



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



**ESTUDIO DE ARC FLASH PARA CATEGORIZAR ZONAS DE RIESGO EN LA
PLANTA MASISA MAPAL**

POR

Ignacio Andrés Vásquez Valdés

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción
para optar al título profesional de Ingeniero Civil Eléctrico

Profesor Guía

Leonardo M. Palma F.

Profesional Supervisor

Igor Badtke S.

Agosto 2023

Concepción (Chile)

© 2023 Ignacio Andrés Vásquez Valdés

© 2023 Ignacio Andrés Vázquez Valdés

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

Agradecimientos

A mis padres Jeannette y Jose, hermanos Jose y Diego, así como nuestras mascotas, que me han apoyado incondicionalmente en todo lo que han podido desde que tengo memoria.

A mi pareja Danitza por motivarme a mejorar continuamente en todo lo que me propongo.

A todo el personal de la planta Mapal que ha aportado en todo lo que se ha necesitado tanto en el estudio como en mi desarrollo profesional, en especial a Igor, Luis y Juan.

Sumario

El presente estudio se centra en categorizar las zonas de riesgo ante arco eléctrico en la planta Masisa Mapal, para ello se recopiló información a partir de las normas que regulan estos incidentes, encontrándose la NFPA 70E y la IEEE 1584. La primera de estas normas, al tener un enfoque más conservador de seguridad hacia las personas fue la de mayor contenido referencial. En este contexto la norma recomienda que el uso de elementos de protección personal sea la última medida de protección, y en primer lugar se debe asegurar que los espacios sean delimitados de manera coherente al nivel de riesgo, así como el correcto uso de coordinación y selectividad en las protecciones eléctricas, todo esto entendiendo que la seguridad de las personas depende principalmente del conocimiento que estas tengan sobre las condiciones de trabajo, pues no existe ninguna protección capaz de salvar la vida de un trabajador que realice una mantención en un equipo energizado de alto nivel de potencia en contacto directo con la persona.

El trabajo fue realizado a partir de la necesidad de tener el conocimiento si en la actualidad se cuenta con todos los criterios de seguridad en la planta. Se recopila la información de transformadores, cargas conectadas, configuración y modelo de las protecciones presentes, así como niveles de cortocircuito desde la barra de alimentación en 154 kV hasta las cargas conectadas en 0,4 y 6 kV. Con esta información se estiman los niveles de energía incidente en diferentes barras del sistema, lo cual se realiza con cálculos teóricos y a partir de simulaciones en ETAP. Para este supuesto se considera que el arco eléctrico ocurre en su peor condición, es decir, que esta sucede mientras la puerta de la celda se encuentra abierta y una persona está ubicada a 46 centímetros del fenómeno.

El punto crítico de energía en ambas normas presentadas es de 1,2 [cal/cm²], con esta exposición de energía durante un segundo ocurriría una quemadura mayor a segundo grado.

Se obtuvo que el nivel de energía incidente presente en la planta es de 2,72 [cal/cm²] para las celdas de alimentación en MT, mientras que para las áreas de desfibrado y de planta de energía es 1,979 y 3,9 [cal/cm²] respectivamente, en consecuencia, se recomienda la utilización de un equipo de protección de categoría 2, debido a que se encuentra justo en la frontera. Además se revisa un caso hipotético en el que protecciones críticas fueron deshabilitadas, lo cual entrega una energía incidente de 70 [cal/cm²] en el área de desfibrado, lo cual da la oportunidad de considerar EPP de categoría 4, ofreciendo protección ante posibles eventualidades que se pueden dar en la industria para favorecer la productividad de la planta

Summary

The present study focuses on categorizing the risk zones for electric arc incidents at the Masisa Mapal plant. To achieve this, information was collected from the standards that regulate these incidents, namely NFPA 70E and IEEE 1584. The former, with a more conservative safety approach towards personnel, provided the most comprehensive reference content. In this context, the standard recommends that the use of personal protective equipment should be the last resort for protection. The primary emphasis should be on ensuring that spaces are appropriately delimited according to the level of risk, along with the correct use of coordination and selectivity in electrical protections. All of this is based on the understanding that the safety of individuals primarily depends on their knowledge of the working conditions, as there is no protection capable of saving the life of a worker who performs maintenance on a highly powered energized equipment in direct contact with the person.

The work was carried out due to the necessity of assessing whether the current safety criteria are met in the plant. Information on transformers, connected loads, configuration, and model of existing protections was collected, in addition to short-circuit levels from the 154 kV power supply to the connected loads at 0.4 and 6 kV. Using this information, incident energy levels at different system points were estimated through theoretical calculations and simulations in ETAP. For this scenario, it was assumed that the electric arc occurs under its worst condition, i.e., with the cell door open and a person located 46 centimeters from the phenomenon.

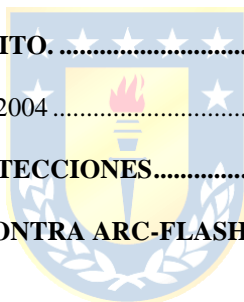
The critical energy point in both presented standards is 1.2 [cal/cm²], and exposure to this energy level for one second would cause a burn greater than second degree.

The study found that the incident energy level at the plant is 2.72 [cal/cm²] for the medium voltage (MT) supply cells, while for the debarking and power plant areas, it is 1.979 and 3.9 [cal/cm²] respectively. Therefore, the use of category 2 personal protective equipment is recommended as it is right on the boundary. Additionally, a hypothetical case was examined where critical protections were disabled, resulting in an incident energy of 70 [cal/cm²] in the debarking area. This indicates the need to consider category 4 personal protective equipment to provide protection against potential eventualities that may occur in the industry and to enhance plant productivity.

Tabla de contenido

CAPÍTULO 1. NORMATIVAS ASOCIADAS.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
1.2 PLIEGOS TÉCNICOS RIC	1
1.3 NORMA NFPA	3
1.4 NORMA ASTM	8
1.5 IEEE.....	9
CAPÍTULO 2. ARC-FLASH O ARCO ELÉCTRICO.....	10
2.1 INTRODUCCIÓN	10
2.2 ARCO ELÉCTRICO Y PELIGROS ASOCIADOS	10
2.3 CORRIENTE DE CORTO CIRCUITO.....	15
2.4 POTENCIA DE CORTO CIRCUITO, MÉTODO RALPH-LEE	16
2.5 DISTANCIA DE FRONTERA DEL ARCO ELÉCTRICO, MÉTODO RALPH-LEE.....	16
2.6 CALCULO ENERGÍA INCIDENTE PARA SISTEMAS DE TENSIÓN SUPERIORES A 600 V, POR DOUGHTY NEAL	17
2.7 MÉTODO DOUGHTY NEAL PARA ENERGÍA INCIDENTE EN SISTEMAS DE TENSIONES INFERIORES 600 V.....	17
2.8 MÉTODO DE CÁLCULO IEEE 1584-2002	18
CAPÍTULO 3. PROCESO PRODUCTIVO PLANTA MAPAL	20
3.1 INTRODUCCIÓN	20
3.2 PROCESO MDF	20
3.3 PROCESO LAMINADO	22
3.4 PROCESO AGLOMERADO.....	23
CAPÍTULO 4. MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DE ARCO ELÉCTRICO	25
4.1 INTRODUCCIÓN	25
4.2 SOFTWARE.....	25
4.3 UNILINEAL.....	26
4.3.1 Sección 154 a 15 kV.....	27
4.3.2 Switchgear 15 kV, sala celda.....	30
4.4 RESULTADOS TEÓRICOS	33
4.5 SIMULACIÓN	35
CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	37
5.1 INTRODUCCIÓN	37
5.2 NIVELES DE CORTOCIRCUITO SIMULADOS	37
5.3 NIVELES DE ENERGÍA INCIDENTE SIMULADOS	38
5.4 CASO DE PROTECCIONES DESHABILITADAS	39

5.5	RECOMENDACIONES POR ENERGÍA INCIDENTE	40
5.6	COORDINACIÓN Y TIEMPO DE OPERACIÓN DE PROTECCIONES	41
CAPÍTULO 6. CATEGORIZACIÓN DE ZONAS DE RIESGO		44
6.1	INTRODUCCIÓN	44
6.2	ELEMENTOS DE PROTECCIÓN PERSONAL ACTUALES	44
6.3	SWG 15 kV, SALA PALLMAN 15 kV Y ALIM MT	45
6.4	ÁREA PLANTA DE ENERGÍA.	46
6.5	ÁREA DESFIBRADO.....	47
6.6	RECOMENDACIONES DE EPP.....	47
CAPÍTULO 7 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES		50
REFERENCIAS.....		53
ANEXO A. UNILINEAL.....		56
A.1.	UNILINEAL PLANTA MAPAL MASISA, 2004	56
A.2.	UNILINEAL SIMPLIFICADO, 2011.....	58
ANEXO B. VALORES CORTO CIRCUITO.....		59
B.1.	UNILINEAL PLANTA MAPAL MASISA, 2004	59
ANEXO C. COORDINACIÓN DE PROTECCIONES.....		61
ANEXO D. REQUERIMIENTO EPP CONTRA ARC-FLASH		63



Lista de Tablas

TABLA 1.3.1 CATEGORÍA DEL EPP SEGÚN LA GRAVEDAD DE ARCO ELÉCTRICO [3].	7
TABLA 2.7.1. VALORES TÍPICOS DE ESPACIO ENTRE CONDUCTORES Y SU FACTOR DE DISTANCIA.	19
TABLA 2.7.2. DISTANCIAS DE TRABAJO RECOMENDADAS.	19
TABLA 4.3.1.1. CONFIGURACIÓN DE LAS PROTECCIONES UTILIZADAS EN LA PLANTA.	28
TABLA 4.3.2.1. CONFIGURACIÓN DE LAS PROTECCIONES UTILIZADAS EN EL ÁREA DESFIBRADO.	31
TABLA 4.3.2.2. CONFIGURACIÓN DE LAS PROTECCIONES UTILIZADAS EN EL ÁREA PLANTA DE ENERGÍA.	31
TABLA 4.4.1. VALORES DE CORRIENTE CORTO CIRCUITO TRANSFORMADORES A ESTUDIAR.	34
TABLA 4.4.2. ENERGÍA INCIDENTE EN BARRAS A ESTUDIAR.	34
TABLA 4.5.1. ENERGÍA INCIDENTE EN BARRAS A ESTUDIAR.	35
TABLA 4.5.2. ENERGÍA INCIDENTE EN BARRAS A ESTUDIAR ENTREGADOS POR SIMULACIÓN.	35
TABLA 4.5.3. ENERGÍA INCIDENTE EN BARRAS A ESTUDIAR ENTREGADOS POR SIMULACIÓN CASO PROTECCIONES DESHABILITADAS.	36
TABLA 4.3.2.2. CONFIGURACIÓN DE LAS PROTECCIONES UTILIZADAS EN EL ÁREA PLANTA DE ENERGÍA.	45
TABLA C.1. RESUMEN COORDINACIÓN DE PROTECCIONES 154 KV.	61
TABLA C.2. RESUMEN COORDINACIÓN DE PROTECCIONES DESFIBRADO.	61
TABLA C.3. RESUMEN COORDINACIÓN DE PROTECCIONES PLANTA ENERGÍA.	62
TABLA D.1. REQUERIMIENTO DE EPP CONTRA ARC-FLASH.	63

Lista de Figuras

FIGURA 1.2.1 IMAGEN CONCEPTUAL SOBRE LOS PLIEGOS TÉCNICOS RIC [2].	2
FIGURA 1.3.1 FRONTERA DE ARCO ELÉCTRICO DE ACUERDO CON NFPA 70E [4].	5
FIGURA 1.3.2 EPP SEGÚN LAS DISTINTAS CATEGORÍAS DE ARCO ELÉCTRICO [7].	6
FIGURA 2.2.1 QUEMADURAS DE PRIMER, SEGUNDO Y TERCER GRADO [8].	12
FIGURA 2.2.2 CURVA DE STOLL [9].	12
FIGURA 2.2.3 DIFERENCIA ENTRE ARC FLASH Y ARC BLAST [11].	13
FIGURA 2.2.4 NIVELES DE RUIDO EN DBA Y EJEMPLOS ASOCIADOS [13].	14
FIGURA 2.2.1.1 TIPOS DE CORTOCIRCUITO [14].	15
FIGURA 3.1.1. ESQUEMA DE PRODUCCIÓN LÍNEA MDF [17].	21
FIGURA 3.2.1. ESQUEMA DE PRODUCCIÓN LAMINADO.	23
FIGURA 4.3.1.1. SECCIÓN 154 KV	27
FIGURA 4.3.1.2 COORDINACIÓN DE COORDINACIÓN PROTECCIONES SECCIÓN 154 A 15 KV	29
FIGURA 4.3.2.1. SWITCHGEAR 15 KV AGUAS ABAJO.	30
FIGURA 4.3.2.2 COORDINACIÓN DE PROTECCIONES SECCIÓN PLANTA ENERGÍA.	32
FIGURA 4.3.2.3 COORDINACIÓN DE PROTECCIONES SECCIÓN PLANTA DESFIBRADO.	33
FIGURA 6.3.1 ETIQUETA DE PELIGROS BARRAS 15 KV	46
FIGURA 6.4.1 ETIQUETA DE PELIGROS BARRA PTA ENERGÍA Y BARRA VENTILADOR CALDERA 0,4KV.	47
FIGURA 6.5.1 PLACEHOLDER ETIQUETA DE PELIGROS BARRA SWG 6 KV.	47
FIGURA 6.5.1 CAMISA RESISTENTE AL ARCO CATEGORÍA 9,7 CAL /CM2.	48
FIGURA 6.5.2 PANTALONES RESISTENTE AL ARCO CATEGORÍA 9,5 CAL /CM2.	48
FIGURA 6.5.2 KIT RESISTENTE AL ARCO CATEGORÍA 10 CAL /CM2.	48
FIGURA 6.5.2 GUANTES RESISTENTE AL ARCO CATEGORÍA 11 CAL /CM2.	48
FIGURA A.1.1 UNILINEAL 2004, PLANTA MAPAL. CIRCUITO DESDE LA RED AL SWITCHGEAR DE 13.8 KV.	56
FIGURA A.1.2 UNILINEAL 2004, PLANTA MAPAL. CIRCUITO DESDE EL SWITCHGEAR DE 13.8 KV AL RESTO DE LA PLANTA.	57
FIGURA A.2.1 CIRCUITO UNILINEAL SIMPLIFICADO, ÁREA DESFIBRADO Y LAMINADO 2,	58

FIGURA B.1.1 CIRCUITO UNILINEAL SIMPLIFICADO, ÁREA DESFIBRADO Y LAMINADO 2.59

FIGURA B.1.2 CIRCUITO UNILINEAL SIMPLIFICADO, ÁREA DESFIBRADO Y LAMINADO 2.60



Nomenclatura y abreviaciones

V: Voltaje o diferencia de potencial.

A: Amperes o Amperios.

Cal: Calorias.

J: Joules.

m: Metros.

s: Segundos.

NFPA: National Fire Protection Association.

IEEE: Institute of Electrical and Electronic Engineers.

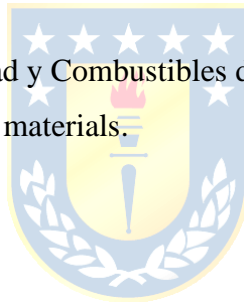
MDF: Medium density Fiberboard.

RIC: Reglamento de seguridad de las Instalaciones de Consumo de energía eléctrica.

AR: Arc rated o resistente al arco.

SEC: Superintendencia de Electricidad y Combustibles de Chile.

ASTM: American Society of Testing materials.



Capítulo 1. Normativas Asociadas

1.1 Introducción General

La seguridad es un tema muy importante en todo ámbito, en términos medioambientales, un litro de aceite es capaz de contaminar hasta 40.000 litros de agua, en un marco industrial una falla eléctrica no controlada de un equipo en una empresa podría comprometer no solo económicamente a esta misma con todo el daño causado, si no que también legal, moral y éticamente si este daño fuese propagado a una sola persona en sus instalaciones.

La seguridad en una planta industrial resulta entonces fundamental para proteger a su personal, prevenir daños a la propiedad, mantener la continuidad del negocio y cumplir con regulaciones normativas, por ello se debe trabajar activamente para identificar posibles riesgos que pudiesen aparecer en todas las actividades que se realizan.

El presente estudio busca categorizar las zonas de riesgo dentro de la planta Mapal ante un posible arco eléctrico, para esto se hace necesario asegurar que se cumplan todos los criterios de seguridad necesarios para minimizar el riesgo de que alguien sea lastimado, pero ¿Cuáles son estos criterios? En la actualidad existe una cantidad de normas importantes que establecen los criterios mínimos que deben cumplirse en cada actividad eléctrica. La norma nacional se detalla en los pliegos Técnicos RIC, estos a su vez citan a las normas IEC, IEEE, NFPA, con el fin de que se tenga la mayor cantidad de información posible para establecer un correcto procedimiento a la hora de proteger a las personas, a los equipos y al medioambiente. Este capítulo tiene como objetivo estudiar los criterios de seguridad eléctricos establecidos por las distintas normas, y como se pueden aplicar a la planta Mapal. Se busca así garantizar un entorno seguro y prevenir posibles accidentes o daños que puedan surgir debido a situaciones de arco eléctrico.

1.2 Pliegos técnicos RIC

Los pliegos técnicos RIC [1], son la norma chilena que establece las exigencias mínimas tanto en diseño, construcción, puesta en servicio, operación, reparación eléctrica, mantenimiento de toda instalación con consumo de energía eléctrica, estos actualmente se encuentran enumerados del 1 al 19, los cuales son:

RIC N°1: Empalmes.

RIC N°2: Tableros Eléctricos.

RIC N°3: Alimentadores y Demanda de una Instalación

RIC N°4: Conductores y Canalizaciones.

RIC N°5: Medidas de Protección contra Tensiones Peligrosas.

RIC N°6: Puesta a Tierra.

RIC N°7: Instalaciones de Equipos.

RIC N°8: Sistemas de Emergencia.

RIC N°9: Sistemas de Autogeneración.

RIC N°10: Instalaciones de uso General.

RIC N°11: Instalaciones Especiales.

RIC N°12: Instalaciones de Ambientes Explosivos.

RIC N°13: Subestaciones y Salas eléctricas.

RIC N°14: Exigencias de Eficiencia Energética para Edificios.

RIC N°15: Infraestructura para Recarga de Vehículos Eléctricos.

RIC N°16: Subsistemas de Distribución.

RIC N°17: Operación y Mantenimiento.

RIC N°18: Presentación de Proyectos.

RIC N°19: Puesta en Servicio.

La figura 1.2.1 corresponde a una imagen conceptual de lo anteriormente mencionado, y a que proceso se enfoca el pliego técnico RIC en particular.

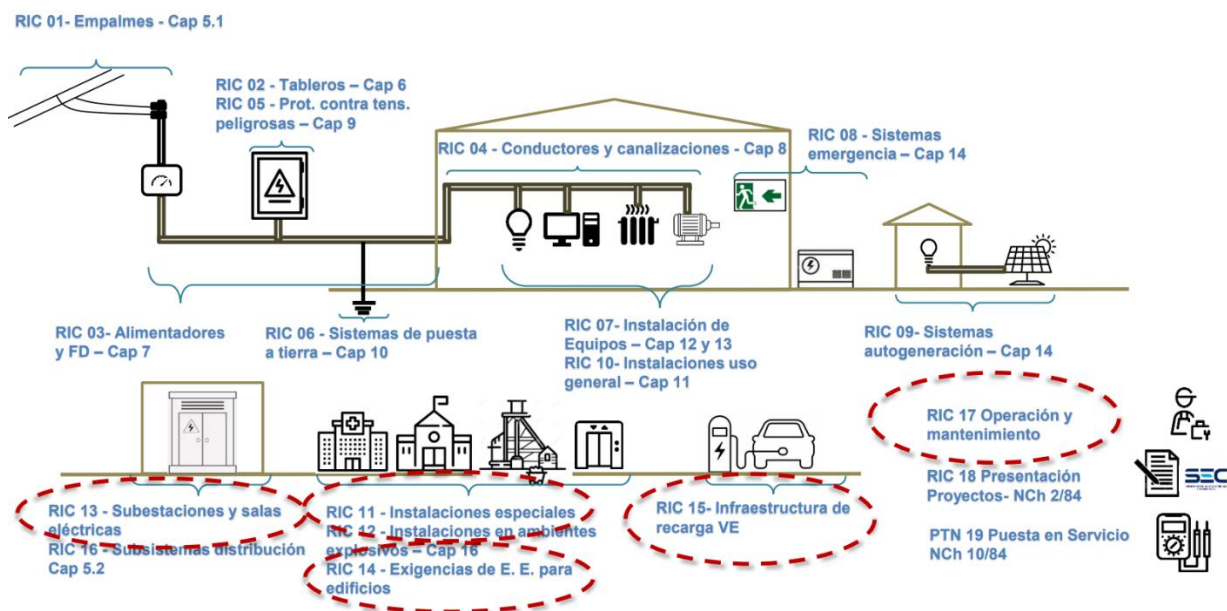


Figura 1.2.1 Imagen conceptual sobre los pliegos técnicos RIC [2].

El enfoque de este estudio se encuentra en lo establecido por el RIC N°17 y parte del 5, correspondientes a operación y mantenimiento y medidas de protección contra tensiones peligrosas. El primero es un documento con 5 páginas y 6 capítulos, se define toda la terminología utilizada, sus objetivos, alcances, requisitos que deben cumplir las instalaciones y el programa de protección eléctrica para un procedimiento de trabajo seguro. En el presente estudio se busca cumplir con los requisitos de la instalación correspondiente al capítulo 5, de aquí se tiene que

5.2. Las instalaciones de consumo de energía eléctrica de carácter general tendrán que cumplir con los requisitos básicos de mantención de acuerdo con lo definido en este pliego. Por su parte, los instaladores eléctricos autorizados por la Superintendencia deberán cumplir con las exigencias de seguridad en la operación y mantención, conforme a lo indicado en el presente pliego. Adicionalmente las instalaciones, que se ubiquen en atmósferas explosivas, en instalaciones para la minería y todas las instalaciones de consumo de media y alta tensión de una potencia instalada igual o mayor a 5 MW deberán cumplir con las exigencias de seguridad en la operación y mantención definidas por la NFPA 70E.



1.3 Norma NFPA

La National Fire Protection Association o NFPA [3] es una organización global sin fines de lucro dedicada a eliminar el riesgo de muerte, lesiones, pérdidas económicas y de propiedad debido al fuego y peligros de origen eléctrico. Para ello establece normas para todo tipo de procesos, en el ámbito eléctrico, sus normas referencian a los procedimientos ASTM, así como los estándares IEC, ANSI e IEEE. En particular la norma NFPA 70E titulada Seguridad Eléctrica en Lugares de trabajo. El pliego técnico RIC N°17 hace referencia a las exigencias de seguridad en la operación y mantención, que serían los capítulos 1 y 2 con sus correspondientes Anexos.

El capítulo 1 de la norma establece los Requisitos generales para prácticas de trabajo relacionadas con la seguridad eléctrica, para ello define un programa de seguridad eléctrica el cual debe contemplar al menos los siguientes tópicos:

1. Inspección.
2. Mantención.
3. Capacitación.
4. Principios de seguridad eléctrica.

5. Controles de seguridad eléctrica.
6. Procedimiento de la evaluación de riesgo.

Desde el punto de vista de la seguridad, la norma técnica se preocupa de minimizar los riesgos asociados a través de la jerarquización de sus métodos de control. Estos son:

- (1) Eliminación.
- (2) Sustitución.
- (3) Controles de ingeniería.
- (4) Advertencia.
- (5) Controles administrativos.
- (6) EPP.

El documento también entrega información sobre auditorías, entrenamientos de seguridad eléctrica, primeros auxilios, principios de bloqueos/etiquetado en los equipos, formas de bloqueo y todas las metodologías de prevención de condiciones potencialmente peligrosas, las cuales se encuentran en línea con la jerarquización de los métodos de control.

El artículo 130 de la norma NFPA 70E, encontrada en el capítulo 1 se centra en trabajos que involucran peligros eléctricos, en primer lugar, sugiere trabajar en entornos desenergizados y si esto no fuera posible, ya sea porque aumenta los posibles riesgos, o es inviable, se debe establecer una condición de trabajo eléctricamente segura. Aquí es donde se considera fuertemente que haya una condición de operación normal, la presencia de permisos de trabajo, presencia de prácticas de seguridad cuando se está expuesto a peligros eléctricos, así como la evaluación de riesgo de arco eléctrico, para definir las fronteras de protección necesarias y uso de EPP adicionales. El presente estudio tiene como enfoque el uso de elementos de protección personal adecuados para los riesgos latentes en la planta, para esto se debe estudiar los niveles de peligro que representan los equipos disponibles en la planta, a través de los criterios y formulas establecidos por la norma. De haber oportunidades de mejora para la protección de las personas en el proceso de categorización de zonas de riesgo, es debidamente mencionado en su sección correspondiente.

En línea con los objetivos del presente estudio, la norma NFPA 70E establece que debe realizarse una evaluación de riesgo de arco eléctrico para:

- (1) Identificar los peligros de arco eléctrico.
- (2) Calcular la probabilidad de que ocurra una lesión o daño a la salud y la gravedad potencial de dicha lesión o daño a la salud.

(3) Para determinar si se requieren medidas de protección adicionales, incluyendo el uso de EPP.

Para calcular la probabilidad y severidad mencionada en el punto 2, se debe tener en cuenta el diseño del equipo eléctrico, protecciones contra sobrecorriente y tiempo de funcionamiento, así como sus condiciones de operación y mantenimiento. Para estimar si es probable que ocurra un evento se puede revisar la tabla 130.5(C) [3], la cual detalla todas las posibles actividades a realizar y si es que pudiesen tener la posibilidad de que ocurra un arco eléctrico.

Se estima que la frontera de arco eléctrico es la distancia a la que la energía incidente recibida por la persona es de $1,2 \text{ cal/cm}^2$ o 5 J/cm^2 . El análisis de energía incidente se debe actualizar cuando ocurran cambios en el sistema de distribución eléctrica que pudieran afectar los resultados del mismo, este debiese realizarse en intervalos que no excedan los 5 años. La figura 1.3.1 establece de manera gráfica la frontera restringida, limitada y frontera de arco eléctrico.

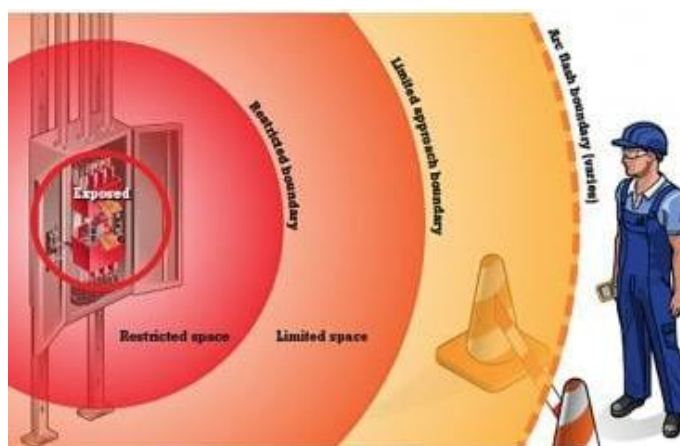


Figura 1.3.1 Frontera de arco eléctrico de acuerdo con NFPA 70E [4].

Se considera fundamental el siguiente ítem en la norma:


(H) Etiquetado de equipos: Los equipos eléctricos tales como tableros de distribución, paneles de control industriales, envolventes de medidores y centros de control de motores que están en unidades que no son de vivienda, y que probablemente requieran ser examinados, ajustados, reparados o mantenidos mientras están energizados, deben ser marcados con una etiqueta que incluya la siguiente información:

- (1) Tensión nominal del sistema.
- (2) Frontera de relámpago de arco.
- (3) Al menos uno de los siguientes datos:

- a. Energía incidente disponible y la correspondiente distancia de trabajo, o la categoría de EPP de la tabla 130.7(C)(15)(a) o Tabla 130.7(C)(15)(b) para el equipo, pero no ambas.
- b. Nivel mínimo de resistencia al arco de la vestimenta
- c. Nivel EPP específico para el sitio.

Este punto en particular tiene relevancia, pues establece que debe hacerse un análisis de energía incidente, la metodología, formulas, y posibles consecuencias que podría tener un arco eléctrico de una determinada intensidad serán detalladas en el capítulo 2 del presente estudio.

La energía incidente se encuentra medida en cal/cm^2 , dado que el aire es un material dieléctrico, se entiende que es una función de la distancia y esta disminuye a medida que se aleja del origen del arc-flash. Para seleccionar el equipo de protección personal requerido para realizar una actividad en particular, se debe tener en cuenta la distancia a la que se encuentra una persona al estar haciendo algún tipo de intervención del equipo, y cual es la posible energía incidente que este recibe en caso de un corto circuito o ionización producto de acortamiento de distancias, una vez definido esto, se categorizan los EPP necesarios en 4 niveles, los cuales pueden ser apreciados en la figura 1.3.2 y de manera escrita en la tabla 1.3.1:



PPE CATEGORY 1	PPE CATEGORY 2	PPE CATEGORY 3	PPE CATEGORY 4
<p>Minimum Arc Rating of 4 cal/cm²</p> <p>Arc Rated Clothing:</p> <ul style="list-style-type: none"> • AR long-sleeve shirt and pants, or AR coverall • AR face shield, or AR flash suit hood • AR jacket, parka, rainwear, or hard hat liner (as needed) <p>Protective Equipment:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Hard hat • Safety glasses or safety goggles • Hearing protection (with inserts) • Heavy-duty leather gloves • Leather footwear (as needed) 	<p>Minimum Arc Rating of 8 cal/cm²</p> <p>Arc Rated Clothing:</p> <ul style="list-style-type: none"> • AR long-sleeve shirt and pants, or AR coverall • AR flash suit hood, or AR face shield and AR balaclava • AR jacket, parka, rainwear, or hard hat liner (as needed) <p>Protective Equipment:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Hard hat • Safety glasses or safety goggles • Hearing protection (with inserts) • Heavy-duty leather gloves • Leather footwear 	<p>Minimum Arc Rating of 25 cal/cm²</p> <p>Arc Rated Clothing:</p> <ul style="list-style-type: none"> • As required: AR long-sleeve shirt, AR pants, AR coverall, AR flash suit jacket, and/or AR flash suit pants • AR flash suit hood • AR gloves • AR jacket, parka, rainwear, or hard hat liner (as needed) <p>Protective Equipment:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Hard hat • Safety glasses or safety goggles • Hearing protection (with inserts) • Leather footwear (as needed) 	<p>Minimum Arc Rating of 40 cal/cm²</p> <p>Arc Rated Clothing:</p> <ul style="list-style-type: none"> • As required: AR long-sleeve shirt, AR pants, AR coverall, AR flash suit jacket, and/or AR flash suit pants • AR flash suit hood • AR gloves • AR jacket, parka, rainwear, or hard hat liner (as needed) <p>Protective Equipment:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Hard hat • Safety glasses or safety goggles • Hearing protection (with inserts) • Leather footwear (as needed)

This guide is for general information purposes only. It is not a substitute for review of applicable standards.

Figura 1.3.2 EPP según las distintas categorías de arco eléctrico [7].

Tabla 1.3.1 Categoría del EPP según la gravedad de arco eléctrico [3].

Categoría de EPP de relámpago de arco			
Número	Valor mínimo de protección	Vestimenta	Equipo de protección
1	4 cal/cm ²	Camisa de mangas largas y pantalones resistentes al arco u overol (mameluco) resistente al arco. Protector facial ^b resistente al arco o capucha del traje de protección contra relámpago de arco. Chaqueta, parka, prendas impermeables o forros de cascotes con valor de resistencia al arco (SSN).	Casco. Anteojos de seguridad o gafas de seguridad (SR). Protección auditiva (tapones) ^c . Guantes de cuero para industrial ^d . Calzado de trabajo de cuero (SSN).
2	8 cal/cm ²	Camisa de mangas largas y pantalones resistentes al arco u overol (mameluco) resistente al arco. Capucha del traje de protección contra relámpago de arco, resistente al arco o protector facial ^b resistente al arco y pasamontañas con valor de resistencia al arco. Chaqueta, parka, prendas impermeables o forros de cascotes con valor de resistencia al arco (SSN).	Casco Anteojos de seguridad o gafas de seguridad (SR). Protección auditiva (tapones) ^c . Guantes de cuero para uso industrial ^d . Calzado de trabajo de cuero.
3	25 cal/cm ²	Camisa de manga larga resistente al arco (SSR). Pantalones resistentes al arco (SSR). Overol (mameluco) resistente al arco (SSR). Chaqueta de traje de protección contra relámpago de arco (SSR). Pantalones de traje de protección contra relámpago de arco con valor de resistencia al arco (SSR). Capucha del traje de protección contra relámpago de arco con valor de resistencia al arco. Guantes ^d resistentes al arco. Chaqueta, parka, prendas impermeables o forros de cascotes con valor de resistencia al arco (SSN).	Casco. Anteojos de seguridad o gafas de seguridad (SR). Protección auditiva (tapones) ^c . Calzado de trabajo de cuero.
4	40 cal/cm ²	Camisa de manga larga resistente al arco (SSR). Pantalones resistentes al arco (SSR). Overol (mameluco) resistente al arco (SSR). Chaqueta de traje de protección contra relámpago de arco con valor de resistencia al arco (SSR). Pantalones de traje de protección contra relámpago de arco con valor de resistencia al arco (SSR). Capucha de traje de protección contra relámpago de arco con valor de resistencia al arco. Guantes resistentes al arco ^d . Chaqueta, parka, prendas impermeables o forros de cascotes con valor de resistencia al arco (SSN).	Casco. Anteojos de seguridad o gafas de seguridad (SR). Protección auditiva (tapones) ^c . Calzado de trabajo de cuero.

Donde

- SSN: según sea necesario (opcional).
- SSR: según sea requerido.
- SR: selección requerida.

a: Valor de resistencia al arco se define en el Artículo 100.

b: Los protectores faciales deben tener una protección envolvente que resguarde no solamente la cara sino también la frente, las orejas y el cuello, o, como alternativa, se requiere el uso de la capucha de un traje de protección contra relámpago de arco con valor de resistencia al arco.

c: Se permite el uso de otros tipos de protección auditiva en lugar de, o además de tapones, siempre que se usen debajo de una capucha de traje de protección contra relámpago de arco, que sea resistente al arco.

d: Si se usan guantes de hule aislantes con protectores de cuero, no se requieren guantes adicionales de cuero o con valor de resistencia al arco.

1.4 Norma ASTM

La American Society of Testing materials (ASTM) [5] es un conjunto de estándares técnicos reconocidos a nivel internacional, estos participan en distintas áreas, tanto eléctricas como químicas y mecánicas, su objetivo es presentar criterios para la calidad y rendimiento del objeto en particular. La ASTM fue fundada en 1898 como una manera de crear normas que apoyaran al desarrollo industrial, estas normas fomentan la calidad y la seguridad, a su vez estandarizan métodos de prueba y sus especificaciones.

En el contexto del presente estudio la norma NFPA70E refiere distintos estándares ASTM, el proveedor de algún EPP específico para especificar los niveles de energía incidente a los que se puede someter, debe especificar los tipos de prueba que se le realizaron, preferentemente de algún estándar conocido, como el presentado en la sección actual. La norma NFPA referencia todas relevantes para un entorno de trabajo seguro, pero algunas de las más importantes con respecto a los EPP son:

ASTM F1959: Método de prueba normalizado para determinar el nivel de protección al arco de los materiales para vestimenta, 2014.

ASTM F2178: Método de prueba normalizado para determinar el valor de resistencia al arco y especificación normalizada para productos de protección para la cara, 2012

ASTM F2413: Especificación normalizada para los requisitos de desempeño para el calzado de protección con puntera (de seguridad), 2011.

ASTM F1116: Método de prueba normalizado para determinar la resistencia dieléctrica del calzado dieléctrico, 2003 (R 2008).

ASTM F1117: Especificación normalizada para calzado con cubrecalzado dieléctrico, 2014 (R2013).

ASTM F2675/F2675M: Método de prueba para determinar las calificaciones de resistencia a arcos eléctricos de productos para la protección de las manos desarrollados y utilizados como protección contra arcos eléctricos, 2013.

1.5 IEEE

IEEE, nació el 1 de enero de 1963 con la fusión de dos organizaciones previas, el American Institute of Electrical Engineers (AIEE), fundada en 1884 por Thomas A. Edison y Alexander G. Bell, entre otros, y el Institute of Radio Engineers (IRE), fundada en 1912 [6]. Hoy en día el IEEE sirve a unos 420.000 miembros organizados geográficamente en diez Regiones, más de 300 Secciones y unas 700 Ramas Estudiantiles. Los aproximadamente 50.000 miembros estudiantiles no solo constituyen una fracción significativa de la membresía sino que son esenciales al crecimiento y a la vitalidad del Instituto, el cual selecciona y publica información aportada por profesionales de todo el mundo, a sus principales dedicaciones se pueden incluir publicaciones de investigaciones, estándares técnicos, conferencias y eventos, así como promocionar el desarrollo profesional para sus miembros, en particular con el enfoque del presente estudio se referencia la norma IEEE 1584 de título “Guía para realizar cálculos de peligro de arco eléctrico”, que tiene como propósito proporcionar pautas y métodos para calcular el arco eléctrico y su energía incidente.

Si bien tanto la norma NFPA70E como la norma IEE1584 se dedican a garantizar la seguridad de los trabajadores, IEEE lo hace de una manera más técnica enfocada al cálculo de la energía, mientras que la NFPA70E lo abarca de manera más amplia, abordando tanto eso como las directrices para establecer un área de trabajo eléctrica segura. Las ecuaciones utilizadas para establecer los riesgos asociados son detalladas en el capítulo 2.

Capítulo 2. Arc-Flash o Arco Eléctrico

2.1 Introducción

El presente capítulo busca entregar una definición del fenómeno conocido como Arco Eléctrico, describiendo las circunstancias en que ocurre, así como el tipo de efectos que puede tener en los equipos, personas y red eléctrica. A su vez se busca esbozar las primeras ecuaciones que permitirían cuantificar la cantidad de energía liberada durante este fenómeno.

2.2 Arco eléctrico y peligros asociados

En un sistema de distribución convencional, la corriente fluye desde la red eléctrica a las cargas, tableros de fuerza, barras, cualquier equipo que necesite energía eléctrica para ofrecer un correcto funcionamiento, esto se hace a través de conductores, con su respectivo largo, sección transversal y aislación necesaria para que este opere en condiciones que no le estresen más allá de sus condiciones nominales.

Cuando ocurre algún tipo de falla, por ejemplo, un acortamiento de distancias o un cortocircuito en algún punto del sistema de distribución, la corriente sube a niveles muchas veces por encima de sus valores nominales. Como bien se sabe por efecto joule, la energía corresponde al cuadrado de la corriente multiplicado por la resistencia y el tiempo, esto queda mejor ilustrado en la siguiente ecuación.

$$E_{joule} = i^2 \cdot R \cdot t_{op} \quad (2.1)$$

Normalmente, la corriente de cortocircuito se expresa en [kA], y el tiempo de operación de las protecciones está en milisegundos, por lo que la energía incidente queda generalmente en números no mayores a 100 cal/cm², sin embargo, el tiempo de operación influye enormemente en la seguridad de las personas, ya que si el tiempo de operación no es lo suficientemente pequeño y al ser una gran cantidad de energía liberada de manera violenta, evidentemente puede provocar un gran daño a los cables y a los equipos, así como también a las personas, lo que a su vez puede causar que el aire se vuelva un conductor, provocando que la corriente circule por él y con ello la aparición del arco

eléctrico. Durante la ocurrencia de este fenómeno, 3 procesos que atentan contra la seguridad de las personas inmediatamente cercanas ocurren, estos son:

Temperatura: Dependiendo del tipo de falla, en un milisegundo se puede llegar a temperaturas entre 2.800 y 19.000 ° C en las barras de cobre al momento de un cortocircuito [7] para dar una perspectiva, la temperatura en la superficie del sol es estimada en 5.500°C, por lo que temperaturas tan altas pueden provocar una vaporización violenta de materiales como cobre, aluminio y acero, lógicamente puede además provocar una ignición en la ropa y quemar la piel de cualquier persona que se encuentre en las proximidades.

Cuando se habla de quemaduras, es importante comprender a qué nivel se está afectando a la persona, por ello resulta relevante definir la estructura de la piel.

La piel es el órgano más grande del cuerpo, su capa exterior se llama epidermis, y es la encargada de proteger las capas interiores del mundo exterior, impermeabiliza y fortalece la piel, también contiene células que permiten tener sentido del tacto. En segundo lugar, se encuentra a la dermis, que contiene los receptores sensoriales, permitiendo que la piel reaccione ante dolor, presión y temperatura, también se encuentran los vasos sanguíneos que le brindan los nutrientes necesarios y remueven desechos. En la última capa se encuentra la hipodermis, contiene células de grasa o tejido adiposo, ayudando a conservar el calor y aislar el cuerpo, las glándulas sebáceas producen el aceite en la piel, evitando que esta se reseque.

Una persona recibe quemaduras dependiendo del tiempo al que esté expuesto al fenómeno en particular y afecta a las distintas capas de la piel. Una quemadura en la capa externa de la piel (primer grado) normalmente suceden por exposición al sol, no se presentan ampollas, el sitio quemado se encuentra rojo, seco y puede ser doloroso [8] . Cuando afecta a la epidermis y parte de la dermis se habla de quemadura de segundo grado, el sitio presenta ampollas, puede estar inflamado y ser doloroso. Una quemadura de tercer grado afecta a la capa más profunda de la piel conocida como hipodermis, destruyendo la epidermis y dermis, pudiese además dañar tejido subcutáneo, la zona afectada pierde sensibilidad y la piel puede verse blanca o carbonizada. Por último, se habla de quemaduras de cuarto grado cuando los huesos, músculos y tendones también resultan dañados. No hay sensación en la zona ya que los terminales nerviosos han sido destruidos, los tres primeros tipos de quemadura pueden ser apreciados en la figura 2.2.1.

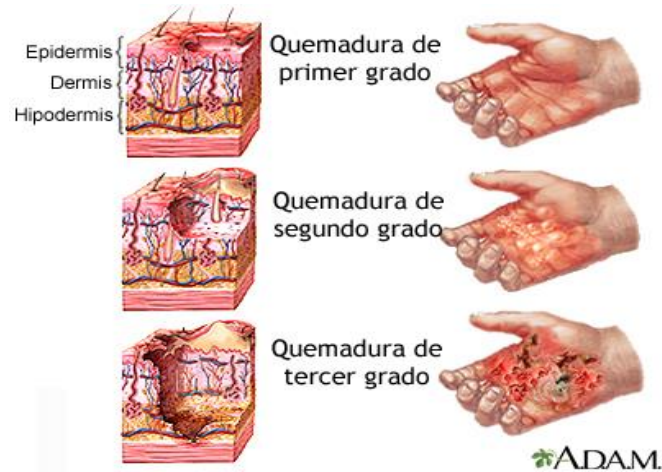


Figura 2.2.1 Quemaduras de primer, segundo y tercer grado [8].

En particular una persona se puede recuperar de quemaduras de segundo grado, por lo que se busca que nunca se sobrepase este nivel, si bien representan un detrimento en la vida de la persona, representan lesiones recuperables, por lo que es importante que no se llegue a quemaduras de tercer grado. Para tener en cuenta las condiciones que no debiesen ser sobrepasadas, se ha desarrollado la curva Stoll (figura 2.2.2), esta curva representa la energía, superficie y tiempo requerido para causar quemaduras de segundo grado en una persona, Alice Stoll demostró que alrededor de $1,2 \text{ [cal/cm}^2\text{]}$ son capaces de producir este tipo de daños.

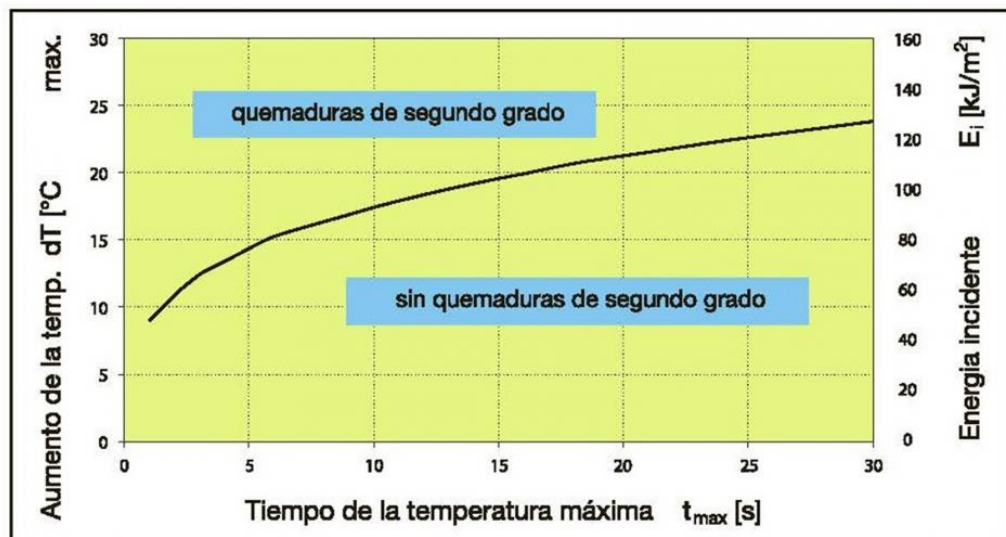


Figura 2.2.2 Curva de Stoll [9].

Presión: Como se discutió previamente, la temperatura aumenta a niveles alarmantes, además se ioniza el gas atmosférico conocido como aire, permitiendo el paso de la corriente a través de él, como resultado la temperatura del aire también aumenta rápidamente. De acuerdo con la ecuación de los gases ideales, un aumento en la temperatura provoca un aumento en el volumen y presión de los gases.

La presión producida por un arco eléctrico puede ser de 14478,99 kPa, de acuerdo con un estudio realizado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos. 69 kPa es suficiente para que una persona deje de vivir, 138 kPa son suficientes para hacer caer una pared de concreto y causar una ráfaga de viento de hasta 808 km/hr [10]. Es importante notar que cuando se habla de estos aumentos catastróficos en la presión, como ejercen la suficiente presión para mandar a una persona despedida en el aire, se habla de arc-blast o explosión de arco, correspondiente a la onda expansiva que este provoca [11]. Dependiendo de las condiciones del entorno, la presión puede provocar que los paneles eléctricos se rompan, enviando escombros, potencialmente peligrosos para el ser humano, esto se aprecia visualmente en la figura 2.2.3.

La presión puede variar dependiendo de la severidad de la falla, es por esto que se debe respetar correctamente los equipos de seguridad establecidos, así como las distancias de seguridad dentro de las situaciones posibles.

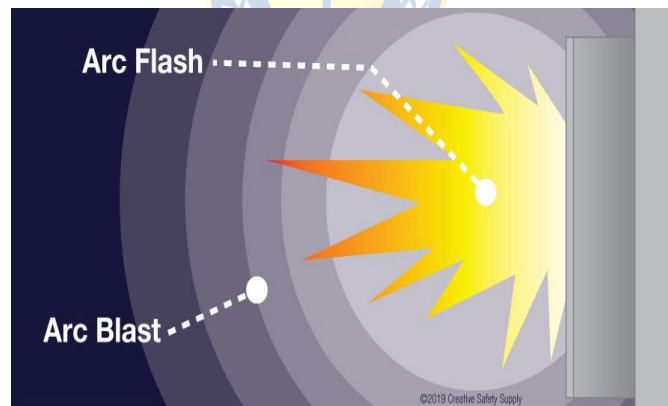


Figura 2.2.3 Diferencia entre arc flash y arc blast [11].

Sonido: Debido a un aumento súbito en la presión, la onda expansiva viene con un ruido asociado, este no aumenta en magnitud según el tiempo de operación de la protección correspondiente, lo que si aumenta el ruido producido por la falla es la intensidad de corriente que fluye, el sonido puede superar ligeramente los 140 dB, para dar un marco de referencia, esto es comparable con un disparo cercano a los oídos, o el sonido de un motor de avión a unos 30 metros de distancia.

Los decibeles son una medida sin un factor que lo relacione con el oído humano, un sonido de 100 dB a 100 Hz tendrá una percepción similar a uno de 80 dB a 1000 Hz, es por esto que se establece la métrica en dBA, que tiene en cuenta la respuesta del oído humano.

La norma OSHA establece que el límite de exposición al ruido es de 90 dBA durante 8 horas [12], pero de tan solo 2 horas a 100 dBA, es por esto que es importante también llevar protecciones acústicas además de las ya conocidas, pues las consecuencias auditivas para la persona expuesta al ruido sin ningún tipo de equipamiento serán seguramente, permanentes. En este contexto la norma NFPA 70E recomienda el uso de tapones para los oídos, aunque no especifican el tipo de protección que estos debiesen ser, sin embargo, los niveles de ruido con los que se trabaja dentro de la planta son altos y la protección auditiva con la que se trabaja aísla de manera eficaz el sonido. Se estima que la protección auditiva debiese ser suficiente siempre y cuando se siga utilizando dentro de las áreas con peligros de arco eléctrico. La figura 2.2.4 muestra el espectro de ruidos conocidos por el hombre y sus dBA asociados.

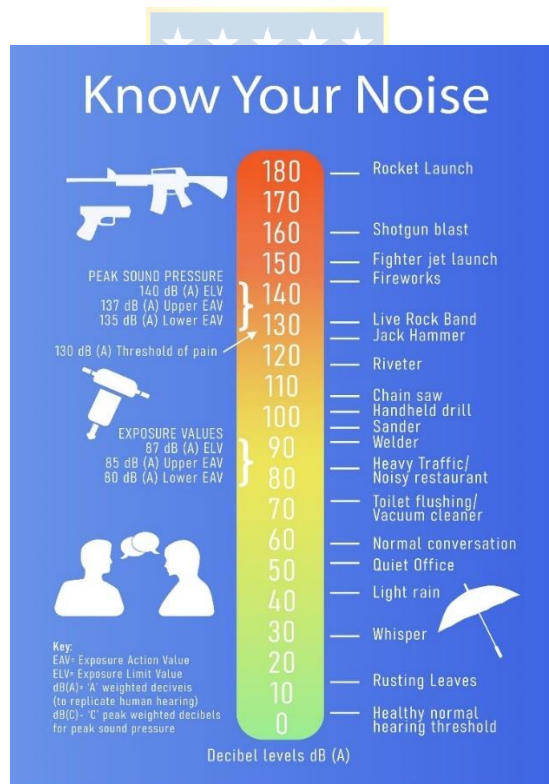


Figura 2.2.4 Niveles de ruido en dBA y ejemplos asociados [13].

2.3 Corriente de corto circuito

La corriente siempre fluirá en mayor medida por el camino de menor impedancia, de aquí es donde viene el nombre corto circuito, cuando la corriente encuentra un camino con una resistencia muy pequeña o nula, como por ejemplo cuando hay un deterioro en la aislación de un conductor y este hace contacto con un camino de menor impedancia, es cuando se produce el corto circuito, los posibles casos son los que se nombran a continuación y se detallan en la figura 2.2.1.1.

- Corto circuito monofásico a tierra.
- Corto circuito bifásico.
- Corto circuito bifásico a tierra.
- Corto circuito trifásico.

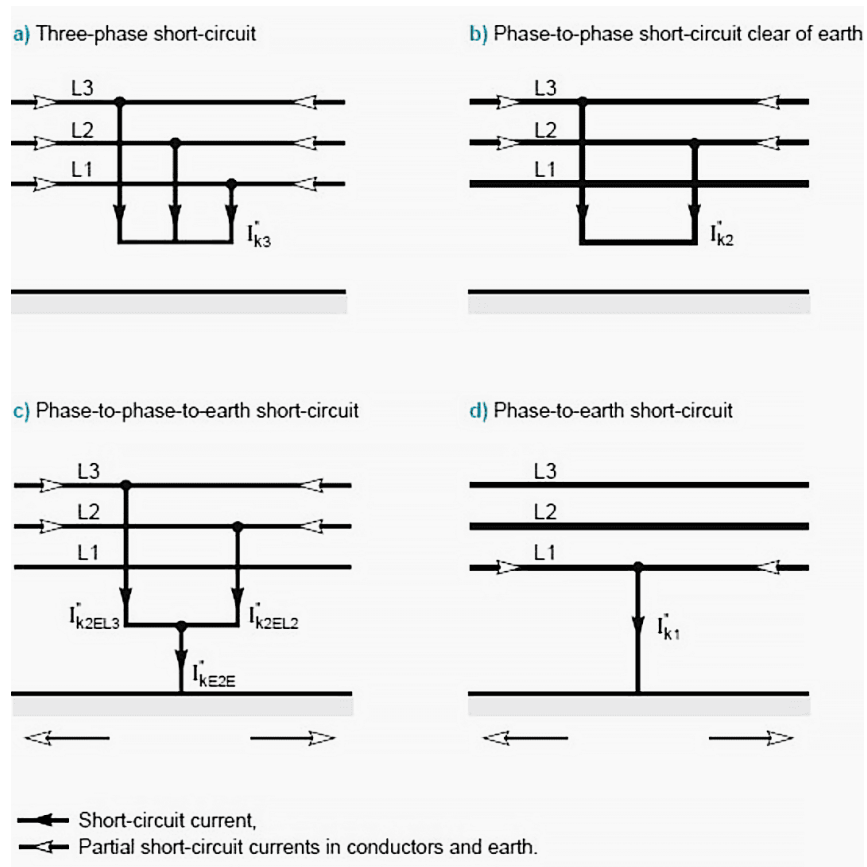


Figura 2.2.1.1 Tipos de cortocircuito [14].

El corto circuito trifásico es el de mayor intensidad y por tanto el caso que será estudiado en cada zona propuesta. Su valor puede ser calculado con la siguiente ecuación.

$$I_{sc} = \frac{S_{transf}}{\sqrt{3} \cdot V_{rtd} \cdot Z_{transf}} \quad (2.2)$$

Donde I_{sc} es la corriente de corto circuito, S_{transf} es la potencia del transformador en [VA], V_{rtd} es el voltaje nominal del transformador y Z_{transf} es la impedancia del transformador expresada en por unidad. Esta fórmula es la misma que se utiliza para calcular la corriente en los circuitos trifásicos, pero en el caso que se está estudiando la única impedancia que vería el sistema sería la propia del transformador.

2.4 Potencia de corto circuito, método Ralph-Lee

En el caso de un arco trifásico, la potencia máxima que este puede tener se calcula utilizando la siguiente ecuación.

$$P_{arc,sc} = \frac{\sqrt{3} \cdot V_{rtd} \cdot I_{sc}}{2} \quad (2.3)$$

2.5 Distancia de frontera del arco eléctrico, método Ralph-Lee

En primer lugar, en la norma estudiada, se define la frontera del arco eléctrico como la mínima distancia a la que la persona puede sufrir quemaduras de segundo grado, es decir, que la temperatura de la piel se mantiene a menos de 80°C y esta sufre de una lesión curable.

Esta distancia se puede calcular de la siguiente manera.

$$D_{sc} = 0,3048 \cdot \left[(2,65 \cdot \sqrt{3} \cdot V_{rtd} \cdot I_{sc} \cdot 10^{-6} \cdot t)^{0,5} \right] \quad (2.4)$$

Donde t es el tiempo de despeje de la falla, y D_{sc} es la distancia de frontera de arco eléctrico en metros. El factor 0,3048 es utilizado para cambiar de pies a metros según las conversiones de métricas estándar.

2.6 Cálculo energía incidente para sistemas de tensión superiores a 600 V, por Doughty Neal

Para calcular la energía incidente en cal/cm^2 , parámetro deseado para estimar el tipo de protección que se debería utilizar, se tiene la siguiente ecuación.

$$E = \frac{793 \cdot F \cdot V \cdot t_A}{D^2} \quad (2.5)$$

Donde E es la energía incidente en cal/cm^2 , F es la corriente de falla de corto circuito en kA, V es la tensión fase a fase del sistema en kV, t_A es el tiempo en segundos de duración del arco y D es la distancia a la fuente de arco, en centímetros.

2.7 Método Doughty Neal para energía incidente en sistemas de tensiones inferiores 600 V

El método Doughty Neal presenta una forma de predecir la intensidad del arco eléctrico, puede que las ecuaciones no siempre representen el mejor caso, pero mientras se utilicen dentro de los rangos establecidos, debiesen estar cercanos a la realidad. La ecuación es, por lo tanto:

$$E_{MA} = 5271 \cdot D_A^{-1.9593} \cdot t_A \cdot [0,0016F^2 - 0,0076F + 0,8938] \quad (2.6)$$

Donde, E_{MA} es la energía incidente de arco abierto en cal/cm^2 y D_A la distancia a los electrodos de arco en pulgadas (para distancias mayores o iguales a 18 pulgadas).

Por otro lado, en una caja cúbica de 20 pulgadas o 50,8 centímetros se utiliza la siguiente ecuación.

$$E_{MB} = 1038,7 \cdot D_B^{-1.4738} \cdot t_A \cdot [0,0093F^2 - 0,3453F + 5,9675] \quad (2.7)$$

Donde, E_{MB} es la energía incidente de arco en caja cúbica, expresado en cal/cm^2 y D_A la distancia a los electrodos de arco en pulgadas (para distancias mayores o iguales a 18 pulgadas).

Esta ecuación es aplicable también a arcos eléctricos que provienen de adentro de tableros de potencia, centros de control de motores, u otros envolventes equipos eléctricos.

2.8 Método de cálculo IEEE 1584-2002

Como otra opción de cálculo se presenta el método de cálculo de la IEEE 1584-2002 [15], en específico se utiliza para el cálculo de la energía incidente y la frontera de arco eléctrico, sus resultados fueron obtenidos a través de análisis estadístico y ajuste de curvas, sus límites son para sistemas entre 0,208 a 15 kV trifásicos, para sistemas de 50 o 60 Hz, con una corriente de corto circuito trifásico de 700 a 106.000 A y con una distancia entre conductores de 13 a 152 mm. En sus cálculos se estima la corriente de arco trifásico, para sistemas bajo 1 kV se tiene que:

$$\log_{10}(I_a) = K + 0,662 \cdot \log_{10}(I_{bf}) + 0,0966 \cdot V + 0,000526 \cdot G + 0,5588 \cdot V \quad (2.8)$$

$$\cdot \log_{10}(I_{bf}) - 0,00304 \cdot G \cdot \log_{10}(I_{bf})$$

Donde I_a es la corriente de arco en kA, K es una constante correspondiente a -0,153 para arcos al aire libre y -0,097 para arcos en caja, I_{bf} es la corriente de corto circuito y G el espacio entre conductores.

Para sistemas mayores a 1 kV se utiliza una versión con menos términos, esta es:

$$\log_{10}(I_a) = 0,00402 + 0,983 \cdot \log_{10}(I_{bf}) \quad (2.9)$$

Teniendo estos resultados se puede calcular de forma empírica la energía incidente, esta ecuación se utiliza para un tiempo de arco de 0,2 segundos y a una distancia de 610 mm al punto de arco.

$$\log_{10}(E_n) = k_1 + k_2 + 1,081 \cdot \log_{10}(I_a) + 0,0011 \cdot G \quad (2.10)$$

Con E_n la energía incidente en J/cm^2 normalizada para tiempo y distancia estipulados, k_1 igual a -0,792 para arcos al aire libre y -0,555 para arcos en una caja, k_2 igual a 0 para sistemas no puestos a tierra mediante alta resistencia, y en caso contrario -0,113. Trabajando esto se obtiene que:

$$E = 4,184 \cdot C_f \cdot E_n \cdot \left(\frac{t}{0,2}\right) \left(\frac{610^x}{D^x}\right) \quad (2.11)$$

La Norma IEEE 1584 entrega valores típicos para distintos equipos y sus factores respectivos, esto queda esbozado en las tablas 2.7.1 y 2.7.2.

Tabla 2.7.1. Valores típicos de espacio entre conductores y su factor de distancia.

Voltaje del sistema [kV]	Tipo de elemento	Espacio entre conductores [mm]	Factor de distancia x
0,208 - 1	Aire libre	10 –40	2.000
	Switchgear	32	1.473
	MCC y paneles	25	1.641
	Cables	13	2.000
>1 - 5	Aire libre	102	2.000
	Switchgear	13 – 102	0.973
	Cables	13	2.000
>5 - 15	Aire libre	13-153	2.000
	Switchgear	153	0.973
	Cables	13	2.000

Tabla 2.7.2. Distancias de trabajo recomendadas.

Equipamiento	Distancia típica de trabajo [mm]
Switchgear 15 kV	910
Switchgear 5 kV	910
Switchgear baja tensión	610
MCC y tableros de tensión	455
Cable	455

En el caso de las distancias de trabajo, esta corresponde a la medida entre la cara y el pecho del trabajador con respecto a un posible peligro de arco eléctrico, y los valores presentes corresponden a recomendaciones de trabajo. El presente estudio utiliza la misma distancia de trabajo en todos sus tramos y sus detalles se pueden revisar en el capítulo 4.

Existe también la norma de cálculo IEEE 1584-2018, que además de las variables anteriormente mencionadas, hace análisis de las dimensiones de la celda. Los resultados no difieren mucho por lo que se escoge este análisis más simplificado.

Capítulo 3. Proceso productivo planta Mapal

3.1 Introducción

Masisa es un referente [16] Latinoamericano en la producción y comercialización de tableros de madera y soluciones para muebles y revestimientos de interior, ofreciendo productos y servicios de calidad, innovadores y sustentables a partir de sus materias primas. Más de 4100 personas forman parte de los diferentes equipos ubicados en sus instalaciones industriales y comerciales ubicadas en Colombia, Ecuador Estados Unidos entre otros. En particular, planta Mapal ubicada Camino a Coronel, Km 10, Calle 1 N°575, San Pedro de la Paz, Concepción, se dedica a la producción de tableros de aglomerado, MDF, dándoles un valor agregado según sea requerido a través del proceso de melaminización.

3.2 Proceso MDF

El tablero MDF fue introducido en los años 60 en Estados Unidos, como una respuesta a los crecientes precios en la madera, y a la necesidad de erradicar los desechos de grandes complejos industriales como aserraderos y celulosas.

La materia prima es obtenida a través de subproductos de la madera, provenientes de aserraderos, viruteados de madera seca, astillas de metros ruma, reaprovechamiento de residuos post cosecha y subproductos de la madera provenientes de faenas forestales e industriales. Además de lo anteriormente mencionado es necesario añadir también Resina urea-formaldehído, aditivos de agua y vapor, energía eléctrica y energía calórica.

En la formación del tablero se varían las propiedades de resistencia y calidad requeridas según las exigencias de producción. La figura 3.2.1, muestra un esquema del proceso de producción en la línea MDF.

El proceso de fabricación del tablero MDF involucra varias etapas desde la alimentación de las materias primas hasta la formación y enfriamiento de los tableros finales [17]. En sus procesos se puede identificar, alimentación de materias primas, lavado, transporte al vaporizador, preparación de la fibra, secado, formación, pre-prensado, prensado y salida prensa.

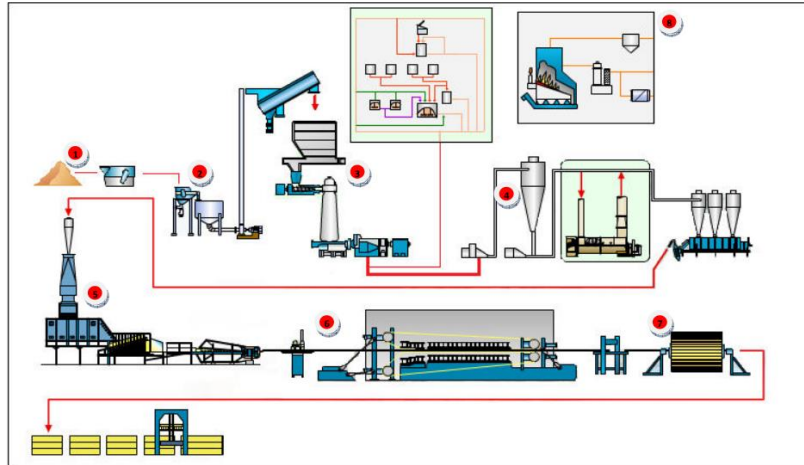


Figura 3.2.1. Esquema de producción línea MDF [17].

Este proceso comienza con la recepción de las astillas de madera, que pasan por una estación de limpieza para separar los materiales no utilizables. Luego, se realiza un lavado y transporte al vaporizador para eliminar contaminantes y preparar las astillas para el siguiente paso.

Después se lleva a cabo el proceso de preparación de la fibra, que incluye el precalentamiento, deshidratación, calentamiento y desfibrado del material. En el precalentamiento, las astillas se precalientan antes de pasar a la deshidratación, donde se remueve el agua y el polvillo fino. A continuación, se realiza el calentamiento con vapor saturado y el desfibrado mecánico para convertir las astillas en fibras. Se aplica una receta de resina para mejorar las propiedades finales de las fibras.

Luego, las fibras se someten al proceso de secado, donde se utiliza calor y aire para evaporar el agua presente en ellas. Después del secado, las fibras se dirigen a la formación o pendistor, donde se distribuyen uniformemente y se crea una manta compacta de fibra. A continuación, la manta pasa por el proceso de pre prensado, donde se comprime y se recortan los bordes.

Después del pre prensado, el tablero pasa al prensado en caliente, donde se somete a compresión y temperatura para formar el tablero MDF. Luego de salir de la prensa, el tablero se corta y se verifica su espesor y características. Si cumple con los requisitos, se dirige a la estación duplicadora y luego al enfriador. Finalmente, los tableros enfriados se agrupan y se preparan para su posterior procesamiento y formación de paquetes.

3.3 Proceso Laminado

La melamina, un material ampliamente utilizado en la actualidad, tuvo sus inicios en la década de 1830 gracias al descubrimiento de un químico alemán [18]. Sin embargo, su popularidad no se disparó hasta la Segunda Guerra Mundial, cuando su aplicación como laminado y plástico económico ganó relevancia. Durante la mitad del siglo XX, la melamina experimentó un auge debido a su aspecto moderno, utilizándose la resina para cubrir papel laminado y adherirlo a tableros de partículas, lo que dio lugar a los conocidos tableros laminados de hoy en día.

La melamina destaca por su superficie cerrada y fácil limpieza, lo que impide el desarrollo de microorganismos, haciéndola ideal para entornos altamente sanitarios, además, es resistente al calor y a los líquidos agresivos utilizados en la limpieza doméstica.

El proceso de fabricación de los tableros melamínicos comienza con la llegada de los paquetes de tableros [19], que son separados uno a uno mediante una grúa, luego se alinean en pares y se ingresan a la cinta transportadora a través de un carro aéreo. Las láminas de melamina son transportadas mediante otro carro aéreo y la cantidad de láminas utilizadas depende si el pedido es de cara simple o doble. Posteriormente, se recorta el exceso de lámina para obtener las dimensiones necesarias. La adhesión del papel al tablero se logra mediante la aplicación de estática y el conjunto se introduce en la prensa mediante un carro de entrada.

En la sección de prensado, se aplica una combinación específica de temperatura y presión para garantizar una correcta adhesión del tablero al papel melamínico, adaptada al formato del tablero. Una vez finalizado el proceso de prensado, los tableros son depositados en una vía de rodillos mediante un carro, donde son alineados, enfriados y llevados a una estación especializada para limpiar los cantos del tablero, eliminando el exceso innecesario de las láminas.

Los tableros son transportados mediante correas hacia la sección de clasificado, donde un operador los clasifica en pares según los tableros producidos. Finalizada esta etapa, los tableros son alineados y apilados por un carro transportador, formando paquetes de tableros melamínicos. A continuación, los paquetes de tableros son descargados en la zona de embalaje y finalmente almacenados en una bodega para su reposo. En base a lo mencionado anteriormente se adjunta la figura 3.3.1, la cual corresponde a un esquema para ejemplificar lo escrito en los párrafos.

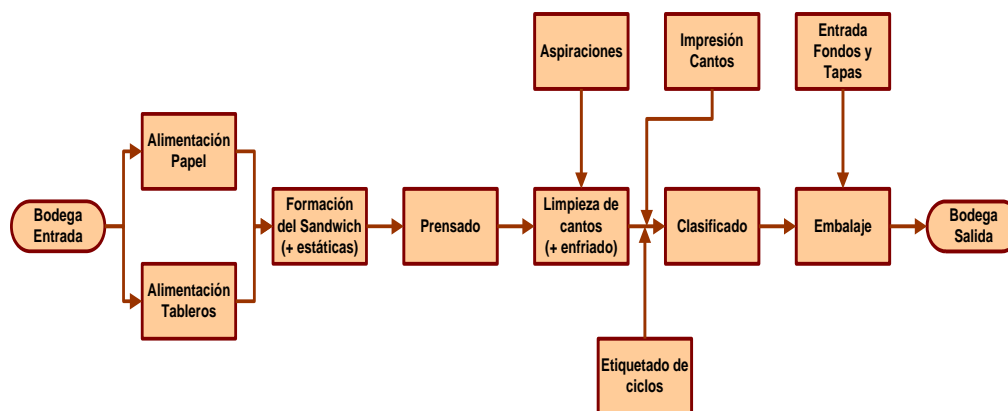


Figura 3.3.1. Esquema de producción laminado [19].

3.4 Proceso Aglomerado

El proceso de aglomerado es una etapa fundamental en la producción de tableros, que consiste en transformar diferentes tipos de materiales de madera, como aserrín, viruta y astillas, en paneles robustos y versátiles [20]. Mediante una serie de etapas y técnicas especializadas, se logra obtener tableros de alta calidad con propiedades físicas y mecánicas adecuadas para su uso en una amplia gama de aplicaciones. El proceso de aglomerado abarca diversas fases, desde la recepción y preparación de las materias primas, pasando por el secado y la clasificación de los materiales, hasta la formación y prensado del manto compuesto. Estas fases quedan brevemente descritas a continuación.

Recepción de materias primas: En esta etapa, se reciben aserrín, viruta y astillas, que son almacenadas en silos acumuladores. Se utilizan pesómetros para dosificar la cantidad adecuada de estos materiales en la mezcla, que será utilizada en la producción de diferentes tipos de tableros.

Secado y clasificación: En la etapa de secado, se extrae el agua de la mezcla hasta alcanzar un contenido de humedad de aproximadamente 3-4% [21]. El material seco se somete a un proceso de clasificación, donde se separa en polvo, material fino, material grueso y sobretamaño. El sobretamaño es molido nuevamente para convertirlo en material utilizable, mientras que el polvo se almacena en silos para su uso como fuente de combustible. El material seco y el material grueso se utilizan en la etapa de encolado.

Formación y prensado: En la etapa de formación, se crea un manto compuesto por capas de material fino y grueso, este manto se somete a un proceso de prensado previo para prepararlo antes de

ingresar a la prensa principal. En la prensa, se aplica una presión de 250 bar y una temperatura de 130°C para que la resina reaccione y aglomere el manto. Una vez compactado, el tablero se enfría y pasa a la etapa de formación final, donde se le da un formato preliminar mediante discos de sierra.

Apilado y terminación: El tablero formateado se acumula en la etapa de stacker para la formación de paquetes y luego se somete a un periodo de reposo. Posteriormente, el tablero pasa al proceso de terminación, donde se realizan los últimos acabados antes de su distribución final. Una figura descriptiva del proceso se adjunta en la figura 3.4.1

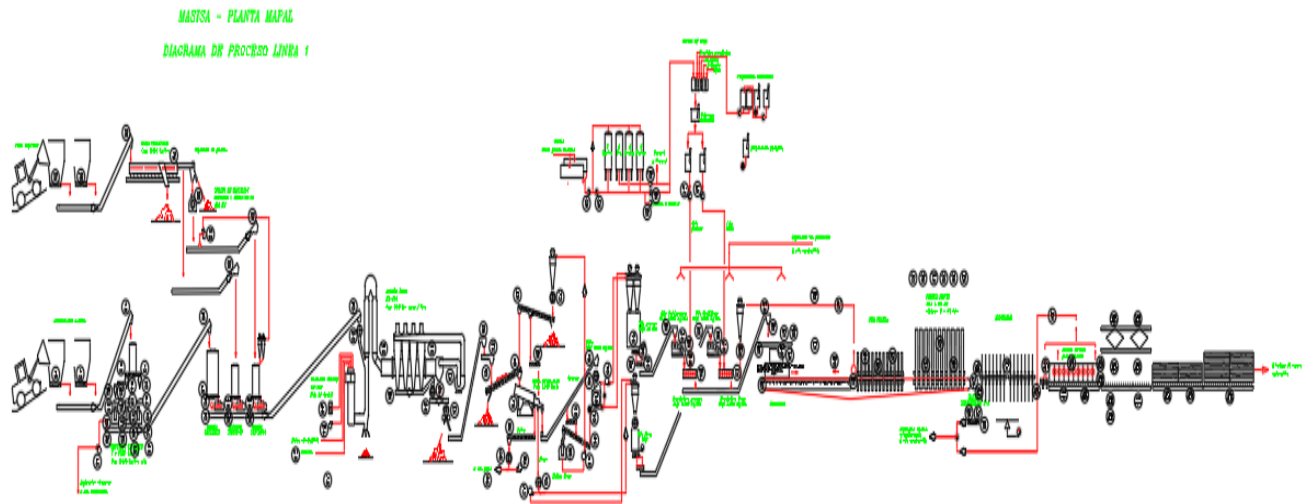


Figura 3.4.1. Esquema de producción aglomerado [21].

Capítulo 4. Modelación y simulación de arco eléctrico

4.1 Introducción

En este capítulo se modela el sistema de distribución eléctrico de la planta Mapal, y se realiza la simulación de arco eléctrico, para ello se ocupa el software ETAP, en específico, se toman en cuenta los sectores con mayor demanda de potencia, pues estos tentativamente tienen el mayor nivel de riesgo de arco eléctrico. Se procede a utilizar el programa para un análisis de cortocircuito. En base a estos resultados se puede justificar cuales son las medidas de seguridad necesarias para el resguardo contra el arc-flash.

4.2 Software

Para realizar las simulaciones, se usa el programa Electrical Transient and Analysis Program. En la actualidad es ampliamente utilizado para realizar análisis eléctrico para determinar cómo opera el sistema ante posibles contingencias, desde la conexión y desconexión de cargas, a fallas francas, El programa tiene una diversidad de funciones para ayudar al ingeniero en el análisis de sistemas, entre estas figuran, flujos de carga, análisis de corto circuito, valores de arc flash, armónicos en la red, estabilidad de transientes, coordinación de protecciones, tanto para corriente alterna como para corriente continua.

El programa se encuentra validado y verificado a través de la comparación de sus resultados con casos reales y disponibles en su sitio online [23] se encuentran todos los estudios realizados. Para su validación se basan en comparaciones con ejemplos publicados por las normas IEEE, NFPA70E y mediciones reales, en específico para el caso del arco eléctrico se pueden encontrar dos estudios, la comparación de los resultados en ETAP con los resultados teóricos según el estándar IEEE 1584, y de manera similar con cálculos efectuados con las ecuaciones expuestas por la norma NFPA70E, por lo que se asegura que de entregarse los parámetros correctos, el software entrega resultados lo suficientemente cercanos a la realidad.

El programa además de ser intuitivo, en la mayoría de sus ítems presenta la posibilidad de rellenado con valores estándar, por lo que para valores desconocidos que no pudiesen ser recopilados se utiliza esta función siendo observado pertinentemente en el capítulo 5. No se considera además la impedancia de las líneas, dado que se busca que la corriente de corto circuito sea lo más alta posible, teniendo un marco más conservador con el que trabajar a la hora de asegurar la integridad de las personas. El

programa además tiene un análisis de arc flash, utilizando los cálculos proporcionados por la norma IEEE 1584 en su versión del 2002, y delimitaciones de frontera según las normas NFPA70E, por lo que se comparan los resultados calculados en el presente estudio con los entregados por el software.

4.3 Unilineal

El último unilineal de la planta en formato digital data del año 2004 [22]. Desde esa fecha se han realizado diversas modificaciones, gracias a la información proporcionada por la supervisión de la planta, se complementa esta información con un análisis de corto circuito efectuado en 2011 [24], el cual se centra en la rama de mayor potencia en la planta, correspondiente al área de desfibrado; ambas figuras de los unilineales se adjuntan en el anexo A. Además, se toma en cuenta el valor de corto circuito desde la red al sistema, el cual se encuentra en [24].

Actualmente la planta cuenta con 14 transformadores, el de mayor potencia es de 8 [MVA], mientras que los demás son de 2,5, 1,5 y 1,25 [MVA] respectivamente. Para no recurrir a una sobrecarga de información, se realiza una simplificación del modelo completo de la planta, en primer lugar, se toma en cuenta la sección de la planta que tiene una mayor demanda de potencia, que es en específico por un motor de 6,3 [MW] en 6 [kV] correspondiente al transformador de 8 [MVA] anteriormente mencionado, además se tiene en cuenta el área de planta de energía, conectado a un transformador de 2,5 [MVA], esto permite extrapolar los resultados de categorización de zonas de riesgo a los otros sectores de la planta. Si esta última área tuviese un nivel de arco eléctrico muy elevado, se continúa el análisis hacía las zonas de menor potencia en la planta según sea pertinente. A continuación, se secciona la planta de manera que se puedan identificar las áreas más críticas, facilitando el trabajo del siguiente capítulo.

En este trabajo se espera que el análisis sea lo más cercano a la realidad posible, por lo que se busca que todas las configuraciones de las protecciones a estudiar se encuentren actualizadas a la fecha, pero en algunos casos resulta más complicado de recopilar, como por ejemplo cuando son secciones que pertenecen a la subestación, o equipos que se encuentren energizados, por lo que se decide utilizar los diversos estudios disponibles en la planta, así como de visitas a terreno con el fin de que sea lo más fiel posible a la realidad.

4.3.1 Sección 154 a 15 kV.

De acuerdo con la figura 4.3.1.1, esta sección se encuentra comprendida desde la alimentación de la red en 154 [kV], a 15 [kV], actualmente no se puede acceder a esta área, por lo que se utilizan las configuraciones de las protecciones obtenidas por el análisis de corto circuito en 2011 [24]. En su camino hacia el Switchgear pasa por 3 barras, siendo el primero una división para alimentar al transformador principal, un pararrayos, y un transformador de potencial para poder medir los valores de voltaje en el lado del primario. Desde el secundario del transformador principal alimenta a una barra llamada parrón en 13,8 [kV], que a su vez alimenta un portal de mufas que alimenta tanto al Switchgear de 13.8 [kV] como a un transformador que alimenta al área laminado 2. Es importante mencionar que el área en 154 [kV] no se encuentra regulado por Masisa, por lo que se incluye en la simulación con valores estimativos, y no se consideran EPP a recomendar para esta sección, dado que no existe participación del personal de la planta allí. En el programa esta sección luce de la siguiente manera.

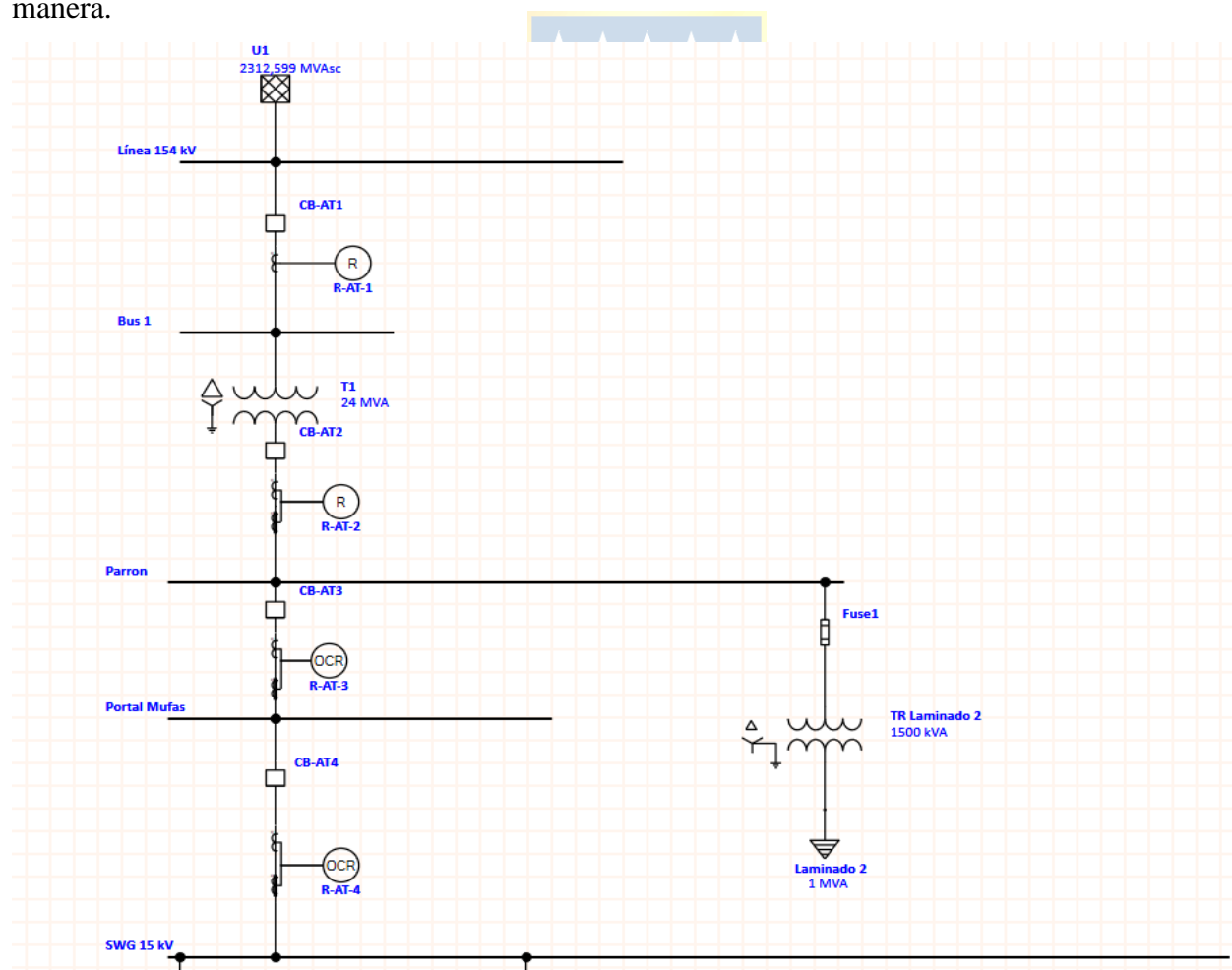


Figura 4.3.1.1. Sección 154 [kV].

Como se puede observar en el modelo presentado existen 4 relés encargados de proteger al sistema, el de la línea de 154 [kV] tiene asociado un transformador de corriente, mientras que los otros 3 tienen transformadores de corriente tanto para las fases como para las tierras. Las protecciones utilizadas se identifican por los números asociados a la norma ANSI, dentro de la planta se utilizan las protecciones de corriente de corto circuito o instantánea y de sobrecarga o sobrecalentamiento, sus números de protección son respectivamente 50 y 51. Los valores asociados a los relés se encuentran detallados en la siguiente tabla.

Tabla 4.3.1.1. Configuración de las protecciones utilizadas en la planta.

TAG	Barra asociada	Protección	I pup TC/ prim	Td	Curva	Fuente
R-AT-1	Línea 154 kV	50	140 / 2800	0,1		[25]
		51	6 / 120	0,4	IEC-Curve A	
R-AT-2	Bus 1	50	60 / 12000	0		[25]
		51	6 / 1200	0,31	IEC-Curve A	
R-AT-3	Parrón	50	48 / 9600	0	IEC-Curve A	[25]
		51	5/ 1000	0,23	IEC-Curve A	
		51G	0,5/5	8		
R-AT-4	Portal Mufas	50	71 / 17040	0,05		[26]
		50G	1,0/10			
		51	4,5 / 1080	0,1	IEC- Long Time Inverse	

El conjunto de las protecciones utilizadas debe cumplir con una serie de normas, como por ejemplo, el tiempo de operación mínimo para la protección, mientras más rápido actúe, menor será la energía liberada, lo que disminuiría el riesgo de arco eléctrico y daño del equipo. Por otro lado, para asegurar la continuidad de la planta también se debe cumplir un criterio de coordinación, en el caso de que una carga cualquiera fallara en la planta, la protección aguas arriba más cercana debiese actuar, aislando efectivamente la falla, si no existiese una coordinación, puede ocurrir que al entrar en falla un circuito no primordial de la planta, como un enchufe de alimentación en baja tensión, hiciera que la sede completa quedara sin suministro eléctrico. Para proteger al equipo se hace uso de las curvas ANSI de los transformadores, asegurando que las protecciones actúen antes de que este reciba algún tipo de daño, mientras que se ajustan los tiempos de operación para que las distintas protecciones no incurran en alguna descoordinación.

Con el fin de ilustrar los valores obtenidos se adjunta la figura 4.3.1.2, que muestra un gráfico de tiempo de operación v/s corriente recibida, así como las curvas ANSI de los transformadores asociados.

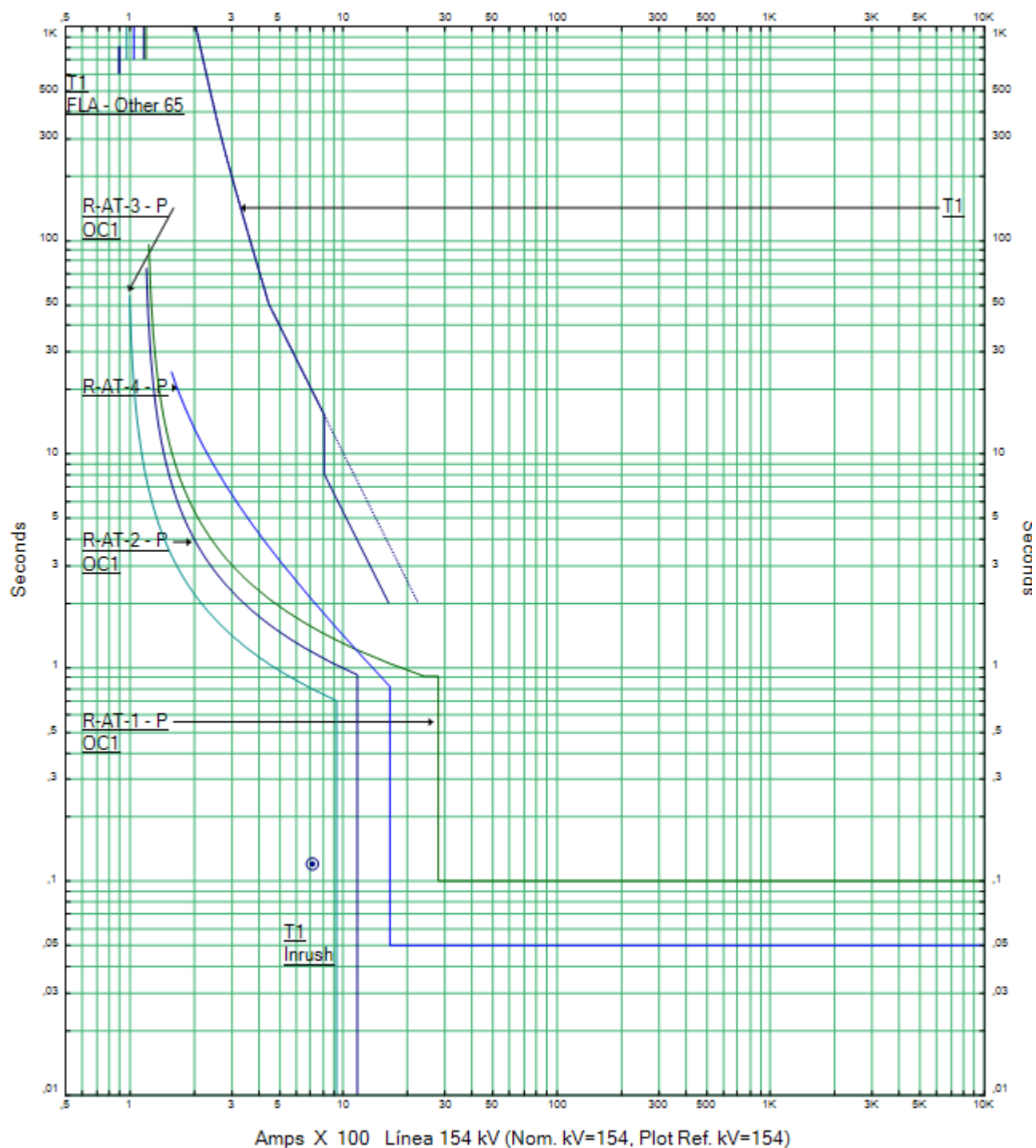


Figura 4.3.1.2 Coordinación de protecciones Sección 154 a 15 [kV].

4.3.2 Switchgear 15 kV, sala celda

La sala celda comprende el Switchgear más grande de la planta, posee 14 celdas, teniendo una libre para cualquier proyecto futuro, es de la marca AEG y gracias a los planos encontrados dentro de la misma sala eléctrica se puede acceder a sus valores de fábrica, las tres primeras celdas corresponden a, entrada, medición y servicios Auxiliares. Las celdas 4 a 13 exceptuando la número 6 corresponden a conexiones a transformadores que alimentan los distintos sectores de la planta.

Dado que en este estudio se busca categorizar las zonas de riesgo, El Switchgear de esta sección es tentativamente el punto más crítico, pues como bien se sabe de lo obtenido en el capítulo 2, la intensidad del arco eléctrico es una función de la potencia, voltaje e impedancia del transformador. Siguiendo el modelo propuesto para la planta, estas son las secciones que se tendrán en cuenta. También se incluye una imagen de estas áreas en el programa.

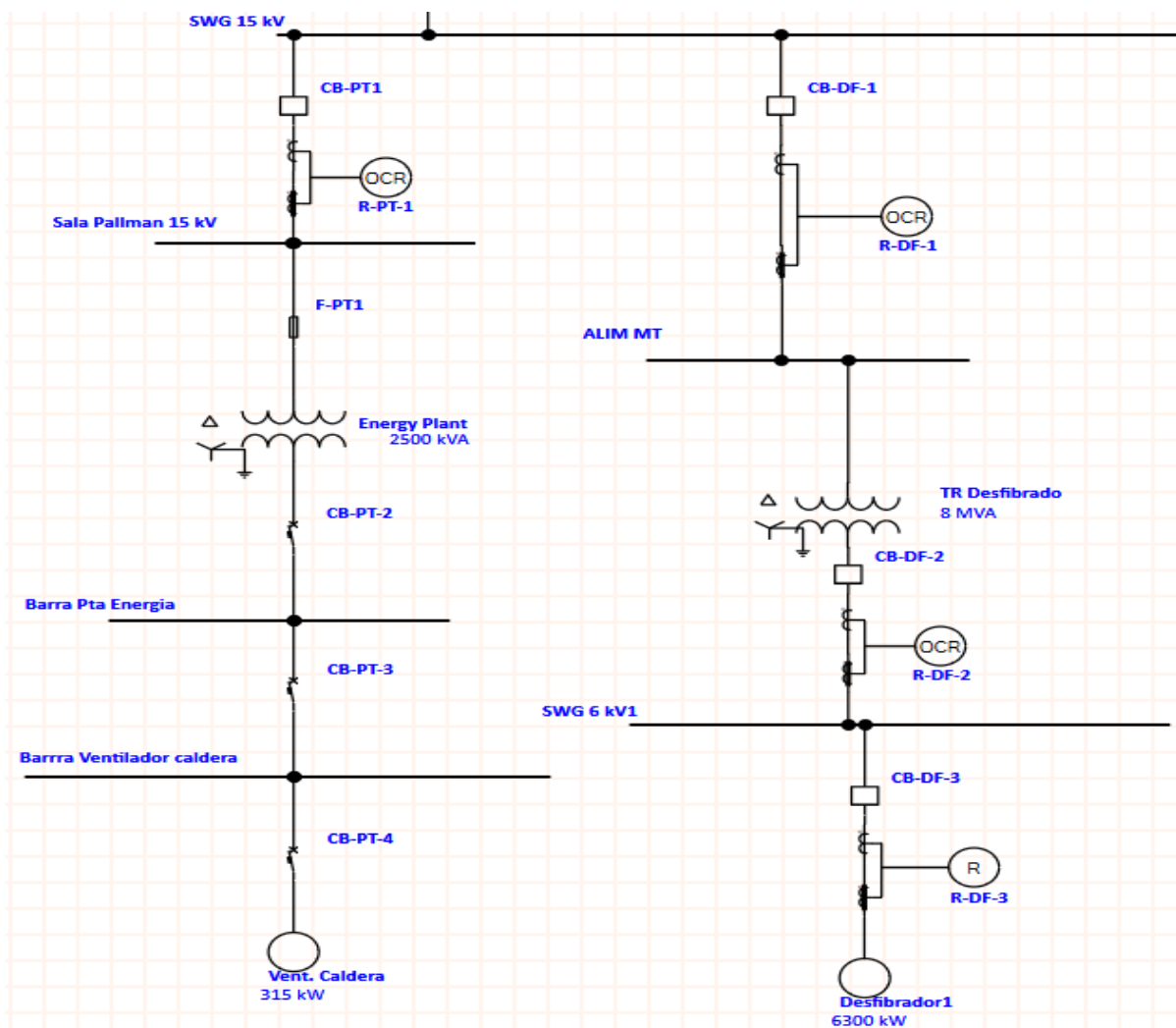


Figura 4.3.2.1. Switchgear 15 kV aguas abajo.

De acuerdo con lo establecido, se tiene 5 Relés, 3 para el área de planta de energía, y otros 2 para área de desfibrado, se tiene también 2 motores como cargas finales, en alta tensión la protección del motor de desfibrado se encuentra por el secundario del transformador, mientras que en baja tensión su protección correspondiente se encuentra en la barra de 400 V, en ambos casos se tiene una de corriente instantánea y otra de sobrecarga. Es importante mencionar que estas no son las únicas cargas en el área asociada, pero si son las con una mayor relevancia por lo que se decide omitirlas. Las configuraciones de los relés se pueden apreciar en las siguientes tablas.

Tabla 4.3.2.1. Configuración de las protecciones utilizadas en el área desfibrado.

TAG	Barra asociada	Protección	I pickup TC/Primario	Time dial	Curva	Fuente
R-DF-1	Alim MT	50	50/ 4000	0,08	IEC- Long Time Inverse	[26]
		51	4,5 / 360	0,3		
		51G	0,5/5	0,05	Definite inverse	
R-DF-2	SWG 6 kV	50	25/ 5000	0,04		Terreno
		51	4 / 800	0,09		
		51G	0,3 /36	0,09	Long time inverse	
R-DF-3	SWG 6 kV	50	11,0 / 2200	0,04	Curve 4 (p=100)	Terreno
		51	4,35 /870	2		
		51G	0,3 /36	0,09	Long time inverse	

Tabla 4.3.2.2. Configuración de las protecciones utilizadas en el área planta de energía.

TAG	Barra asociada	Protección	I pickup TC/Primario	Time dial	Curva	Fuente
R-PT-1	Sala pallman	50	71 / 5680	-	IEC- Normal Inverse	[27]
		51	4,5 / 360	-		
F-PT-1	Sala Pallman	50	160 A / 20 kA break	-	-	[22]
CB-PT-2	Sala Pallman	50	16000	-	-	Terreno
		51	2000	-	-	
CB-PT-3	Barra pta energía	50	12800	-	-	Terreno
		51	1600	-	-	
CB-PT-4	Barra ventilador caldera	50	7560	-	-	Terreno
		51	630	10s @ 6Iref	-	

Con los valores recopilados, es posible graficar las curvas de coordinación de protecciones, esto se ve en las figuras 4.3.2.2 y 4.3.2.3.

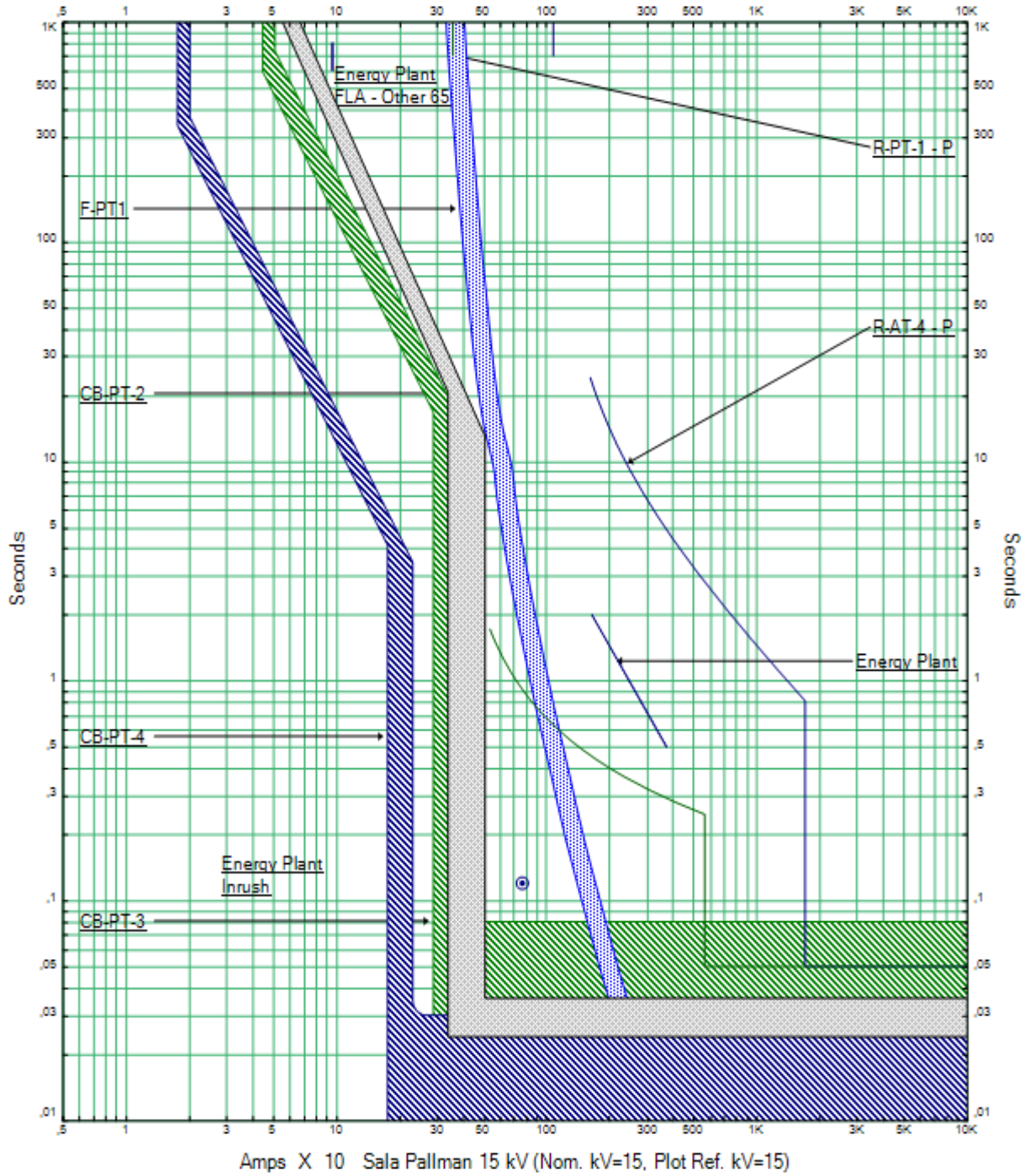


Figura 4.3.2.2 Coordinación de protecciones Sección Planta Energía.

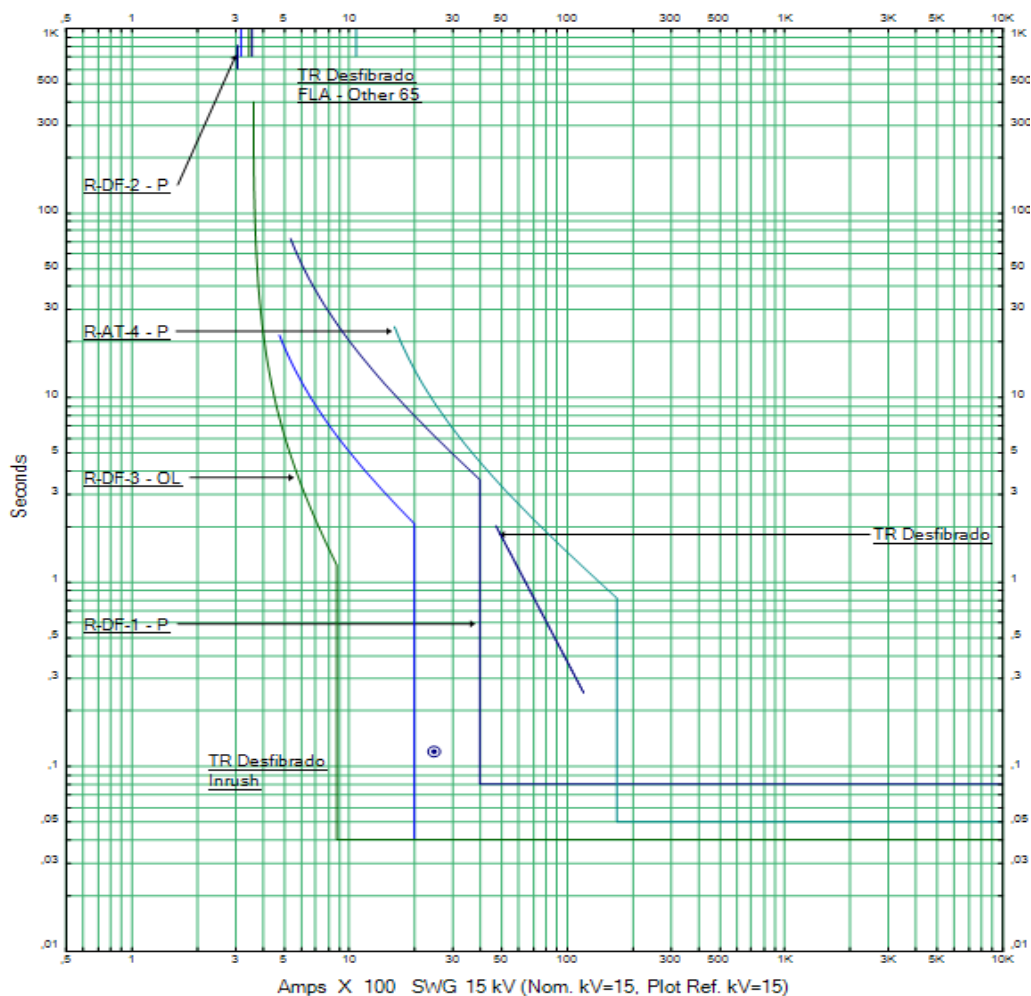


Figura 4.3.2.3 Coordinación de protecciones Sección planta Desfibrado.

4.4 Resultados teóricos

Con el fin de minimizar cualquier error que se hubiese cometido en el presente estudio, sabiendo que estos pueden tener algún tipo de impacto negativo en la integridad de cualquier persona que fuese a intervenir en los equipos de la planta Masisa Mapal, se hace necesario corroborar la información obtenida, en este caso realizando un apartado en donde se aplican las ecuaciones esbozadas en el capítulo 2, con el fin de compararlos con los resultados obtenidos vía simulación. Dado que los valores de potencia, estado de las protecciones y dimensiones correspondientes de las celdas estudiadas son parte íntegra de la planta Mapal, se espera que los cálculos realizados en esta sección tengan valores cercanos o muy cercanos a los entregados por ETAP.

Los cálculos se realizan teniendo los 3 transformadores mencionados en las secciones 4.2.1 y 4.2.2, sus valores de corto circuito son calculados utilizando la ecuación (2.2) esbozada en el punto 2.3. Los resultados se detallan en la siguiente tabla.

Tabla 4.4.1. Valores de corriente corto circuito transformadores a estudiar.

Transformador	Impedancia transformador [%]	Potencia [kVA]	Voltaje primario [V]	Voltaje secundario [V]	Corriente corto circuito secundario [kA]
T1	5,5	24000	154000	15000	16,7956
Energy Plant	5,84	2500	15000	400	61,7883
TR Desfibrado	6,5	8000	15000	6000	11,8431

Teniendo estos valores, se deben estudiar las distintas barras del sistema, si bien se puede analizar los valores de energía incidente en todas las barras, el fin del estudio es la seguridad de las personas, por lo que se tiene en cuenta solamente aquellas a las que tenga acceso personal encargado de realizar alguna labor en las cercanías de estos equipos. Tal como se expresa en el presente capítulo, la primera barra identificable para estudiar es la de la sala celda en 15 [kV], en el área de planta de energía, tanto la barra planta de energía como la barra ventilador caldera se encuentran en una sala eléctrica, resguardadas por una celda, en el área de desfibrado se tiene como estudio el Switchgear en 6 [kV], definiendo así cuáles son los puntos críticos por estudiar.

En base a las corrientes de corto circuito, se utilizan las ecuaciones (2.5), (2.6) y (2.7), dependiendo del voltaje del sistema, para el tiempo de despeje de la falla se toma en cuenta la protección inmediatamente aguas arriba de la barra correspondiente. Para el cálculo de la frontera de arco eléctrico, se considera la ecuación (2.5), con una energía incidente de 1,2 [cal/cm²]. Los resultados quedan expresados en la siguiente tabla.

Tabla 4.4.2. Energía incidente en barras a estudiar.

Barra	Corriente corto circuito [kA]	Voltaje [V]	Distancia a la fuente del arco [cm]	Tiempo de despeje [s]	Energía incidente [cal/cm ²]	Distancia de frontera arco eléctrico [m]
SWG 15 kV	16,7956	15000	45	0,05	4,9329	0,7742
Sala Pallman 15 kV	16,7956	15000	45	0,05	4,9329	0,9124
Barra pta energía	61,7883	400	45	0,036	2,7375	0,6160
Barra ventilador caldera	61,7883	400	45	0,036	2,7375	0,6160
Alim MT	16,7956	15000	45	0,08	7,8927	1,1541
SWG 6 kV	11,8431	6000	45	0,04	1,1131	0,4334

4.5 Simulación

Entregando la información requerida al programa se puede realizar una simulación de arco eléctrico en las barras a estudiar, en primer lugar, para las corrientes de corto circuito se tiene que los resultados por barra son los siguientes:

Tabla 4.5.1. Energía incidente en barras a estudiar.

Barra	Voltaje [kV]	Corriente de corto circuito [kA]	Aporte aguas arriba [kA]	Aporte aguas abajo [kA]
Linea 154 kV	154	8,8	8,67	0,13
Bus 1	154	8,8	8,67	0,13
Parron	15	16,598	15,156	1,443
Portal Mufas	15	16,599	15,156	1,443
SWG 15 kV	15	16,599	15,156	1,443
Sala pallman 15 kV	15	16,599	16,511	0,088
Barra Pta energía	0,4	64,234	60,739	3,495
Barra Ventilador caldera	0,4	64,234	60,739	3,495
ALIM MT	6	16,599	15,244	1,355
SWG 6 kV	6	14,695	9,786	4,909

En el anexo B se puede apreciar una figura con todos los valores de corriente y la dirección de esta.

Una vez completado el análisis de los niveles de corto circuito, se puede observar cuales son los niveles de energía incidente según el análisis realizado en ETAP, esto queda resumido en la siguiente tabla.

Tabla 4.5.2. Energía incidente en barras a estudiar entregados por simulación.

Barra	Corriente corto circuito [kA]	Voltaje [V]	Tiempo de despeje [s]	Energía incidente [cal/cm ²]	Distancia de frontera arco eléctrico [m]	Protección que despeja
SWG 15 kV	14,87	15000	0,036	2,7230	0,6890	R-AT-3
Sala Pallman 15 kV	14,87	15000	0,036	2,7230	0,6890	R-AT-3
Barra pta energía	27,91	400	0,036	3,9000	0,8240	CB-PT-2
Barra ventilador caldera	27,91	400	0,036	3,9000	0,8240	CB-PT-2
Alim MT	14,87	15000	0,036	1,3760	0,5300	R-AT-3
SWG 6 kV	12,99	6000	0,04	1,9790	0,7830	R-DF-2

En la industria se puede dar la ocasión excepcional de que por mal funcionamiento o para priorizar la continuidad en la producción de la planta, las protecciones eléctricas u otros equipos deban ser deshabilitados, si bien esta práctica no es recomendada, es importante tener la información de que tanto cambian los niveles de energía incidente en este caso hipotético, por ello en la siguiente tabla se

detallan los niveles de energía incidente al ser deshabilitadas las protecciones R-AT-3, CB-PT-2 y R-DF-2.

Tabla 4.5.3. Energía incidente en barras a estudiar entregados por simulación caso hipotético de estudio

Barra	Corriente corto circuito [kA]	Voltaje [V]	Tiempo de despeje [s]	Energía incidente [cal/cm ²]	Distancia de frontera arco eléctrico [m]	Protección que despeja
SWG 15 kV	14,87	15000	0,036	2,7230	0,6890	R-AT-2
Sala Pallman 15 kV	14,87	15000	0,036	2,7230	0,6890	R-AT-2
Barra pta energía	27,91	400	1,439	130,7680	4772	R-PT-1
Barra ventilador caldera	27,91	400	0,08	8,6670	1,2280	CB-PT-3
Alim MT	14,87	15000	0,036	1,3760	0,5300	R-AT-2
SWG 6 kV	12,99	6000	2,099	69,243	35,791	R-AT-2



Capítulo 5. Análisis de resultados

5.1 Introducción

El presente capítulo busca sistematizar los resultados obtenidos a lo largo del capítulo anterior, compararlos, y explicar diferencias entre los resultados teóricos y entregados por software, además se contemplan otros puntos importantes para la planta como coordinación de protecciones, recomendaciones y tiempos de operación.

Antes de clasificar las áreas con sus respectivos equipos de protección, es importante mencionar que el enfoque de este trabajo es la seguridad de las personas, y los EPP son la última línea de defensa, por lo que se debe asegurar que todas las medidas de seguridad anteriores sean cumplidas, en primer lugar que los valores de energía incidente dependen de la distancia al cuadrado, y estos serán válidos siempre y cuando no se exceda la distancia de trabajo permitida durante el mantenimiento, pues si se toma en cuenta para los resultados que se trabaja a 22 centímetros en el área SWG 15 kV, se tendrá una energía incidente de 25 [cal/cm²] y el equipo de protección ya sería de otro rango de trabajo. De igual manera la energía incidente depende de las protecciones, por lo que debe asegurarse que estas se encuentren actualizadas y en buen estado. El tiempo que demore la protección en aislar la falla es directamente proporcional a la energía incidente que ve la persona inmediatamente cercana a esta.

5.2 Niveles de cortocircuito simulados

Con respecto a la tabla 4.5.1, se puede observar que el corto circuito en la línea de 154 [kV] es mucho mayor a lo que aporta el transformador de distribución T1, esto es porque la red eléctrica tiene su propio aporte de corriente al cortocircuito, bajo la información proporcionada por el coordinador eléctrico nacional se sabe que este valor corresponde 8,67 [kA], por lo que el aporte de corriente tiene sentido matemático. Aguas abajo existe una corriente de corto circuito de 0,13 [kA], correspondiente al aporte de corriente de los motores presentes en la simulación, en las barras definidas a estudiar se puede apreciar que los niveles de corto circuito se encuentran en niveles muy cercanos a los obtenidos teóricamente, lo cual está dentro de lo esperado.

5.3 Niveles de energía incidente simulados

En la barra ventilador planta de energía se puede notar que hay un aporte de 3,495 [kA] aguas abajo, correspondiente al motor ventilador caldera de 315 [kW], esta es menor a la corriente nominal del transformador, por lo que la corriente de corto circuito arriba se ve cambiada únicamente por la razón de transformación en los transformadores. Lo antes mencionado no ocurre de igual manera en el Switchgear de 6 [kV], pues su aporte aguas abajo corresponde a 4,909 [kA], sin embargo, en la barra ALIM MT esta corriente es de 1,355 kA, la corriente de 4,909 kA en 6 kV tendría un correspondiente de 1,9636 kA, lo cual se encuentra ligeramente alejado, esta pérdida se puede justificar en las pérdidas propias del transformador, así como que este se satura cuando se encuentra en niveles de corriente mayores a los nominales, cambiando efectivamente los valores de impedancia de este.

En primer lugar, es importante notar que los niveles de calorías por centímetro cuadrado son ligeramente menores a los resultados teóricos, esto se debe en gran medida a que ETAP trabaja bajo el marco de normas IEEE 1584, la cual como se ve en la sección 2.7, tiene formas de calcularse tanto para celdas cerradas, como para lugares abiertos.

Dada la naturaleza del caso de estudio, el arco eléctrico ocurre cuando se le está realizando mantenimiento al equipo, es decir, tiene su puerta abierta, por lo que todo impacto que pudiese absorber el interior de la celda queda dirigido hacia la salida más cercana. En términos matemáticos se opta por considerar este caso como si fuera un entorno abierto. Se podría argumentar que el caso que se está estudiando es peor que si estuviese en el aire libre, pero no resulta tan trivial porque en un entorno totalmente abierto se tiene mayor disponibilidad de oxígeno que podría traer peores consecuencias al aportar al conocido triángulo del fuego.

Los niveles de calorías por centímetro cuadrado en el área de baja tensión son ligeramente mayores a los calculados, esto ocurre debido a que en baja tensión la corriente de arco eléctrico es mucho menor a la corriente de falla en cortocircuito trifásico, lo que significa que los tiempos de operación son mayores, aumentando la energía incidente. Esto puede ocasionar problemas en la industria, dado que resulta engorroso coordinar a los equipos de manera que puedan ofrecer continuidad sin descuidar los niveles de energía incidente, sin embargo, no es problema en el caso a estudiar dado que los niveles de energía incidente no resultaron en un cambio de energía incidente significativo como para subir de categoría en la recomendación de EPP. En circunstancias en que los valores resultarán en EPP de distintos rangos se opta por el enfoque más conservador.

La frontera de arco eléctrico calculada por software tiene un valor ligeramente diferente al calculado en la sección de resultados teóricos, por lo que se escoge el resultado de mayor magnitud al tener un enfoque más seguro.

5.4 Caso hipotético de protecciones deshabilitadas

En la industria una práctica común que se realiza es la desconexión de algunas protecciones que detienen el funcionamiento habitual de estos dispositivos, con la finalidad de priorizar la continuidad de servicio y de producción. Si bien no es una práctica que se recomiende, como es ampliamente realizada es conveniente tener la mayor información posible antes de tomar una decisión de este tipo, por lo que en el presente punto del capítulo se analiza la situación de desconexión de algunas protecciones estratégicas.

En el caso hipotético en que las protecciones R-AT-3, CB-PT-2 y R-DF-2 fueran deshabilitadas, se identifica un aumento significativo en los niveles de energía incidente en la barra de ventilador caldera, barra pta energía y SWG 6 kV, siendo este último el más preocupante. En el caso de la barra SWG 6 kV, se ha registrado una corriente de arco eléctrico de 12,99 [kA], sin embargo, es importante destacar que este valor corresponde al aporte total considerado por los motores y el banco de condensadores, así como el aporte desde la red eléctrica. El tiempo de despeje medido por las protecciones es de 2,099 segundos, lo cual resulta en una energía incidente de 69 [cal/cm²]. Este aumento considerable en la energía incidente implica la necesidad de revisar y actualizar los elementos de protección personal requeridos para garantizar la seguridad y la integridad del personal de la planta.

En cuanto a la barra planta de energía, también se ha observado un incremento en los niveles de energía incidente, pasando de 3,9 a 8,67 [cal/cm²] en la barra ventilador caldera y de 3,9 a 130 [cal/cm²] en la barra planta de energía. Esto implica un cambio de categoría de protección, pasando de la categoría 2 a la categoría 3. El caso específico de las 130 [cal/cm²] resulta muy alarmante, pero entre la protección R-PT1 y CB-PT2, específicamente en el secundario del transformador existe otra protección adicional de la cual no se pudieron rescatar los parámetros, pero con el accionar de ella, se estima que este valor debiese ser mucho más bajo (en el rango de la categoría 3). Se vuelve a destacar la importancia de abordar esta situación con la seriedad requerida, priorizando la seguridad del equipo humano.

5.5 Recomendaciones por energía incidente

Ante los resultados obtenidos del estudio sobre los niveles de energía incidente, se plantea la necesidad imperante de tomar medidas inmediatas para salvaguardar la seguridad y bienestar del personal involucrado. En este sentido, se recomienda implementar una serie de acciones preventivas y correctivas para mitigar los riesgos identificados.

En primer lugar, se sugiere llevar a cabo una revisión exhaustiva de los equipos de protección personal utilizados por el personal en las áreas y situaciones donde se ha registrado un aumento significativo en los niveles de energía incidente. Es esencial garantizar que estos equipos estén en pleno cumplimiento de las normativas y regulaciones vigentes, así como de las nuevas directrices establecidas a partir de los resultados del estudio. La revisión debe abarcar aspectos como la calidad, la eficiencia y la adecuación de los equipos de protección personal actuales para hacer frente a los niveles de energía incidente identificados. Este punto se profundiza en el capítulo 6: Categorización de zonas de riesgo.

Además, recomienda tener en cuenta la importancia de brindar capacitación adicional al personal sobre los riesgos asociados a los arcos eléctricos y las medidas de protección adecuadas que deben seguirse en cada caso. Es fundamental que el personal esté plenamente consciente de los peligros potenciales que implica la exposición a niveles elevados de energía incidente, así como de las precauciones y procedimientos de seguridad necesarios para prevenir accidentes y lesiones. La capacitación debe incluir información actualizada sobre las últimas normativas y mejores prácticas en materia de seguridad eléctrica, así como ejercicios prácticos y simulaciones de situaciones reales para reforzar la comprensión y la aplicación de los conocimientos adquiridos.

Adicionalmente, se recomienda establecer una comunicación clara y efectiva con todo el personal, fomentando un ambiente de trabajo seguro y promoviendo la conciencia de los riesgos eléctricos. Esto implica la creación de canales de comunicación abiertos donde el personal pueda informar sobre cualquier situación o preocupación relacionada con la seguridad eléctrica, y se promueva una cultura de seguridad en la que todos los miembros del equipo se sientan responsables y comprometidos con la protección mutua.

Por último, y de manera propia al área de mantenimiento, se enfatiza la necesidad de realizar un seguimiento continuo y una evaluación periódica de las medidas implementadas. La seguridad eléctrica es un aspecto dinámico que requiere una atención constante y una mejora continua. Es importante monitorear regularmente los niveles de energía incidente, realizar inspecciones de los

equipos de protección personal y revisar los procedimientos de seguridad existentes para asegurar su eficacia y eficiencia.

5.6 Coordinación y tiempo de operación de protecciones

Los resultados teóricos y simulados revelan diferencias en el tiempo de operación de las protecciones, y estas discrepancias pueden atribuirse a dos razones principales. En primer lugar, en la sección teórica del análisis no se considera el tiempo de acción propio de las protecciones, el cual puede variar según el tipo específico de protección utilizado. Sin embargo, al utilizar el software ETAP, que cuenta con una biblioteca de protecciones, se pudo obtener una estimación más precisa. Por lo general, se puede hablar de un tiempo de operación de aproximadamente 1 ciclo o 20 milisegundos. La segunda razón que contribuye a la diferencia en el tiempo de operación es que la protección que actúa y despeja la falla no necesariamente es la ubicada inmediatamente aguas arriba. Esto se observa en los casos de las barras SWG 15 kV, Sala pallman 15 kV y Alim MT, donde la protección responsable de dar la orden de apertura aguas arriba es la protección R-AT-3.

Si bien un tiempo de acción más rápido en las protecciones implica una menor energía incidente, es importante considerar tanto la seguridad de las personas como la continuidad de la producción de la planta. Por lo tanto, se debe buscar niveles aceptables de energía incidente y una coordinación efectiva en la operación de las protecciones, de modo que un fallo en una sección de la planta no afecte negativamente a la planta en su totalidad, desenergizándola por completo en el peor de los casos.

Para asegurar una correcta coordinación de protecciones, deben cumplirse dos condiciones. En primer lugar, la protección inmediatamente aguas arriba del circuito en falla debe despejar dicha falla. Esto significa que los tiempos de operación de todas las protecciones ubicadas aguas arriba del circuito deben ser mayores que el de la protección inmediatamente superior, para un mismo nivel de corriente a lo largo de toda la curva. En otras palabras, la protección de nivel superior debe estar desplazada hacia arriba y hacia la derecha en comparación con la protección anterior. En segundo lugar, el tiempo de acción de la protección debe ser el menor posible para garantizar una protección adecuada de los equipos y cumplir con los requisitos mínimos de tiempo de operación establecidos por la norma técnica chilena de calidad y seguridad de suministro.

Al cumplir estas condiciones, se puede establecer un esquema de protección confiable y coordinado, asegurando la seguridad e integridad del sistema eléctrico. Es fundamental analizar y

configurar cuidadosamente los ajustes de protección de acuerdo con los requisitos establecidos por la Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio.

Observando la figura 4.3.1.2 se puede apreciar que existe un cruce entre las curvas de las protecciones R-AT-1 y R-AT-4. Este cruce ocurre a los 1145 [A], con 1,22 segundos referidos a 15 [kV]. Para corrientes menores a este valor, la primera protección en actuar sería R-AT-1, lo cual no es deseable. Sin embargo, para valores de corriente mayores, el sistema muestra una coordinación adecuada.

Para mejorar la coordinación, se recomienda reducir la corriente de pickup de la protección 51 a un valor inferior a 1000 [A], que corresponde al valor de R-AT-3. Además, se sugiere reducir la corriente de pickup de la protección 50 a un valor inferior a 9600 [A], que es la corriente de acción instantánea de R-AT-3. A pesar de estos ajustes, aún existe una descoordinación debido al retardo mínimo ofrecido por la protección R-AT-4 SPAJ 140C, que es de 0,04 segundos y provoca un cruce de curvas en la acción instantánea.

En la figura 4.3.2.3 se observa un cruce entre las curvas R-DF-1 y R-AT-4 a 42150 [A], para solucionar este problema, se sugiere aumentar el retardo de la protección 50. Además, las protecciones R-DF-2 y R-DF-3 tienen el mismo tiempo de retardo, lo que hace que sus curvas se junten. La solución a esto es aumentar el tiempo de retardo de la protección aguas arriba, que corresponde a R-DF-2. En el tiempo largo, estas dos protecciones también tienen sus corrientes de pickup cruzadas, lo cual de igual manera genera una descoordinación que podría ser solucionada.

En la figura 4.3.2.2 se observa la presencia de un fusible, el cual es efectivo para proteger en tiempos cortos, pero menos efectivo en tiempos largos debido a las corrientes de operación elevadas, por lo tanto, no se toma en cuenta para el análisis de coordinación.

En el área de baja tensión de la figura 4.3.2.2, los elementos responsables de la apertura del circuito están agrupados y pueden actuar en cualquier tiempo dentro de esa área. Se observa un cruce en el tiempo largo para las protecciones R-PT-1, CB-PT-2 y CB-PT-3. Para solucionar esto, se sugiere cambiar el tipo de curva de R-PT-1 por una curva del tipo IEC-Normal inverse. Los valores de las protecciones CB-PT-2, CB-PT-3 y CB-PT-4 para tiempo corto se encuentran dentro de valores aceptables.

Es importante mencionar que las curvas utilizadas en la sección de 15 [kV] son del tipo IEC-Curve A, similar a la Normal inverse, mientras que en el área de desfibrado son del tipo Long time Inverse. Estos tipos de curva pueden generar descoordinaciones cuando las protecciones tienen valores de pickup similares en el tiempo largo, por lo tanto, no es posible solucionar todas las descoordinaciones

con un único cambio de protecciones. Se recomienda realizar un estudio de coordinación de protecciones que asegure el correcto funcionamiento, teniendo en cuenta los tiempos de operación y cómo afecta la energía incidente.

Para presentar lo anteriormente mencionado de manera ordenada, se adjunta una tabla en el anexo C, en la cual se presentan las recomendaciones y observaciones realizadas a lo largo de la presente sección, sus valores de corriente son referidos a 15 [kV].

En el proceso de visitas a terreno, se menciona la situación en la que el motor de desfibrado de 6300 [kW] utiliza un autotransformador para regular la corriente de partida. En ocasiones, este autotransformador no funciona adecuadamente, lo que provoca la activación de protecciones aguas arriba que no deberían actuar. En este caso, se estima que la corriente nominal del motor es de 606 [A] y una partida directa sería aproximadamente 6 veces ese valor, es decir, 3637 [A], referidos a 6 [kV], con una duración de 4 a 10 segundos. Ante esta situación, la primera protección en actuar sería R-DF-3 en 0,04 segundos, seguida de R-DF-2 en 3,05 segundos y R-AT-3 en 4 segundos. Esto indica que el sistema no está preparado para permitir una partida directa del motor, ya que dejaría al motor expuesto a vulnerabilidades indeseadas y si las protecciones correspondientes no se activan, la planta completa podría quedarse sin energía desde la subestación. Como posible solución, se plantea reemplazar el autotransformador por un partidor suave o variador de frecuencia, que ofrecen mayor confiabilidad y suavidad en el arranque utilizando electrónica de potencia.

Por último, se recomienda realizar mantenimientos regulares y pruebas periódicas de los dispositivos de protección para verificar su correcto funcionamiento y cumplimiento de los tiempos de operación especificados.

Capítulo 6. Categorización de zonas de riesgo

6.1 Introducción

En este capítulo se realiza la categorización de las zonas de riesgo en la planta Masisa Mapal, para ello se utiliza la información expuesta en el capítulo 1. De acuerdo con lo dispuesto por la norma NFPA 70E y las facultades en ETAP se procede a disponer los etiquetados para las distintas áreas, con la información relevante a tener en cuenta para un desarrollo del trabajo seguro, además se procede a estudiar los EPP presentes en la planta y los tipos de condiciones a las que son resistentes. Con la información recopilada se procede a recomendar nuevos EPP, tomando en cuenta lo disponible en el mercado, escogiendo a Comulsa de ser posible. Entendiendo que el tipo de trabajo a realizar en las áreas estudiadas puede cambiar el nivel de peligro, se dispone de una tabla guía con información de cuando es necesario utilizar las medidas de protección recomendadas en el presente capítulo.

6.2 Elementos de protección personal actuales

En la actualidad los trabajadores del área eléctrica en planta Masisa Mapal tienen como elementos de protección personal el uso de chaqueta y pantalones de trabajo 100% algodón, este material se caracteriza por ser antiestático, además al contrario de las telas sintéticas, al encenderse no se pega a la piel, lo cual de no ser así podría ocasionar daños severos. El nivel de protección de la tela depende del tipo de tratamiento que se le realice, la información presentada por Masisa puede ser resumida en la tabla 4.3.2.2.

En protección facial para los trabajadores se encuentra únicamente los anteojos de seguridad, no existiendo una protección completa para la cara en los elementos de protección personal.

Los guantes vienen certificados en espesor, longitud y resistencias mecánicas, pero ninguna prueba de resistencia ante la abrasión o niveles de incidencia de arco eléctrico como los especificados en la norma ASTM F2675.

Los zapatos de seguridad tienen un índice de protección resistente a hidrocarburos y aislante ante tensiones de contacto menores a 600 [V], son de cuero Nobuck, esto no significa que sean resistentes al arco, al no haber una norma que lo certifique y ser el mismo de uso general para todo el personal de la planta, se concluye que es poco probable que tengan una resistencia al arco eléctrico comprobable a través de las normas ASTM F2413-18 y ASTM F1959.

En protección auditiva tienen audífonos que reducen el sonido de manera significativa en entornos de trabajo con niveles de decibeles relativamente altos, por lo que no debiese haber mayores problemas en este entorno.

Tabla 4.3.2.2. Configuración de las protecciones utilizadas en el área planta de energía.

Tipo de protección	Nombre	Normativas asociadas	Descripción
Auditiva	Fono Peltor 3M	-	Disminuye frecuencias de resonancia, resistencia a golpes, barrera contra el ruido [28].
Casco	V-Gard Hat	Ansi Z89.1 - 2014 Industrial head Tipo 1 protection Nch 461 Clase A tipo 2.	Protección contra alto impacto, lluvia, llama, salpicaduras de sustancias y soportan fugas de hasta 8 mA a 15000 V [29].
Guantes	Guante cabritilla varios	Nch 1115 - 1996 Nch 1252/1 - 1996	Resistencia desgarramiento, contenido humedad menor a 18%, ph mínimo 3.5, materia grasa entre 6 y 15 % [30].
Guantes	Guante Ninja explorer	EN 388:2003 EN 374-2:2003 EN 374-3:2003	Protección contra riesgos mecánicos, protección contra químicos y microorganismos [29].
Guantes	Eagle varios	EN 388:2003 EN 420:2003	Protección contra riesgos mecánicos, pruebas generales y métodos de prueba [29].
Lentes	MSA Ergo Lynx	Ansi Z87.1 2003 + alto impacto EN166:2001	Testeado en impactos equivalentes a 164 km/h [29].
Zapatos	Proflex	NCh 772/1. of 92 NCh2147/2. of 92 NCh 1350. of 96	Zapatos de seguridad generales, protección contra riesgos especiales, resistente a hidrocarburos, aislante [30].
Chaleco	-	-	100% algodón, antiestático, no se pega a la piel cuando se quema.
Pantalones	-	-	100% algodón, antiestático, no se pega a la piel cuando se quema.

6.3 SWG 15 kV, Sala pallman 15 kV y Alim MT

De acuerdo con la información entregada por el capítulo 4 se puede clasificar las distintas áreas presentes en la planta, la barra SWG en 15 kV con un valor de corriente de corto circuito de 14,868 [kA], siendo esta despejada por la protección CB-AT-3, tiene un valor de 2,72 [cal/cm²], lo que significa que debe utilizarse un equipo de protección de nivel 2, a su vez su frontera de arco eléctrico es de 0,689 [m]. Frente a esto y de acuerdo con lo establecido en la sección 1.3 se recomienda el uso apropiado de:

- Camisa de mangas largas y pantalones resistentes al arco u overol (mameluco) resistente al arco.
- Protector facial resistente al arco o capucha del traje de protección contra relámpago de arco.
- Chaqueta, parka, prendas impermeables o forros de cascos con valor de resistencia al arco (SSN).
- Casco.
- Anteojos de seguridad o gafas de seguridad (SR).
- Protección auditiva tapones.
- Guantes de cuero para industrial.
- Calzado de trabajo de cuero (SSN).

De acuerdo con la norma NFPA70E se recomienda entregar esta información de forma resumida y ordenada, esto se presenta a continuación.

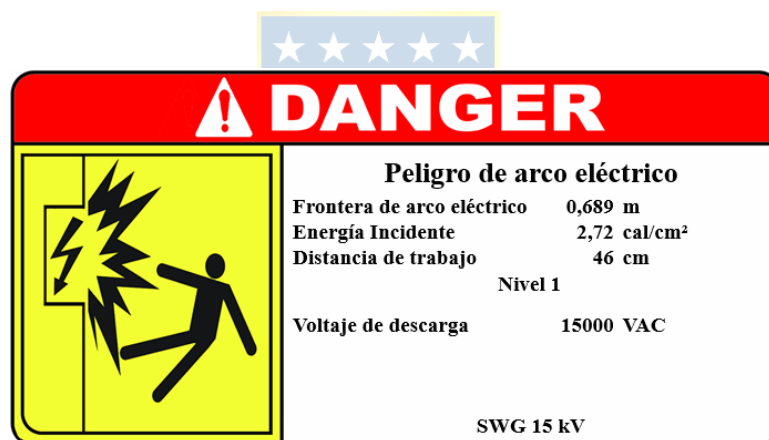


Figura 6.3.1 Etiqueta de peligros barras 15 kV.

6.4 Área planta de energía.

De manera similar, en la sección planta de energía las barras planta de energía y barra ventilador caldera tienen un nivel de [cal/cm²] similar, siendo este de 3,9, lo que correspondería a un nivel de protección 1, su frontera de arco eléctrico sería de 0,82 metros, la protección que despeja la falla es CB-PT-2 para ambos casos. El nivel de protección establecido sigue siendo el mismo que para la sala Switchgear en 15 kV.

La etiqueta de seguridad correspondiente a esta área sería, por lo tanto:



Figura 6.4.1 Etiqueta de peligros barra pta energía y barra ventilador caldera 0,4 [kV].

6.5 Área desfibrado.

En la sección área desfibrado hay un nivel energía incidente similar, siendo este de 1,979 [cal/cm²], lo que correspondería a un nivel de protección 1, su frontera de arco eléctrico sería de 0,783 metros, la protección que despeja la falla es R-DF-2.

Las etiquetas de peligro para estas serían, por tanto,



Figura 6.5.1 Etiqueta de peligros barra SWG 6 kV.

6.6 Recomendaciones de EPP.

Siendo el enfoque de este estudio la categorización de zonas de seguridad, se sugiere por tanto la obtención de equipo resistente al arco eléctrico correspondiente a la categoría 2 para el personal eléctrico en la planta Masisa Mapal, se recomienda la obtención de ropa que se encuentre certificada por las normas correspondientes, en el sitio web de Comulsa [31] se pueden encontrar los siguientes artículos de ropa:



Figura 6.6.1 Camisa resistente al arco categoría 9,7 [cal/cm²].



Figura 6.6.2 Pantalones resistente al arco categoría 9,5 [cal/cm²].



Figura 6.6.3 Kit resistente al arco categoría 10 [cal/cm²].



Figura 6.6.4 Guantes resistente al arco categoría 11 [cal/cm²].

Las recomendaciones realizadas por supuesto no son de carácter obligatorio y si es que planta Mapal, Masisa tuviese un convenio con alguna otra empresa que ofrezca el equipo de protección personal necesario para la planta es libre de hacerlo, se recomienda que se asegure que se encuentren certificadas en las normas mencionadas en la introducción del presente capítulo y certifiquen una energía incidente correspondiente a la determinada en el informe.

Los EPP son una medida de protección ante riesgo de arco eléctrico, y por lo general no resultan cómodos de usar en su totalidad, por lo que resulta lógico analizar las situaciones en las que se debiese utilizar, esto es cuando existe un riesgo de arco eléctrico. La norma NFPA70E [3] detalla todas las situaciones en las que se debiese ocupar EPP, esto queda adjunto en el anexo D.

Es importante mencionar que la recomendación de EPP categoría 2 es en base a los resultados de la sección 5.2 y 5.3, lo cual sería el mínimo recomendado, si dentro de los enfoques de la empresa se busca emplear una sobreprotección, parece tentadora la opción de adquirir equipamiento de categoría 4, correspondiente a 40 [cal/cm²], esto específicamente para las zonas de media tensión en la planta. Este equipamiento permite una sobreprotección, cuyo único impacto negativo es hacia la comodidad de la persona. Como bien se menciona en la sección 5.4, el caso hipotético de estudio, los niveles de energía incidente si aumentan considerablemente en 6 [kV], por lo que finalmente se recomienda considerar además elementos de protección personal de categoría 4, priorizando así la seguridad de los trabajadores cuyas actividades pudiesen tener algún riesgo de arco eléctrico en media tensión.

Tabla 6.6.1 Categoría de EPP basado en los resultados obtenidos

Nombre de la barra	Energía incidente simulada [cal/cm ²]	Categoría	Energía incidente caso hipotético [cal/cm ²]	Categoría
SWG 15 kV	2,723	1	2,7230	1
Sala Pallman 15 kV	2,723	1	2,7230	1
Barra Pta energía	3,9	1	130,7680	4
Barra ventilador caldera	3,9	2	8,6670	3
ALIM MT	2,723	1	1,3760	1
SWG 6 kV	1,979	1	69,243	4
Recomendación final	Hasta 8	2	Hasta 40	4

Capítulo 7 Discusión y Conclusiones

El presente capítulo se centra en discutir las normas estudiadas y la manera en que fueron abordadas para aplicarse al entorno de trabajo presente en la planta, sus alcances, y recomendaciones a futuro que pueden mejorar la seguridad y continuidad de la planta.

De las normas estudiadas, se puede concluir que de los 19 pliegos técnicos RIC, ninguno resulta particularmente denso en cantidad de información, pero se apoyan en normas internacionales como la IEEE, IEC, NFPA y que se deban cumplir sus estándares para el tópico en particular, lo que las hace inmensamente más completas en términos de información, teniendo como objetivo el correcto funcionamiento del sistema, de los equipos, confort y seguridad de las personas por igual. De la norma NFPA70E se pudo concluir que es una norma completa, teniendo como principal objetivo la seguridad de las personas, y realizando hincapié en que los elementos de protección personal debiesen ser la última línea de defensa ante el arc flash. Habiendo identificado los posibles peligros eléctricos, se pueden establecer estrategias de eliminación, sustitución y control, para luego recomendar los EPP de la categoría en particular.

Así mismo de la norma se advierte los peligros asociados a arco eléctrico, siendo esta una verdadera explosión, que con el paso de corriente puede producir temperaturas de hasta 10.000 °C en los conductores, presión suficiente para mandar a volar a una persona, y sonidos de hasta 140 dB, concluyendo que cada uno de estos fenómenos pudiese tener consecuencias permanentes para la vida del trabajador afectado. Es por lo antes mencionado que se recomienda hacer llegar la información pertinente al personal de la planta en forma de capacitaciones y charlas de seguridad, pues la poca probabilidad de ocurrencia de una contingencia pudiese liderar a una falsa sensación de seguridad.

Del modelo de la planta se puede concluir que una simplificación en el modelo unilineal de la planta pudiese ser una buena estrategia, pero la energía incidente tal como se presenta en el capítulo 2 es directamente proporcional a la corriente de falla, al tiempo de operación de las protecciones e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, los tiempos de operación en las ramas de 400 [V] debiesen tener protecciones similares, por lo que se estima que los niveles de energía incidente deben ser de la misma categoría, pero si se quiere tener una mayor seguridad de esto, realizar un levantamiento de información en las distintas ramas puede ser una estrategia a considerar.

De los resultados obtenidos se concluye que los niveles de energía incidente están dentro de los esperados al inicio del estudio, siendo la única sorpresa los niveles de energía en baja tensión, dado que se esperaba que el mayor nivel de calorías por centímetro cuadrado se diera en la barra SWG 15

kV, por lo que se tendría a lo más niveles de energía incidente que requiriesen de un EPP de categoría 2, en el caso hipotético de estudio se encuentra que los niveles de energía incidente son mayores, por lo que si en algún momento se diera el caso que se deshabilite una protección del lado de media tensión, el EPP recomendado no sería suficiente, aquí nace la posibilidad de recomendar una sobreprotección, y disponer de EPP de categoría 4 dentro de la planta, para evitar cualquier inconveniente que pudiese ocurrir.

También se realiza la observación de que no existe una total coordinación en las curvas de protección, pudiendo incurrir en que en particular una falla en una de las cargas de la planta provocara una desenergización completa dentro de la misma, por lo que se reitera lo mencionado en la sección 5.6, que un estudio de coordinación de protecciones en específico para la rama de desfibrado podría evitar no solo que accionen antes las protecciones de la subestación, sino que también una mayor facilidad de identificar en que sección de la planta ocurrió la falla.

En conclusión y a modo de resumen, se puede decir que es fundamental encontrar un equilibrio entre niveles aceptables de energía incidente y una adecuada coordinación de las protecciones para garantizar la seguridad del personal y la continuidad de la producción en la planta. Se sugiere llevar a cabo un análisis detallado de las protecciones utilizadas, considerando tanto los tiempos de operación como la coordinación entre ellas, con el objetivo de optimizar la seguridad y la eficiencia del sistema eléctrico, así como de hacer llegar la información al personal de la planta de manera que todos puedan entender y formar un entorno de trabajo seguro.



Referencias

- [1] SEC (2020) “Reglamento de Instalaciones de Consumo de electricidad” (RIC 1 - 19)
- [2] Normativa Eléctrica Chilena - Pliegos Técnicos RIC - SEC. (s. f.). ELECTRODOMUS.
<https://electrodomus.cl/pages/pliegos-tecnicos-sec-ric>
- [3] NFPA (2018) "Electrical Safety in the Workplace" (NFPA70E-2018)
- [4] Fluke. (s. f.). Understanding the arc flash boundary. <https://www.fluke.com/en-us/learn/blog/safety/understanding-arc-flash-boundary>
- [5] ASTM International History: Founding, Timeline, and Milestones - Zippia. (2022, September 9). <https://www.zippia.com/astm-international-careers-1083942/history/>
- [6] Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE). (s.f.). ¿Qué es IEEE? Recuperado de <https://ewh.ieee.org/sb/argentina/mendoza/que%20es%20el%20ieee/que%20es%20ieee.html>
- [7] Fluke. (s. f.-a). Arc flash vs arc blast. <https://www.fluke.com/en-us/learn/blog/safety/arc-flash-vs-arc-blast#:~:text=Temperatures%20of%20an%20arc%20flash,5%2C000%20to%2035%2C000%20%C2%B0F>
- [8] Quemaduras: MedlinePlus enciclopedia médica ilustración. (s. f.). https://medlineplus.gov/spanish/ency/esp_imagepages/1078.htm
- [9] Riesgo térmico producido por arco eléctrico. (s. f.). Interempresas. <https://www.interempresas.net/Proteccion-laboral/Articulos/221192-Riesgo-termico-producido-por-arco-electrico.html>
- [10] CBSArcSafe (2016) “Arc-flash, Blast protection isn’t just a fashion statement”. https://cbsarcsafe.com/wp-content/uploads/2016/06/Arc_whitepaper_FINAL_lores.pdf

- [11] What is the difference between an arc flash and an arc blast? (s. f.). Creative Safety Supply. <https://www.creativesafetysupply.com/qa/arc-flash/what-is-the-difference-between-arc-flash-and-arc-blast>
- [12] Occupational Noise Exposure - Overview | Occupational Safety and Health Administration. (s. f.). <https://www.osha.gov/noise#:~:text=With%20noise%2C%20OSHA%27s%20permissible%20exposure,dose%20is%20cut%20in%20half.>
- [13] Savchuk, A. (2021). How Loud Is 50 Decibels | What Is 50 Decibels. Decibel Meter App | Best Digital Sound Level Meter For Your Smartphone. <https://decibelpro.app/blog/what-is-50-decibels/>
- [14] Edvard. (2022). Short circuit phenomenon you should properly understand. EEP - Electrical Engineering Portal. <https://electrical-engineering-portal.com/short-circuit-phenomenon>
- [15] Gammon, T., & Matthews, J. (2005). IEEE 1584-2002. IEEE Industry Applications Magazine, 11(1), 23-31. <https://doi.org/10.1109/mia.2005.1380323>
- [16] Masisa (s.f). Nuestra empresa, quienes somos, referente. <https://corporativo.masisa.com/nuestraempresa/#:~:text=Somos%20referente%20Latinoamericano%20en%20la,en%20los%20países%20donde%20operamos.>
- [17] Masisa (2012). Tecnología Línea MDF. Documento disponible en planta
- [18] Melamine, B. (2022). Historia de la Melamina. Best Melamine Vajillas de melamina personalizadas. <https://bestmelamine.com/post-format-image/>
- [19] Masisa (2023). Documentación proceso Laminado. Documentos disponibles en planta

- [20] Tableros aglomerados: características, desventajas y usos. (s. f.). Maderame. <https://maderame.com/clases-de-tableros/aglomerados/>
- [21] Masisa (2023). Documentación proceso Aglomerado. Documentos disponibles en planta
- [22] Masisa (2004). Diagrama unilíneal general 154/15 KV. Documento disponible en planta.
- [23] Casos de Prueba de Validación . (s. f.). <https://etap.com/es/products/quality-assurance/qa-verification-validation-cases>
- [24] Juan N. Luis M. Fabricio S. (2011). Análisis de la operación de la red eléctrica de Masisa planta mapal en el marco de la norma técnica de seguridad y calidad de servicio. Documento disponible en planta.
- [25] Elice (2022). Estudio de coordinación y ajuste de protecciones SE Mapal, NUP 2991. Documento disponible en planta.
- [26] SCS (2021). Reporte de intervención, Documento disponible en planta
- [27] SCS (2020). Reporte de intervención, Documento disponible en planta
- [28] Kupfer (s.f) Descripción orejeras 3M. Documento disponible en planta.
- [29] MSA (2016). Registro de fabricantes e importadores de elementos de protección personal. Documentos varios disponibles en planta.
- [30] CESMEC S.A (2021). Certificación titular de la marca de conformidad a MACME LTDA zapatos Proflex y guantes Cabritilla. Documentos disponibles en planta.
- [31] Comulsa Chile - Compra online. (s. f.). <https://webstore.comulsa.com/>

Anexo A. Unilíneal

A.1. Unilíneal Planta Mapal Masisa, 2004

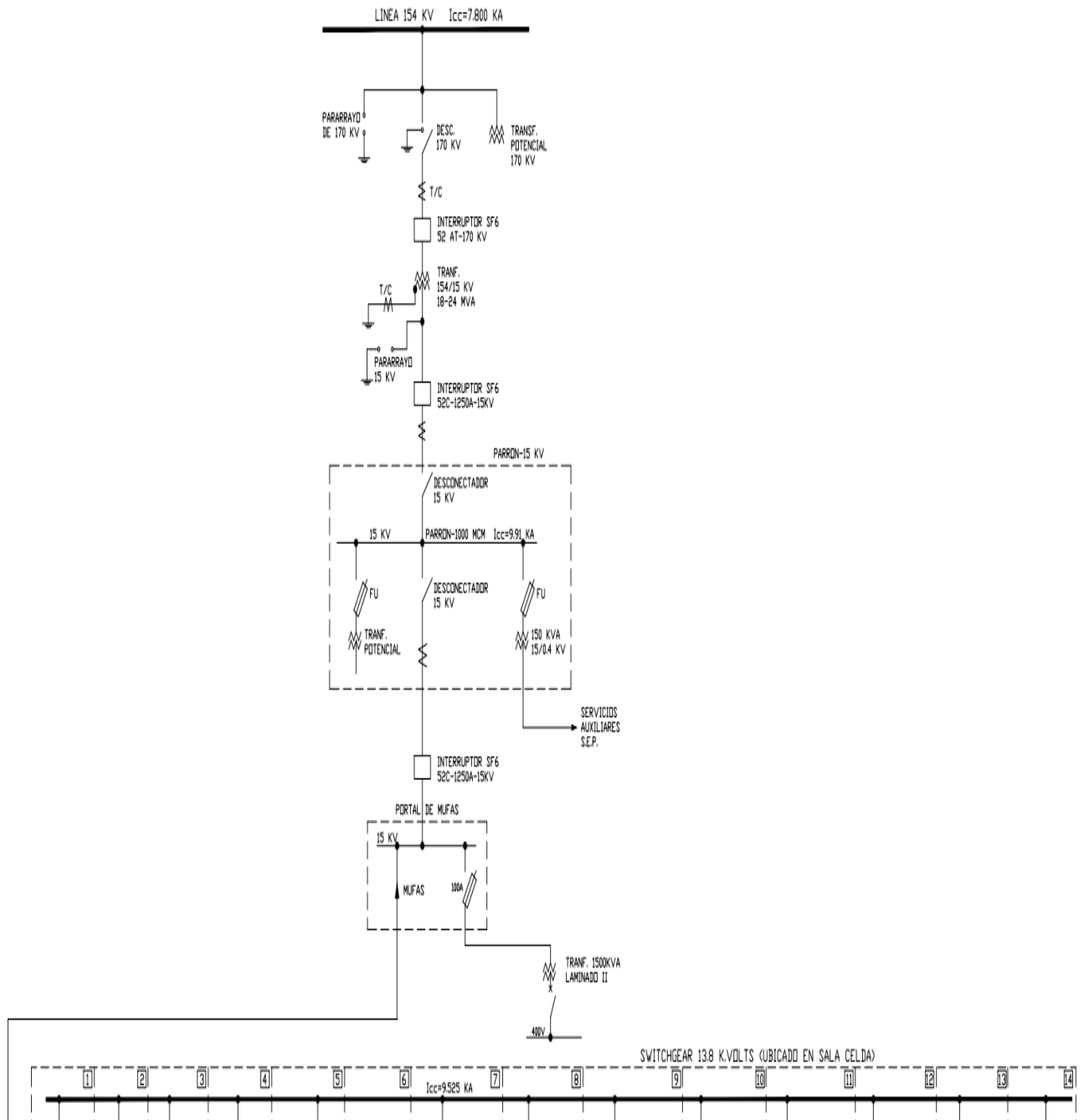


Figura A.1.1 Unilíneal 2004, planta Mapal. Circuito desde la red al Switchgear de 13.8 kV.

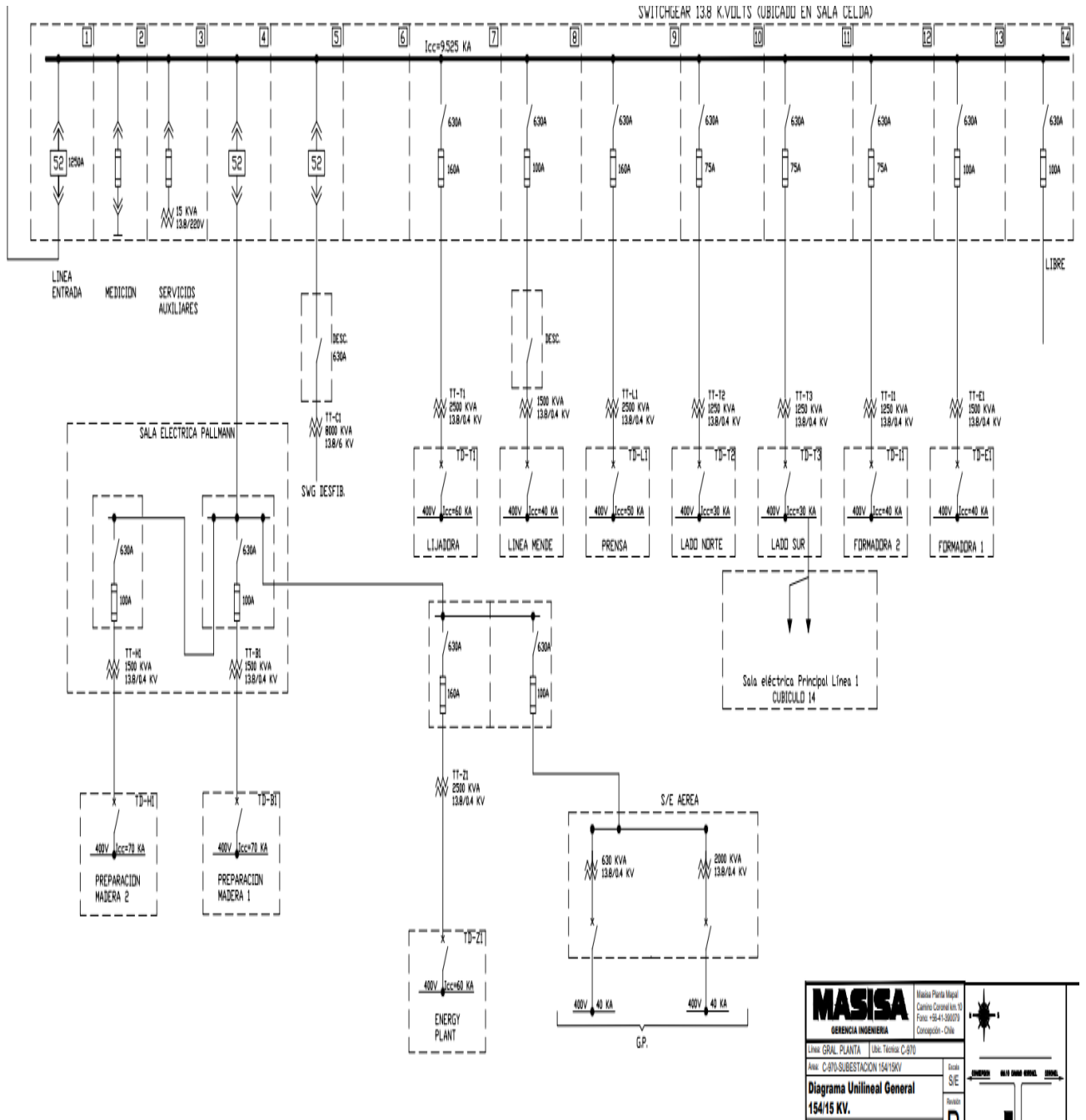


Figura A.1.2 Unilineal 2004, planta Mapal. Circuito desde el Switchgear de 13.8 kV al resto de la planta.

A.2. Unilineal Simplificado, 2011

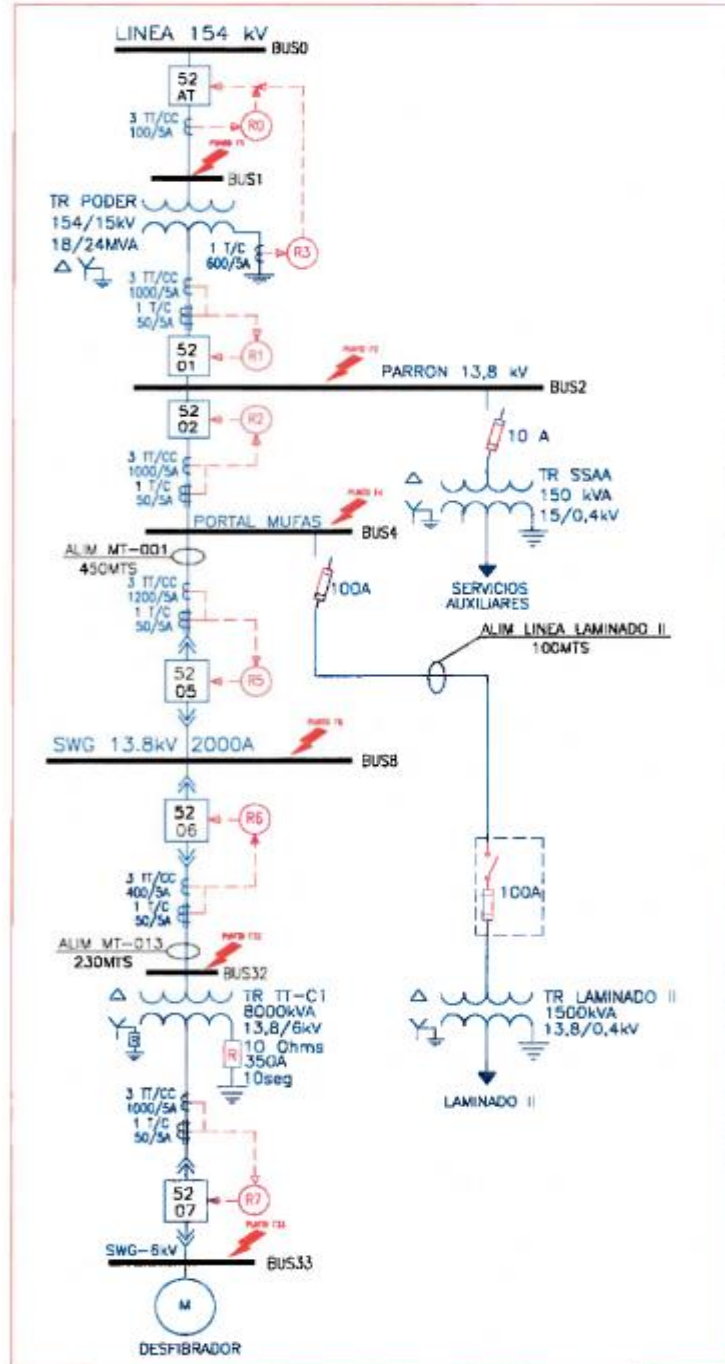


Figura A.2.1 Circuito unilineal simplificado, área desfibrado y laminado 2.

Anexo B. Valores corto circuito.

B.1. Unilineal Planta Mapal Masisa, 2004

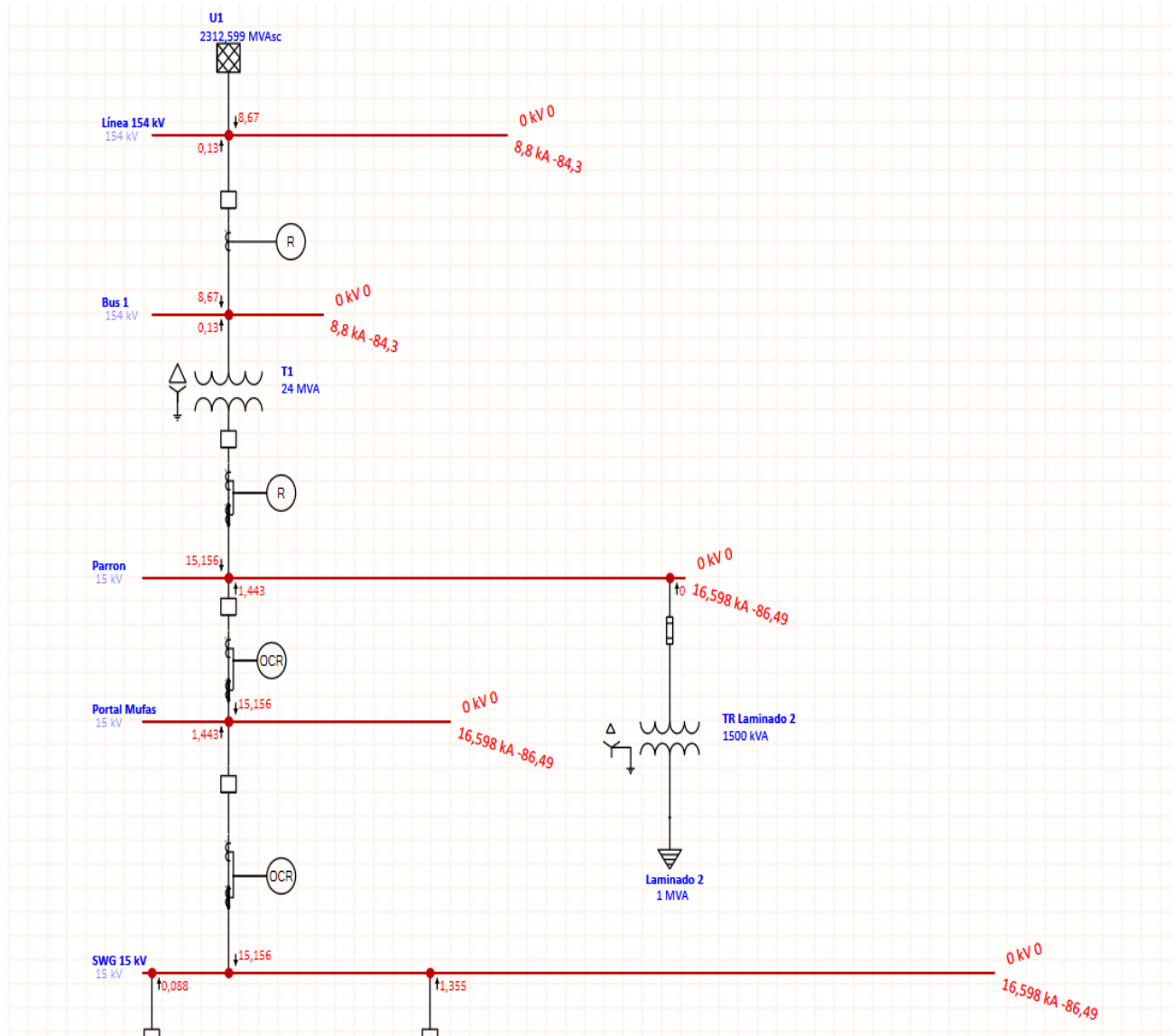


Figura B.1.1 Circuito unilineal simplificado, área desfibrado y laminado 2.

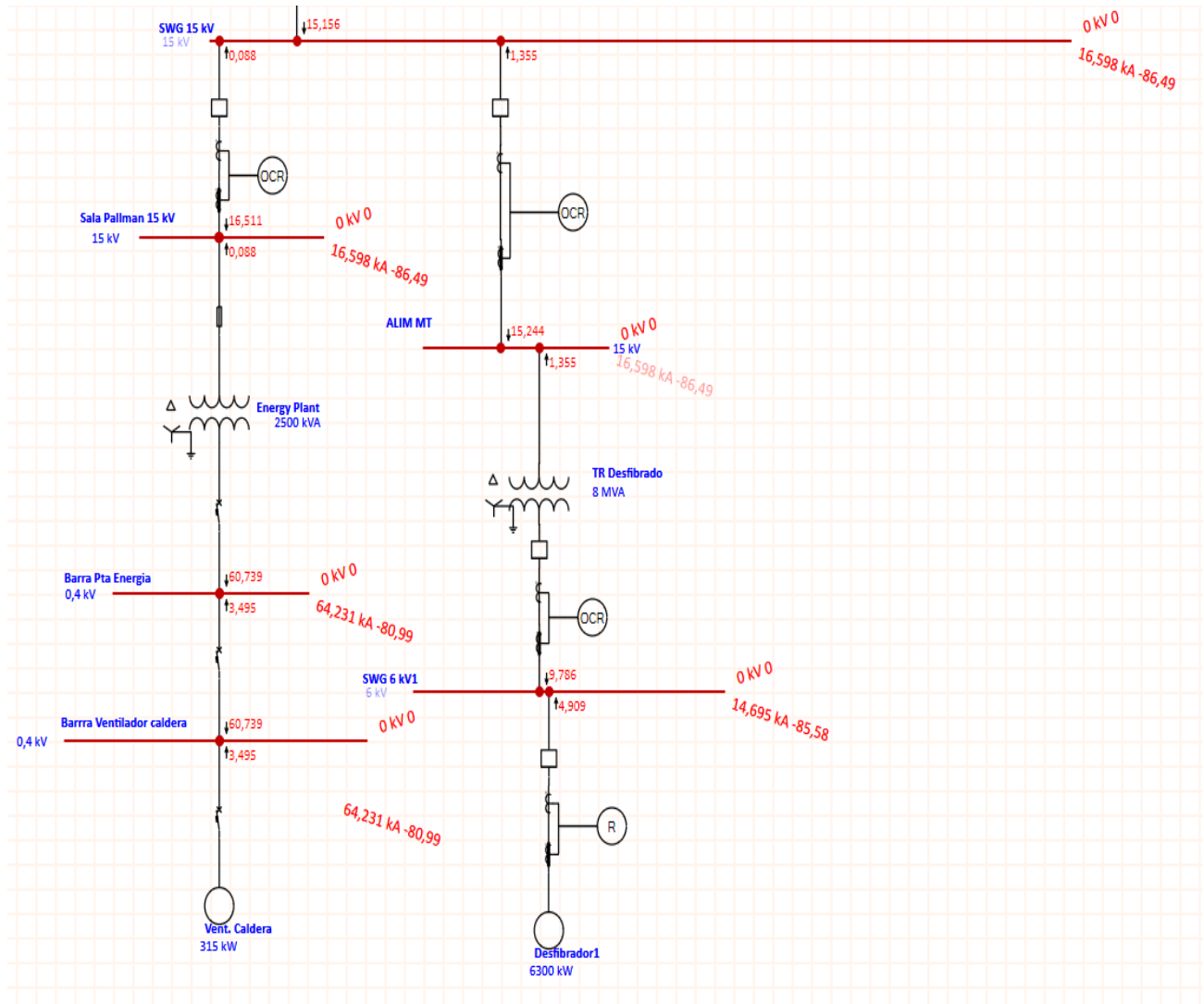


Figura B.1.2 Circuito unilineal simplificado, área desfibrado y laminado 2.

Anexo C. Coordinación de protecciones

Tabla C.1. Resumen coordinación de protecciones 154 kV.

Sección 154-15 kV			
Protección	Descoordinación	Recomendación	Comentarios
R-AT-1	Si, con R-AT-4		Pertenece a la subestación
R-AT-2	No		
R-AT-3	No		
R-AT-4	Si, con R-AT-1, R-AT-2 y R-AT-3	Ajustarlo a Normal time inverse, ajustar protección 50 a un valor mayor a 719 A (Inrush T1) y menor a 935 (protección 50 R-AT-1). Ajustar pickup protección 51 a un valor menor a 1000A (protección 51 R-AT-3).	Mantendría descoordinación con R-AT-2 y R-AT-1, descoordinaría con R-DF-1 y R-DF-2.

Tabla C.2. Resumen coordinación de protecciones Desfibrado.

Desfibrado			
Protección	Descoordinación	Recomendación	Comentarios
R-AT-1	Si, con R-DF-1	-	Pertenece a la subestación
R-AT-2	Si, con R-DF-1, R-DF-2 y R-DF-3	-	
R-AT-3	Si, con R-DF-1, R-DF-2 y R-DF-3	-	
R-AT-4	Si, con R-DF-1	-	
R-DF-1	Si, con R-AT-1, R-AT-2 y R-AT-3	Ajustar curva a Normal time inverse. Ajustar delay protección 50 a un valor entre 0,04 y 0,05 segundos.	Para corrientes mayores a 9600 A, no se puede solucionar la descoordinación con R-AT-2 y R-AT-3.
R-DF-2	Si, con R-DF-3 R-AT-2 y R-AT-3	Ajustar curva a Normal time inverse. Ajustar delay protección 50 a un valor entre 0,04 y 0,05 segundos. Ajustar Protección 51 a un valor mayor a 320 A y menor a 360 A.	
R-DF-3	Si, con R-DF-2 R-AT-2 y R-AT-3	Ajustar delay protección 50 a 0,04 segundos. Ajustar protección 51 a 320 A.	

Tabla C.3. Resumen coordinación de protecciones Planta energía.

Planta energía			
Protección	Descoordinación	Recomendación	Comentarios
R-AT-1	No	-	Pertenece a la subestación
R-AT-2	Si, con CB-PT-2, CB-PT-3 y CB-PT-4	-	
R-AT-3	Si, con CB-PT-2, CB-PT-3 y CB-PT-4	-	
R-AT-4	Si, con CB-PT-2, CB-PT-3 y CB-PT-4	-	
F-PT-1	Si	Debido a la curva propia de los fusibles no se recomiendan cambios para este dispositivo	-
R-PT-1	Si, con R-AT-1, R-AT-2 y R-AT-3	Ajustar pick up protección 51 a un valor cercano a los 480 A.	Para corrientes mayores a 9600 A, no se puede solucionar la descoordinación con R-AT-2 y R-AT-3. Coordinación en corto circuito protecciones CB-PT-2 CB-PT-3 y CB-PT-4 debido a rango de operación, se considera inevitable
CB-PT-2	Si, con R-DF-3 R-AT-2 y R-AT-3	-	
CB-PT-3	Si, con R-DF-2 R-AT-2 y R-AT-3	-	
CB-PT-4	Si, con R-DF-2 R-AT-2 y R-AT-3	-	

Anexo D. Requerimiento EPP contra arc-flash

Tabla D.1. Requerimiento de EPP contra Arc-flash.

Labor	Condición del equipo	Uso requerido de EPP contra arc-flash
Leer el panel del medidor mientras opera un interruptor de nivel.	Cualquiera	No
Para sistemas de CA: Trabajo en conductores eléctricos energizados y partes de circuitos, incluidas las pruebas de voltaje.	Cualquiera	Sí
Para sistemas de CC: Trabajar en conductores eléctricos energizados y partes de circuitos de celdas de batería conectadas en serie, incluidas las pruebas de voltaje.	Cualquiera	Sí
Remoción o instalación de CBs o interruptores.	Cualquiera	Sí
Funcionamiento normal de un circuit breaker (CB), interruptor, contactor o arrancador.	Todas de las siguientes: <ul style="list-style-type: none"> - El equipo está instalado correctamente. - El equipo se mantiene adecuadamente. - Todas las puertas de los equipos están cerradas y aseguradas. - Todas las cubiertas de los equipos están en su lugar y aseguradas. - No hay evidencia de falla inminente. 	No
	Una o más de las siguientes: <ul style="list-style-type: none"> - El equipo no está instalado correctamente. - El equipo no se mantiene adecuadamente. - Las puertas de los equipos están abiertas o no aseguradas. - Las cubiertas del equipo están apagadas o no aseguradas. - Hay evidencia de una falla inminente. 	
Aplicación de equipos de puesta a tierra de protección temporal después de la prueba de tensión.	Cualquiera	Sí
Extracción o instalación de cubiertas para equipos como canaletas, cajas de conexiones y bandejas de cables que no expongan los conductores eléctricos y las partes del circuito energizados.	Todas las siguientes: <ul style="list-style-type: none"> - El equipo está instalado correctamente. - El equipo se mantiene adecuadamente. - No hay evidencia de falla inminente. 	No
	Todas las siguientes: <ul style="list-style-type: none"> - El equipo no está instalado correctamente. - El equipo no se mantiene adecuadamente. - Hay evidencia de una falla inminente. 	Sí

Apertura de la (s) puerta (s) abisagrada (s) o cubierta (s) (para exponer los conductores eléctricos desnudos y las partes del circuito).	Cualquiera	Sí
Realización de la termografía infrarroja y otras inspecciones sin contacto fuera del límite de aproximación restringida. Esta actividad no incluye la apertura de puertas o cubiertas.	Cualquiera	No
Inserción y eliminación de medidores de ingresos (kW-hora, a tensión primaria y corriente).	Cualquiera	Sí
Prueba de voltaje en celdas de batería individuales o unidades multicelulares individuales.	Todas de las siguientes: <ul style="list-style-type: none"> - El equipo está instalado correctamente. - El equipo se mantiene adecuadamente. - Las cubiertas para todos los otros equipos están en su lugar y aseguradas. - No hay evidencia de falla inminente. 	No
	Una o más de las siguientes: <ul style="list-style-type: none"> - El equipo no está instalado correctamente. - El equipo no se mantiene adecuadamente. - Las puertas de los equipos están abiertas o no aseguradas. - Las cubiertas del equipo están apagadas o no aseguradas. - Hay evidencia de una falla inminente. 	Sí
Extracción de las cubiertas atornilladas (para exponer los conductores eléctricos desnudos y las partes del circuito). Para sistemas de CC, esto incluye cubiertas atornilladas, como cubiertas de terminales de batería.	Cualquiera	Sí
Extracción de las cubiertas del conector intercelular de la batería.	Todas de las siguientes: <ul style="list-style-type: none"> - El equipo está instalado correctamente. - El equipo se mantiene adecuadamente. - Las cubiertas para todos los otros equipos están en su lugar y aseguradas. - No hay evidencia de falla inminente. 	No
	Una o más de las siguientes: <ul style="list-style-type: none"> - El equipo no está instalado correctamente. - El equipo no se mantiene adecuadamente. - Las puertas de los equipos están abiertas o no aseguradas. - Las cubiertas del equipo están apagadas o no aseguradas. - Hay evidencia de una falla inminente. 	Sí

Trabajar en circuitos de control con conductores eléctricos energizados expuestos y partes del circuito, mayores a 120 V.	Cualquiera	Sí
Trabajar en circuitos de control con conductores eléctricos energizados expuestos y partes del circuito, 120 voltios o menos sin ningún otro equipo energizado expuesto de más de 120 V, incluida la apertura de cubiertas con bisagras para obtener acceso.	Cualquiera	No
Inserción o extracción de cubos de arranque individuales desde el centro de control de motores (MCC)	Cualquiera	Sí
Inserción o extracción de CB o arrancadores desde sus cubículos, con puertas abiertas o cerradas.	Cualquiera	Sí
Inserción o extracción de dispositivos enchufables dentro o fuera de carriles.	Cualquiera	Sí
Examinación de un cable aislado, sin la manipulación de este.	Cualquiera	No
Examinación de un cable aislado, mediante la manipulación de este.	Cualquiera	Sí
Trabajar en conductores eléctricos energizados expuestos y partes de circuitos de equipos suministrados directamente por un tablero o MCC.	Cualquiera	Sí
Para sistemas de CC, inserción o extracción de celdas individuales o unidades multicelulares de un sistema de batería en un gabinete.	Cualquiera	Sí
Para sistemas de CC, inserción o extracción de celdas individuales o unidades multicelulares de un sistema de batería en un rack abierto.	Cualquiera	No
Para sistemas de CC, mantenimiento en una sola celda de un sistema de batería o unidades multicelulares en un rack abierto.	Cualquiera	No

Para sistemas de CC, trabaje en conductores eléctricos energizados expuestos y partes de circuitos de equipos de utilización suministrados directamente por una fuente de CC.	Cualquiera	Sí
Apertura del transformador de tensión o compartimentos del transformador de potencia de control.	Cualquiera	Sí
Operación del interruptor de desconexión en el exterior (mediante pértiga) de 1 kV a 15 kV.	Cualquiera	Sí
Operación del interruptor de desconexión en exteriores (seccionadores) a 1 kV a 15 kV.	Cualquiera	Sí

