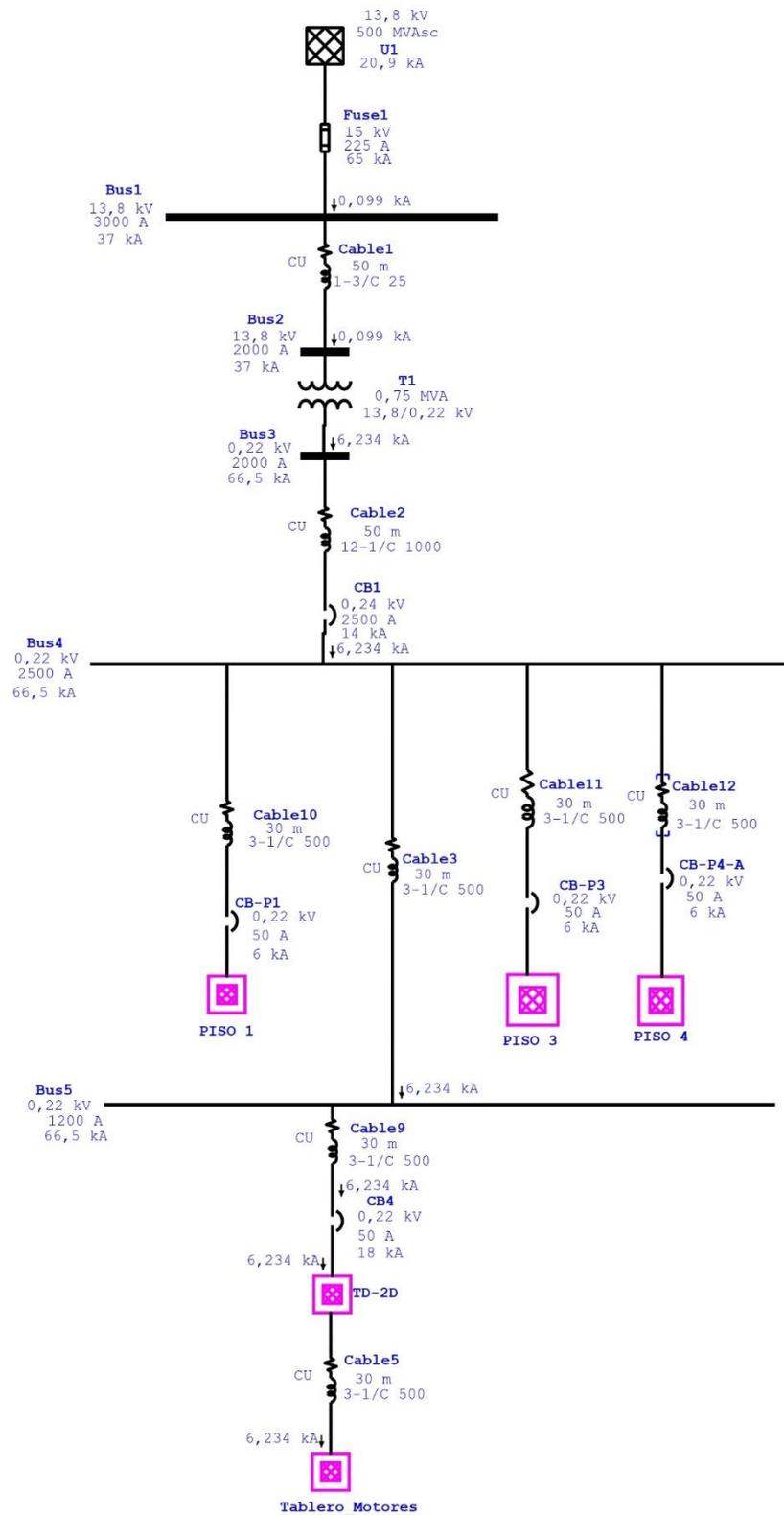
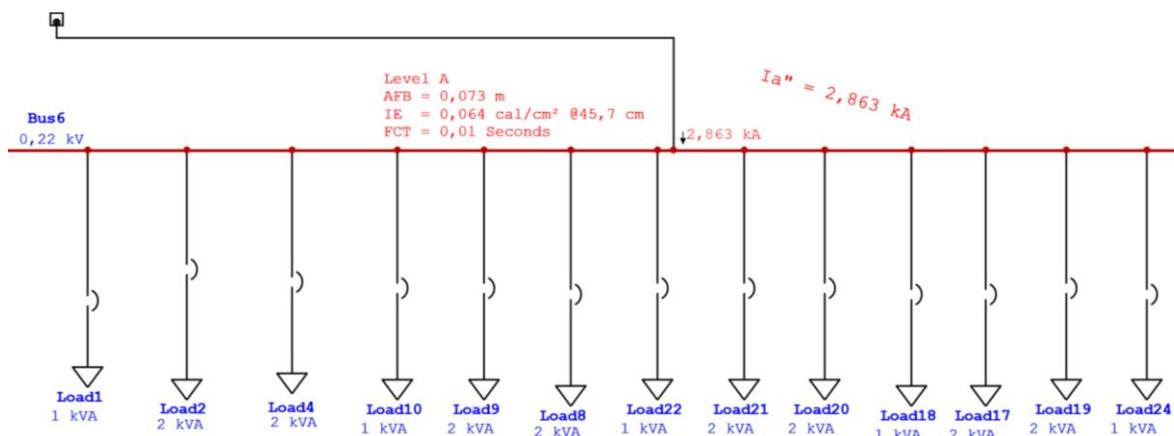


Figura 26. Diagrama unifilar simulado para tablero de motores y transformadores

Fuente. Etap IEEE-1485 2018

4.20. DIAGRAMA UNIFILAR SIMULADO EN ETAP PARA TABLEROS DE MOTORES Y GENERADORES



TABLERO DE MOTORES Y GENERADORES

Figura 27. Diagrama unifilar Arco Eléctrico - Tablero de motores y generadores

Fuente. Etap IEEE-1485 2018

4.21. CÁLCULO CORRIENTES DE ARCO PROMEDIO INTERMEDIAS PARA TABLERO DE TRANSFORMADORES

Hacemos el caculo de la corriente de arco promedio para calcular la corriente de arco eléctrico al momento que se genera el arco eléctrico

$$I_{arcVoc} = 10^{(k1+k2lg I_{br}+k3 lg G)} * (k4I_{br}^6+k5I_{br}^5+k6I_{br}^4+k7I_{br}^3+k8I_{br}^2+k9I_{br}+k10)$$

$$I_{arcVoc} = 10^{((-0.04287)+(1.035)* \log (6.234)+(-0.083)* \log (25))} * (0+0+(-4.783 * 10^{-9}) * 6.234^4+1.962 * 10^{-6} * 6.234^3+(-0.000229) * 6.234^2+(0.003141) * 6.234+1.092)$$

$$I_{arcVoc} = 5.0853 \text{ kA}$$

4.22. CORRIENTE DE ARCO (IARC) PARA TABLERO DE TRANSFORMADORES

Una vez calculada la corriente de arco promedio, hacemos uso de la ecuación para calcular la corriente de arco, ya que es la corriente que se genera al momento que existe una falla a tierra en el sistema, para este estudio es en la barra principal que se encuentra a la salida del transformador del edificio.

$$I_{arc} = \frac{1}{\sqrt{\left[\frac{0.6}{V_{oc}}\right]^2 \times \left[\frac{1}{I_{arc600}^2} - \left(\frac{0.6^2 - V_{oc}^2}{0.6^2 \times I_{br}^2}\right)\right]}}$$

$$I_{\text{arc}} = \frac{1}{\sqrt{\left[\frac{0.6}{0.22} \right]^2 \times \left[\frac{1}{25.642^2} - \left(\frac{0.6^2 - 0.220^2}{0.6^2 \times 32.242^2} \right) \right]}}$$

$$I_{\text{arc}} = 2.863 \text{ kA}$$

4.23. DATOS DE LA BARRA DE CASO DE ESTUDIO – TABLERO DE MOTORES Y GENERADORES

| Faulted Bus | | | | |
|--------------|------|---------|----------------|-------------------------|
| Enclosure ID | ID | Nom. kV | Equipment Type | Electrode Configuration |
| | Bus6 | 0.220 | Panelboard | VCB |

| Arc Flash Ratings | | | | | | |
|-------------------|----------|---------------------------|-------|-------|-----------------------|---------------------------------------|
| Conductor | | Enclosure Dimensions (mm) | | | Working Distance (cm) | Avail. Protection cal/cm ² |
| Type | Gap (mm) | Height | Width | Depth | | |
| Copper | 25 | 356 | 305 | 204 | 46 | |

Figura 28. Data bus 6 tablero de motores y generadores

Fuente. Etap.es IEEE 1584-2018

4.24. FACTOR DE CORRECCIÓN DEL TAMAÑO DEL RECINTO PARA TABLERO DE TRANSFORMADORES

Para realizar el cálculo de factor de corrección, necesitamos hacer un cálculo del tamaño del recinto para obtener los datos para el factor de corrección.

$$\text{Width}_1 = 0.03937 * \text{width}$$

$$\text{Height}_1 = 0.03937 * \text{Height}$$

$$\text{EES} = \frac{\text{Height}_1 + \text{Width}_1}{2}$$

$$\text{Width}_1 = 0.03937 * 356$$

$$\text{Width}_1 = 14.015$$

$$\text{Height}_1 = 0.03937 * 305$$

$$\text{Height}_1 = 12.007$$

$$EES = \frac{14.015 + 12.007}{2}$$

$$EES = 13.011$$

4.25. DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE CORRECCIÓN DEL TAMAÑO DEL RECINTO (CF) PARA TABLERO DE TRANSFORMADORES

En base al cálculo de tamaño del recinto hacemos el cálculo del factor de corrección.

$$CF = b_1 \times EES^2 + b_2 \times EES + b_3$$

$$CF = \frac{1}{b_1 \times EES^2 + b_2 \times EES + b_3}$$

$$CF = 0.000302 \times 13.011^2 + 0.03441 \times 13.011 + 0.4325$$

$$CF = 0.9313$$

$$CF = \frac{1}{0.000302 \times 13.011^2 + 0.03441 \times 13.011 + 0.4325}$$

$$CF = \frac{1}{0.9313}$$

$$CF = 1.073$$

4.26. CÁLCULO DE LA ENERGÍA INCIDENTE INTERMEDIA (E) PARA TABLERO DE TRANSFORMADORES

Ahora hacemos el cálculo de la energía incidente que existe al momento del arco eléctrico, la cual usamos la ecuación para tablero dentro de caja ya que para nuestro caso de estudio es la ecuación que se requiere.

$$E_{MB} = 1038.7 \times D_a^{-1.4738} \times t_A [0.0093F^2 - 0.3453 \times F + 5.9675]$$

$$E_{MB} = 1038.7 \times 18^{-1.4738} \times 0.0010 [0.0093 \times 6.234^2 - 0.3453 \times 6.234 + 5.9675]$$

$$E_{MB} = 0.061 \text{ cal/cm}^2$$

4.27. CÁLCULO DEL LÍMITE DE DESTELLO DE ARCO INTERMEDIO (AFB) PARA TABLERO DE TRANSFORMADORES

El cálculo del límite de destello de arco intermedio se hace uso de la ecuación presente, además de los datos previamente cálculos dentro del estudio presente, el cual nos indica la distancia mínima para evitar lesiones en la piel por el calor disipado por un arco eléctrico.

$$AFB_{600} = 10 \left(\frac{k1 + k2 \lg G + \frac{k3 I_{arc600}}{k4 I_{bf}^7 + k5 I_{bf}^6 + k6 I_{bf}^5 + k7 I_{bf}^4 + k8 I_{bf}^3 + k9 I_{bf}^2 + k10 I_{bf} + k11 \lg I_{bf} + k13 \lg I_{arc} + \lg \left(\frac{1}{CF} \right) - \lg \left(\frac{20}{T} \right)}{-k12} \right)$$

$$AFB_{600} = 10 \left(\frac{0.753364 + 0.566 * \log 25 + \frac{1.752636 * 5.0853}{0 + 0 + (-4.783 * 10^{-9}) * 6.234^5 + 0.000001962 * 6.234^4 + (-0.000229) * 6.234^3 + 0.003141 + 6.234^2 + 1.092 * 6.234 + 0 + 0.957 * \log 2.863 + \log \left(\frac{1}{0.9313} \right) - \log \left(\frac{20}{10} \right)}{-(-1.598)} \right)$$

$$AFB_{600} = 76.5335 \text{ mm} - 0.0765 \text{ m}$$

4.28. ENERGÍA INCIDENTE (E) PARA TABLERO DE TRANSFORMADORES

La energía incidente esta dado por el resultado presentado anteriormente en nuestro calculo previo.

$$E = E_{MB}$$

$$E = E_{MB} = 0.061 \text{ cal/cm}^2$$

4.29. LÍMITE DE ARCO ELÉCTRICO (AFB) PARA TABLERO DE TRANSFORMADORES

El límite de arco eléctrico esta dado por el resultado presentado anteriormente en nuestro calculo previo del límite de destello de arco intermedio.

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

$$AFB = 0.0765 \text{ m}$$

4.30. SUMMARY DE LA BUS 6 – ENERGIA INCIDENTE

| Bus | | | Total Fault Current (kA) | |
|------|---------|------------|--------------------------|--------|
| ID | Nom. kV | Type | Bolted | Arcing |
| Bus6 | 0.220 | Panelboard | 6.234 | 2.863 |

| Arc-Flash Analysis Results | | | |
|----------------------------|-----------------------------------|---------|--------------|
| FCT (cycles) | Incident E (cal/cm ²) | AFB (m) | Energy Level |
| 0,598 | 0.064 | 0.07 | Level A |

Figura 29. Summary Incident energy Bus 6

Fuente. Etap.es 1584-2018

4.31. CÁLCULO DE FACTOR CORRECCIÓN DE VARIACIÓN DE CORRIENTE DE ARCO PARA TABLERO DE TRANSFORMADORES

$$I_{\text{arc min}} = I_{\text{arc}} * (1 - 0.5 * \text{Var}C_f)$$

$$\text{Var}C_f = (k1V_{oc}^6 + k2V_{oc}^5 + k3V_{oc}^4 + k4V_{oc}^3 + k5V_{oc}^2 + k6V_{ov} + k7)$$

$$I_{\text{arc min}} = 2.863 * (1 - 0.5 * \text{Var}C_f)$$

$$\text{Var}C_f = (0 + (-0.0000014269) * 0.220^5 + 0.000083137 * 0.220^4 + (-0.0019382) * 0.220^3 + 0.022366 * 0.220^2 + (-0.12645) * 0.220 + 0.30226)$$

$$\text{Var}C_f = 0.863$$

$$I_{\text{arc min}} = 2.863 * (1 - 0.5 * 0.863)$$

$$I_{\text{arc min}} = 1.627 \text{ kA}$$

4.32. ETIQUETAS GENERADAS POR ETAP PARA TABLERO DE MOTORES Y TRANSFORMADORES

Una vez hayamos hecho la simulación correctamente en el etap, y hayas verificado los parámetros de arco eléctrico con las ecuaciones dada por la Norma IEEE 1584 - 2018, el etap nos da la facilidad de generar etiquetas como se muestra en la Figura 30, las cuales son medidas de seguridad para de esta manera poder informar sobre el peligro existente al momento que se genere un arco eléctrico.

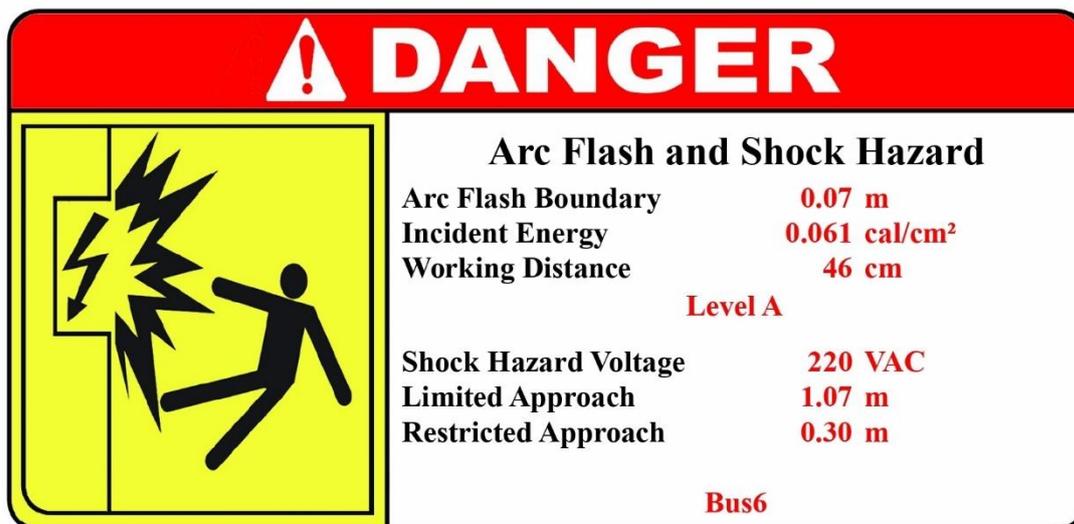


Figura 30. Etiqueta de seguridad generada por Etap

Fuente. Etap IEEE-1485 2018

4.33. RESULTADO DE ARCO ELÉCTRICO SIMULADO PARA TABLERO DE TRANSFORMADORES

Una vez completada la simulación del centro de carga que alberga motores y generadores en ETAP, tenemos la capacidad de generar un informe detallado que aborda temas importantes, especialmente los relacionados con disyuntores y barras. En nuestro caso particular, que engloba los componentes presentes en el centro de carga del laboratorio de motores y generadores, estos componentes son de vital importancia en el escenario de estudio porque interactúan significativamente durante una falla a tierra. Hemos realizado esta evaluación específica utilizando el software ETAP, las capacidades avanzadas de ETAP nos permitieron simular y analizar con precisión escenarios potenciales de arco eléctrico.

Por lo tanto, proporciona información detallada y clara sobre cómo se comportaría el tablero de transformadores en caso de falla, lo que aumentaría significativamente la seguridad y eficiencia del sistema eléctrico en estudio.

| Ibf" (kA) | Source PD | | FCT (Cycles) | Source PD ID | IE (cal/cm ²) | AFB (m) |
|-----------|-----------|----------|-----------------|--------------|------------------------------|------------|
| | Ia" (kA) | Ia" (kA) | | | | |
| 6.234 | 2.863 | 2.863 | 0.6 | CB1 | 0.064 | 0.07 |
| | | FCT = | 0.6 | | | |
| 6.234 | 2.863 | 2.863 | 0.6 | CB1 | 0.064 | 0.07 |
| | | FCT = | 0.6 | | | |
| 6.234 | 2.863 | 2.863 | 0.6 | CB1 | 0.064 | 0.07 |
| | | FCT = | 0.6 | | | |
| 6.234 | 2.863 | 2.863 | 0.6 | CB1 | 0.064 | 0.07 |
| | | FCT = | 0.6 | | | |
| 6.234 | 2.863 | 2.863 | 0.6 | CB1 | 0.064 | 0.07 |
| | | FCT = | 0.6 | | | |
| 6.234 | 2.863 | 2.863 | 0.6 | CB1 | 0.064 | 0.07 |
| | | FCT = | 0.6 | | | |

| Encl. CF (pu) | Ibf" (kA) | Source PD | | FCT (Cycles) | Source PD ID | IE (cal/cm ²) | AFB (m) |
|------------------|-----------|-----------|----------|-----------------|--------------|------------------------------|------------|
| | | Ia" (kA) | Ia" (kA) | | | | |
| 1.000 | 6.234 | 2.863 | 2.863 | 0.6 | CB1 | 0.064 | 0.07 |
| | | FCT = | 0.6 | Total = | | | |
| 1.000 | 6.234 | 2.863 | 2.863 | 0.6 | CB1 | 0.064 | 0.07 |
| | | FCT = | 0.6 | Total = | | | |
| 1.000 | 6.234 | 2.863 | 2.863 | 0.6 | CB1 | 0.064 | 0.07 |
| | | FCT = | 0.6 | Total = | | | |
| 1.000 | 6.234 | 2.863 | 2.863 | 0.6 | CB1 | 0.064 | 0.07 |
| | | FCT = | 0.6 | Total = | | | |
| 1.000 | 6.234 | 2.863 | 2.863 | 0.6 | CB1 | 0.064 | 0.07 |
| | | FCT = | 0.6 | Total = | | | |
| 1.000 | 6.234 | 2.863 | 2.863 | 0.6 | CB1 | 0.064 | 0.07 |
| | | FCT = | 0.6 | Total = | | | |
| 1.000 | 6.234 | 2.863 | 2.863 | 0.6 | CB1 | 0.064 | 0.07 |
| | | FCT = | 0.6 | Total = | | | |

Figura 31. Arc Flash Analysis Bus 6

Fuente. Etap.es IEEE-1584 - 2018

| Element ID | Connected Bus ID | Type | Electrode Config. | Prefault kV | Iarc Var. (%) | Encl. CF (pu) |
|------------|------------------|-------------------|----------------------|----------------|------------------|------------------|
| | | | | | | |
| C1-3-5 | Bus6 | Load PD Line Side | VCB | 0.220 | 0 | 1.000 |
| C-2-4-6 | Bus6 | Load PD Line Side | VCB | 0.220 | 0 | 1.000 |
| C-7-911 | Bus6 | Load PD Line Side | VCB | 0.220 | 0 | 1.000 |
| C-8-10-12 | Bus6 | Load PD Line Side | VCB | 0.220 | 0 | 1.000 |
| CB13 | Bus6 | Load PD Line Side | VCB | 0.220 | 0 | 1.000 |

| Element ID | Connected Bus ID | Enclosure | | Electrode Config. | Prefault kV | Iarc Var. (%) |
|------------|------------------|-----------|-------------------|-------------------|-------------|---------------|
| | | ID | Type | | | |
| CB12 | Bus6 | | Load PD Line Side | VCB | 0.220 | 0 |
| CB26 | Bus6 | | Load PD Line Side | VCB | 0.220 | 0 |
| CB25 | Bus6 | | Load PD Line Side | VCB | 0.220 | 0 |
| CB24 | Bus6 | | Load PD Line Side | VCB | 0.220 | 0 |
| CB22 | Bus6 | | Load PD Line Side | VCB | 0.220 | 0 |
| CB21 | Bus6 | | Load PD Line Side | VCB | 0.220 | 0 |
| CB23 | Bus6 | | Load PD Line Side | VCB | 0.220 | 0 |

Figura 32. Arc Flash Analysis Bus 6 - CBS

Fuente. Etap.es IEEE-1584 – 2018

Por ultimo tenemos ultimo el análisis de resultado sobre el factor de corrección para tener la justificación de nuestro cálculos, el cual Etap nos entrega al momento de arco eléctrico simulado, los resultados se muestran en la Figura 33.

| Correction Factors | | Incident Energy | | | | | | |
|--------------------|------------------|-----------------|-------------------|--------------------|--------------|--------------|---------------------------|---------|
| Iarc Var. (%) | Encl. CF (pu) | Ibf" (kA) | Ia" (kA) | Source PD Ia" (kA) | FCT (Cycles) | Source PD ID | IE (cal/cm ²) | AFB (m) |
| 0 | 1.000 | 6.234 | 2.863 | 2.863 | 0.6 | CB1 | 0.064 | |
| | | | | FCT = | 0.6 | | Total = | 0.064 |
| | | | | | | | | 0.07 |
| Arc Fault Location | | | | | | | | |
| Element ID | Connected Bus ID | Enclosure | | Electrode Config. | Prefault kV | | | |
| | | ID | Type | | | | | |
| CB27 | Bus6 | | Load PD Line Side | VCB | 0.220 | | | |

Figura 33. Arc Flash Analysis CB27 – Bus 6

Fuente. Etap.es IEEE - 2018

4.34. ANALIZADOR DE RESULTADOS PARA TABLERO DE MOTORES Y GENERADORES

La investigación actual se basa en un análisis de seguridad eléctrica detallado que se lleva a cabo a través del software ETAP, que aborda varios componentes importantes del sistema. Se han evaluado minuciosamente los resultados de varios componentes, incluidos el disyuntor principal, la barra principal de salida del transformador y los centros de carga de motores y generadores. Las tablas presentadas, creados de acuerdo con la norma IEEE 1584-2018, brindan un análisis completo de la seguridad eléctrica del centro de carga de motores y generadores

| ID | kV (kV) | Type | Location | Connected Bus | Electrode Configuration |
|-----------|---------|------------|---------------------|---------------|-------------------------|
| Bus4 | 0,22 | Switchgear | Bus Arc Fault | Bus4 | VCB |
| Bus6 | 0,22 | Panelboard | Bus Arc Fault | Bus6 | VCB |
| C-2-4-6 | 0,22 | LV CB | Load PD Line-side | Bus6 | VCB |
| C-7-911 | 0,22 | LV CB | Load PD Line-side | Bus6 | VCB |
| C-8-10-12 | 0,22 | LV CB | Load PD Line-side | Bus6 | VCB |
| C1-3-5 | 0,22 | LV CB | Load PD Line-side | Bus6 | VCB |
| CB-P1 | 0,22 | LV CB | Load PD Line-side | Bus4 | VCB |
| CB-P3 | 0,22 | LV CB | Load PD Line-side | Bus4 | VCB |
| CB-P4-A | 0,22 | LV CB | Load PD Line-side | Bus4 | VCB |
| CB1 | 0,22 | LV CB | Source PD Line-side | Bus4 | VCB |
| CB12 | 0,22 | LV CB | Load PD Line-side | Bus6 | VCB |
| CB13 | 0,22 | LV CB | Load PD Line-side | Bus6 | VCB |
| CB21 | 0,22 | LV CB | Load PD Line-side | Bus6 | VCB |
| CB22 | 0,22 | LV CB | Load PD Line-side | Bus6 | VCB |
| CB23 | 0,22 | LV CB | Load PD Line-side | Bus6 | VCB |
| CB24 | 0,22 | LV CB | Load PD Line-side | Bus6 | VCB |
| CB25 | 0,22 | LV CB | Load PD Line-side | Bus6 | VCB |
| CB26 | 0,22 | LV CB | Load PD Line-side | Bus6 | VCB |
| CB27 | 0,22 | LV CB | Load PD Line-side | Bus6 | VCB |

| Conductor Gap LL (mm) | Working Distance LL (cm) | Height (mm) | Width (mm) | Depth (mm) | LAB to Exp. Mov. Conductor (m) |
|-----------------------|--------------------------|-------------|------------|------------|--------------------------------|
| 32 | 61 | 508 | 508 | 508 | 3,048 |
| 25 | 45,7 | 356 | 305 | 204 | 3,048 |
| 25 | 45,7 | 356 | 305 | 204 | 3,048 |
| 25 | 45,7 | 356 | 305 | 204 | 3,048 |
| 25 | 45,7 | 356 | 305 | 204 | 3,048 |
| 25 | 45,7 | 356 | 305 | 204 | 3,048 |
| 32 | 61 | 508 | 508 | 508 | 3,048 |
| 32 | 61 | 508 | 508 | 508 | 3,048 |
| 32 | 61 | 508 | 508 | 508 | 3,048 |
| 32 | 61 | 508 | 508 | 508 | 3,048 |
| 25 | 45,7 | 356 | 305 | 204 | 3,048 |
| 25 | 45,7 | 356 | 305 | 204 | 3,048 |
| 25 | 45,7 | 356 | 305 | 204 | 3,048 |
| 25 | 45,7 | 356 | 305 | 204 | 3,048 |
| 25 | 45,7 | 356 | 305 | 204 | 3,048 |
| 25 | 45,7 | 356 | 305 | 204 | 3,048 |
| 25 | 45,7 | 356 | 305 | 204 | 3,048 |
| 25 | 45,7 | 356 | 305 | 204 | 3,048 |
| 25 | 45,7 | 356 | 305 | 204 | 3,048 |
| 25 | 45,7 | 356 | 305 | 204 | 3,048 |
| 25 | 45,7 | 356 | 305 | 204 | 3,048 |

Tabla 18. Análisis de resultados para centro de carga de motores y generadores

Fuente. Etap.es IEEE 1584 – 2018

El presente análisis se centra en los parámetros críticos que influyen en la generación de arco eléctrico, con el objetivo de brindar una perspectiva fundamental sobre la seguridad eléctrica en diferentes configuraciones. La información se presenta en una tabla que resume datos relevantes como la distancia de trabajo, las dimensiones del espacio de arco, la configuración de electrodos y los niveles de energía.

| Output Rpt. | Configuration | Total Energy (cal/cm ²) | AFB (m) | Energy Levels |
|---------------------------|---------------|-------------------------------------|---------|---------------|
| CB1 | Normal | 0,226426 | 0,215 | Level A |
| Motores y transformadores | Normal | 0,063696 | 0,073 | Level A |
| Motores y transformadores | Normal | 0,063696 | 0,073 | Level A |
| Motores y transformadores | Normal | 0,063696 | 0,073 | Level A |
| Motores y transformadores | Normal | 0,063696 | 0,073 | Level A |
| Motores y transformadores | Normal | 0,063696 | 0,073 | Level A |
| CB1 | Normal | 0,226426 | 0,215 | Level A |
| CB1 | Normal | 0,226426 | 0,215 | Level A |
| CB1 | Normal | 0,226426 | 0,215 | Level A |
| CB1 | Normal | 0,449527 | 0,33 | Level A |
| Motores y transformadores | Normal | 0,063696 | 0,073 | Level A |
| Motores y transformadores | Normal | 0,063696 | 0,073 | Level A |
| Motores y transformadores | Normal | 0,063696 | 0,073 | Level A |
| Motores y transformadores | Normal | 0,063696 | 0,073 | Level A |
| Motores y transformadores | Normal | 0,063696 | 0,073 | Level A |
| Motores y transformadores | Normal | 0,063696 | 0,073 | Level A |
| Motores y transformadores | Normal | 0,063696 | 0,073 | Level A |
| Motores y transformadores | Normal | 0,063696 | 0,073 | Level A |
| Motores y transformadores | Normal | 0,063696 | 0,073 | Level A |

Tabla 19. Análisis de resultados para centro de motores y generadores

Fuente. Etap.es IEEE 1584 – 2018

| Final FCT (ms) | Source PD ID | Prefault Voltage (kV) | FaultType | Method | Ia at FCT (kA) | Total Ia" (kA) |
|----------------|--------------|-----------------------|-----------|------------------|----------------|----------------|
| 10 | CB1 | 0,22 | 3-Phase | IEEE 1584 - 2018 | 13,383 | 13,383 |
| 10 | CB1 | 0,22 | 3-Phase | IEEE 1584 - 2018 | 2,863 | 2,863 |
| 10 | CB1 | 0,22 | 3-Phase | IEEE 1584 - 2018 | 2,863 | 2,863 |
| 10 | CB1 | 0,22 | 3-Phase | IEEE 1584 - 2018 | 2,863 | 2,863 |
| 10 | CB1 | 0,22 | 3-Phase | IEEE 1584 - 2018 | 2,863 | 2,863 |
| 10 | CB1 | 0,22 | 3-Phase | IEEE 1584 - 2018 | 2,863 | 2,863 |
| 10 | CB1 | 0,22 | 3-Phase | IEEE 1584 - 2018 | 13,383 | 13,383 |
| 10 | CB1 | 0,22 | 3-Phase | IEEE 1584 - 2018 | 13,383 | 13,383 |
| 10 | CB1 | 0,22 | 3-Phase | IEEE 1584 - 2018 | 13,383 | 13,383 |
| 19,8 | Fuse1 | 0,22 | 3-Phase | IEEE 1584 - 2018 | 13,383 | 13,383 |
| 10 | CB1 | 0,22 | 3-Phase | IEEE 1584 - 2018 | 2,863 | 2,863 |
| 10 | CB1 | 0,22 | 3-Phase | IEEE 1584 - 2018 | 2,863 | 2,863 |
| 10 | CB1 | 0,22 | 3-Phase | IEEE 1584 - 2018 | 2,863 | 2,863 |
| 10 | CB1 | 0,22 | 3-Phase | IEEE 1584 - 2018 | 2,863 | 2,863 |
| 10 | CB1 | 0,22 | 3-Phase | IEEE 1584 - 2018 | 2,863 | 2,863 |
| 10 | CB1 | 0,22 | 3-Phase | IEEE 1584 - 2018 | 2,863 | 2,863 |
| 10 | CB1 | 0,22 | 3-Phase | IEEE 1584 - 2018 | 2,863 | 2,863 |
| 10 | CB1 | 0,22 | 3-Phase | IEEE 1584 - 2018 | 2,863 | 2,863 |
| 10 | CB1 | 0,22 | 3-Phase | IEEE 1584 - 2018 | 2,863 | 2,863 |
| 10 | CB1 | 0,22 | 3-Phase | IEEE 1584 - 2018 | 2,863 | 2,863 |

Tabla 20. Análisis de resultados para centro de carga de motores y generadores

Fuente. Etap.es IEEE 1584 – 2018

Los resultados del análisis se basan en simulaciones realizadas con el software ETAP, una herramienta especializada que permite comprender con mayor precisión los posibles escenarios de arco eléctrico.

Los cálculos realizados se basan en la norma IEEE 1584-2018, la cual establece los estándares para la evaluación y mitigación de los riesgos asociados a los arcos eléctricos. La información detallada en la tabla respalda sólidamente la justificación de los cálculos realizados y sirve como base firme para la implementación de medidas preventivas y de seguridad que se ajustan a las normativas vigentes.

| Source PD la at FCT (kA) | Source PD la" (kA) | Total lbf at FCT (kA) | Total lbf" (kA) | Source PD lbf at FCT (kA) | Source PD lbf" (kA) | Energy 1 (cal/cm ²) |
|--------------------------------|-----------------------|--------------------------|--------------------|---------------------------------|------------------------|------------------------------------|
| 13,383 | 13,383 | 32,242 | 32,242 | 32,242 | 32,242 | 0,226426 |
| 2,863 | 2,863 | 6,234 | 6,234 | 6,234 | 6,234 | 0,063696 |
| 2,863 | 2,863 | 6,234 | 6,234 | 6,234 | 6,234 | 0,063696 |
| 2,863 | 2,863 | 6,234 | 6,234 | 6,234 | 6,234 | 0,063696 |
| 2,863 | 2,863 | 6,234 | 6,234 | 6,234 | 6,234 | 0,063696 |
| 2,863 | 2,863 | 6,234 | 6,234 | 6,234 | 6,234 | 0,063696 |
| 13,383 | 13,383 | 32,242 | 32,242 | 32,242 | 32,242 | 0,226426 |
| 13,383 | 13,383 | 32,242 | 32,242 | 32,242 | 32,242 | 0,226426 |
| 13,383 | 13,383 | 32,242 | 32,242 | 32,242 | 32,242 | 0,226426 |
| 0,213 | 0,213 | 32,242 | 32,242 | 0,514 | 0,514 | 0,449527 |
| 2,863 | 2,863 | 6,234 | 6,234 | 6,234 | 6,234 | 0,063696 |
| 2,863 | 2,863 | 6,234 | 6,234 | 6,234 | 6,234 | 0,063696 |
| 2,863 | 2,863 | 6,234 | 6,234 | 6,234 | 6,234 | 0,063696 |
| 2,863 | 2,863 | 6,234 | 6,234 | 6,234 | 6,234 | 0,063696 |
| 2,863 | 2,863 | 6,234 | 6,234 | 6,234 | 6,234 | 0,063696 |
| 2,863 | 2,863 | 6,234 | 6,234 | 6,234 | 6,234 | 0,063696 |
| 2,863 | 2,863 | 6,234 | 6,234 | 6,234 | 6,234 | 0,063696 |
| 2,863 | 2,863 | 6,234 | 6,234 | 6,234 | 6,234 | 0,063696 |
| 2,863 | 2,863 | 6,234 | 6,234 | 6,234 | 6,234 | 0,063696 |
| 2,863 | 2,863 | 6,234 | 6,234 | 6,234 | 6,234 | 0,063696 |
| 2,863 | 2,863 | 6,234 | 6,234 | 6,234 | 6,234 | 0,063696 |
| 2,863 | 2,863 | 6,234 | 6,234 | 6,234 | 6,234 | 0,063696 |
| 2,863 | 2,863 | 6,234 | 6,234 | 6,234 | 6,234 | 0,063696 |
| 2,863 | 2,863 | 6,234 | 6,234 | 6,234 | 6,234 | 0,063696 |
| 2,863 | 2,863 | 6,234 | 6,234 | 6,234 | 6,234 | 0,063696 |

Tabla 21. Análisis de resultados para centro de carga de motores y generadores

Fuente. Etap.es IEEE 1584 – 2018

| PPE Description | FCT 1 (ms) | Trip Time (ms) |
|---|---------------|-------------------|
| Non-melting or untreated natural fiber long-sleeve shirt and long pants | 10 | 10 |
| Non-melting or untreated natural fiber long-sleeve shirt and long pants | 10 | 10 |
| Non-melting or untreated natural fiber long-sleeve shirt and long pants | 10 | 10 |
| Non-melting or untreated natural fiber long-sleeve shirt and long pants | 10 | 10 |
| Non-melting or untreated natural fiber long-sleeve shirt and long pants | 10 | 10 |
| Non-melting or untreated natural fiber long-sleeve shirt and long pants | 10 | 10 |
| Non-melting or untreated natural fiber long-sleeve shirt and long pants | 10 | 10 |
| Non-melting or untreated natural fiber long-sleeve shirt and long pants | 10 | 10 |
| Non-melting or untreated natural fiber long-sleeve shirt and long pants | 10 | 10 |
| Non-melting or untreated natural fiber long-sleeve shirt and long pants | 19,8 | 19,8 |
| Non-melting or untreated natural fiber long-sleeve shirt and long pants | 10 | 10 |
| Non-melting or untreated natural fiber long-sleeve shirt and long pants | 10 | 10 |
| Non-melting or untreated natural fiber long-sleeve shirt and long pants | 10 | 10 |
| Non-melting or untreated natural fiber long-sleeve shirt and long pants | 10 | 10 |
| Non-melting or untreated natural fiber long-sleeve shirt and long pants | 10 | 10 |
| Non-melting or untreated natural fiber long-sleeve shirt and long pants | 10 | 10 |
| Non-melting or untreated natural fiber long-sleeve shirt and long pants | 10 | 10 |
| Non-melting or untreated natural fiber long-sleeve shirt and long pants | 10 | 10 |
| Non-melting or untreated natural fiber long-sleeve shirt and long pants | 10 | 10 |
| Non-melting or untreated natural fiber long-sleeve shirt and long pants | 10 | 10 |
| Non-melting or untreated natural fiber long-sleeve shirt and long pants | 10 | 10 |

Tabla 22. Análisis de resultados para centro de carga de motores y generadores

Fuente. Etap.es IEEE 1584 – 2018

Este análisis, junto con la información detallada en la tabla, ofrece una base sólida para la toma

de decisiones relacionadas con la seguridad eléctrica en diferentes configuraciones. La implementación de medidas preventivas y de seguridad basadas en este análisis permitirá minimizar los riesgos asociados a los arcos eléctricos y garantizar un entorno seguro para las personas y las instalaciones.

4.35. TECNICAS DE MEJORAS PARA LA MITIGACION DE ARCO ELECTRICOS

Las simulaciones realizadas en el software ETAP, que abarcaron el disyuntor principal, la barra principal de salida del transformador y el centro de carga de motores y generadores, revelaron la necesidad de implementar medidas preventivas para evitar la propagación de arcos eléctricos y minimizar los riesgos asociados. Estas medidas son fundamentales para la seguridad del edificio y sus ocupantes.

- Etiquetado de seguridad: Implementar un sistema de etiquetado de seguridad en todos los centros de carga del edificio. Este sistema debe proporcionar información clara y precisa sobre los riesgos asociados a cada centro de carga, así como las medidas de precaución que se deben tomar.

| CATEGORÍA DE PPE 1 | CATEGORÍA DE PPE 2 | CATEGORÍA DE EPP 3 | CATEGORÍA DE EPP 4 |
|---|---|--|---|
| <p>CLASIFICACIÓN DE ARCO MÍNIMO ENTRE 4 - 8 CAL/CM2</p> <p>ROPA DE PROTECCIÓN CONTRA ARCO ELÉCTRICO</p> <ul style="list-style-type: none"> • Camisa de manga larga y pantalones o traje entero aptos para arcos eléctricos • Protector facial o capucha para traje aptos para arcos eléctricos • Chaqueta, parka, gabardina o revestimiento para cascos aptos para arcos eléctricos (según sea necesario) <p>OTROS EQUIPOS DE PROTECCIÓN:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Casco • Lentes o gafas de seguridad • Protección auditiva (dentro del oído) • Guantes de cuero resistentes • Calzado de cuero (según sea necesario) | <p>CLASIFICACIÓN DE ARCO MÍNIMO ENTRE 8 - 25 CAL/CM2</p> <p>ROPA DE PROTECCIÓN CONTRA ARCO ELÉCTRICO</p> <ul style="list-style-type: none"> • Camisa de manga larga y pantalones o traje entero aptos para arcos eléctricos • Capucha para traje o protector facial y pasamontañas aptos para arcos eléctricos • Chaqueta, parka, gabardina o revestimiento para cascos aptos para arcos eléctricos (según sea necesario) <p>OTROS EQUIPOS DE PROTECCIÓN:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Casco • Lentes o gafas de seguridad • Protección auditiva (dentro del oído) • Guantes de cuero resistentes • Calzado de cuero | <p>CLASIFICACIÓN DE ARCO MÍNIMO ENTRE 25 - 40 CAL/CM2</p> <p>ROPA DE PROTECCIÓN CONTRA ARCO ELÉCTRICO</p> <ul style="list-style-type: none"> • Según sea necesario: Camisa de manga larga, pantalones traje entero, chaqueta y pantalones de traje aptos para arcos eléctricos • Capucha para traje apta para arcos eléctricos • Guantes aptos para arcos eléctricos • Chaqueta, parka, gabardina o revestimiento para cascos aptos para arcos eléctricos (según sea necesario) <p>OTROS EQUIPOS DE PROTECCIÓN:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Casco • Lentes o gafas de seguridad • Protección auditiva (dentro del oído) • Calzado de cuero (según sea necesario) | <p>CLASIFICACIÓN DE ARCO MÍNIMO ENTRE 40 CAL/CM2</p> <p>ROPA DE PROTECCIÓN CONTRA ARCO ELÉCTRICO</p> <ul style="list-style-type: none"> • Según sea necesario: Camisa de manga larga, pantalones traje entero, chaqueta y pantalones de traje aptos para arcos eléctricos • Capucha para traje apta para arcos eléctricos • Guantes aptos para arcos eléctricos • Chaqueta, parka, gabardina o revestimiento para cascos aptos para arcos eléctricos (según sea necesario) <p>OTROS EQUIPOS DE PROTECCIÓN:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Casco • Lentes o gafas de seguridad • Protección auditiva (dentro del oído) • Calzado de cuero (según sea necesario) |

Figura 34. Categorías de EPP según la norma NFPA 70E-2018

Tabla 23. Categorías de EPP

Fuente. Norma NPFA-70E de seguridad eléctrica

- Equipo de protección personal: Asegurar que el personal que realiza maniobras en los centros de carga cuente con el equipo de protección personal adecuado, incluyendo gafas y guantes aislantes.
- Capacitación del personal: Capacitar al personal sobre los riesgos asociados a los arcos eléctricos y las medidas de seguridad que se deben tomar durante las actividades de mantenimiento y reparación de las instalaciones eléctricas.
- Inspecciones y mantenimiento: Realizar inspecciones y mantenimientos regulares en

los centros de carga, incluyendo revisiones periódicas de la operatividad de los disyuntores, así como inspecciones visuales y limpieza programada.

- Selección y dimensionamiento de disyuntores: Seleccionar y dimensionar correctamente los disyuntores para asegurar su operación óptima frente a sobrecargas y cortocircuitos.
- Bloqueo y etiquetado: Implementar un sistema de bloqueo y etiquetado adecuado en las instalaciones eléctricas que requieran mantenimiento y reparaciones. Este sistema debe garantizar que el circuito eléctrico se encuentre desenergizado antes de iniciar cualquier trabajo.

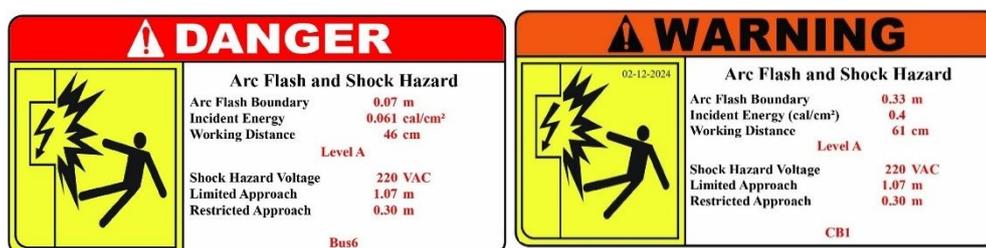


Figura 35. Ejemplos de etiquetas de seguridad para eléctrico.

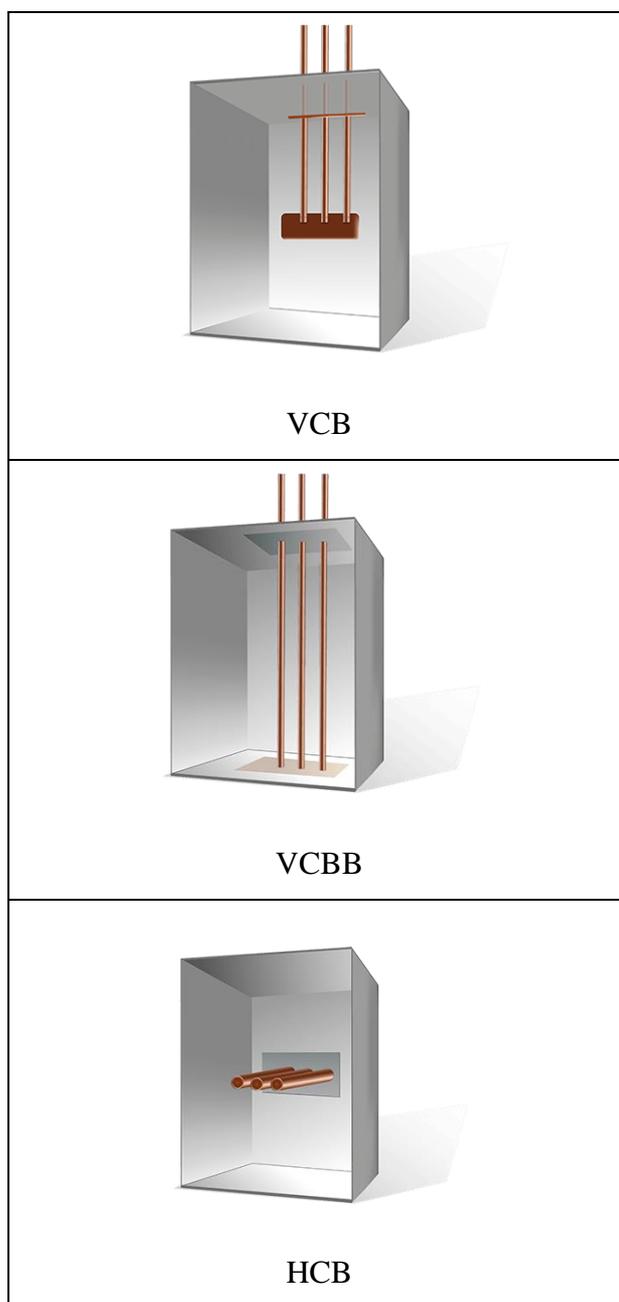
Fuente. Etap.es 1584-2018

La implementación de estas medidas integrales fortalecerá la seguridad eléctrica del edificio, asegurando un entorno laboral seguro y eficiente.

ANEXOS.

5. CONFIGURACION DE TIPOS DE ELECTRODOS

Un paso fundamental en el proceso de cálculo es determinar la disposición de los conductores dentro del equipo y la carcasa. Se busca encontrar la configuración que mejor represente las condiciones reales del electrodo. Diversos equipos, como interruptores, tableros de distribución y centros de control de motores, pueden presentar disposiciones de conductores similares a las configuraciones de electrodos de la prueba, que se detallan en la Figura 8. Es importante tener en cuenta que en el interior de un equipo pueden existir diferentes disposiciones de conductores que se asemejan a diversas configuraciones de electrodos.



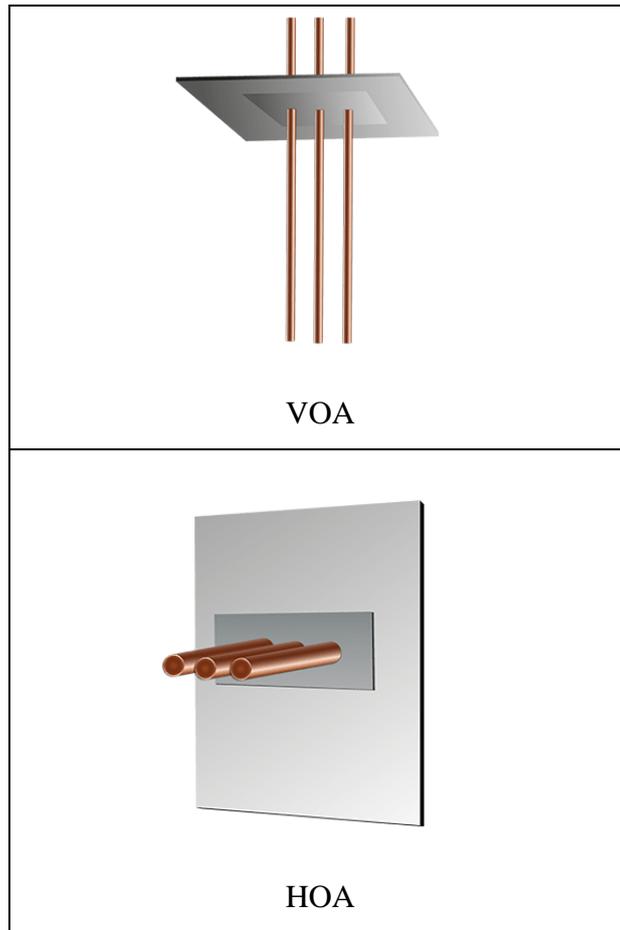


Tabla 24. Ejemplos de configuración de electrodos

Fuente. Etap.es IEEE 1584-2018

5.1. PANELES DE DISTRIBUCIÓN DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Universidad Politécnica Salesiana, ubicada en la ciudad de Guayaquil, Ecuador, cuenta con un sistema de distribución eléctrica, los paneles de distribución se encuentran distribuidos por todo el campus universitario, uno en cada piso del Edificio E.

5.1.1. Tablero de distribución piso 1 (TD-1P)

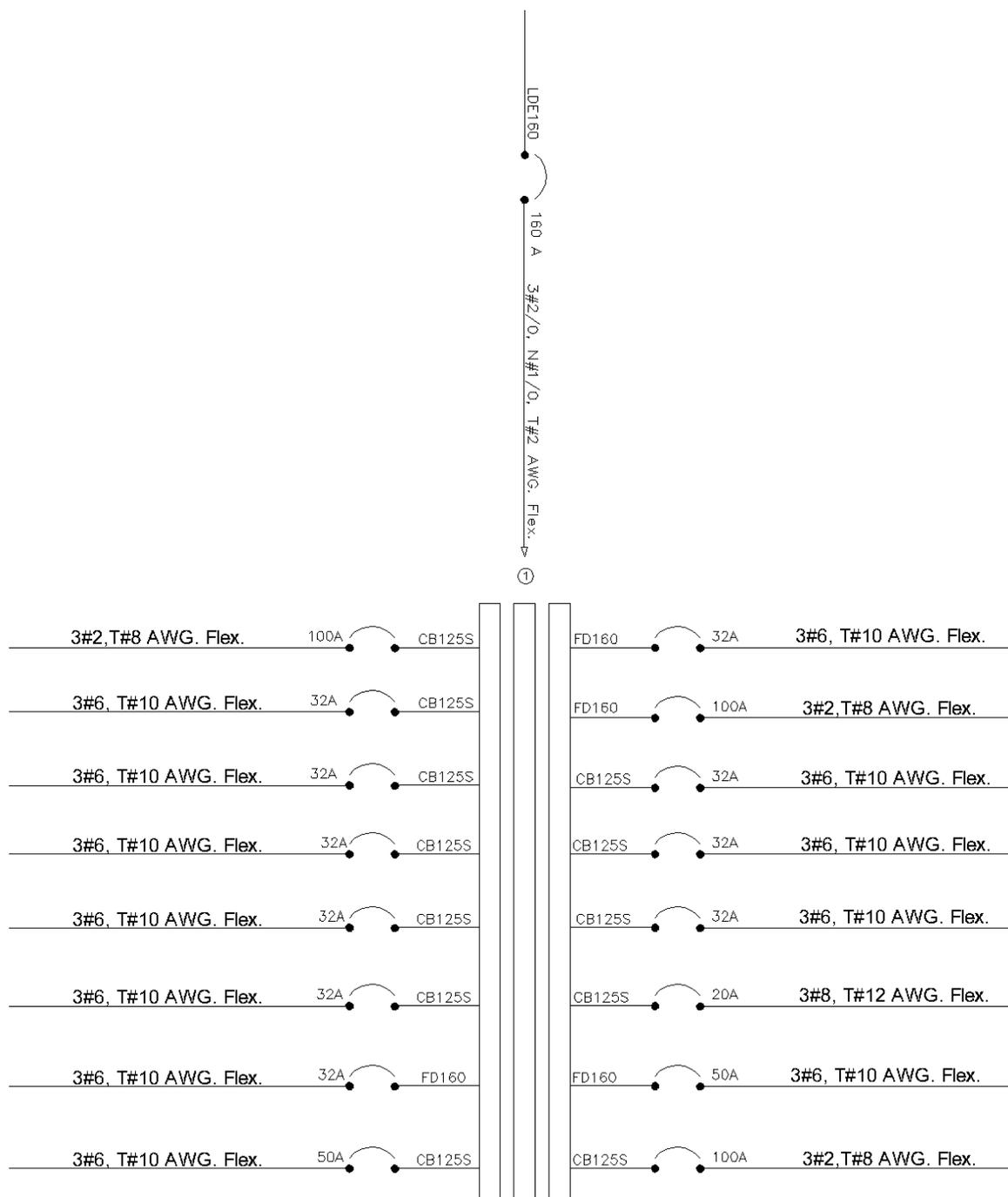


Figura 36. Tableros de distribución piso 1- Bloque E

Fuente. Elaboración Suquinahua - Montero

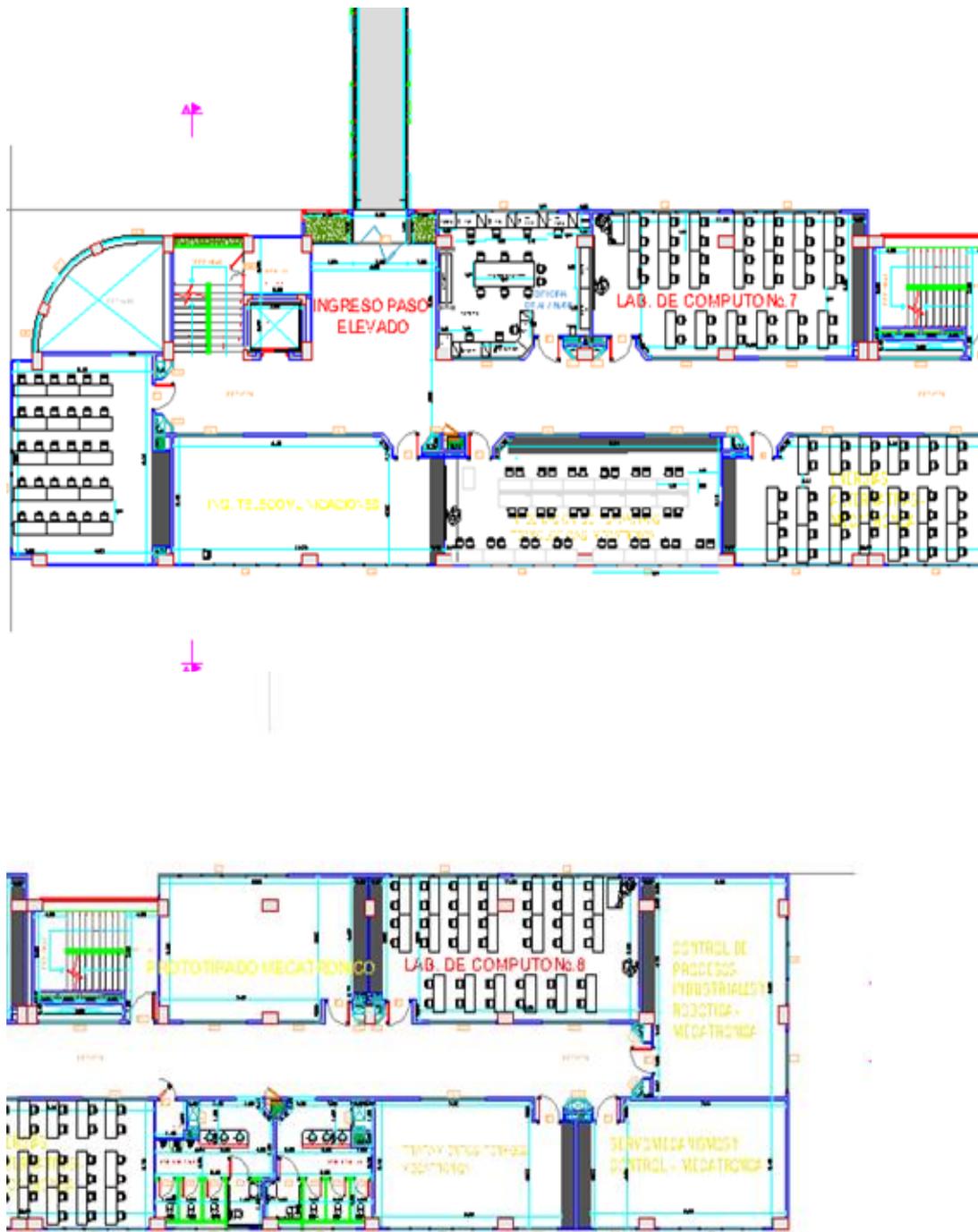


Figura 24. Plano estructural Bloque E - Piso 1

Fuente. Universidad Politécnica Salesiana

5.1.2. Tablero de distribución piso 2 (TD-2P)

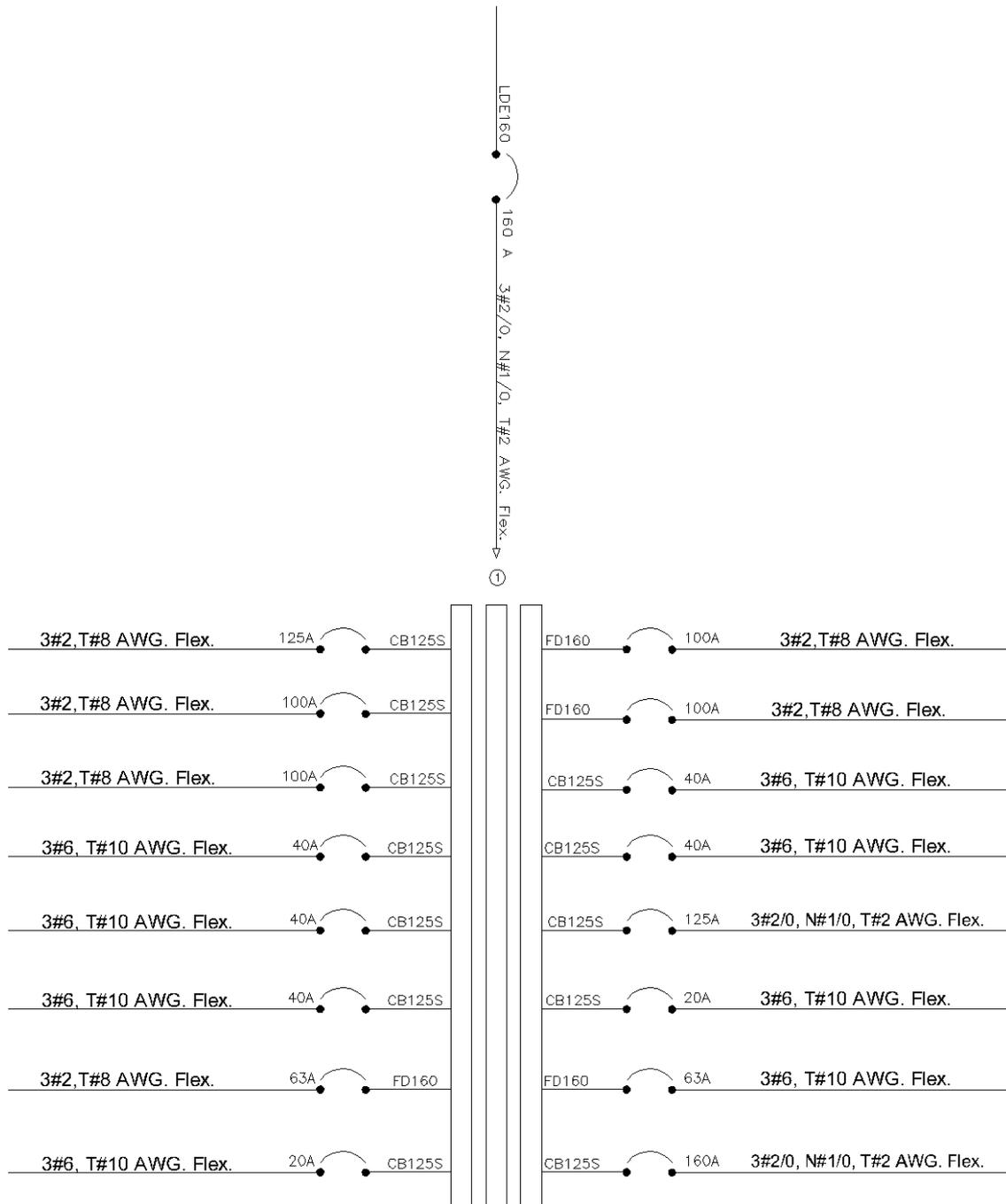


Figura 37. Tablero de distribución Bloque E - Piso 2

Fuente. Elaboración Suquinahua - Montero

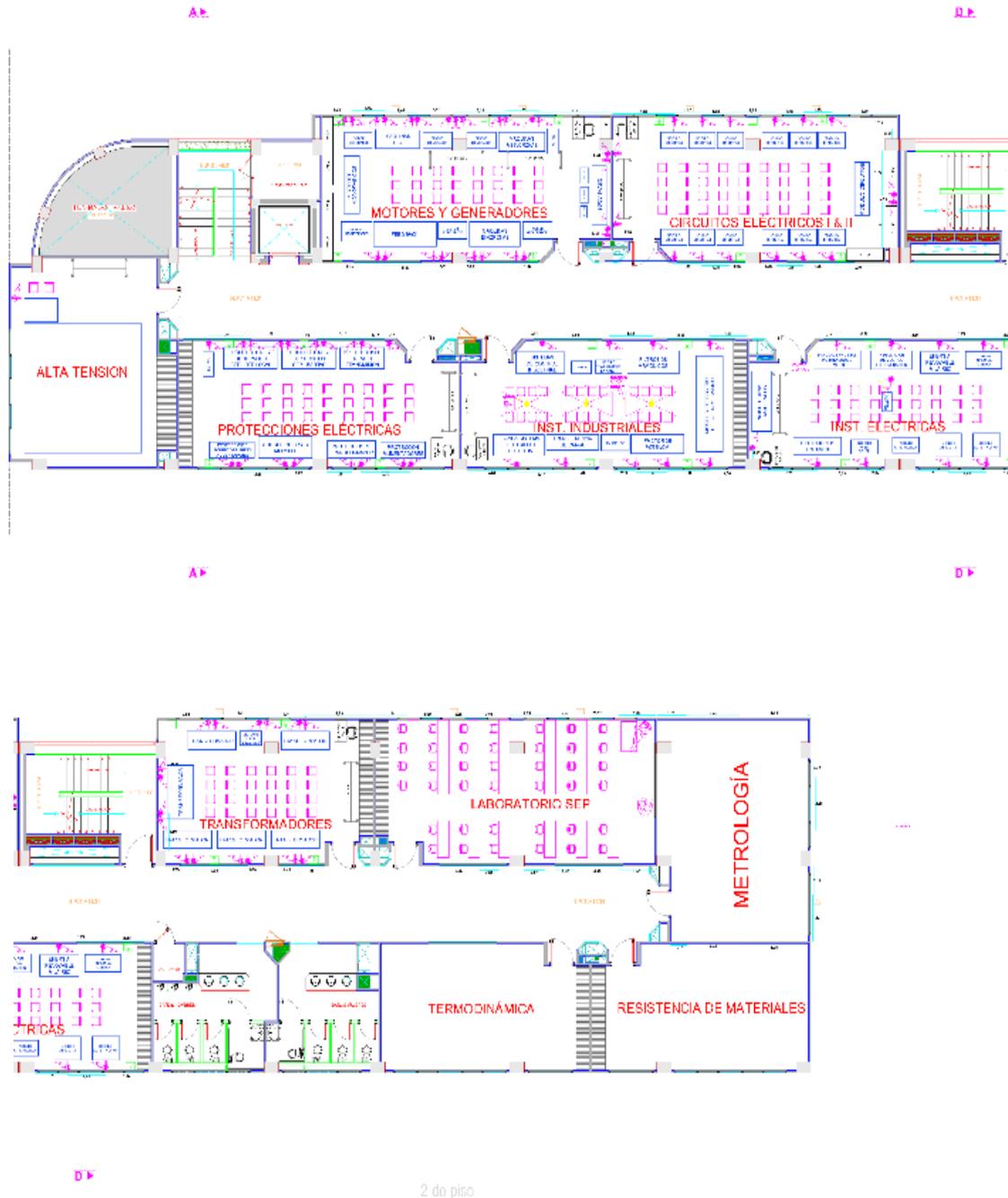


Figura 38. Plano Estructural Bloque E - Piso 2

Fuente. Universidad Politécnica Salesiana

5.1.3. Tablero de distribución piso 3 (TD-3P)

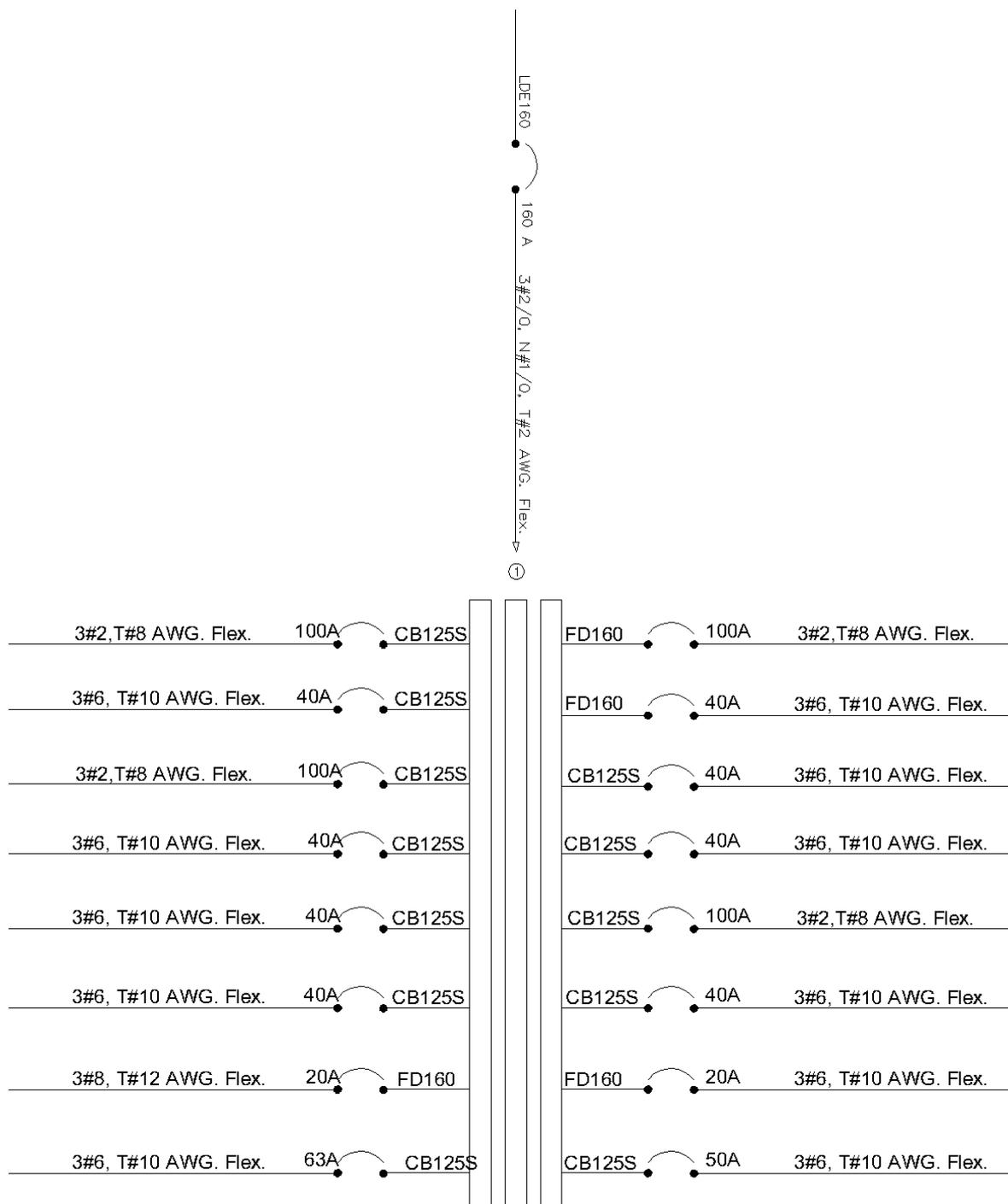


Figura 39. Tablero de distribución Bloque E - Piso 3

Fuente. Elaboración Suquinahua – Mont

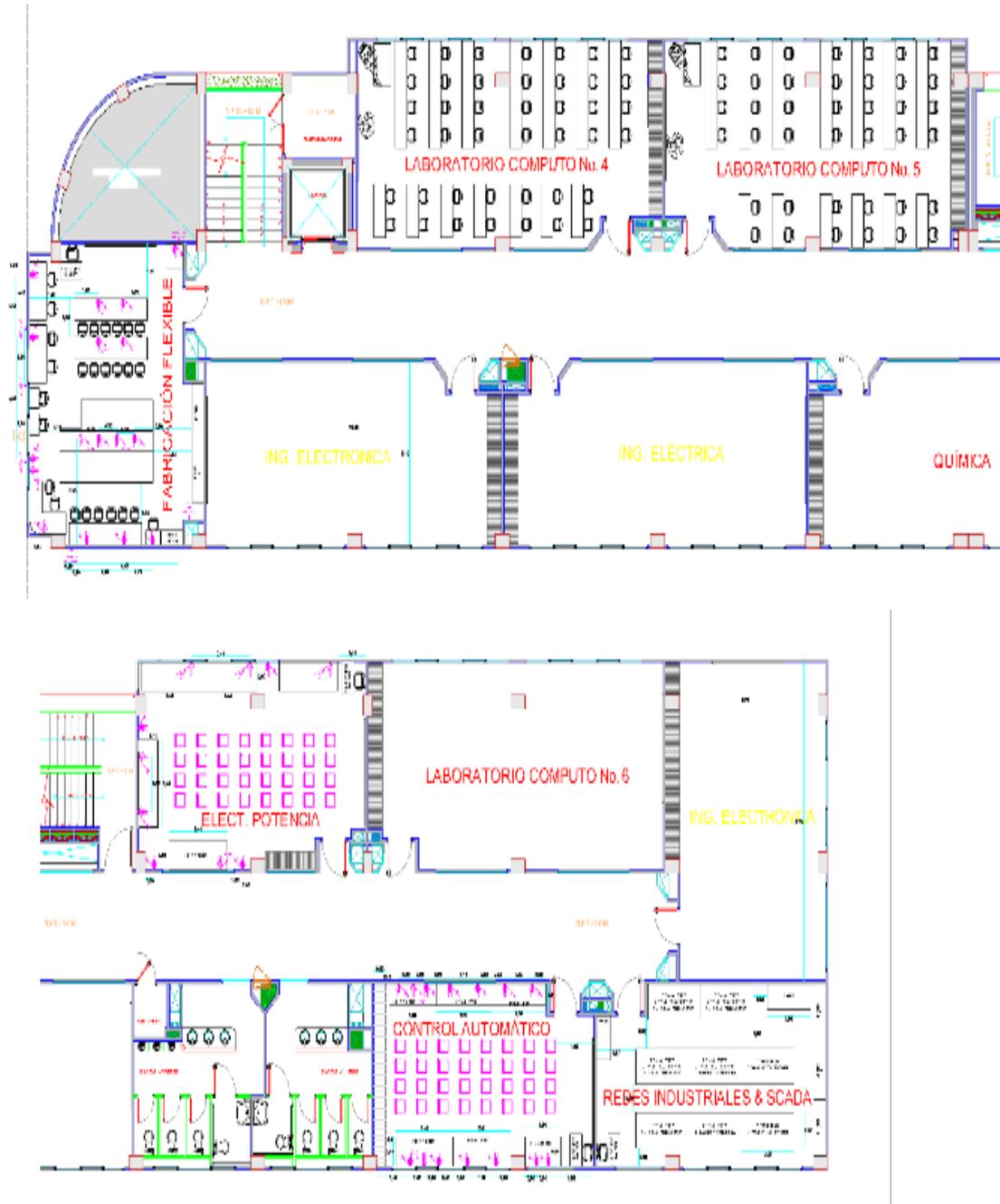


Figura 40. Plano Estructural Bloque E - Piso 3

Fuente. Universidad Politécnica Salesiana

5.1.4. Tablero de distribución piso 4 (TD-4P)

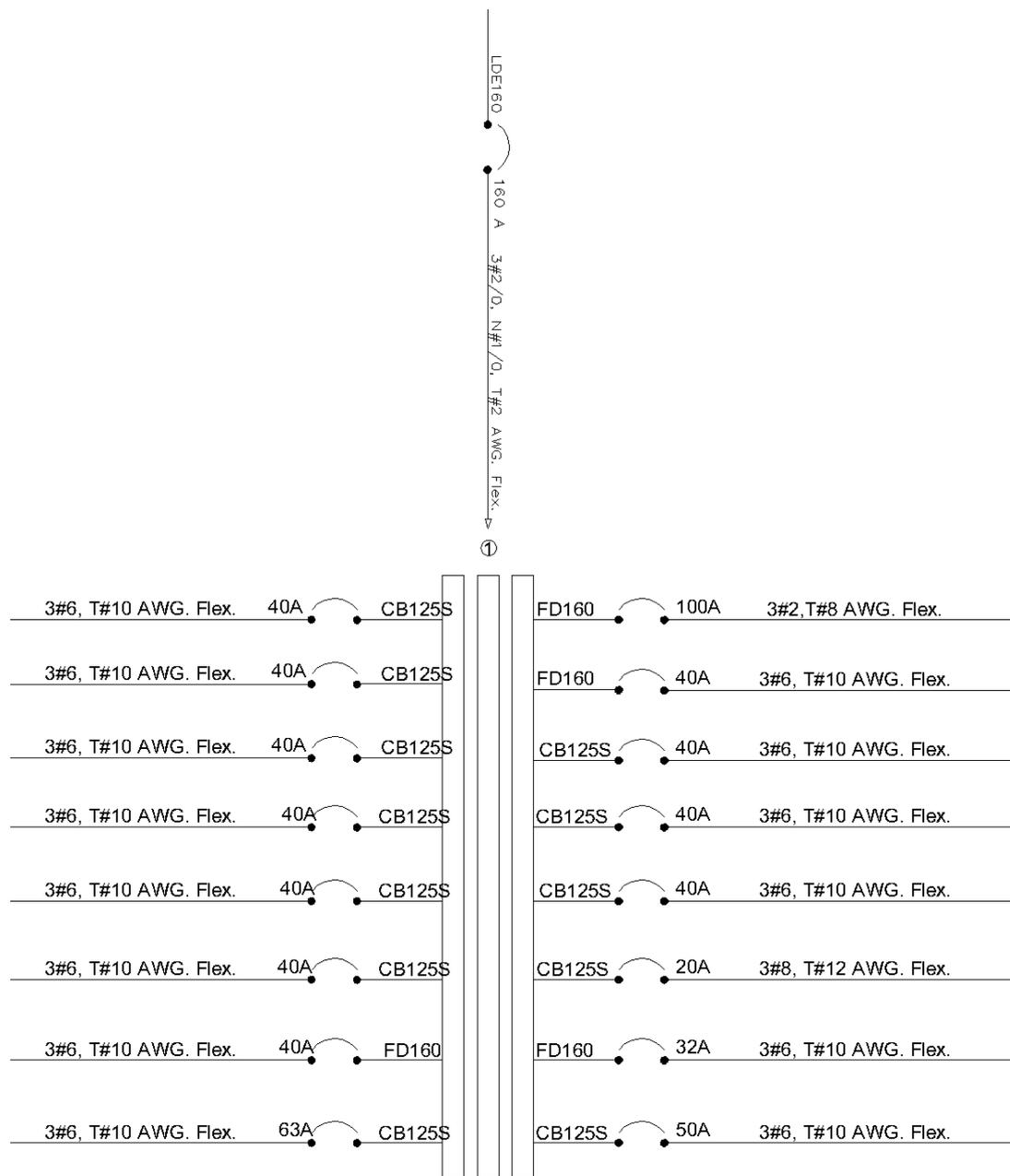


Figura 41. Tablero de distribución Bloque E - Piso 4

Fuente. Elaboración Suquinahua – Montero

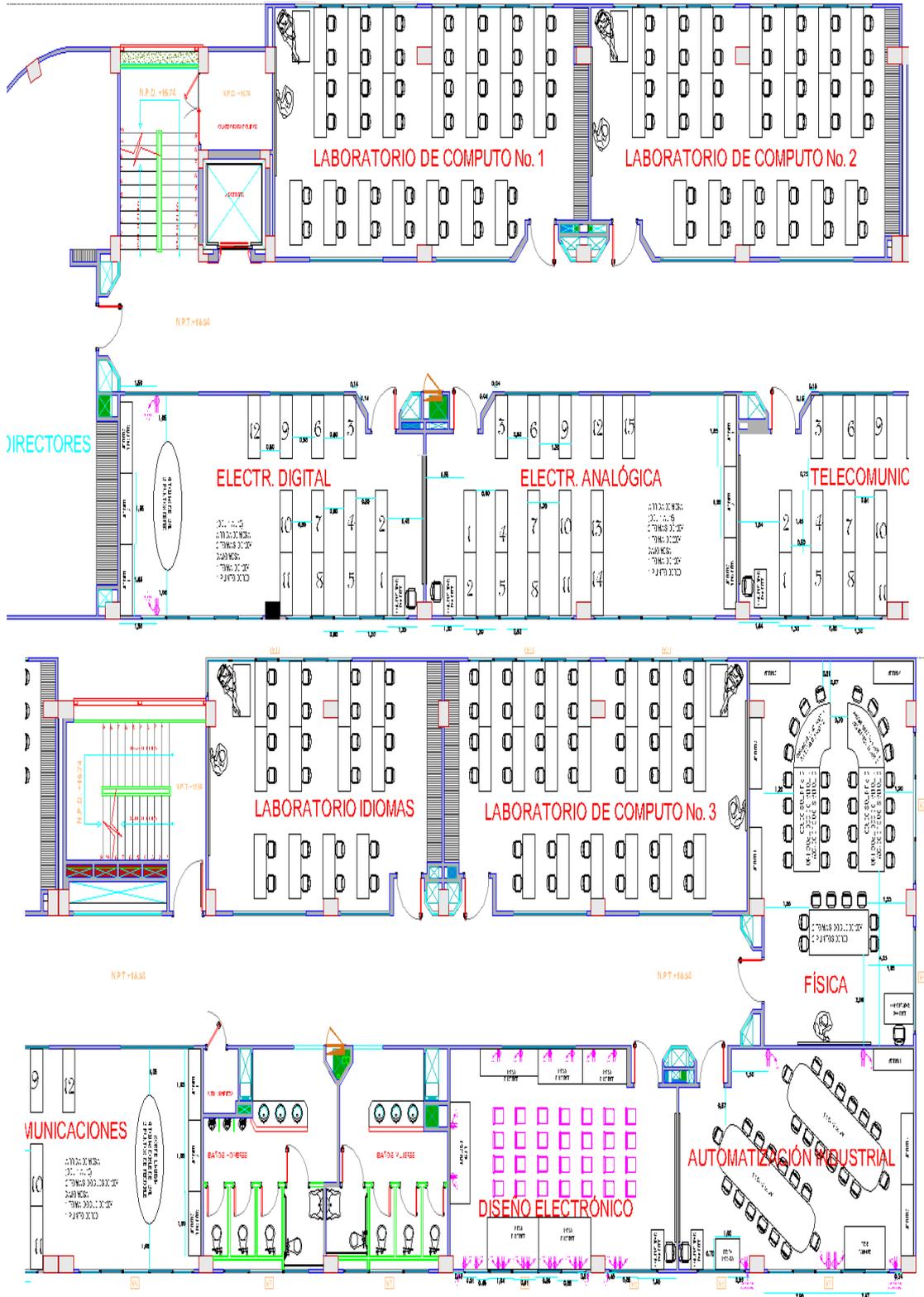


Figura 42. Plano Estructural Bloque E - Piso 4

Fuente. Universidad Politécnica Salesiana

5.2. DIAGRAMAS UNIFILARES DE LOS SUBTABLERO E UBICACIÓN

5.2.1. Subtablero - Bioinstrumentacion



Figura 43. Subtablero Bioinstrumentacion Bloque E – Piso 2

Fuente. Elaboración Suquinahua – Montero

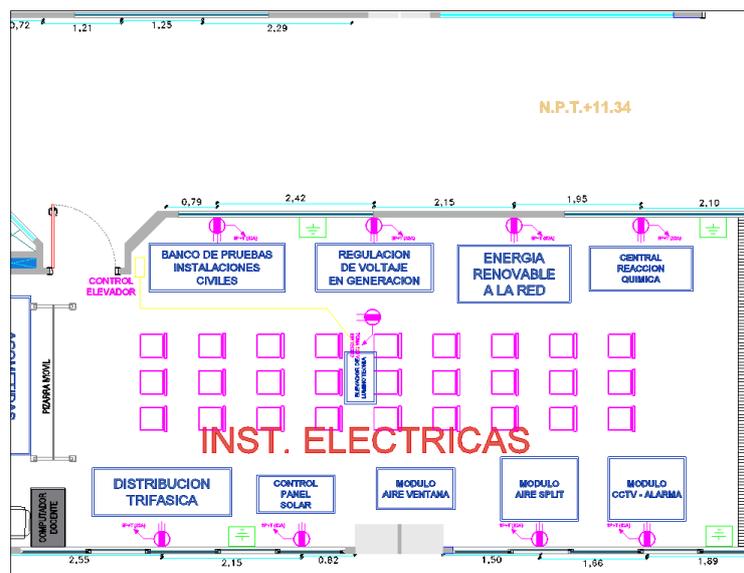


Figura 44. Plano Estructural - Ubicación de subtablero Bloque E - Piso 2

Fuente. Universidad Politécnica Salesiana

5.2.2. Subtablero - Resistencia de materiales

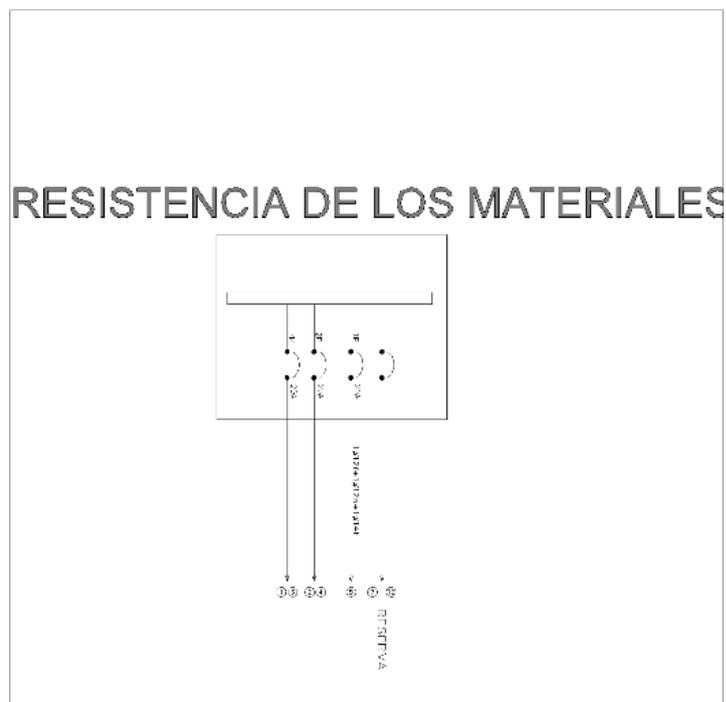


Figura 45. Subtablero Resistencia de los materiales

Fuente. Elaboración Suquinahua - Montero



Figura 46. Plano Estructural - Ubicación del subtablero resistencia de materiales

Fuente. Universidad Politécnica Salesiana

5.2.3. Subtablero - Circuitos Eléctricos

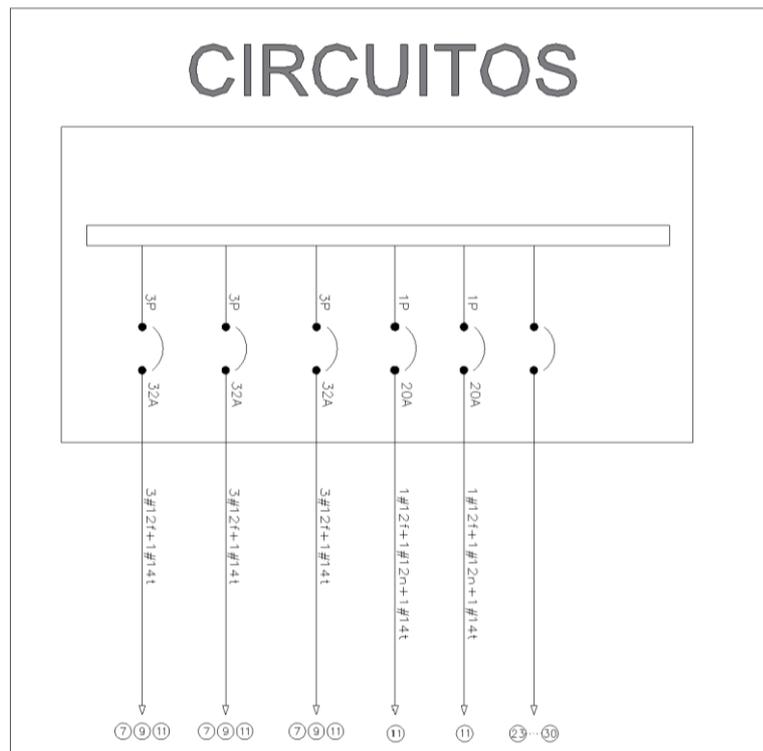


Figura 47. Subtablero Circuitos Eléctricos

Fuente. Elaboración Suquinhua – Montero

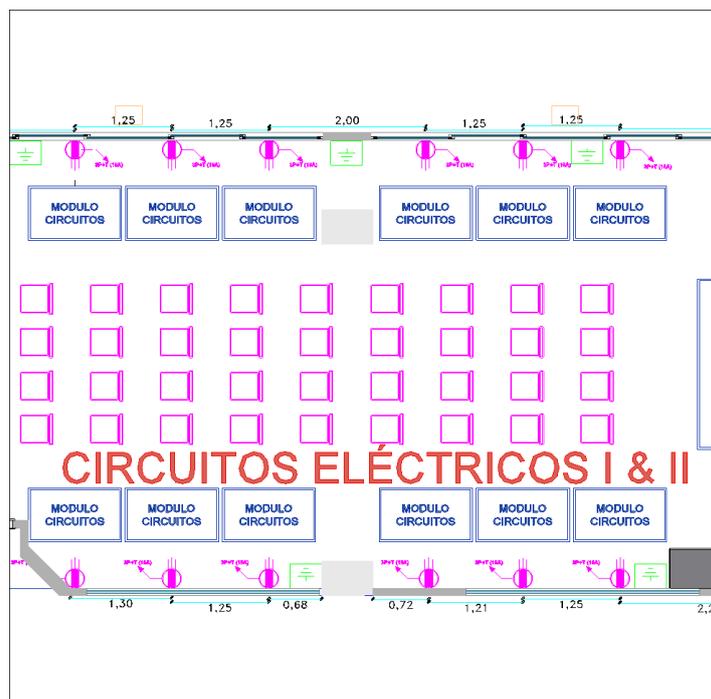


Figura 48. Plano Estructural - Ubicación del subtablero Circuitos

Fuente. Universidad Politécnica Salesiana

5.2.4. Subtablero - Transformadores



Figura 49. Subtablero de transformadores

Fuente. Elaboración Suquinahua – Montero

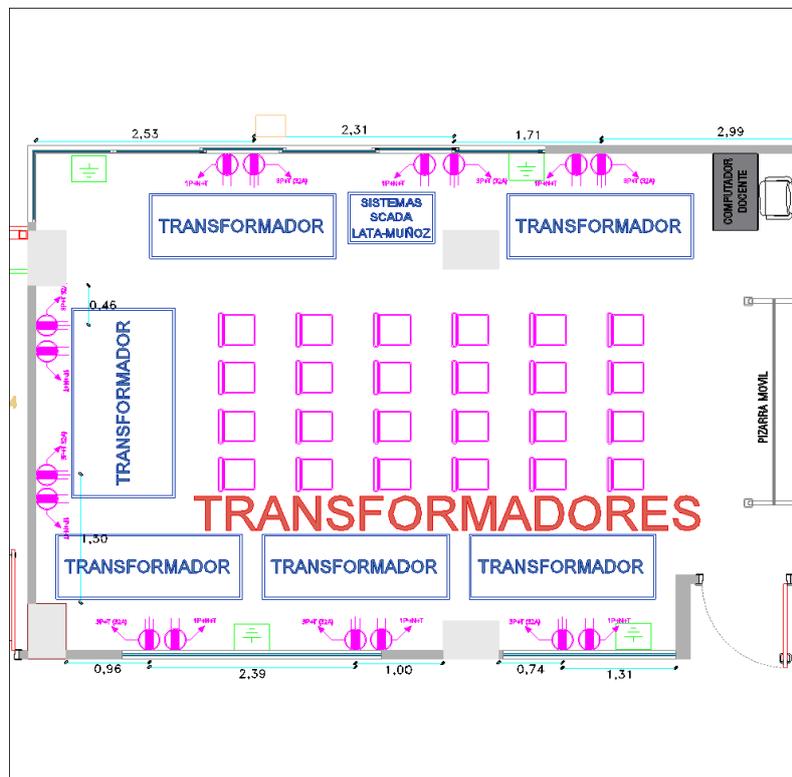


Figura 50. Plano Estructural - Ubicación de subtablero Transformadores

Fuente. Universidad Politécnica Salesiana

5.2.5. Subtablero - Termodinámica

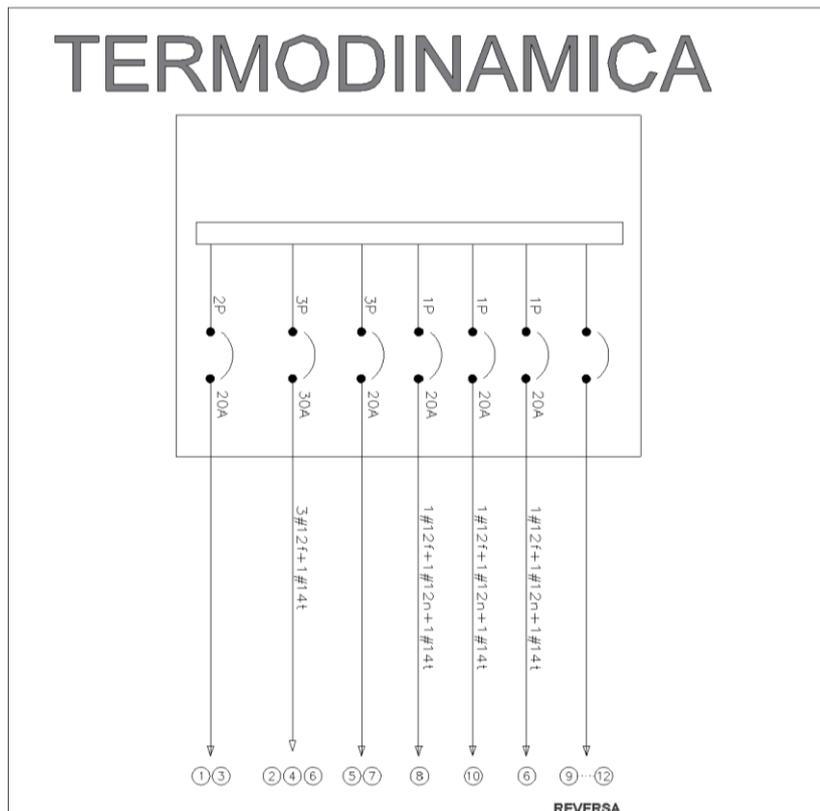


Figura 51. Subtablero termodinámica

Fuente. Elaboración Suquinahua – Montero

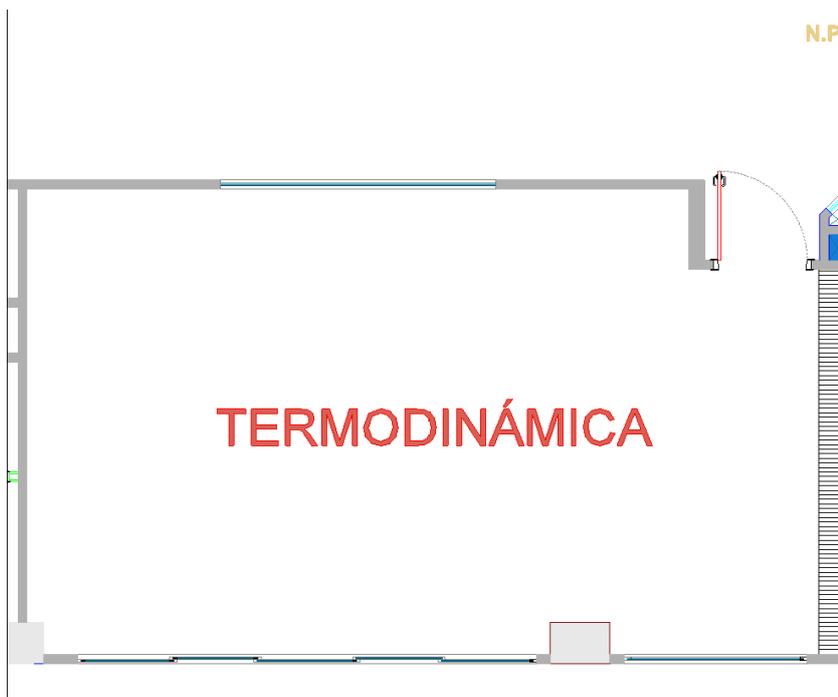


Figura 52. Plano estructural - Ubicación de subtablero termodinámica

Fuente. Universidad Politécnica Salesiana

5.2.6. Subtablero - Alta Tensión

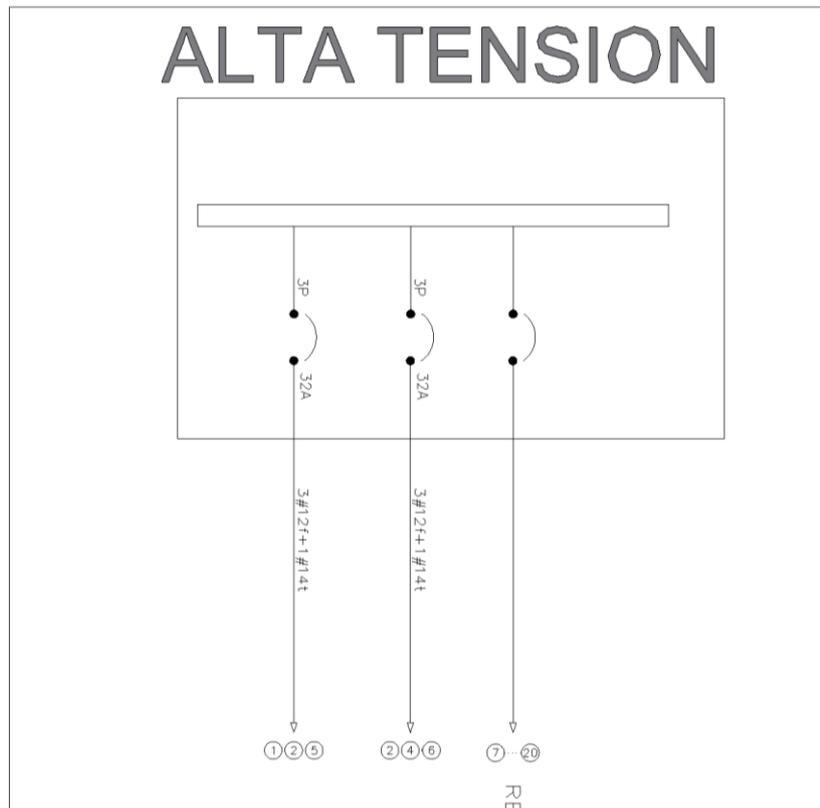


Figura 53. Subtablero de Alta tensión

Fuente. Elaboración Suquinahua - Montero



Figura 54. Plano estructural - Ubicación de subtablero Alta tensión

Fuente. Universidad Politécnica Salesiana

5.2.7. Subtablero - Protecciones Eléctricas



Figura 55. Subtablero Protecciones eléctricas

Fuente. Elaboración Suquinahua - Montero

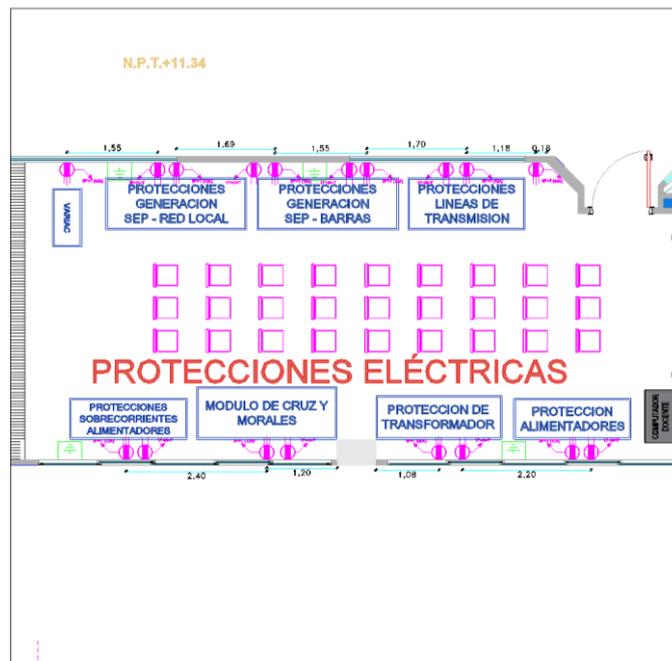


Figura 56. Plano estructural - Ubicación subtablero Protecciones eléctricas

Fuente. Universidad Politécnica Salesiana

5.2.8. Subtablero - Generación

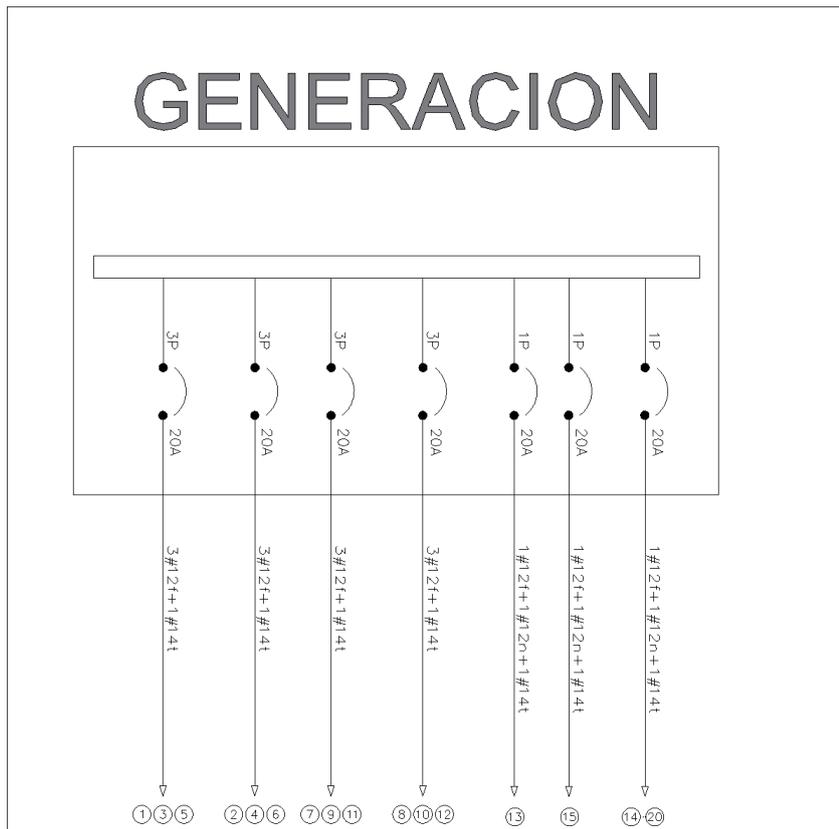


Figura 57. Subtablero generación

Fuente. Elaboración Suquinahua - Montero

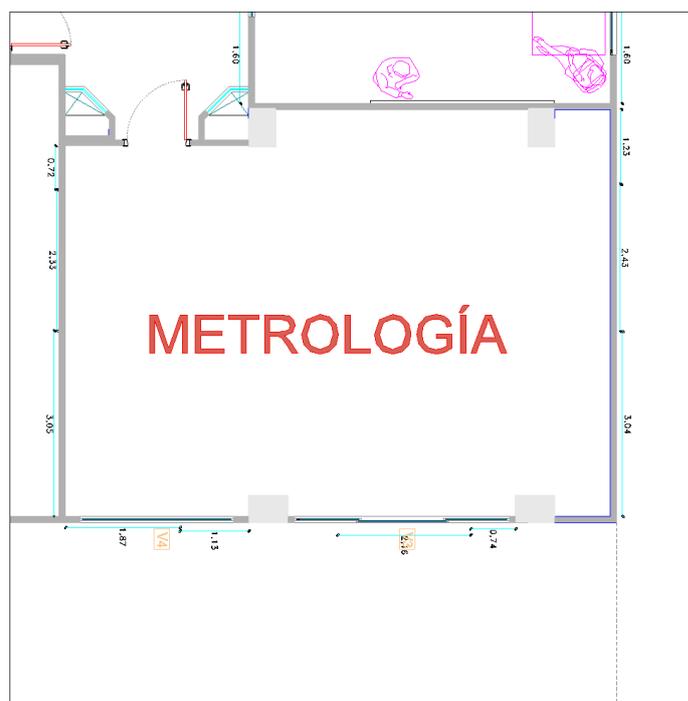


Figura 58. Plano estructural - Ubicación subtablero Generación

Fuente. Universidad Politécnica Salesiana

5.2.9. Subtablero - Motores y Generadores

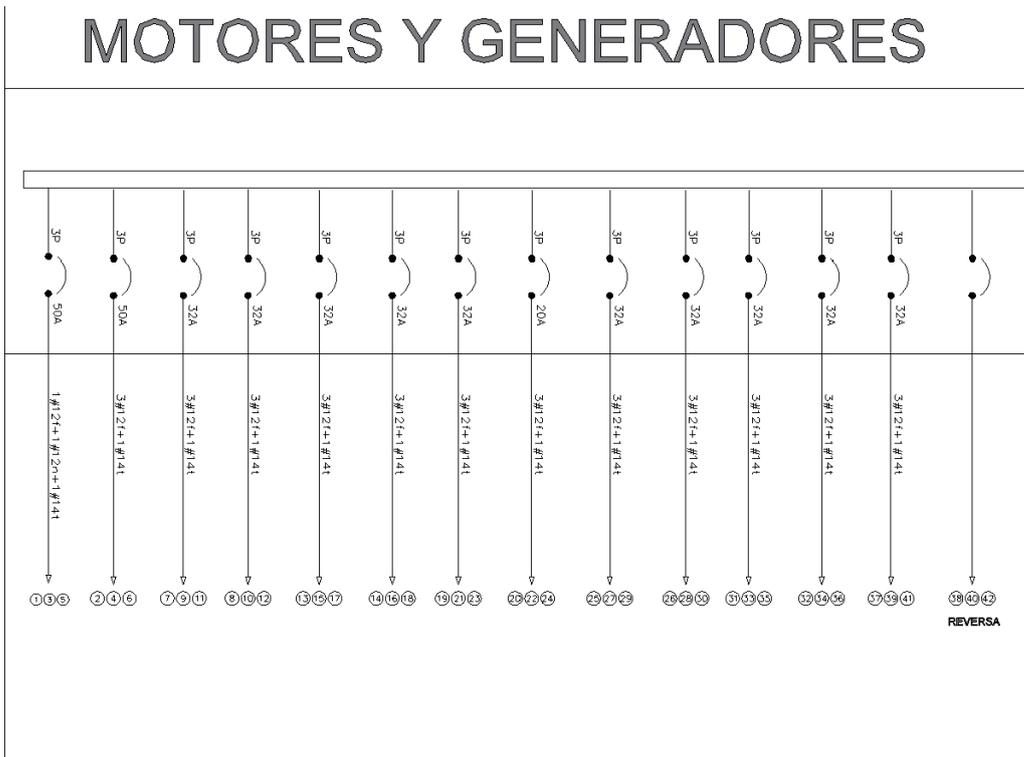


Figura 59. Subtablero Motores y generadores

Fuente: Elaboración Suquinahua - Montero



Figura 60. Plano estructural - Ubicación Motores y generadores

Fuente. Universidad Politécnica Salesiana

5.3. DIAGRAMA UNIFILAR DEL SISTEMA, UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA, EDIFICIO E – BLOQUE E

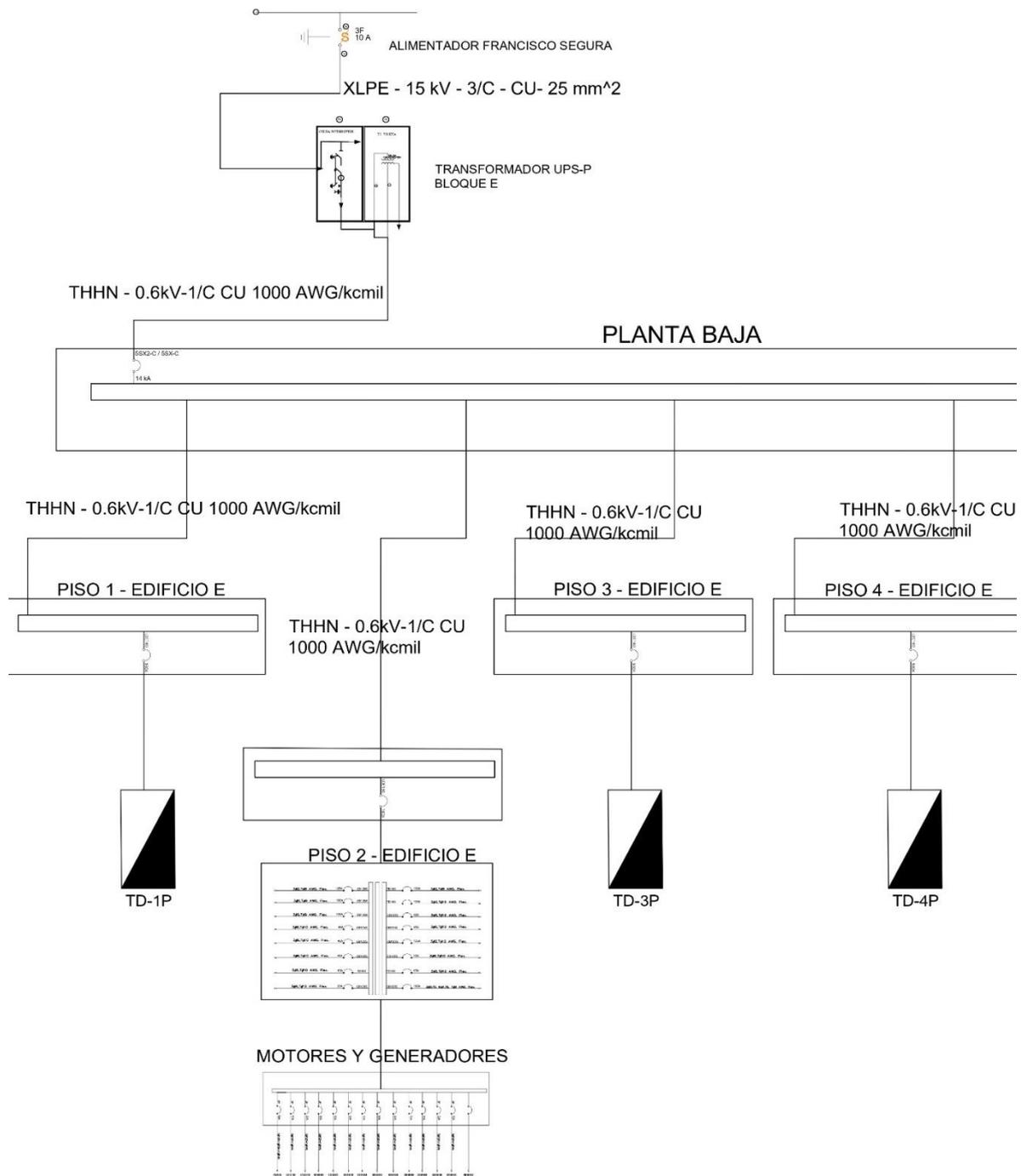


Figura 61. Diagrama Unifilar Universidad Politécnica Salesiana Bloque E

Fuente. Elaboración Suquinahua - Montero

CONCLUSIONES

El análisis en profundidad de los resultados confirma un diseño seguro y eficiente del tablero de transformadores. Las magnitudes de las corrientes de arco, $Iarc_{Voc}$ 5.0853 kA e $Iarc$ 2.863 kA, infieren la importancia de considerar estos valores para el diseño de sistemas de protección y medidas de seguridad. El ajuste de las dimensiones del recinto y el factor de corrección (CF) resalta la relevancia de los aspectos espaciales en la evaluación de la seguridad, impactando directamente en la mitigación de riesgos y la eficacia del diseño del entorno de trabajo.

La medición cuantitativa del riesgo de arco eléctrico, E_{MB} 0.061 cal/cm², proporciona información crucial para evaluar la seguridad del personal y guiar la implementación de medidas preventivas y correctivas, la estimación del límite de destello de arco intermedio AFB_{600} en 76.5335 mm-0.0765 m remarca la importancia crítica de mantener distancias seguras en caso de un destello, contribuyendo significativamente a la seguridad del personal y brindando directrices claras para la planificación de operaciones seguras.

La comparación entre la energía incidente E y el límite de arco eléctrico AFB respalda la conclusión de que el entorno de trabajo cumple con los estándares y normativas de seguridad, lo que indica un diseño e implementación exitosos para operaciones diarias seguras. El ajuste del factor de corrección de la variación de la corriente de arco $Iarc_{min}$ a 1.627 kA destaca la importancia de considerar la variabilidad de la corriente de arco en la evaluación de riesgos, contribuyendo a una planificación más precisa y segura de las operaciones. Se recomienda mantener una vigilancia continua y realizar evaluaciones periódicas para garantizar la sostenibilidad de estos estándares en el tiempo.

RECOMENDACIONES

Realizar un análisis detallado de las instalaciones eléctricas en la Universidad Politécnica Salesiana, con el objetivo de identificar áreas en las que no se cumple con la Norma IEE-1485, para garantizar la conformidad con los requisitos establecidos por esta normativa, desarrollar e implementar un plan de acción detallado con especial énfasis en las medidas de protección contra el arco eléctrico.

Actualizar y mejorar los sistemas de protección individual y colectiva de la Universidad Politécnica Salesiana para que cumplan con los criterios de la NFPA70E. Esto incluye la evaluación de equipos de protección personal, la instalación de señales de advertencia y la implementación de procedimientos operativos seguros

Implementar programas de capacitación continua y específica para el personal de la Universidad Politécnica Salesiana, los programas deben abordar detalladamente los requisitos de la Norma IEE-1485 y la NFPA70E para que el personal adquiera un conocimiento completo de las medidas de seguridad y los procedimientos adecuados en caso de un incidente con arco eléctrico.

Adquirir un sistema regular de auditorías para evaluar el cumplimiento de la Norma IEE-1485 y la NFPA70E en todas las instalaciones eléctricas de la Universidad Politécnica Salesiana. Estas auditorías deben llevarse a cabo con frecuencia y consisten en inspecciones exhaustivas, análisis de documentos y evaluaciones de los sistemas de protección existentes en la universidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS:

- [1] PIERRE ST and Conrad, "Practical Solution Guide to Arc Flash Hazards. Ted Balderree," vol. 2, pp. 1–2, 2015.
- [2] Cesar MUÑOZ, "Estudio de accidentes eléctricos y peligro del arco eléctrico. Introducción a la norma NFPA 70E," Asociación Chilena de seguridad.
- [3] ELKIN JAVIER RODRIGUEZ SUESCA, "ESTUDIO DE ARCO ELÉCTRICO EN LA SUBESTACIÓN DONATO (TUNJA) PARA LA EMPRESA DE ENERGÍA DE BOYACÁ EBSA S.A. E.S.P.," DUITAMA, BOYACÁ, 2018.
- [4] Ralph H LEE, "The Other Electrical Hazard: Electric Arc Blast Burns" IEEE Transactions on Industry Applications," May 1982.
- [5] Alexander Junior Huaynate Sanchez and Anderson Adalid Nova Diaz, "Estudio de arco eléctrico en los centros de control de motores de una planta concentradora de 140000 tn/día ubicado A 4200 m s.n.m. para la implementación de medidas de seguridad del personal y equipos," 2020.
- [6] Emmanuel Sangoi et al, "Estudio de Riesgo por Arco Eléctrico Según AEA 92606. Análisis de Sensibilidad de Resultados," 2022.
- [7] National Fire Protection Association (NFPA), "Standard for Electrical Safety in the Workplace," 2012.
- [8] Institute of Electrical and Electronics Engineers, "Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations," 2002.
- [9] Asociación Electrotécnica Argentina, "Cálculo de magnitudes de los efectos térmicos y su protección," 2016.
- [10] E. O. Hernández. , and E. M.-G. V. Hernández O., "ANÁLISIS DE ARCO ELÉCTRICO Y REDUCCIÓN DE ENERGÍA INCIDENTE EN UNA PLANTA DE REFINACIÓN," 2019.
- [11] NFPA 70E-2015, "Normas para la Seguridad Eléctrica en zonas de trabajo," NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION., vol. Edición 2015, 2015.
- [12] [25] U. de LASALLE, "Ciencia Unisalle ETAP," 2015.
- [13] O.Aguilar, "Diseño asistido por computadora, AUTOCAD."

- [14] VÍCTOR MANUEL PERALES GRACIA, “ESTUDIO DE SISTEMAS PROTECTIVOS EN REDES ELÉCTRICAS EN ALTA TENSIÓN. ESTUDIO Y MEJORA DE PROCEDIMIENTOS PARA EL ANÁLISIS DE INCIDENTES,” UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA, vol. 1, pp. 46–50, 2011.
- [15] A. J. Conejo Navarro et al, “Instalaciones Eléctricas. ,” 2007.
- [16] Ecuador, “Ley Organica del servicio público de energía Eléctrica, Registro Oficial No.418,” Ecuador, 2015.
- [17] F. A. R. P. Francisco Javier Ramírez Cano, “Metodología para el diagnóstico del nivel de riesgo por arco eléctrico en subestaciones de transmisión de energía,” *Sostenibilidad y la Industria Eléctrica – CISLIE 2011* , Apr. 2011.