

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTÍSIMA CONCEPCIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE MEDIO AMBIENTE Y ENERGÍA



UCSC

Estrategias para Administración de Riesgos Eléctricos de Arc Flash en Cabinas de Potencia de Palas Mineras de Cable.

Sebastián Ignacio Ramos Concha

Informe de Habilitación Profesional para optar al título de:
Ingeniero Civil Eléctrico

Profesor Patrocinante:
Dr. Aníbal S. Morales M

Profesores Guía:
Dr. Eduardo E. Espinosa N
Dr. Guillermo Ramírez A.

Concepción, Agosto 2018

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTISIMA CONCEPCION
Facultad de Ingeniería
Departamento de Medio Ambiente y Energía

Profesor Patrocinante:
Dr. Aníbal S. Morales M.

Estrategias para Administración de Riesgos de Arc Flash en Cabinas de Potencia de Palas Mineras de Cable.

Sebastián Ignacio Ramos Concha

Informe de Habilitación Profesional
para optar al Título de

Ingeniero Civil Eléctrico

Agosto 2018

Resumen

En un escenario complejo como un sistema eléctrico minero, los trabajos en los gabinetes eléctricos representan sin duda un riesgo de Arc flash para los equipos y el personal.

El Arc flash es la condición asociada a la liberación de energía térmica producida por la falla de arco eléctrico, medida en términos de energía incidente. La interacción con el Arc flash es un riesgo capaz de generar lesiones o la muerte a las personas debido a quemaduras.

En este informe se proponen estrategias para administración de riesgos eléctricos de Arc flash en cabinas de potencia de palas mineras de cable. Como la falla de corto circuito es una condición para producir un Arc flash, se hace un estudio de corto circuito basado principalmente en los modelos presentados en los estándares IEEE 1584 “Guide for performing Arc Flash hazard calculation” y la norma NFPA 70E “Estándar de Seguridad Eléctrica en Lugares de Trabajo”.

La NFPA 70E contiene las regulaciones en materia de programas de seguridad, uso y tipo de equipo de protección, así como criterios generales de cálculo. Por su parte, el IEEE Std.1584 detalla los procedimientos de cálculo basados en pruebas realizadas en laboratorio. Para el análisis sólo se describen los modelos matemáticos para el cálculo de la corriente de corto circuito.

Dicho estudio de corto circuito se hace enfocado en un sistema eléctrico minero, que contiene información técnica sobre líneas eléctricas, cables móviles, subestaciones móviles, palas mineras, otras cargas y esquemas de protección de sobrecorriente.

Luego del estudio de Arc Flash de un sistema eléctrico minero, se procedió a una simulación completa donde se obtuvieron resultados en términos de energía incidente, enfocándose principalmente en los gabinetes eléctricos de una pala eléctrica, donde los resultados fueron categorizados de acuerdo a la norma NFPA 70E.

En el presente informe se conducirá a explicar diferentes escenarios de trabajo y evaluar donde existe el principal riesgo de Arc Flash. Además se analiza y justifica los resultados en torno a la energía incidente en los diferentes gabinetes de la pala eléctrica. Finalmente se proponen soluciones para eliminar o reducir el riesgo de Arc Flash utilizando una Jerarquía de control basada en la Norma ANSI Z10-2005.

Summary

In a complex scenario such as a mining electrical system, work in electrical cabinets undoubtedly represents a risk of Arc Flash for equipment and personnel.

Arc Flash is the condition associated with the release of thermal energy produced by the electric arc fault, measured in terms of incident energy. The interaction with the flash arc is a risk factor for damage or death caused by burns.

This report identifies the problems for the electrical risk management of Arc Flash in power cabinets of cable mining shovels. As the short circuit fault is a condition to produce an Arc Flash, a short circuit study is made based mainly on the models presented in the IEEE 1584 "Guide for performing Arc Flash hazard calculation" standards and the NFPA 70E standard "Electrical Safety Standard in places of work".

NFPA 70E contains the provisions on security programs, use and type of protective equipment, as well as general calculation criterion. For its part, the IEEE Std.1584 details the calculation procedures in laboratory tests. For the analysis only the mathematical models for the calculation of the short circuit current are described.

This short-circuit study is focused on a mining electrical system, which contains technical information on power lines, mobile cables, mobile substations, mining shovels, other loads and overcurrent protection schemes.

After the Arco study, a mining electrical system, was processed to a complete simulation where results were obtained in terms of energy incident, focusing mainly on the electric cabinets of an electric shovel, where the results were categorized according to the NFPA 70E standard.

In this report, different work scenarios and analyzes are conducted where the main Arc Flash risk exists. In addition, the results are analyzed and justified regarding the incident energy in the different cabinets of the electric shovel. Finally, propose solutions to eliminate or reduce the risk of Arc Flash by relating a Control Hierarchy based on the ANSI Z10-2005 Standard.

Dedicado a mi familia.

Agradecimientos

En la etapa final de lo que implica el proceso formativo-académico de mi persona quisiera agradecer en primer lugar a Dios, que ha puesto personas incondicionales en mi camino.

Nadie enseña a ser padre o madre, ni tampoco a ser hijo, pero en las dificultades de estos tiempos, mi familia ha sido el pilar que mantiene mi equilibrio espiritual. Gracias madre, gracias padre, gracias hermano, por quererme, aguantarme y apoyarme en mis múltiples caídas y alegrías.

En este camino hubo muchas personas que me apoyaron y que de igual modo merecen llamarse familia. Amigos como Pili, Pablo, Carlos, Felipe y Gonzalo que siempre he tenido la conciencia que son difíciles de encontrar y hoy me gustaría agradecerle por la presencia que han tenido en mi vida.

No quisiera nombrar a todos mis amigos, porque estoy seguro que alguno de ustedes se me olvidara. Pero dentro de estos amigos si nombrare a una sección, llamada “amigos de Universidad”, el cual tienen una relación directa en el estudio y en el esparcimientos de mi vida universitaria, con esto quiero nombrar a Diego, que compartimos muchas noches de estudio y de diversión en la U, y mi grupo desde mechón hasta ahora llamado “ChPl@”, el cual sacaron muchas carcajadas en este camino, ellos también merecen un agradecimiento.

Quisiera agradecer al profesor Aníbal Morales, por cumplir su labor de guía y encaminarme de buena voluntad en este proceso, con entrega de un amplio conocimiento y conversaciones motivacionales para lograr el objetivo final. Además agradecer al resto de profesores de la carrera Ing. Civil Eléctrica, por cumplir una labor de calidad en mi proceso formativo como profesional.

A todos Gracias totales!

Tabla de Contenidos

LISTA DE TABLAS	X
LISTA DE FIGURAS	XI
ABREVIACIONES	XIII
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	14
1.1. INTRODUCCIÓN GENERAL	14
1.2. TRABAJOS PREVIOS	15
1.2.1 De las definiciones.....	15
1.2.2 De la normativa y legislación.....	15
1.2.3 Del análisis.....	16
1.2.4 Discusión	17
1.3. HIPÓTESIS DE TRABAJO	17
1.4. OBJETIVOS	18
1.4.1 Objetivo General	18
1.4.2 Objetivos Específicos.....	18
1.5. ALCANCES Y LIMITACIONES	18
1.6. METODOLOGÍA	18
CAPÍTULO 2. RIESGOS ELÉCTRICOS	20
2.1 INTRODUCCIÓN	20
2.2 DEFINICIONES	20
2.3 EFECTOS DE LA CORRIENTE ELÉCTRICA EN EL SER HUMANO	20
2.4 FACTORES QUE DETERMINAN LA GRAVEDAD DE LOS ACCIDENTES ELÉCTRICOS	20
2.5 RIESGO ELÉCTRICO.....	22
2.6 SHOCK ELÉCTRICO.....	22
2.7 ARCO ELÉCTRICO	22
2.7.1 Causa de falla por Arco Eléctrico	23
2.8 ARC FLASH O RELÁMPAGO DE ARCO.....	23
2.8.1 Severidad del daño por exposición a Arc flash.....	24
2.9 ARC BLAST	25
2.10 DISCUSIÓN	27
CAPÍTULO 3. LEGISLACIÓN Y NORMATIVA	28
3.1 INTRODUCCIÓN	28
3.2 SERNAGEOMIN (SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGÍA Y MINERÍA)	28
3.3 REGLAMENTO DE SEGURIDAD MINERA (DS132)	28
3.4 RESPONSABILIDADES	29
3.5 LEGISLACIÓN	29
3.5.1 Nacional: Ley 16.744 Sobre Accidentes del Trabajo y Enfermedades Profesionales	29
3.5.2 Internacional: Regulaciones OSHA.....	30
3.6 NORMATIVA.....	31
3.6.1 Nacional: Norma Nch 4/2003.....	31
3.6.2 Internacional: NEC o NFPA70-2011	31
3.6.3 Internacional: NFPA 70E-2012.....	31
3.6.4 Internacional: IEEE 1584-2002	32
3.7 DISCUSIÓN	32
CAPÍTULO 4. JERARQUÍA DE CONTROL DE RIESGOS	33
4.1 INTRODUCCIÓN	33
4.2 NORMA ANSI Z10-2005: ADMINISTRACIÓN DE RIESGOS Y JERARQUÍA DE CONTROL.....	33
4.3 NIVELES DE CONTROL DE RIESGO.....	34

4.4	PIRÁMIDE JERARQUÍA CONTROL DE RIESGOS	35
1.11	DISCUSIÓN	36
CAPÍTULO 5. MODELOS PARA ESTIMAR FALLA DE ARCO ELÉCTRICO		37
5.1	INTRODUCCIÓN	37
5.2	MODELO SEGÚN ESTÁNDAR IEEE STD. 1584	37
5.1.2	<i>Modelo para los cálculos de energía incidente</i>	<i>40</i>
5.2	MODELO SEGÚN ESTÁNDAR NFPA-70E	42
5.2.1	<i>Métodos de cálculo y limitaciones</i>	<i>43</i>
5.2.2	<i>Ecuaciones Básicas para Calcular Distancias de Límite de Arc Flash según Ralph Lee paper.</i>	<i>44</i>
5.2.3	<i>Cálculo de la exposición de energía incidente para un Análisis de Peligro de Arc Flash según Doughty/Neal paper.....</i>	<i>45</i>
5.2.4	<i>Cálculo de la exposición a energía incidente Mayor a 600 V para un Análisis de Peligro de Arc Flash según Ralph Lee paper.</i>	<i>46</i>
5.2.5	<i>Ecuaciones básicas para calcular energía incidente y Límite de Arc Flash Según IEEE 1584</i>	<i>47</i>
5.2.6	<i>Cálculos de energía incidente en corriente- directa.....</i>	<i>50</i>
5.3	DISCUSIÓN	51
CAPÍTULO 6. ESTUDIO DE CORTO CIRCUITO		52
6.1	INTRODUCCIÓN	52
6.2	RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN TÉCNICA Y ANÁLISIS DE OPERACIÓN.....	53
6.3	LEVANTAMIENTO DE PROTECCIONES.	56
6.3.1	<i>Ubicación y detalles de protecciones</i>	<i>56</i>
6.3.2	<i>Características Generales de operación de un Relé de protección</i>	<i>57</i>
a.	<i>Relé de Protección 50/51F</i>	<i>58</i>
b.	<i>Protección fusible</i>	<i>60</i>
6.4	IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS DE INTERÉS.....	62
6.4.1	<i>Tensión en las barras.....</i>	<i>62</i>
6.4.2	<i>Distancia de trabajo</i>	<i>62</i>
6.4.3	<i>Potencia de trabajo.....</i>	<i>63</i>
6.4.4	<i>Parámetros de línea.....</i>	<i>63</i>
6.4.5	<i>Parámetros de transformadores</i>	<i>63</i>
6.5	LEVANTAMIENTO DE CARGA.....	64
6.5.1	<i>Pala Eléctrica de cable Bucyrus 495HR</i>	<i>64</i>
6.5.2	<i>Principio de operación de un convertidor</i>	<i>69</i>
6.6	DISCUSIÓN	70
CAPÍTULO 7. IMPLEMENTACIÓN DE MODELO EN SOFTWARE Y DIAGNÓSTICO DE PROTECCIONES		71
7.1	INTRODUCCIÓN	71
7.2	SIMULACIÓN	71
7.3	DIAGNÓSTICO DE LAS PROTECCIONES A LA FALLA DE ARCO	72
CAPÍTULO 8. ESCENARIOS		75
8.1	INTRODUCCIÓN	75
8.2	LONGITUD DE CABLES DESDE SUBESTACIONES MÓVILES A LAS PALAS.....	75
8.3	LONGITUD DE LÍNEAS AÉREAS DESDE ALIMENTADORES A SUBESTACIONES MÓVILES.....	77
8.4	MODIFICACIÓN DE LA POTENCIA DE LAS SUBESTACIONES MÓVILES.....	79
8.5	TECNOLOGÍA DE ACCIONAMIENTO	80
8.6	MODO REGENERATIVO.....	84
8.7	FALLA EN EL ENLACE DC	86
CAPÍTULO 9. PROPUESTAS DE SOLUCIONES		87
9.1	ELIMINAR	88
9.2	SUSTITUCIÓN	92
9.3	CONTROL DE INGENIERÍA.....	92
9.4	SEÑALIZACIÓN, ADVERTENCIAS Y/O CONTROLES ADMINISTRATIVOS	94

9.5	ELEMENTOS DE PROTECCIÓN PERSONAL	97
CAPÍTULO 10. CONCLUSIONES		99
10.1	CONCLUSIONES	99
10.2	TRABAJOS FUTUROS	100
BIBLIOGRAFÍA.....		101
ANEXO A. CONFIGURACIÓN EN SOFTWARE		103
A.1.	CONFIGURACIÓN DE PARÁMETROS EN SOFTWARE EASYPOWER	103
ANEXO B. RESULTADOS DE ENERGÍA INCIDENTE.....		107
B.1.	ENERGÍA INCIDENTE A DIFERENTES DISTANCIAS DE CABLES MÓVILES	107
B.2.	ENERGÍA INCIDENTE A DIFERENTES DISTANCIAS DE LÍNEAS AÉREAS	107
B.3.	ENERGÍA INCIDENTE A DIFERENTES POTENCIAS DE SUBESTACIONES MÓVILES	108

Lista de Tablas

Tabla 2-1 Efectos de la Corriente en el ser humano.	21
Tabla 2-2 Ejemplos de efectos para valores de energía incidente [2].....	25
Tabla 2-3 NFPA-70E 2003 EPP propuesto.....	25
Tabla 5-1 Condiciones para las cuales las ecuaciones del Std. IEEE 1584 son aplicable	37
Tabla 5-2 Clase de equipo y espacios de aire (gap) de arco típicos.....	39
Tabla 5-3 Clase de equipo y distancia de trabajo típicos	39
Tabla 5-4 Factor de distancia	42
Tabla 5-5 Ejemplo de categorización peligro/riesgo para tareas [19].....	43
Tabla 5-6 Limitaciones de los métodos de cálculo.	44
Tabla 5-7 Peligro de quemadura instantánea a diversos niveles en una planta petroquímica grande	45
Tabla 5-8 Factores para clases de equipos y voltaje [19].....	48
Tabla 5-9 Distancias de trabajo típicos	49
Tabla 6-1 Alimentadores en Subestación B	53
Tabla 6-2 Nombre y ubicación de Subestaciones móviles.....	53
Tabla 6-3 Resumen ajuste de protecciones de sobrecorriente de alimentadores en S/E A y S/E B ..	56
Tabla 6-4 Resumen ajuste de protecciones de sobrecorriente de alimentadores en S/E Móviles.....	56
Tabla 6-5 Tipos de curvas	59
Tabla 6-6 Clasificación del fusible SM5-300E.....	60
Tabla 6-7 Tensión en las barras de S/E B	62
Tabla 6-8 Clase de equipo y distancia de trabajo.....	63
Tabla 6-9 Parámetros de potencia de Pala Bucyrus 495HR.....	63
Tabla 6-10 Parámetros de las líneas eléctricas.....	63
Tabla 6-11 Parámetros de las subestaciones móviles conectadas en S/E B.....	64
Tabla 6-12 Parámetros de potencia de Pala Bucyrus 405HR.....	65
Tabla 6-13 Resumen de distancias de trabajo en cabinas de potencia en Palas Mineras para evaluación de energía incidente por arc flash	66
Tabla 6-14 Potencia de motores asociada a la Pala Bucyrus 495HR.....	68
Tabla 6-15 Protecciones de sobrecorriente principales Transformadores de pala Bucyrus 495 HR	68
Tabla 8-1 Distancia de cables Alimentadores – S/E Móviles – Palas de cable	75
Tabla 8-2 Tabla resumen de parámetros de transformadores	79
Tabla 9-3 Resultados de Energía Incidente en Cabinas Eléctricas	79
Tabla 8-4 Cuadro resumen de los parámetros de una Pala de cable en continua modelo P&H 4100XPB DC.....	81
Tabla 10-1 Distancia de cables Alimentadores – S/E Móviles – Palas de cable	93
Tabla 10-2 Energía incidente en subestaciones móviles.....	94
Tabla B-1 Energía incidente a diferentes distancias de cables móviles	107
Tabla B-2 Energía incidente a diferentes distancias de líneas aéreas	107
Tabla B-3 Energía incidente a diferentes potencias de subestaciones móviles.....	108

Lista de Figuras

Fig. 2-1 Impedancia interna del organismo para diferentes trayectorias.	21	
Fig. 2-2 Riesgos Eléctricos.....	26	
Fig. 4-1 Pirámide de jerarquía control de riesgos.	35	
Fig. 6-1 Alimentación de energía a la pala de cable	52	
Fig. 6-2 Ejemplo Subestación Móvil.....	54	
Fig. 6-3 Diagrama Unilineal Subestación B.....	55	
Fig. 6-4 Curvas de tiempo corriente de relé	57	
Fig. 6-5 Curvas de tiempo corrientes de relés	58	
Fig. 6-6 Curva tiempo corriente fusibles.....	60	
Fig. 6-7 Curvas ejemplo tiempo corriente GE F35	61	
Fig. 6-8 Curvas estándar IAC.....	61	
Fig. 6-9 Ejemplo de Pala eléctrica de cable	64	
Fig. 6-10 Levantamiento distancias de trabajo en cabinas eléctricas potencias en vista de planta de pala Bucyrus 495HR (dimensiones en metro).....	65	
Fig. 6-11 Diagrama eléctrico de Pala eléctrica Bucyrus 495 HR.....	66	
Fig. 6-12 Esquema de un convertidor controlado	69	
Fig. 7-1 Cabinas eléctricas en la Pala Bucyrus 495HR.....	72	
Fig. 8-1 Resultados de Energía Incidente en Cabinas Eléctricas	76	
Fig. 8-2 Resultados de Energía Incidente en Cabinas Eléctricas	77	
Fig. 8-3 Ejemplo de curvas de protección.....	78	
Fig. 8-4 Diagrama unilineal del nivel de distribución eléctrica	82	
Fig. 8-5 Diagrama unilineal de accionamiento movimiento Swing.....	83	
Fig. 8-6 Diagrama unilineal de accionamiento de motor Hoist, Crowd y propel	83	
Fig. 8-7 Diagrama simplificado del sistema eléctrico, Caso A.....	84	
Fig. 8-8 Diagrama simplificado del sistema eléctrico, Caso B.	85	
Fig. 8-9 Diagrama simplificado del sistema eléctrico, Caso C.	85	
Fig. 8-10 Modulo IGBT	86	
Fig. 8-11 Gabinete de potencia de Convertidores	86	
Fig. 9-1 Pirámide Jerarquia control de riesgos.....	87	
Fig. 9-2 Cabinas eléctricas en la Pala Bucyrus 495HR.....	88	
Fig. 9-3 Transistor IGBT	Fig. 9-4 Tiristor.....	89
Fig. 9-5 Comparación de semiconductores	90	
Fig. 9-6 Diagrama eléctrico de Pala de cable de corriente continúa	91	
Fig. 9-7 Diagrama eléctrico de Pala de cable de corriente alterna	91	
Fig. 9-8 Eliminación de HRC 4.....	93	
Fig. 9-9 Disminución de energía incidente	94	
Fig. 9-10 Ejemplo de etiquetado	95	
Fig. 9-11 Etiqueta para Cabina ZHV-PRINCIPAL	96	
Fig. 9-12 Etiqueta para cabina MCC.....	96	
Fig. 9-13 Etiqueta para cabina MRC- LADO Frontal.....	96	
Fig. 9-14 Etiqueta para cabina MRC LADO POSTERIOR.....	96	
Fig. 9-15 EPP a utilizar según norma NFPA 70-E.....	98	
Fig. A-1 Configuración Barra principal	103	
Fig. A-2 Configuración de línea eléctrica	103	
Fig. A-3 Configuración relé de protección 1.....	104	

Fig. A-4 Configuración relé de protección 2.....	104
Fig. A-5 Configuración relé de protección 3.....	105
Fig. A-6 Configuración convertidor.....	105
Fig. A-7 Configuración de Fusible.....	105
Fig. A-8 Ejemplo de resultado de energía incidente en Pala Bucyrus 495HR.....	106

Abreviaciones

Mayúsculas

I.E.E.E	: Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.
A.F.E	: Active Front End.
M.C.C.	: Centro de Control de Motores.
C.D.C.	: Centro de Distribución de Carga.
N.F.P.A.	: National Fire Protection Association.
O.S.H.A.	: Administración de seguridad y salud ocupacional.
I.E.	: Energía Incidente.
M.T	: Media Tensión.
B.T.	: Baja Tensión.
N.E.C	: National Electrical Code.
S.E.C	: Superintendencia de Electricidad y Combustibles.
V	: Volteos.
A	: Amperes.
E.P.P.	: Equipo de protección personal.
A.C.	: Corriente alterna.
D.C.	: Corriente continua.
H.R.C	: Hazard Risk Category

Minúsculas

cal.	: calorías.
cm.	: centímetros.
lb.	: libras.
ft.	: pies.
m.	: mili

Capítulo 1. Introducción

1.1. Introducción general

La seguridad eléctrica es un aspecto relevante a la hora de trabajar con equipos energizados, ya que se debe garantizar la seguridad de las personas y de los equipos electrónicos presentes en las instalaciones, es por eso que se debe tener un conocimiento sobre los riesgos, con el fin de identificar los potenciales peligros asociados y poder establecer medidas de control que permitan eliminar, reducir o segregar el riesgo a exposición a peligros eléctricos.

En este informe se presenta un estudio de estrategias para administración de riesgos eléctricos de Arc flash en cabinas de potencia de palas mineras de cable. La motivación del estudio de Arc flash en cabinas de potencias es debido a la alta potencia en la que trabajan los equipos en escenarios agresivos.

Para este estudio se propone una metodología de trabajo que hace referencia al conjunto de procedimientos lógicos utilizados para alcanzar los objetivos propuestos.

Se presenta además una jerarquía de control basado en la Norma ANSI Z10-2005, que estudia medidas de control que permiten eliminar o reducir el riesgo de exposición a peligros eléctricos. Dicho estudio se hace sobre un modelo de sistema eléctrico minero que incluye; líneas eléctricas, cables mineros, subestaciones móviles, esquemas de protecciones de sobrecorriente, palas mineras y otras cargas, basado principalmente en los lineamientos indicados en el estándar NFPA 70E y los métodos de cálculo recomendados en el estándar IEEE Std.1584,

Luego se procedió a una simulación completa de diferentes escenarios donde se obtuvieron resultados en términos de energía incidente, enfocándose principalmente en los gabinetes eléctricos de una pala eléctrica, donde los resultados fueron categorizados de acuerdo a la norma NFPA 70E.

En el informe se conducirá a explicar diferentes escenarios de trabajo y evaluar donde existe el principal riesgo de Arc Flash. Además se analiza y justifica los resultados en torno a la energía incidente en los diferentes gabinetes de la pala eléctrica. Finalmente se proponen soluciones para eliminar o reducir el riesgo de Arc Flash relacionándolo una Jerarquía de control basada en la Norma ANSI Z10-2005.

1.2. Trabajos previos

Antes de administrar riesgos eléctricos de Arc flash en cabinas de potencia de palas mineras de cable es necesario estudiarlos a cabalidad y comprenderlo de tal modo para poder proponer mejoras en torno a la seguridad industrial de trabajo.

A continuación se mostrara la literatura consultada, separándola por ítems para posteriormente comentar la relación que dará paso a lo que se pretende utilizar en el informe.

1.2.1 De las definiciones

- ❖ Bernardo Bello Rebolledo, “*Riesgos electricos en la mineria*”, SERNAGEOMIN.

En este trabajo se presenta de forma general los riesgos eléctricos que se pueden presentar en la minería. Se definen diferentes conceptos como el shock eléctrico, tipos de contactos y los efectos sobre el cuerpo humano. Estos datos son útiles para conocer las consecuencias de un posible shock eléctrico que puede influir en el cuerpo humano. Se destaca que la información proporcionada es asociada a la minería.

- ❖ Paulina Gutiérrez, *Estrategias de Administración de Riesgo Eléctrico por Jerarquía de Control en Ambientes Industrial*, 2015, Universidad de Concepción.

Los primeros capítulos de este trabajo se muestran definiciones útiles que particularmente introducen el riesgo de arc flash como condición peligrosa en lugares de trabajo.

1.2.2 De la normativa y legislación

- ❖ Guide for performing arc-flash hazard calculations, IEEE 1584, IEEE Industry Applications Society, IEEE, 2002

Esta guía es fundamental en este trabajo, ya que propone modelos empíricos para realizar un estudio de corto circuito, que ayudan a determinar corrientes de arco eléctrico. Sin duda, esto conlleva a una estimación de cálculo de energía incidente.

- ❖ NFPA, NFPA 70E: Norma para la Seguridad Eléctrica en Lugares de Trabajo, NFPA, 2004.

Esta es una norma de seguridad en lugares de trabajo, la cual entrega información establecida para diferentes tareas realizadas. Además recomienda requerimientos de seguridad en instalaciones eléctricas con el fin de proporcionar protección a las personas. La energía incidente es categorizada para cada tarea realizada. Sin embargo estos datos son demasiados conservadores.

- ❖ Ministerio de Minería de Chile, Reglamento de Seguridad Minera Decreto Supremo No 132

Es de gran importancia conocer los reglamentos nacionales, esta legislatura entrega información sobre el reglamento de seguridad minera en Chile. Se detalla el reglamento a seguir tanto para la empresa como para el personal, donde fundamentalmente la empresa minera deberá velar por el cumplimiento de la normativa vigente y el manejo de buenas prácticas en materia de instalación y mantención de sistemas eléctricos. Particularmente esta al debe sobre el riesgo de arc flash.

- ❖ Ministerio del Trabajo de Chile, "Ley N°16.744; Accidentes del Trabajo y Enfermedades Profesionales". 2013

En este documento se encuentra la ley de accidentes del trabajo y enfermedades profesionales. Se entiende que el riesgo de arc flash está dentro de un accidente laboral y se debe conocer los métodos de prevención, información sobre atenciones médicas, prestaciones económicas, reeducación sobre los accidentes de trabajos y enfermedades profesionales. Esta información es útil para conocer la realidad nacional sobre los accidentes de trabajo.

1.2.3 Del análisis

- ❖ Eric N. Berkheimer, "Shovel Performance: AC vs. DC", May 2012

Debido a que el proyecto se basa en una pala específica con tecnología de accionamiento en alterna, se debe conocer la tecnología en continua para realizar diferencias. El documento presenta ventajas de la pala AC, que abre el paso a realizar un análisis más profundo del porqué.

- ❖ F. A. Manuele, "ANSI/AIHA Z10-2005: The new benchmark for safety management.

Este documento presenta una jerarquía de control para poder eliminar o reducir el riesgo. Fundamentalmente se asoció al riesgo de arc flash, que fue útil para desarrollar las propuestas de soluciones de una forma ordenada y jerárquica que permiten eliminar y reducir el riesgo de arc flash en las cabinas eléctricas de las palas.

- ❖ Wiechmann, E., Morales, A., Llanos, C., Zulueta, R., & Aqueveque, P. (2011). "*Reducing arc flash Hazard/Risk Category (HRC) in mining shovels based on standard NFPA-70E*", in conf., Lake Buena Vista, FL, USA.

Este documento muestra un análisis para reducir categorías de peligro/riesgos en palas de minerías. Muestra un método basado en la norma NFPA 70-E para disminuir la energía incidente

en diferentes puntos. Entrega información adicional para un análisis de mi trabajo.

- ❖ E. Wiechmann, P. Aqueveque, L. Muñoz, A. Morales, J. Henriquez, C. Llanos, “*A study of arc flash hazard risk on open pit mining shovels*”, *Australasian Power Technologies Publications Industrial Electrix*, pp. 57 - 61, July - September 2014.

Este trabajo muestra un estudio de categorías de riesgos de arc flash en palas mineras de cable.

Entrega información y una metodología para un seguimiento estructurado de cómo clasificar la energía incidente y la importancia de disminuirla.

1.2.4 Discusión

Luego de hacer una revisión bibliográfica respecto a los riesgos eléctricos, fundamentalmente del riesgo de arc flash, se propone unir la información y clasificarla para un mejor entendimiento. En primer lugar es recomendable conocer las diferentes definiciones relacionadas al arc flash y los peligros y consecuencias asociadas a la exposición de ello.

También es necesario conocer las normativas y legislación asociada a la seguridad minera, es por ello que se investigó sobre ello en el ámbito nacional e internacional. Sin embargo este informe se da énfasis en la materia internacional, ya que son estas las que ayudan y dan pasos metodológicos que ayudan a obtener resultados en termino de energía incidente, además dan una mayor profundidad al riesgo de arc flash. La norma NFPA 70-E es conservadora, es por eso que con el estándar IEE 1584 podemos determinar nuestros propios resultados de energía incidente y utilizar como referencia las recomendaciones de la norma NFPA 70.E .

Finalmente el documento de jerarquía de control nos permitirá recopilar el análisis y resultados obtenidos y clasificarlos en métodos para poder eliminar o mitigar el riesgo de arc flash en las cabinas de potencia de palas mineras.

1.3. Hipótesis de trabajo

La seguridad industrial dentro de un proceso minero, específicamente en la extracción de minerales utilizando palas de cable puede tener mejoras para reducir el riesgo eléctrico.

En las cabinas eléctricas de las palas mineras de cable se puede eliminar o reducir el riesgo de arc flash utilizando una jerarquía de control de riesgos.

1.4. Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Estudiar y proponer estrategias para la administración de riesgos eléctricos de Arc Flash en tableros eléctricos de potencia de palas mineras de cable.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Investigar sobre los riesgos eléctricos asociados a las fallas de arco eléctrico y efectos sobre el cuerpo humano.
- Investigar sobre la normativa y legislación asociada a la seguridad eléctrica de Arc Flash.
- Realizar un estudio de corto circuito en un modelo de ejemplo de un sistema eléctrico minero.
- Evaluar los diferentes escenarios de trabajo con la Pala Bucyrus 495HR
- Justificar resultados de la simulación en términos de energía incidente en los gabinetes eléctricos de la pala.
- Proponer soluciones para eliminar o reducir el riesgo de Arc Flash en los gabinetes eléctrico de la pala Bucyrus 495HR.

1.5 Alcances y Limitaciones

En este informe se estudia las estrategias para administración de riesgos eléctricos de Arc flash en cabinas de potencia de palas mineras de cable.

Se evalúan diferentes escenarios de trabajos.

Para la simulación se utilizó el programa Easy Power.

En la simulación se utilizan corrientes de falla trifásica normalmente equilibradas para el análisis de relámpago de arco. Por configuración predeterminada, el programa no permite cálculos de relámpago de arco de fallas desequilibradas.

De acuerdo a los resultados obtenidos, se analiza donde existen rangos elevados de energía incidente y se aplican jerarquías de control basadas en la norma ANSI Z10-2005.

1.6 Metodología

La metodología propuesta comienza con una recopilación de antecedentes, donde se recopila información teórica, revisión bibliográfica de legislación y normativa, jerarquía de control y estudio

de modelos para estimar falla de arco eléctrico. El siguiente paso es un estudio de corto circuito basado en el estándar IEEE 1584 “Guide for performing Arc Flash hazard calculation” y la norma NFPA 70E. “Estándar de Seguridad Eléctrica en Lugares de Trabajo”. Luego se hace un estudio de Arco eléctrico a partir del estudio del modelo de corto circuito, finalmente se realiza una evaluación de riesgos a partir de la distancia de trabajo, ajuste protecciones y características del sistema eléctrico minero (corrientes de falla, tiempo de despeje de la falla, distancias).

En base a ello se propone las siguientes etapas principales:

- I. Revisión bibliográfica.
 - a. Revisión teórica conceptual.
 - b. Revisión general bibliográfica de legislación y normativa nacional e internacional.
- II. Jerarquía de control de riesgos basada en Norma ANSI Z10-2005.
- III. Estudio de modelo para estimar falla de arco eléctrico.
 - a. Estándar IEEE 1584. “Guide for performing Arc Flash hazard calculation”.
 - b. Norma NFPA 70E. “Estándar de Seguridad Eléctrica en Lugares de Trabajo”.
- IV. Estudio de corto circuito.
 - a. Recopilación de información técnica
 - b. Análisis de modo de operación
 - c. Levantamiento del Sistema eléctrico de potencia
 - d. Levantamiento de protecciones
 - e. Levantamiento de carga
 - f. Identificación de parámetros de interés
 - g. Análisis de Pala minera Bucyrus 495 HR
 - h. Estimación de corriente de corto circuito
- V. Evaluación de diferentes escenarios de trabajo.
- VI. Estimación de Arco eléctrico según Std. IEEE 158 y NFPA 70E.
- VII. Análisis de resultados.
- VIII. Propuesta de soluciones para eliminar o reducir el riesgo de Arc Flash en los gabinetes eléctrico de la pala Bucyrus 495HR.
- IX. Conclusiones y trabajos futuros.

Capítulo 2. Riesgos eléctricos

2.1 Introducción

En este capítulo se definen conceptos claves sobre los riesgos eléctricos asociados a las fallas de arco eléctrico y efectos sobre el cuerpo humano. Se dará un principal énfasis en el riesgo de arc flash, que es consecuencia de una falla de arco eléctrico.

2.2 Definiciones

Peligro: Cualquier situación o condición que pueda causar lesiones o daños a la salud, la propiedad o al medio ambiente. [1]

Riesgo: La probabilidad de que la exposición a un peligro resulte en lesiones, enfermedades u otras pérdidas. Cualquier actividad humana puede llevar a algún riesgo, pero algunos son más riesgosos que otros. [1]

2.3 Efectos de la corriente eléctrica en el ser humano

A continuación se presentan los principales efectos de la corriente eléctrica en el cuerpo humano, desde la menos a la más nociva [2]:

1. Contracción muscular, atrapamiento en circuitos
2. Quemaduras de pie, músculos y órganos
3. Fibrilación ventricular
4. Asfixia por paro respiratorio
5. Muerte

2.4 Factores que determinan la gravedad de los accidentes eléctricos

El contacto eléctrico es la circulación de corriente eléctrica a través del cuerpo humano, que pasa a ser conductor, siendo parte del circuito. Cuando se dan estas condiciones, significa que se ha producido un accidente, cuya gravedad está definida por los siguientes factores [2] [3]:

- Resistencia eléctrica: Se consideran tres tipos de resistencias:
 - i. Resistencia propia del cuerpo humano (espesor y dureza de la piel, superficie de contacto, humedad de la piel, etc.).
 - ii. Resistencia de contacto (ropa o guantes)

- iii. Resistencia de salida (calzado o tipo de pavimento, por ejemplo).
- Trayecto de la corriente eléctrica: Los recorridos de la corriente eléctrica más habituales son mano-mano o mano-pie. La gravedad de las lesiones va a depender de los órganos internos que atraviese, por ejemplo si traspasa el corazón o pulmones, además de la impedancia relativa, que varía según el recorrido
 - Frecuencia de la corriente eléctrica: La frecuencia de la corriente alterna (utilizada en la industria y en nuestros hogares) puede provocar alteraciones en el ritmo cardiaco, existiendo riesgo de fibrilación ventricular
 - Tiempo de contacto: A mayor tiempo de contacto el daño puede ser mayor, por lo que las protecciones eléctricas automáticas deben actuar con gran rapidez, para evitar daño
 - Intensidad de la corriente. A medida que aumentan los valores de la intensidad de la corriente eléctrica, las consecuencias pueden ser cada vez peores por quemaduras (Ver tabla N°2-1 [2])

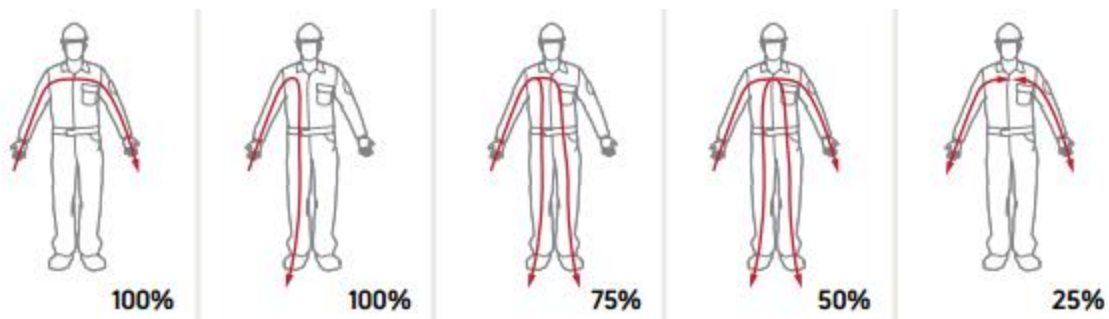


Fig. 2-1 Impedancia interna del organismo para diferentes trayectorias.

Tabla 2-1 Efectos de la Corriente en el ser humano.

Corriente [mA]	Efectos de la corriente
0-1	Umbral de la percepción
1-8	Sorpresa fuerte, sin perder control muscular
9-15	Reacción violenta separándose del objeto
16-50	Paralización muscular, fuertes contracciones y dificultad para respirar
101-200	Fatal, Fibrilación ventricular
201- o mas	Fuertes contracciones que oprimen el corazón evitando la fibrilación, produce quemaduras y bloqueo nervioso

2.5 Riesgo Eléctrico

El riesgo eléctrico es la probabilidad de exposición o interacción con un peligro eléctrico, es decir, la posibilidad de que una persona sufra un determinado daño originado por el uso de la energía eléctrica. Los principales riesgos eléctricos descritos en la literatura y referenciados en la NFPA70E en torno a la naturaleza, causa y lesiones a las personas son el shock eléctrico, interacción con Arc flash e interacción con Arc blast. [4]

¿Que constituye el riesgo eléctrico? [2]

- El desconocimiento de la existencia del riesgo, evidentemente que en la mayoría de los casos puede resultar fatal.
- El desconocimiento de las causas que concurren en el suceso de un accidente eléctrico y los valores de los distintos parámetros que condicionan la magnitud de la gravedad.

2.6 Shock Eléctrico

Existen 2 formas principales de contacto para que se produzca el shock eléctrico.

- 1) Que el cuerpo establezca circuito entre dos conductores a distinta tensión (caso de cortocircuito).[8]
- 2) Que el cuerpo esté en contacto por un lado con un conductor energizado, y por otro, los pies en el suelo. Para que se produzca un shock eléctrico, una persona tiene que formar parte de un circuito. La persona al formar parte de un circuito ofrece el camino de más baja impedancia al paso de la corriente [8].

2.7 Arco Eléctrico

El arco eléctrico es una descarga disruptiva de corriente eléctrica a través del aire en un equipo eléctrico desde un conductor energizado a otro o a tierra. Esta descarga se produce cuando la distancia entre dos electrodos está comprometida de tal forma que quedan sometidos a una diferencia de potencial que es capaz de generar por sí mismo la cantidad de iones y electrones necesarios para transportar corriente eléctrica a través de un material normalmente aislante (masa gaseosa o líquida), que comúnmente es el aire.

La energía liberada por una falla de arco eléctrico produce temperaturas extremadamente altas, intenso calor radiante, destellos de luz intensa y bajo ciertas circunstancias explosiones sonoras y ondas de presión.

Las fallas de arco comienzan como una ruptura del aislamiento propio de conductores o partes de un circuito. Luego se convierten en una corriente de falla: un corto circuito a través de gas ionizado (aire) que puede ser de una sola fase, ya sea de fase a fase o fase a tierra; de dos fases y tierra; trifásica; o trifásica y tierra. [4]

2.7.1 Causa de falla por Arco Eléctrico

- Acciones de las personas, acciones inseguras.
- Condiciones de equipos, condiciones inseguras.
- Condiciones del lugar de trabajo, ambientes inseguros.

Estas tres condiciones pueden coincidir de manera combinada o independiente en un evento de arc flash y posible escalada a arc blast. No obstante, es importante reconocer que los principales contribuyentes en una falla por arco eléctrico son los errores humanos y fallas del equipo eléctrico.

Los equipos en los cuales más se han registrado eventos de arc flash/arc blast son transformadores, Centros de Distribución de Carga (CDC), Centro de Control de Motores (MCC), toda clase de paneles de control y switchgear, equipos de electrónica de potencia y máquinas eléctricas (Motores, generadores, entre otros.).

2.8 Arc Flash o relámpago de arco

El arc flash se define como una condición peligrosa asociada a la liberación de energía térmica producida por la falla de arco eléctrico. La interacción con él es un riesgo capaz de generar lesiones o la muerte a las personas debido a quemaduras. La energía térmica liberada se mide en términos de energía incidente. Ésta última definida como la cantidad de energía irradiada sobre una superficie a una cierta distancia de la fuente de arco y su unidad de medida es en $[\text{cal}/\text{cm}^2]$ [4].

Debido a los altos niveles de corriente de falla y voltaje asociados con sistemas de distribución de poder, los arc flash conllevan altos niveles de energía. La liberación de esta cantidad de energía produce los siguientes fenómenos

- Expansión de gas a temperaturas que superan los 19000 °C, magnitud que excede la temperatura de la superficie del sol.
- Un destello luminoso de alta intensidad que puede causar daños irreparables a la vista.

- Una onda explosiva con presiones sobre los 2000 [lb/ft²], eyectando trozos de metal fundido y otros escombros a velocidades balísticas. Se produce un nivel de ruido muchas veces superior a 140 dB (equivalente al ruido de un disparo).
- El metal vaporizado se convierte rápidamente en una nube de óxidos metálicos caliente que tiene la capacidad de quemar aislantes cercanos. En el caso del cobre, que expande su volumen 67000 veces, crea una inmensa onda de presión [5]

Los factores que intervienen en la severidad del daño por exposición a Arc flash son:

- Nivel de tensión
- Corriente de arco en el punto de falla
 - Duración o tiempo del arco,
 - Distancia del personal al punto de falla.

2.8.1 Severidad del daño por exposición a Arc flash

Los efectos de la exposición a Arc flash se caracterizan por quemaduras térmicas clásicas, directas por la alta temperatura del aire, e indirecta por la inflamación de la ropa. Las quemaduras que resultan se clasifican dentro de tres categorías:

- a) Quemaduras de primer grado
- b) Quemaduras de segundo grado
- c) Quemaduras de tercer grado

En la mayoría de los casos un incidente por Arc flash termina provocando quemaduras de carácter grave, y pueden matar incluso a una distancia de tres metros. La probabilidad de supervivencia dependerá de la edad de la persona y la superficie quemada. La tabla 2-2 muestra los efectos de la energía incidente y algunas de sus equivalencias. [4]

Tabla 2-2 Ejemplos de efectos para valores de energía incidente [2]

Energía incidente cal/cm²	Resultado
0.0033	Cantidad de energía producida por el sol durante 0.1 segundo sobre la superficie del ecuador
1	Equivalente a la punta del dedo expuesta a una llama de encendedor durante un segundo
1.2	Cantidad De energía que causara instantáneamente una quemadura de segundo grado a piel desnuda
4	Cantidad de energía que produciría ignición instantánea en una camisa de algodón
8	Cantidad de energía que causara instantáneamente una quemadura incurable de tercer grado

La norma NFPA 70-E presenta una categorización de riesgo según la energía incidente y propone requerimiento de equipo de protección personal. (Ver tabla 2-3)

Tabla 2-3 NFPA-70E 2003 EPP propuesto

Categoría de riesgo	Calorías del EPP [cal/cm²]	Requerimientos del EPP
Clase # 0	0-2	Algodón no tratado
Clase # 1	2-4	Camisa y pantalón resistentes a la flama (RF).
Clase # 2	4-8	Ropa interior de algodón + camisa RF y pantalón RF
Clase #3	8-25	2 Ropa interior de algodón + camisa RF y pantalón RF + traje de protección completo
Clase # 4	25-40	Ropa interior de algodón + camisa RF y pantalón RF+traje de varias capas para destello.
Clase # 5	40-100	Ropa interior de algodón + camisa RF y pantalón RF+traje de varias capas para destello.

2.9 Arc Blast

El arc blast se define como una condición peligrosa asociada a la energía explosiva que se puede producir debido a las altas temperaturas durante fallas de arco eléctrico que provocan la expansión del aire circundante y metal conductor fundido. La interacción con él es un riesgo capaz de causar daño o muerte a las personas. El fenómeno de arco eléctrico no siempre va acompañado de arc blast, siendo este último más probable cuando la energía incidente supera las 40 [cal/cm²]. La gran

fuerza que es capaz de alcanzar este fenómeno es capaz de generar lesiones inclusive de mayor consideración que una quemadura para los trabajadores y, en consecuencia, es considerado un evento catastrófico que es indispensable evitar.

En general la exposición a Arc blast se considera un evento catastrófico no solo por los daños a las personas en donde la mayoría de los casos son fatales, sino que también en razón del daño estructural, pues es capaz de destruir por completo equipos e incluso paredes de concreto convencional.[4][5]

Es necesario especificar que evento de Arc Flash y Peligro de Arc Flash son conceptos distintos. De acuerdo a la norma NFPA 70E el Peligro de Arc Flash puede existir cuando conductores eléctricos energizados o partes de circuitos están expuestos o están dentro de equipos en una condición cerrada o resguardada. El Riesgo de Arc Flash está presente al encontrarse personas trabajando con, y/o dentro de estas instalaciones. Por ello, los equipos que tienen mayor potencial de ocurrencia y exposición para los trabajadores son:

- Gabinetes eléctricos,
- Tableros Eléctricos,
- Cabinas Eléctricas.

En estas instalaciones se manobra regularmente con equipos energizados tanto en media tensión (MT) como en baja tensión (BT). Es más probable que se produzcan incidentes en baja tensión, debido a que existe un mayor número de trabajadores operando, ya que tiene una mayor cantidad de intervenciones.

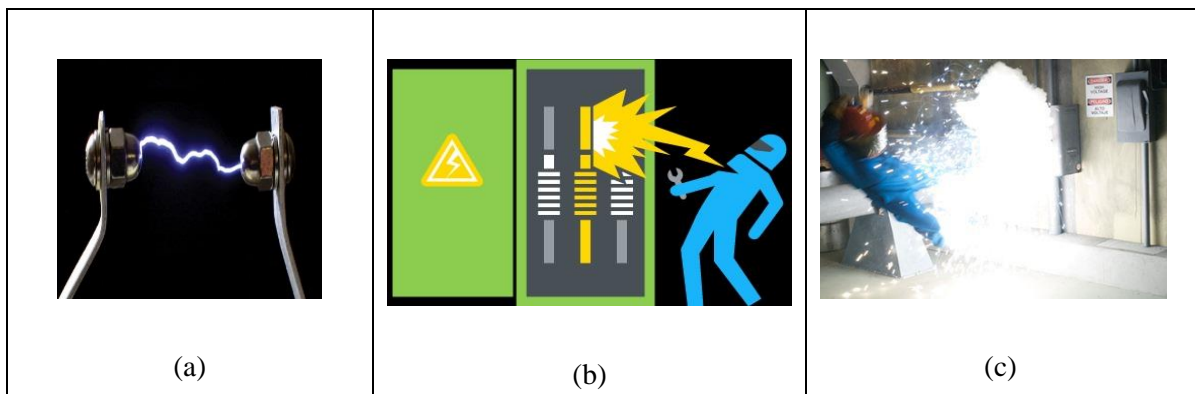


Fig. 2-2 Riesgos Eléctricos

(a)Arco eléctrico **(b)** Interacción con Arc Flash **(c)** Interacción con Arc. Blast

2.10 Discusión

La investigación realizada en este capítulo detalla una revisión bibliográfica de conceptos útiles para entender el riesgo de arc flash y la gravedad de los accidentes eléctricos.

Antes de intervenir en tableros, cabinas y gabinetes eléctricos se debe tener un conocimiento de los riesgos asociados y los efectos de la corriente eléctrica en el cuerpo humano. Específicamente se debe tener en cuenta que dentro de los riesgos eléctricos las consecuencias entre el shock eléctrico, el arc flash y el arc blast pueden tener consecuencias diferentes que se pueden ir desde contracciones musculares, quemaduras, hasta la muerte.

Es importante reconocer que los principales contribuyentes en una falla por arco eléctrico son los errores humanos y fallas del equipo eléctrico.

Dentro de una industria importante como es la minera, los trabajadores pueden intervenir en alta y naja potencia, situación que se puede llegar a pensar que los trabajos son menos riesgosos dependiendo de la potencia utilizada. Esto no es así, hay que entender que en trabajos de gabinetes de baja potencia no requieren de una alta energía incidente para producir quemaduras graves o la muerte por arc flash.

Capítulo 3. Legislación y Normativa

3.1 Introducción

En este capítulo se hace una revisión bibliográfica sobre la legislación y normativa asociada a la seguridad eléctrica en la minería. Se revisa en el ámbito nacional como internacional.

3.2 Sernageomin (Servicio Nacional de Geología y Minería)

El Servicio Nacional de Geología y Minería es un servicio público integrante de la Administración Central del Estado de Chile (Gobierno), tutelado por el Ministerio de Minería.

Es el Organismo responsable de Inspecciones a instalaciones y faenas mineras, para asegurar la correcta aplicación de la normativa de Seguridad Minera y minimizar el riesgo de accidentes personales [3]

3.3 Reglamento de seguridad minera (DS132)

En el reglamento de seguridad minera se muestran diferentes artículos, donde se explica temas relacionados con la seguridad minera. Para este estudio se detalló con más profundidad sobre la Seguridad eléctrica en la minería y se explica lo siguiente: [2] [13]

En las normas nacionales dictadas por la Superintendencia de Electricidad y combustibles deben ser aplicables a las instalaciones, equipos, materiales y dispositivos como así la operación de sistemas eléctricos de las faenas mineras.

En toda faena minera donde se utilice energía eléctrica se deberán mantener planos y registros actualizados de todos los equipamientos y sistemas instalados, como asimismo, la información necesaria y detallada.

Detalla además que ninguna persona podrá instalar, operar, ajustar, reparar o intervenir equipos e instalaciones, sin haber sido instruida y autorizada por la Administración. Además que solo personal autorizado podrá poner en servicio el equipo eléctrico desconectado a causa de la reparación o de la mantención, y únicamente después que los montadores hayan entregado el equipo y de cerciorarse que tal acción no involucra riesgo de accidentes personales o de equipos.

La Empresa Minera deberá velar por el cumplimiento de la normativa vigente y manejo de buenas prácticas en materia de instalación y mantención de sistemas eléctricos, de manera de resguardar la integridad de las personas, equipos e instalaciones. Con tal fin deberá cumplir con las

especificaciones que estarán contenidas en la correspondiente Guía de Operación que publicará el Servicio, la que formará parte del Reglamento interno de la Empresa.

Dentro de este estudio se destaca que el riesgo de Arc Flash en Palas de Cables que son principalmente utilizadas en la Minería, es por ello que se debe tener en cuenta el reglamento de seguridad minera, con el fin de establecer cierto orden y una buena operación de los equipos.

3.4 Responsabilidades

Las normas referentes a seguridad en instalaciones eléctricas, deberán ser contempladas tanto como el que trabaja en la propia empresa como por operarios de otras empresas que estén realizando algún tipo de trabajo en la empresa (personal externo de mantenimiento, subcontratistas, etc.).

Los empresarios que contraten o subcontraten la realización de obras o servicios correspondientes a la propia actividad deben responder del incumplimiento de las obligaciones establecidas en materia de seguridad e higiene durante el periodo de la vigencia de la contrata, siempre que la infracción se haya producido en el centro de trabajo del empresario principal, aun cuando afecte a los trabajadores del contratista o subcontratista. Asimismo se tiene que “el responsable de que se cumplan las medidas de seguridad adecuadas en el trabajo, es la empresa donde presta servicios el trabajador “. Entonces la legislación nos obliga a contemplar las normas de seguridad y a exigir que se cumplan por parte de los operarios como por parte del personal externo.

3.5 Legislación

Se presenta la legislación nacional e internacional referido a la seguridad eléctrica.

3.5.1 Nacional: Ley 16.744 Sobre Accidentes del Trabajo y Enfermedades Profesionales

La ley 16.744 Sobre Accidentes del Trabajo y Enfermedades Profesionales es un seguro social que tiene como objetivo prevenir, otorgar atención médica, prestaciones económicas, rehabilitar y reeducar sobre accidentes del trabajo y enfermedades profesionales. Dentro de los aspectos que respaldan la necesidad de una estrategia se destaca la responsabilidad del empleador de hacer cumplir el “Derecho a Saber”, es decir, informar de forma oportuna a sus trabajadores acerca de los riesgos que entrañan sus labores, las medidas preventivas y los métodos de trabajo correctos. Además de la implementación de un “Sistema de gestión de seguridad y salud en el trabajo” para los empleadores que contraten o subcontraten con otros la realización de una obra o faena. [14]

La ley también exige la existencia de departamentos que permiten cumplir con sus objetivos y debido a sus responsabilidades deberían participar activamente en las actividades de planificación de la Administración de riesgos por jerarquía de control. Estos son [14]:

- Un Departamento de Prevención de Riesgos Profesionales para las empresas mineras, industriales o comerciales con más de 100 trabajadores, el cual está encargado del reconocimiento, evaluación y control de los riesgos.
- Un Comité Paritario encargado de capacitar sobre EPP, supervisar cumplimiento de medidas de higiene, prevención y seguridad, investigar las causas de accidentes y enfermedades profesionales, mantener al día un reglamento interno de higiene y seguridad que debe ser cumplido por los trabajadores.
- La ley chilena trata sobre las responsabilidades del empleador de proporcionar seguridad a los trabajadores y atender oportunamente en caso de accidentes. No obstante, no hace referencia explícitamente a los riesgos eléctricos, pues las medidas para ellos son abordadas por las normas técnicas de seguridad eléctrica nacionales, revisadas posteriormente.

3.5.2 Internacional: Regulaciones OSHA

Bajo la Ley de Seguridad y Salud Ocupacional de 1970 (Ley OSHA) en los Estados Unidos se crea la Occupational Safety and Health Administration (OSHA), organismo encargado de garantizar condiciones de trabajo seguras y saludables mediante la creación y aplicación de normas, además de la capacitación, divulgación, educación y asistencia dirigida hacia los trabajadores y los organismos empleadores, con el fin de ayudarlos a comprender y reconocer el valor por la salud y seguridad.

Las normas de seguridad eléctrica obligatorias instauradas por la OSHA se publican bajo el título 29 del Código de Regulaciones Federales donde las partes 1910.302 a 1910.308 corresponden a normas de seguridad en el diseño de sistemas eléctricos, y las partes 1910.331 a 1910.335 corresponden a prácticas de seguridad eléctrica relacionadas con el trabajo [15]. Estas regulaciones están basadas en las normas eléctricas de la National Fire Protection Association (NFPA), y por tanto establecen solo requisitos de rendimiento respondiendo al “qué se debe cumplir”.

3.6 Normativa

3.6.1 Nacional: Norma Nch 4/2003

En relación a reglamento técnico que entregue directrices para mitigar el riesgo eléctrico o para establecer seguridad frente a éste se encuentra la Norma Eléctrica NCh 4/2003 [16]. Tiene como objeto fijar condiciones mínimas de seguridad que deben cumplir las instalaciones eléctricas de consumo en Baja Tensión, esto para salvaguardar a las personas que las operan y preservar el medio ambiente en que han sido construidas. La norma hace referencia a espacios de trabajo y distancias mínimas de seguridad para lugares donde haya partes energizadas, distinguiendo zonas alcanzables para una persona. No se hace referencia sobre protección o medidas frente a Arc Flash.

3.6.2 Internacional: NEC o NFPA70-2011

La norma *National Electrical Code* (NEC o NFPA 70) es una norma creada por la NFPA que tiene como objetivo especificar los requerimientos de seguridad de las instalaciones eléctricas para proporcionar protección a las personas y los bienes contra los riesgos derivados de la electricidad. Esta fue elaborada para ser utilizada por quienes diseñan, instalan e inspeccionan estas instalaciones eléctricas, es decir a las personas calificadas para el trabajo eléctrico y no para personal sin esta formación.

Esta norma se enfoca en las categorías de control basada en las barreras duras de eliminación, sustitución y controles de ingeniería principalmente para las etapas de diseño y rediseño debido a su carácter técnico. Pero además otra de las categorías de control que es considerada es la de advertencia, pues en su artículo 110.16 exige etiquetado a equipos peligrosos en donde es posible que se genere un arco eléctrico. Sin embargo se debe tener en consideración que cumplir con los requisitos de la NEC es sólo una parte de un diseño seguro, pues es necesario incluir características adicionales que pueden reducir la posibilidad de daños al equipo y lesiones personales.

3.6.3 Internacional: NFPA 70E-2012

La norma NEC o NFPA-70 es una norma creada por la NFPA que tiene como objetivo especificar los requerimientos de seguridad de las instalaciones eléctricas para proporcionar protección a las personas y los bienes contra los riesgos derivados de la electricidad [9]. Esta fue elaborada para ser utilizada por quienes diseñan, instalan e inspeccionan estas instalaciones eléctricas, es decir a las personas calificadas para el trabajo eléctrico y no para personal sin esta formación.

Esta norma se enfoca en las categorías de control basada en las barreras duras de eliminación, sustitución y controles de ingeniería principalmente para las etapas de diseño y rediseño debido a su carácter técnico. Pero además otra de las categorías de control que es considerada es la de advertencia, pues en su artículo 110.16 exige etiquetado a equipos peligrosos en donde es posible que se genere un arco eléctrico. Sin embargo se debe tener en consideración que cumplir con los requisitos de la NEC es sólo una parte de un diseño seguro, pues es necesario incluir características adicionales que pueden reducir la posibilidad de daños al equipo y lesiones personales.

3.6.4 Internacional: IEEE 1584-2002

Un estándar centrado en el arc flash es la IEEE 1584-2002 [17] denominado “*Guide for performing arc-flash hazard calculations*”, este tiene como principal objetivo proporcionar métodos para el cálculo de energía incidente máxima y frontera de acercamiento de arco eléctrico estimado a los cuales los empleados pueden estar expuestos durante su trabajo en o cerca de equipos eléctricos energizados. Esto permite dar soluciones rápidas e integrales en los sistemas eléctricos de una o tres fases, ya sean al aire libre o encerrado, e independiente de la baja o media tensión disponible. Esta norma es la más aceptada para determinar la energía incidente y límites de protección de arco eléctrico, pero por otra parte, para poder aplicar las ecuaciones se necesita de una gran disponibilidad de datos del sistema y una persona con altos conocimientos en sistemas de potencia capaz de realizarlos.

3.7 Discusión

De acuerdo a la normativa y legislación mostrada, la información y las regulaciones más completas relacionadas con el arc flash se encuentran en la normativa internacional. En Chile prácticamente no existen reglamentos relacionados con el arc flash, pero si hay iniciativas e instituciones que deben velar por el cumplimiento de una buena instalación eléctrica, como la Superintendencia de Electricidad y Combustibles y el Sernageomin, que velan por por la buena instalación de corrientes fuertes y débiles , rigiéndose por el reglamento de la Normativa Chilena 4 principalmente. Este estudio se adapta a la normativa internacional y fundamentalmente se basa en modelos entregados por el Estándar IEEE 1584 y NPFA 70E.

Capítulo 4. Jerarquía de control de riesgos.

4.1 Introducción

En este capítulo se presenta una revisión bibliográfica de una jerarquía de control de riesgos basado en la norma ANSI Z10-2005. Esta jerarquía de control va a ser útil en los siguientes capítulos para proponer soluciones que ayuden a eliminar o reducir el riesgo de arc flash.

El control de riesgos define que, a menos que los peligros hayan sido eliminados existe un riesgo.

La jerarquía de control de riesgo, nos permite implementar medidas de control efectivo, para eliminar o reducir el riesgo de exposición a peligros.

4.2 Norma ANSI Z10-2005: Administración de Riesgos y Jerarquía de Control

En su Sección 5, “Implementación y Operación” de la norma ANSI Z10-2005 [18], se definen los elementos operacionales necesarios para la implementación de un efectivo Sistema de Gestión de Riesgos operacionales. Lo primero es definir los controles, para la reducción de riesgos mediante Jerarquía de Controles.

Una jerarquía es cualquier sistema que incorpora acciones, elementos o personas, todas clasificadas en orden uno sobre otro según su grado de importancia o efectividad. Para temas de salud y seguridad, provee una manera sistemática de determinar el método factible más efectivo para reducir el riesgo.

La aplicación de controles debe tener en cuenta:

- La naturaleza y alcance de los riesgos que han sido controlados;
- El grado de reducción de riesgo que se desea;
- Los requisitos de las leyes locales aplicables, normas y reglamentos;
- La tecnología disponible;
- La rentabilidad
- Las normas de organización interna

4.3 Niveles de control de riesgo

- **Eliminación:** El control con mayor efectividad radica en eliminar el peligro en el proceso de diseño inicial o rediseño. Al no haber potencial de daño, el riesgo derivado del peligro también es eliminado. Impacto en la exposición al peligro, lo que elimina el riesgo.
- **Sustitución:** Sustitución por un proceso, equipo o material menos peligroso. Ejemplos incluyen materiales automatizados para manipulación de equipos en el lugar de materiales de manipulación manual. Se reduce la dependencia de acción de los trabajadores, aunque no en la medida que introduce la eliminación de peligro por diseño u otro tipo de eliminación. Afecta a la gravedad y/o la frecuencia de exposición al peligro.
- **Controles de Ingeniería:** Modificar equipos o procesos de trabajo para reducir la exposición y gravedad del daño. Se pueden incorporar dispositivos o sistemas de seguridad como protección de máquinas, sistemas de bloqueo, de detección de fallas, sistemas que separan al personal de la energía peligrosa, etc.
- **Señalización, Advertencias y/o Controles Administrativos:** Controles que alertan a las personas solo después de que el potencial peligro está en proceso. Es un control reaccionario como es el caso de una alarma de humo. La efectividad de sistemas, instrucciones, señales y etiquetas de advertencia se apoyan en los Controles Administrativos: formación, inspección y modificación de comportamiento, programas de trabajo, calidad de mantenimiento, reacción de las personas. El funcionamiento de Controles Administrativos se basa en el acople que exista entre el método y las necesidades; la capacidad de los responsables de la prestación y la aplicación, calidad de supervisión y rendimiento de los trabajadores. Se considera un control vital tener un completo sistema de advertencia. Ejemplo de estos son los que exige Código de Seguridad Humana NFPA 101: detectores de humo, alarmas audibles, señales de salida iluminadas, sistemas de energía de emergencia. Posible efecto en evitar o limitar el daño, exposición inadvertida. Mínimo impacto en la gravedad del daño.
- **Equipos de Protección Personal (EPP):** El último control es la aplicación de EPP el cual minimiza el daño a los trabajadores si las medidas preventivas han fallado. Aunque es el

método menos eficaz y vulnerable, su uso es común y necesario en muchas ocupaciones. El uso apropiado de EPP se basa en medidas de supervisión, identificación y selección, instalación, capacitación, inspección y mantenimiento del equipo. Ejemplos de éstos son, gafas de seguridad, protectores faciales, calzado de seguridad, guantes y protección auditiva. Es un control de riesgo para la gravedad de la exposición, no para la probabilidad de exposición.

4.4 Pirámide Jerarquía control de riesgos

La Administración en riesgos operacionales, requiere que se establezca una racionalidad que fundamente el orden en el que se presentan las medidas. Por tanto, las acciones que se posicionan en el primer, segundo y tercer puesto tienen un grado mayor de efectividad por las siguientes razones: i) Tienen acción preventiva, ii) reducen el riesgo mediante eliminación por diseño y sustitución, iii) se basan en menor grado en el desempeño del personal iv) es difícil ser vulnerada su efectividad. Hasta este nivel, se le llaman “barreras duras”. Tal como muestra la figura 4-1, la pirámide de Jerarquía de Control de Riesgos deja en la cima los métodos más efectivos, característica que disminuye al bajar por la pirámide. En los niveles más abajo, llamadas “barreras blandas”, el control de riesgos depende en gran medida del desempeño de las personas.



Fig. 4-1 Pirámide de jerarquía control de riesgos.

4.5 Discusión

La revisión realizada en este capítulo, estudia una jerarquía de control de riesgos basada en la norma ANSI Z10-2005, la cual contiene niveles de control de riesgos que serán útiles para proponer soluciones para eliminar o reducir el riesgo de arc flash. Estas propuestas de soluciones se estudiarán con mayor profundidad en el capítulo 9.

Conviene siempre trabajar dentro de las barreras duras, ya que no dependen del juicio de las personas.

Capítulo 5. Modelos para estimar falla de arco eléctrico

5.1 Introducción

En este capítulo se estudiarán dos modelos para estimar la falla de arco eléctrico, el Estándar IEEE 1584 y la norma NFPA 70-E. Estas son de útil apoyo para poder estimar corrientes de corto circuito, corrientes de arco, tiempos de despeje de falla y distancias de trabajo. En este capítulo se estudian por separado pero en los próximos capítulos se trabajará de forma conjunta y complementaria.

5.2 Modelo según Estándar IEEE Std. 1584

Esta guía provee técnicas a aplicar en la determinación de la distancia de arco y la energía incidente a la cual los trabajadores podrían estar expuestos a la hora de trabajar sobre o cerca equipo eléctrico. Surge de modelos empíricos basados en el análisis estadístico y ajustes de las curvas de la información disponible luego de las pruebas realizadas a los dispositivos y equipos [17].

A continuación se propone un modelo matemático para estimar falla de arco eléctrico, basado en IEEE Std. 1584, donde primeramente se deben dar ciertas condiciones para que el modelo sea aplicable, esto están escrito en la tabla 5-1 [17].

Tabla 5-1 Condiciones para las cuales las ecuaciones del Std. IEEE 1584 son aplicable

Parámetro	Rango aplicable
Voltaje del sistema (kV)	0.208 a 15 kV
Frecuencia (Hz)	50 o 60 Hz
Corriente de corto Circuito (kA)	0.7 a 106 kA
Separación entre electrodos (mm)	13 a 152 mm
Tipo de equipo	Aire libre, caja, CCM, panel, tableros, cable
Tipo de conexión a tierra	No aterrizado, aterrizado, aterrizado con una gran resistencia
Fases	Fallas Trifásicas

El procedimiento general del estudio de Arco Eléctrico recomendado en el estándar IEEE 1584 consta de los siguientes pasos:

1. Recopilar los datos de campo suficientes para realizar un estudio de corto circuito y coordinación.

Se debe contar con los diagramas unilineales actualizados. Los diagramas unilineales deben contar con los datos suficientes para poder llevar a cabo los estudios de Corto Circuito, Coordinación de Protecciones y Arco Eléctrico. Se deben agregar los datos de todas las posibles fuentes de alimentación (utilidad, generadores, y motores de más de 50 hp, los cuales contribuyen con las corrientes de cortocircuito).

Equipos alimentados a menos de 240 V no necesitan ser considerados a menos que se involucre uno o más transformadores de 125 kVA (o mayor capacidad) de baja impedancia en su fuente de alimentación inmediata. Por parte de la utilidad se debe conocer el aporte de los MVA de falla y su relación X/R, además obtener los datos de los conductores incluyendo el tipo de instalación y las características de los dispositivos de protección.

2. Identificar los posibles modos de operación del sistema.

Es importante determinar la corriente de falla en cada bus para los diferentes modos de operación, tanto la corriente máxima como la corriente mínima de falla.

3. Calcular la corriente de falla en cada punto del sistema.

Para esto es necesario desarrollar un estudio de Corto Circuito y obtener las corrientes de falla para cada bus del sistema.

Esta corriente dependerá principalmente de la corriente de falla franca disponible y será menor a esta debido a la impedancia del arco, especialmente para aplicaciones menores a 1 kV.

4. Calcular la corriente de falla por arco que fluye a través de cada rama de cada punto de falla.

La corriente de falla de arco en el punto de interés y la porción de esa corriente que pasa a través del dispositivo de protección aguas arriba debe ser determinada. Esta corriente dependerá principalmente de la corriente de falla franca disponible y será menor a esta debido a la impedancia del arco, especialmente para aplicaciones menores a 1000 V

5. Características de las protecciones y duración de los arcos eléctricos

De las características del dispositivo de protección, se encuentra la duración del arco. El tiempo total de despeje de la falla de arco determinará el factor "tiempo" en la ecuación de energía.

Si un dispositivo de protección posee ya sea un elemento de disparo integral o un fusible, el tiempo total de despeje debe incluir todas las variables y tolerancias, así el tiempo total despeje es igual al

tiempo de exposición a un arco. Si dos dispositivos operan juntos, entonces la combinación de los tiempos de despeje, junto con las tolerancias de funcionamiento, deben añadirse.

6. Documentar las tensiones del sistema y la clase de equipo

Para cada bus se debe documentar la tensión de operación y la clase de equipo como se muestra en la Tabla 5-2. Esto permitirá la aplicación de las ecuaciones para hallar la energía incidente.

Tabla 5-2 Clase de equipo y espacios de aire (gap) de arco típicos

Clase de equipo	Espacios de aire (gap) de arco típicos(mm)
15 kv Switchgear	152
5 kv Switchgear	104
Switchgear de baja tensión	32
MCCs y panelboards de baja tensión	25
Cables	13
Otros	No requerido

7. Seleccionar distancia de trabajo

La protección contra Arc flash se basa siempre en la energía incidente a nivel del pecho y la cara de la persona a la distancia de trabajo, no la energía incidente en brazos y manos. Esto es debido a que las quemaduras a nivel de la cabeza y tronco son más amenazantes para la vida que a nivel de extremidades. La Tabla 5-3 establece las distancias de trabajo típicas según la clase de equipo.

Tabla 5-3 Clase de equipo y distancia de trabajo típicos

Clase de equipo	Distancias de trabajo típicos (mm)
15 kv Switchgear	910
5 kv Switchgear	910
Switchgear de baja tensión	610
MCCs y panelboards de baja tensión	455
Cables	455
Otros	A determinarse en el campo

8. Determinar la energía incidente para cada locación de trabajo (equipo)

La mejor recomendación es utilizar software apropiado para realizar los cálculos. Las ecuaciones a resolver se presentan en la norma y se han incorporado en programas de simulación, las cuales pueden resolver la energía incidente por bus o múltiples buses a la vez. Para ello se proponen modelos matemáticos descritos más adelante.

9. Determinar la frontera de protección de Arc flash para cada locación de trabajo en el estudio

Para hallar esta frontera de protección, las ecuaciones para encontrar la energía incidente se pueden resolver para la distancia a la cual, desde la fuente del arco, se tiene el umbral bajo el que puede ocurrir una quemadura de segundo grado. Los programas de cómputo incluyen el límite de protección basado en una energía incidente de J/cm^2 ($1,2 \text{ cal/cm}^2$).

5.1.2 Modelo para los cálculos de energía incidente

▪ Corriente de Arco

La corriente de arco trifásica se debe encontrar para poder determinar el tiempo de operación de los dispositivos de protección. Para aplicaciones con una tensión del sistema por debajo de 1000 V, se utiliza la ecuación (5.1):

$$\log(I_a) = K + 0,662 \log(I_{bf}) + 0,096V + 0,000526G + 0,5588V(\log(I_{bf})) - 0,00304G(\log(i_{bf})) \quad (5.1)$$

Donde,

I_a : Corriente de Arco (kA)

K : -0,153 para configuraciones abiertas y -0,097 para configuraciones en caja cubica

I_{bf} : Corriente de falla franca para fallas trifásicas (RMS simétrica) (kA)

V : Tensión del sistema (kV)

G : Separación entre conductores, (mm).

Para aplicaciones con tensiones del sistema de 1000 V o superior, se utiliza la ecuación (5.2):

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(I_{bf}) \quad (5.1)$$

En el caso para alta tensión no hace distinción entre configuración abierta y en caja cúbica.

Convirtiendo de:

$$I_a = 10^{\log(I_a)} \quad (5.2)$$

Se calcula una segunda corriente de arco igual al 85% de I_a , de modo que se puede determinar un segundo tiempo de duración del arco.

- Energía incidente

Primero se debe encontrar el logaritmo en base 10 de la energía incidente normalizado. Esta ecuación se basa en los datos normalizados para una duración de arco de 0,2 segundos y una distancia desde un posible punto de arco hasta la persona de 610 mm, de acuerdo con (5.4).

$$\log(E_n) = K_1 + K_2 + 1,081 \log(I_a) + 0,0011G \quad (5.3)$$

Donde,

E_n : Energía incidente (J/cm^2) normalizada en tiempo y distancia.

K_1 : Es -0,792 para configuraciones abiertas (sin gabinete) y es -0,555 para configuraciones en caja cúbica (equipo cerrado)

K_2 : Es 0 para sistemas no aterrizados o con una alta resistencia de aterrizado y es -0,113 para sistemas aterrizados.

G : Separación entre conductores, (mm)

Luego;

$$E_n = 1^{\log(E_n)} \quad (5.5)$$

Y finalmente se convierte desde la normalizada:

$$E = 4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{D^x} \right) \quad (5.6)$$

Donde,

E : Energía incidente (J/cm^2)

C_f : es un factor de cálculo 1,0 para tensiones mayores a 1 kV y 1,5 para voltajes de 1 kV o menores.

E_n : Energía incidente normalizada.

t : Tiempo de duración del arco (segundos).

D : Distancia desde un posible punto de arco hasta la persona (mm).

x : Factor de distancia (ver tabla 5-4)

Tabla 5-4 Factor de distancia

Tipo	0,208 - 1kV	>1 – 15kV
Aire libre	2	2
Tablero	1.473	0.973
CCM y panel	1.641	
Cable	2	2

- Límite de protección contra relámpago (“Flash protection boundary”)

$$D_B = \left[4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{D^x} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \quad (5.7)$$

Donde,

C_f : Factor de cálculo 1,0 para tensiones mayores a 1 kV y 1,5 para tensiones de 1 kV o menores.

E_n : Energía incidente normalizada.

D_B : Distancia limite desde el punto al arco

E_B : Energía incidente (J/cm^2) a una distancia límite de protección

t : Tiempo de duración del arco (segundos).

x : Exponente de la distancia

I_{bf} : Corriente de falla franca

E_B Se puede fijar en $5,0 J/cm^2$ ($1,2 cal/cm^2$) para la piel desnuda (sin capucha protectora).

5.2 Modelo según Estándar NFPA-70E

La norma NFPA 70-E es otro modelo para estimar la falla de arco con datos establecidos, el cual define valores de energía incidente categorizadas por algún tipo de actividad y equipamiento.

En la tabla 5-5 se presentan un ejemplo de categorización peligro/riesgo para diferentes tareas, donde se asume que el equipo esta energizado y que el trabajo se realiza dentro de la frontera de protección contra arco.

Tabla 5-5 Ejemplo de categorización peligro/riesgo para tareas [19]

Tarea (se asume que el equipo esta energizado y que el trabajo se realiza dentro de la frontera de protección contra arco)	Categoría peligro/riesgo	Guantes V. Nominal	Herramientas V. Nominal
Tableros de potencia encerrados en metal, 1 kV y mayor			
Lectura del medidor de panel mientras que se opera el conmutador del medidor	0	NO	NO
Trabajo en partes energizadas incluyendo la prueba de tensión	4	SI	SI
Trabajo en circuitos de control con partes expuestas energizadas a 120 V 0 menos	2	SI	SI
Trabajo en circuitos de control con partes expuestas energizadas a >120V	4	SI	SI
inserción o retiro de de interruptores automáticos (IAs) de los cubículos, estando las puertas abiertas	4	NO	NO
inserción o retiro de IAs de cubículos, estando las puertas cerradas	2	NO	NO
instalación de tierras de seguridad después de la prueba de tensión	4	SI	NO
Retiro de cubiertas atornilladas (para exponer partes desnudas energizadas)	4	NO	NO
Apertura de cubiertas con bisagras (para exponer partes desnudas energizadas)	3	NO	NO
Apertura de compartimientos de transformador de tensión o transformador de potencia de control	4	NO	NO

5.2.1 Métodos de cálculo y limitaciones

En su Anexo D de la norma NFPA 70-E resume los métodos de cálculo disponibles para el Cálculo de Límites de Energía y Arc Flash.

A continuación en la tabla 5-6, se muestra las limitaciones de los parámetros de los métodos de cálculos de los diferentes autores.

Tabla 5-6 Limitaciones de los métodos de cálculo.

Fuente	Limitaciones/Parámetros
Ralph Lee paper	Calcula el límite de flash de arco para el arco al aire libre. conservador más de 600 V y se vuelve más conservador mientras el voltaje aumenta
Doughty/Neal paper	Calcula la energía incidente para arco trifásico en sistemas entre 600 V e inferior; se aplica para cortocircuitar las corrientes entre 16 kA y 50 kA.
Ralph Lee paper	Calcula la energía incidente para arco trifásico al aire libre en sistemas por encima de 600 V; se vuelve más conservador al aumento de voltaje
IEEE Std. 1584	Calcula límites de energía y arc flash desde 208 V a 15 kV; trifásico; 50 Hz a 60 Hz; 700 A a 106.000 A corriente de cortocircuito; y de 13 mm a 152 mm huecos de conductores.
ANSI/IEEE C2 NESC, Sección 410	Calcula la energía incidente para arcos de fase a tierra de aire libre 1 kV a 500 kV para línea viva de trabajo

5.2.2 Ecuaciones Básicas para Calcular Distancias de Límite de Arc Flash según Ralph Lee paper.

La corriente máxima de cortocircuito I_{sc} , de una falla trifásica en los terminales del transformador se calcula con la siguiente fórmula:

$$I_{sc} = \{[MVA_{Base} \times 10^6] \div [1.732 \times V]\} \times \{100 \div \%Z\} \quad (5.8)$$

Donde I_{sc} está en amperios, V está en voltios, y %Z es la impedancia base en el transformador MVA.

La distancia del límite del arc flash se calcula de acuerdo con las siguientes fórmulas:

$$D_c = [2.65 \times MVA_{bf} \times t]^{1/2} \quad (5.9)$$

$$D_c = [53 \times MVA \times t]^{1/2} \quad (5.10)$$

Dónde,

D_c : Distancia en pies de la fuente del arco para quemaduras curables (es decir, temperatura de la piel permanece inferior a 80°C)

MVA_{bf} : Falla atornillada MVA en el punto involucrado.

MVA : Valor nominal en MVA del transformador. Para transformadores con calificaciones inferiores a 0,75 MVA, se multiplican el valor de MVA del transformador en 1,25.

t : Tiempo de exposición al arco (segundos).

Las formulas usadas en esta explicación son de Ralph Lee. Los cálculos son basados en la impedancia de arco del peor caso (Ver Tabla 5-7.)

Tabla 5-7 Peligro de quemadura instantánea a diversos niveles en una planta petroquímica grande

Niveles Voltaje Nominal Bus	Sistema (MVA)	Transformador (MVA)	Sistema o Transformador (%Z)	Cortocircuito Simétrico (A)	Claro Tiempo de Falla (ciclos)	Límite de Arc Flash Distancia Típica*	
						SI	US
230 kV	9000		1.11	23,000	6.0	15 m	49.2ft
13.8 kV	750		9.4	31,000	6.0	1.16 m	3.8 ft
Carga lateral de todos Fusibles de 13,8 V	750		9.4	31,000	1.0	184mm	0.61ft
4.16 kV		10.0	5.5	25,000	6.0	2.96 m	9.7ft
4.16 kV		5.0	5.5	12,600	6.0	1.4 m	4.6ft
Lado de línea de entrada Fusible de 600-V		2.5	5.5	44,000	60.0 - 120.0	7m - 11m	23ft- 36ft
Bus 600-V		2.5	5.5	44,000	0.25	268 mm	0.9ft
Bus 600-V		1.5	5.5	26,000	6.0	1.6 m	5.4ft
Bus 600-V		1.0	5.57	17,000	6.0	1.2 m	4 ft

5.2.3 Cálculo de la exposición de energía incidente para un Análisis de Peligro de Arc Flash según Doughty/Neal paper

Las siguientes ecuaciones pueden utilizarse para predecir la energía incidente producida por una red trifásica en sistemas de 600 V y más. Los resultados de estas ecuaciones podrían no representar el peor caso en todas situaciones.

Los parámetros necesarios para hacer los cálculos son:

- La máxima exposición a la energía incidente podría ocurrir en niveles inferiores, donde la sobrecorriente del dispositivo podría tardar segundos o minutos en abrirse).
- El tiempo total de despeje del dispositivo de protección ante la corriente de cortocircuito máximo y al nivel mínimo de falla en el que el arco se sustentará.
- La distancia entre el trabajador y el arco.

- Las Distancias de trabajo típicas usadas para cálculos de energía incidente son como las siguientes:
 - MCC de bajo voltaje (600 V y menos) y tableros - 455 mm (18 pulgadas)
 - Aparato de baja tensión (600 V e inferior) - 610 mm (24 in.)
 - Aparato de conmutación de media tensión (por encima de 600 V) - 910 mm (36 pulg.)

a) Arco al aire libre.

La energía incidente estimada para un arco al aire libre se presenta en la ecuación (5.11):

$$E_{MA} = 5271D_A^{-1.9593}t_A[0.0016F^2 - 0.0076F + 0.8938] \quad (5.11)$$

Donde,

E_{MA} : Energía incidente máxima de arco abierto, (cal/cm²)

D_a : Distancia de los electrodos de arco, en pulgadas (para distancias 18 pulgadas o más)

t_A : Duración de arco, en segundos

F : Corriente de cortocircuito, kA (para el rango de 16 kA a 50 kA)

5.2.4 Cálculo de la exposición a energía incidente Mayor a 600 V para un Análisis de Peligro de Arc Flash según Ralph Lee paper.

La ecuación (5.12) se puede usarse para predecir la energía incidente producida por un arco eléctrico trifásico al aire libre en sistemas superior a 600 V. Los parámetros necesarios para los cálculos siguen.

-El fallo máximo atornillado, cortocircuito trifásico corriente disponible en el equipo.

-El tiempo total de despeje de la falla del dispositivo de protección

-La distancia desde la fuente de arco.

-Rango tensión de fase a fase del sistema.

$$E = \frac{793 \times F \times V \times t_A}{D^2} \quad (5.12)$$

Donde:

E : Energía incidente (cal/cm²)

F : Corriente de cortocircuito de la falla kA

V : Voltaje fase a fase del sistema kV

- t_A : Duración de arco, seg.
 D : Distancia de la fuente de arco, pulgadas.

5.2.5 Ecuaciones básicas para calcular energía incidente y Límite de Arc Flash Según IEEE 1584

Un grupo de trabajo de la IEEE produjo los las pruebas realizadas para producir modelos de energía incidente.

- **Límites del sistema.**
 - 0,208 kV a 15 kV, trifásico
 - 50 Hz a 60 Hz
 - 700 A a 106,000 A corriente de cortocircuito disponible
 - Espacios entre conductores de 13 mm a 152 mm

- **Corriente de arco.**

Se debe despejar la corriente de arco de la ecuación (5.13)

$$\lg I_a = K + 0.662 \lg I_{bf} + 0.0966V + 0.000526G + 0.05588V(\lg I_{bf}) - 0.00304G(\lg I_{bf}) \quad (5.4)$$

Donde,

- l_g : \log_{10}
 I_a : Corriente de arco, kA
 K : -0,153 para arco en aire libre; -0.097 para arcos en una gabinete cerrado
 I_{bf} : Corriente de cortocircuito trifásica kA
 V : Voltaje del sistema, kV
 G : Separación del conductor,mm (ver tabla 5-7)

Para sistemas mayores o iguales a 1 kV, utilice la ecuación (5.14):

$$\lg I_a = 0.00402 + 0.983 \lg I_{bf} \quad (5.14)$$

Despejando:

$$I_a = 10^{\lg I_a} \quad (5.15)$$

Tabla 5-8 Factores para clases de equipos y voltaje [19]

Voltaje Sistema (kV)	Tipo de Equipo	Separación Típica Conductor (mm)	Distancia Exponente Factor X
0.208-1	Aire Libre	10-4	2.000
	Conmutador	32	1.473
	MCC y paneles	25	1.641
	Cables	13	2.000
>1-5	Aire Libre	102	2.000
	Conmutador	13-102	0.973
	Cables	13	2.000
>5-15	Aire Libre	13-153	2.000
	Conmutador	153	0.973
	Cables	13	2.000

▪ **Energía incidente en la distancia de trabajo**

La siguiente ecuación se basa en datos normalizados para un tiempo de arco de 0,2 segundos y una distancia del punto de arco posible a la persona de 610 mm:

$$\lg E_n = k_1 + K_2 + 1.081 \lg I_a + 0.0011 \quad (5.16)$$

Donde,

E_n : Energía incidente, normalizada para el tiempo y la distancia, J/cm²

K_1 : -0.792 para arcos en aire libre; -0.555 para arcos en gabinetes cerrado

K_2 : 0 para sistemas sin puesta a tierra, -0.113 para sistemas conectados a tierra

G : Separación del conductor, mm (ver tabla 5-7)

Entonces,

$$E_n = 10^{\lg E_n} \quad (5.17)$$

Conversión de normalizado:

$$E = 4.184 C_f E_n \left(\frac{t}{0.2} \right) \left(\frac{610^x}{D^x} \right) \quad (5.18)$$

Donde,

E : Energía incidente, normalizada para el tiempo y la distancia, J/cm²

C_f : Factor de cálculo 1,0 para tensiones superiores a 1kV; 1,5 para tensiones iguales o inferiores a 1kV

- E_n : Energía incidente normalizada.
 t : Tiempo de duración del arco, seg.
 x : Distancia exponente (ver tabla 5-8)
 D : Distancia, mm, del arco a la persona (distancia de trabajo). Véase la Tabla (5-9)

Tabla 5-9 Distancias de trabajo típicos

Clases de Equipo	Distancia de Trabajo Típica* (mm)
15-kV conmutador	910
5-kV conmutador	910
Conmutador de baja tensión	610
MCC de bajo voltaje y tableros	455
Cable	455
Otros	A determinar en el campo

▪ **Ecuación de Energía Incidente considerando Distancia-Teórica de trabajo.**

La siguiente ecuación teórica se puede aplicar en los casos en que la tensión es mayor a 15 kV o la separación está fuera del rango:

$$E = 2.142 \times 10^6 V I_{bf} \left(\frac{t}{D^2} \right) \quad (5.19)$$

Donde,

- E : Energía incidente, J/cm²
 V : Voltaje del sistema, kV
 I_{bf} : Corriente de falla trifásica
 t : Tiempo de duración del arco, seg.
 D : Distancia, mm, del arco a la persona (distancia de trabajo). Véase la Tabla (5-8)

Para tensiones superiores a 15 kV, la corriente de falla de arco y corriente de falla se consideran iguales.

▪ **Límite de Arc Flash.**

El límite del arco es la distancia a la que es probable que una persona reciba una quemadura de segundo grado. La aparición de una quemadura de segundo grado se da cuando la piel recibe 5,0 J / cm² de energía incidente.

$$D_B = \sqrt{2.142 \times 10^6 V I_{bf} \left(\frac{t}{E_B} \right)} \quad (5.20)$$

Donde,

- D_B : Distancia (mm) del límite del arc flash
- C_f : Factor de cálculo; 1,0 para tensiones superiores a 1 kV; 1,5 para tensiones iguales o inferiores a 1kV
- E_n : Energía incidente normalizada
- t : Tiempo de duración del arco, seg.
- x : Distancia exponente
- E_B : Energía incidente en J/cm² a la distancia de límite del arc flash
- V : Voltaje del sistema, kV
- I_{bf} : Corriente cortocircuito trifásico

5.2.6 Cálculos de energía incidente en corriente- directa

- **Método de potencia máxima.**

Este método se basa en el concepto de que la potencia máxima posible en un arco ocurre cuando la tensión de arco es la mitad del sistema voltaje. Pruebas realizadas para Bruce Power ha demostrado que este cálculo es conservadoramente alto en la estimación del valor del arco eléctrico. Este método se aplica a sistemas de corriente continua de hasta 1000 Vdc.

$$I_{arc} = 0.5 \times I_{bf} \quad (5.21)$$

$$I_{arc} = IE_m = 0.01 \times V_{sis} \times I_{arc} \times T_{arc} / D^2 0.5 \times I_{bf} \quad (5.22)$$

Donde,

- I_{arc} : Corriente de arco, amperees
- I_{bf} : Corriente de falla, amperes
- IE_m : Energía incidente del arc flash de dc en punto de potencia máxima, cal/cm²
- V_{sis} : Voltaje del sistema, volt
- T_{arc} : Tiempo de arco, seg.
- D : Distancia de trabajo, cm.

Para las exposiciones donde el arco está en una caja cerrada, sería prudente utilizar un factor multiplicador de 3 para el resultante del valor de la energía incidente.

- **Método de Cálculos detallados de la corriente de arco y de la energía.**

Una revisión teórica minuciosa del arco eléctrico de dc corriente y energía se presentó en el IEEE PCIC 2009 Conferencia. Se recomienda a los lectores que se refieran a ese para esos cálculos detallados.

5.3 Discusión

En el método IEE1584-2002, requiere de cálculos extensos. Las ecuaciones se derivan de proporcionar una gran cantidad de datos de prueba estadísticos a un modelo.

Ambos métodos de análisis usan aproximaciones y simplificación del problema para llegar a la energía incidente. El arco eléctrico al aire libre es difícil de representar matemáticamente. Los estándares utilizan una combinación de modelos teóricos y pruebas en laboratorios y utilizan valores de corriente de falla simétrica.

En la norma NFPA 70-E, la mayoría de los cálculos experimentales son basados en la impedancia de arco del peor caso.

Las tablas y ecuaciones de la norma NFPA 70-E son muy conservadores y de cierta forma sobreprotegen al equipo o a los trabajadores. Es por ello que se trabajó de forma coordinada entre la norma NFPA 70-E y Std. IEEE 1584 para llegar a un resultado final.

Se siguieron los pasos recomendados del Std. IEEE 1584 para poder estimar la energía incidente pero tomando referencias de recomendaciones de seguridad y protección basadas en la norma NFPA70-E.

Capítulo 6. Estudio de corto circuito

6.1 Introducción

A grandes rasgos, en el proceso de extracción de una mina se ocupan palas de cable que son útiles para cargar los minerales en los camiones de carga. Esta pala de cable es alimentada por energía eléctrica. En la figura 6-1 se presenta un diagrama, donde muestra la forma en que se alimenta la pala.

La red de distribución del Sistema Eléctrico Nacional alimenta a una minera, la cual su energía es transportada por líneas de alta tensión que llegan a las subestaciones eléctricas, que pueden distribuir la energía a diferentes puntos de procesos de la mina. Particularmente, la energía llega a una barra principal, que a través de alimentadores distribuyen la energía a través de líneas aéreas a subestaciones móviles, que reducen la energía a una tensión necesaria capaz de alimentar las diferentes cargas. Estas subestaciones móviles permiten una disponibilidad de movimiento para recorrer diferentes puntos de la mina según lo requerido. A través de cables móviles la subestaciones móviles alimenta cargas como la pala de cable, éstas son útiles para cargar minerales a los diferentes camiones de carga.

En este capítulo se procederá a realizar un estudio de cortocircuito en la subestación eléctrica de una mina de ejemplo, donde el enfoque principal son los gabinetes eléctrico de una pala de cable.

Este estudio es basado en la norma IEEE 1584, el cual será útil en la obtención de datos necesarios para calcular corrientes de falla y de arco. Además será el primer paso para poder realizar una simulación y un posterior cálculo de corrientes de falla y energía incidentes en los diferentes puntos de interés.

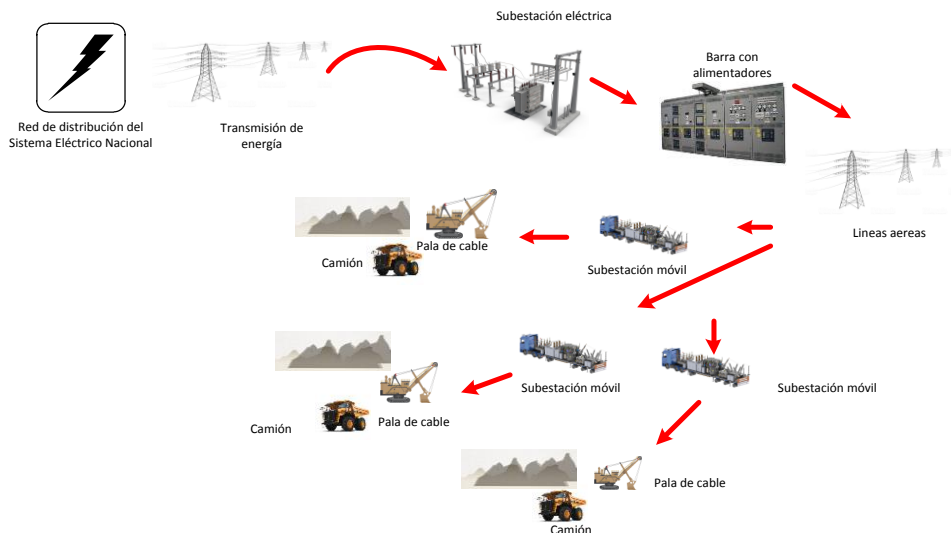


Fig. 6-1 Alimentación de energía a la pala de cable

6.2 Recopilación de información técnica y análisis de operación

Se hace una recopilación de información técnica en un Sistema Eléctrico Minero, con datos reales de ejemplo. En la figura 6-3 se puede ver el diagrama unilineal de una subestación eléctrica de ejemplo, llamada Subestación B.

- Subestación B

La subestación B tiene una barra principal de 13,8 kV, cuenta con dos alimentadores mostrados en la tabla 6-1.

Tabla 6-1 Alimentadores en Subestación B

Alimentadores	
52B15	52B14

En la figura 6-3 se puede ver el diagrama unilineal de la Subestación B.

La subestación B tiene una barra principal de 18.3 kV. Posee dos alimentadores, presentados en la tabla 6-1. Estas barras principales son responsables de suministrar la potencia a las diferentes barras o cargas presentes en el sistema eléctrico de potencia. Cada alimentador tiene un sistema de protección tipo relé 50/51F.

En el sistema eléctrico de potencia minero están presentes además las subestaciones móviles, que son partes integras del sistema. Estas convierten la energía suministrada por los alimentadores a una tensión menor. Las subestaciones móviles pueden ser reubicadas en diferentes puntos o áreas de la mina para responder a los constantes cambios de frente de trabajo (ver figura 6-2). Además cuentan con protecciones de sobrecorriente modelo fusible S&C C en el primario, y un relé de protección 50/51F en el secundario. En la tabla 6-2 están referenciadas el nombre y la ubicación de las subestaciones móviles.

Las subestaciones móviles conectadas a la S/E B, reducen la tensión suministradas por los alimentadores de 13.8kV a 7.2kV, para ser suministrada a las demás barras. Como cargas hay 6 barras de 7.2kV que alimentan a palas eléctricas de cable modelo Bucyrus 495HR y 4 barras que alimentan cargas estáticas de 1 MVA con un factor de potencia de 0.87.

Tabla 6-2 Nombre y ubicación de Subestaciones móviles

Nombre de Subestación	# S/E móvil
Subestación B	1-9-20-15-17

En la figura 6-2. Se presenta un ejemplo de subestación móvil.



Fig. 6-2 Ejemplo Subestación Móvil

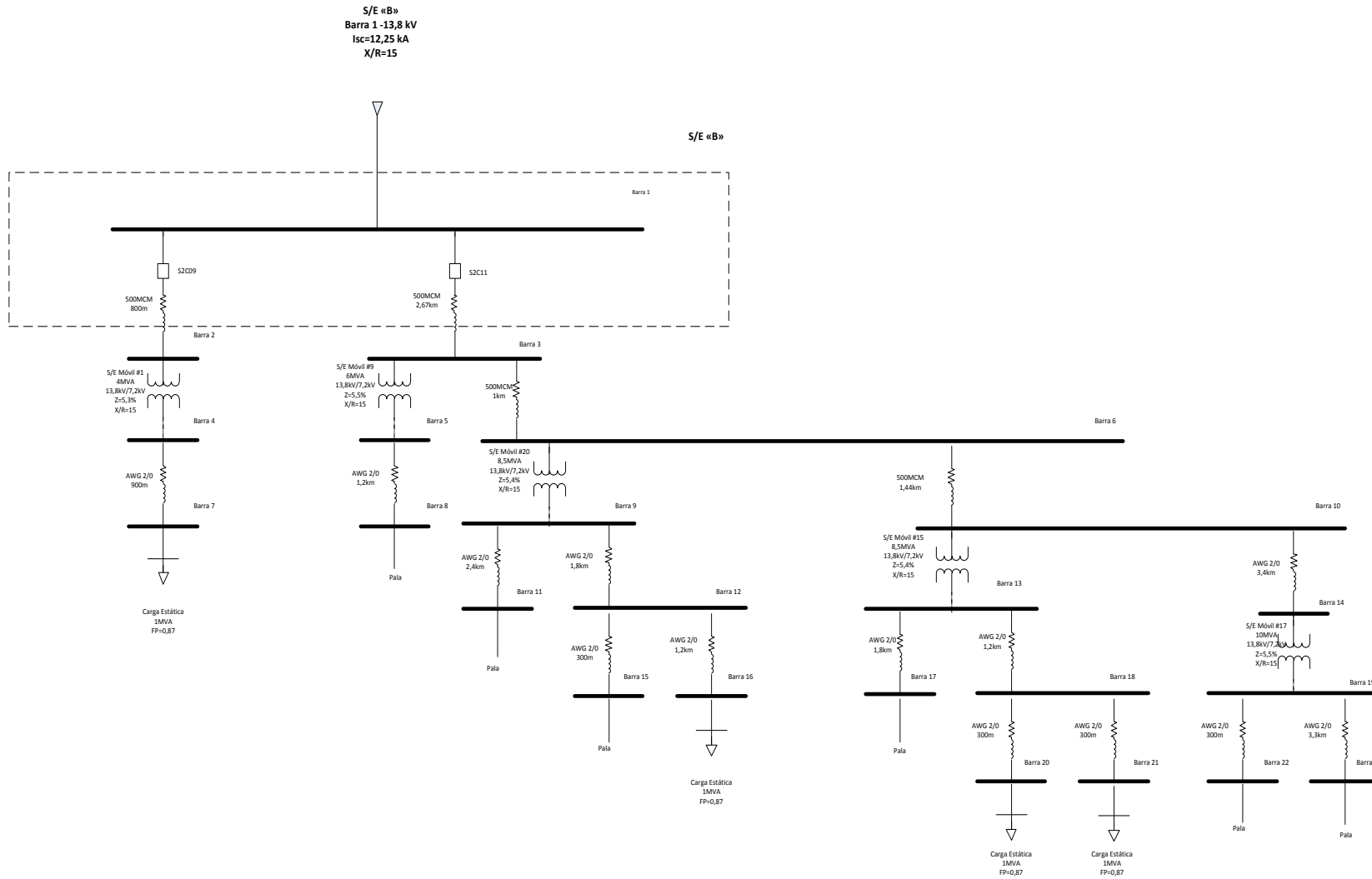


Fig. 6-3 Diagrama Unilineal Subestación B

6.3.2 Características Generales de operación de un Relé de protección

Para entender los parámetros presentados en el resumen de protección, se describe el funcionamiento del relé y el fusible.

El funcionamiento de un relé de sobre corriente depende de dos variables básicas:

1. El nivel de corriente mínima de operación (o corriente de pickup), que es aquel valor que produce el cambio de estado del relé.
2. La característica de tiempo de operación, es decir la forma en que el relé responde en cuanto al tiempo.

De acuerdo a la característica de tiempo de operación, los relés pueden clasificar en:

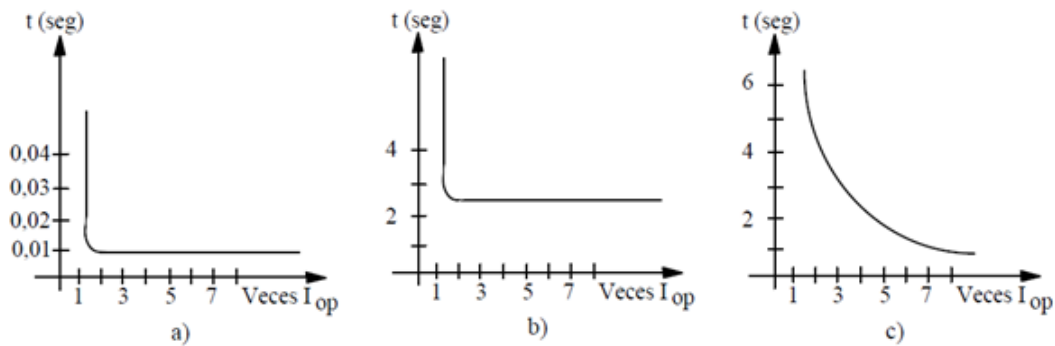
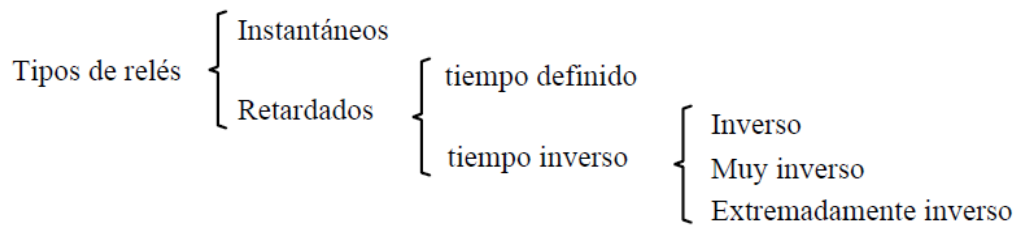


Fig. 6-4 Curvas de tiempo corriente de relé

a) Instantáneo; b) Tiempo definido; c) Tiempo Inverso

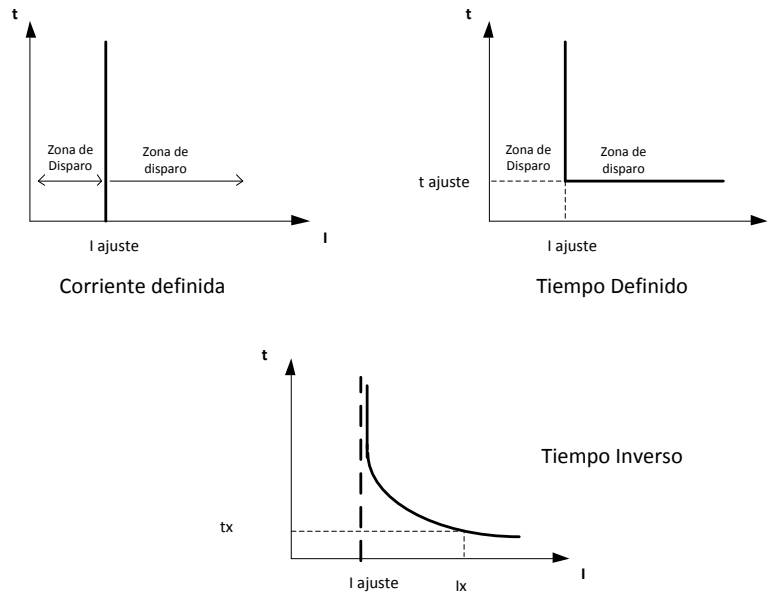


Fig. 6-5 Curvas de tiempo corrientes de relés

- **Tiempo Instantáneo:** Indica que los contactos de disparo del relé se cierran tan pronto la corriente supera el valor ajustado.
- **Tiempo Definido:** Una protección simple de tiempo definido podría obtenerse usando un relé instantáneo en conjunto con un elemento temporizador, que produzca el retardo necesario. El relé opera sólo si la sobrecorriente se mantiene durante el tiempo necesario. En caso contrario, el relé se repone.
- **Tiempo Inverso:** La principal características de este tipo de relés es que mientras mayor sea la corriente aplicada, menor es su tiempo de operación.

a. Relé de Protección 50/51F

El tipo de protección usado es el 50/51 F, una protección de sobre-corriente. Para un nivel de corriente excesivamente alto, el relé mantiene un cierto tiempo y luego envía una señal de disparo o alarma para proteger el sistema. Se ocupa esta protección porque están asociadas a fallas de corto circuito, lo que sirve para el estudio de arco eléctrico.

- 50 F, Tiempo Instantáneo:

No tolera falla y es más rápida, en términos generales los parámetros relevantes asociados a esta protección son:

- a) Pick – up: Corriente mínima de arranque o corriente máxima de carga del transformador sin que actúe la protección, se ajusta entre un 150 y 200 % de la capacidad nominal. Dependerá además de la relación de vueltas en el transformador.
- b) Delay: Es el retardo de los contactos en el inicio del funcionamiento de la protección

- 51 F, Tiempo Inverso:

Tolera la falla durante determinado tiempo, y en términos generales los parámetros relevantes asociado a esta protección son:

- a) Curvas: Las curvas son del tipo tiempo-corriente, donde el eje vertical corresponde al tiempo de operación del relé en segundos y el eje horizontal corresponde a la corriente.

En la tabla 6-5 se presentan los tipos de curvas.

Tabla 6-5 Tipos de curvas

Curvas IAC	Curvas IEC (GE)
Extremadamente Inversa	Curva A
Muy Inversa	Curva B
Normalmente Inversa	Curva C
Moderadamente Inversa	Inversa Corta

- a) Pick up: Corriente mínima de arranque o corriente máxima de carga del transformador sin que actúe la protección, se ajusta entre un 150 y 200 % de la capacidad nominal. Dependerá además de la relación de vueltas en el transformador.

- b) Multiplier o dial: Es el sistema que determina el tiempo de operación de los contactos del relé después de haber iniciado su operación. El dial representa cada uno de los posibles ajustes de tiempo o curva. El retardo en tiempo de operación se efectúa con el dial de tiempos (TMS)
El rango de ajustes del DIAL depende del fabricante y la tecnología del relé, pero los valores normalizados de acuerdo con cada norma son los siguientes:

Norma IEC = Dial desde 0,05 hasta 1,00

Norma ANSI = Dial desde 1,0 hasta 10,0

Se presentan en la figura 6-8 curvas características estandar IAC, y en la figura 6-7 se presenta curvas tiempo corriente de ejemplo de protección GE F-35

b. Protección fusible

El fusible utilizado en las subestaciones móviles es:

Fusible S&C SM5-300E es un fusible de marca S&C tipo botella (existen tipo navaja tipo cigarro, etc.).

Clasificación:

Tabla 6-6 Clasificación del fusible SM5-300E

Tipo	kV			Amperes, RMS, Symmetrical		
	Nominal	Máximo	Bil (Nivel de aislamiento)	Máximo	Interrupting	
SM-5S	25	27	150	300E	20000	20000

Se presenta en la figura 6-6 curva tiempo-corriente de fusible SM5, donde se destaca la corriente máxima tipo 300E en color verde oscuro.

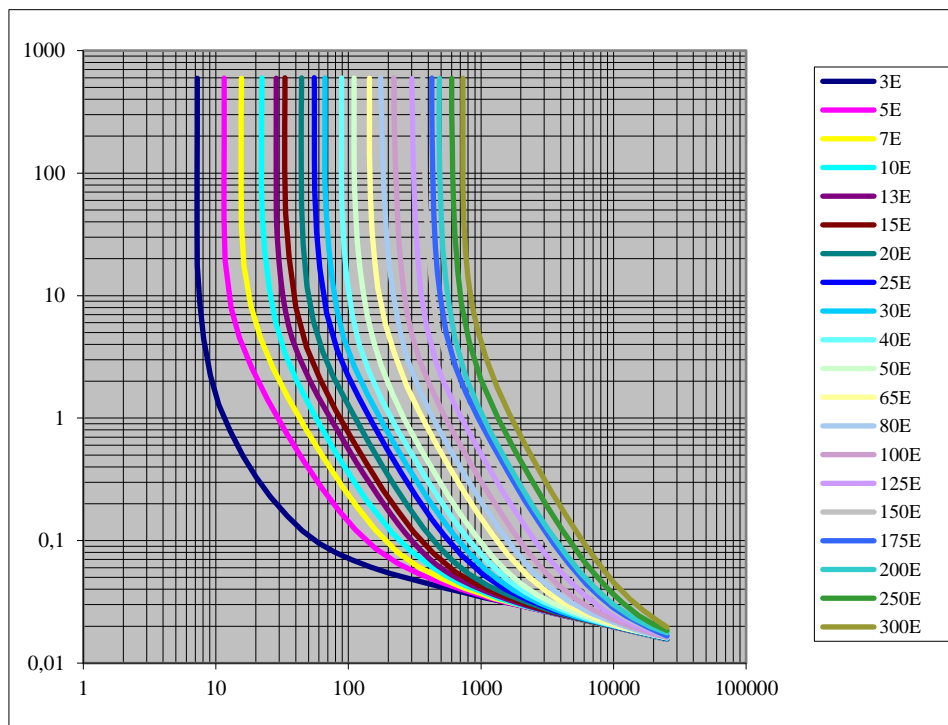


Fig. 6-6 Curva tiempo corriente fusibles

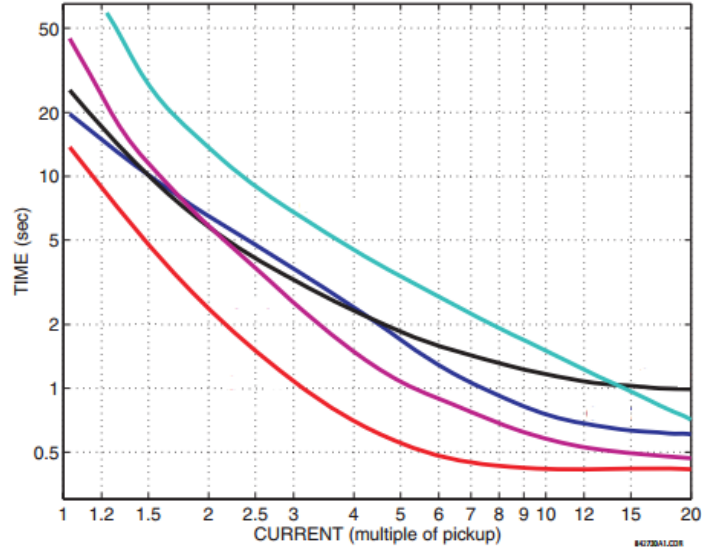


Fig. 6-7 Curvas ejemplo tiempo corriente GE F35

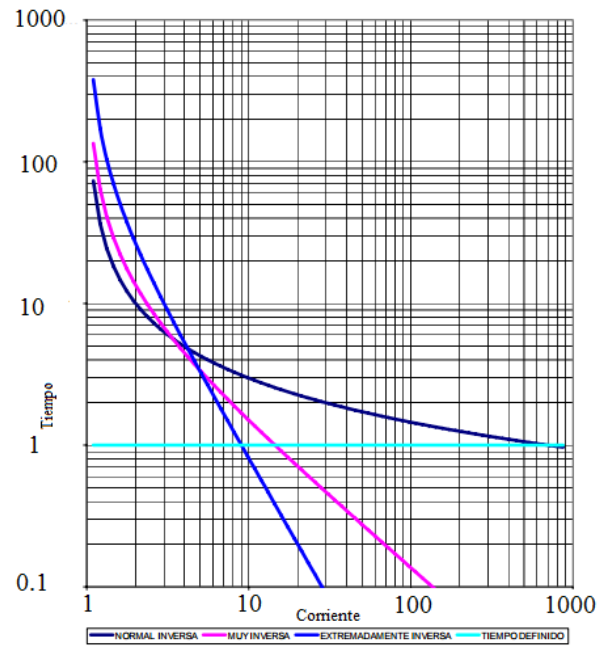


Fig. 6-8 Curvas estándar IAC

6.4 Identificación de parámetros de interés

6.4.1 Tensión en las barras

Se presenta en la tabla 6-7 la tensión en las barras de la Subestación B, mostrada en los diagramas unilineales de la figura 6-2

Tabla 6-7 Tensión en las barras de S/E B

Barra	Subestación B [kV]
1 Principal	13.8
2	13.8
3	13.8
4	7.2
5	7.2
6	13.8
7	7.2
8	7.2
9	7.2
10	13.8
11	7.2
12	7.2
13	7.2
14	13.8
15	7.2
16	7.2
17	7.2
18	7.2
19	7.2
20	7.2
21	7.2
22	7.2
23	7.2

6.4.2 Distancia de trabajo

En la tabla 6-8 se presentan las distancias de trabajos típicos para cada clase de equipo, basados en la norma NFPA 70-E. Será utilizada ésta referencia para determinar distancias de trabajos en gabinetes eléctricos de potencia de la pala.

Tabla 6-8 Clase de equipo y distancia de trabajo.

Clase de equipo	Distancias de trabajo (mm)
15 kv Switchgear	910
5 kv Switchgear	910
Switchgear de baja tensión	610
MCCs y panelboards de baja tensión	455
Cables	455
Otros	A determinarse en el campo

6.4.3 Potencia de trabajo

La potencia de trabajo está ligada a la carga.

La subestación B suministra la potencia a cuatro cargas estáticas de 1 MVA y seis cargas de pala Bucyrus 495HR. En la Tabla 6-9 se presentan los parámetros de potencia de la Pala Bucyrus 495 HR

Tabla 6-9 Parámetros de potencia de Pala Bucyrus 495HR

Parámetro de potencia	Potencia kW
Potencia Peak	929-1300 kw
Avg. 15min Demand. (promedio)	3.715kw

6.4.4 Parámetros de línea

En la tabla 6-10 se presentan las distancias que podrían tomar las líneas aéreas que van desde los alimentadores a las subestaciones móviles y las distancias que podrían tomar los cables móviles que van desde las subestaciones móviles a la pala.

Tabla 6-10 Parámetros de las líneas eléctricas

Alimentador	S/E Móvil	Distancia líneas S/E Móviles- Pala	Distancias líneas Alimentador-S/E Móviles
S/E B Barra 1- 52C09	4 – 10 MVA	900 – 2100 m	800 - 4000 m
S/E B Barra 1- 52C11	4 – 10 MVA	900 – 2100 m	800 - 4000 m

6.4.5 Parámetros de transformadores

Se presenta en la tabla 6.11 los parámetros de las subestaciones móviles, útiles para el estudio de corto circuito.

Tabla 6-11 Parámetros de las subestaciones móviles conectadas en S/E B

Potencia (MVA)	Razón de vuelta	Z (%)	X/R
4	13.8/7.2	5.3	15
6	13.8/7.2	5.5	15
8.5	13.8/7.2	5.4	15
10	13.8/7.2	5.5	15

6.5 Levantamiento de carga

Las cargas utilizadas en el modelo de sistema de potencia son; cargas estáticas y Pala eléctrica de cable modelo Bucyrus 495 HR.

La carga estática es de 1 MVA con un factor de potencia de 0.85

6.5.1 Pala Eléctrica de cable Bucyrus 495HR

Es una pala electromecánica diseñada especialmente para la minería, la cual proporciona un eficiente servicio. Para poder realizar los movimientos requeridos de cargar material desde los bancos y depositarlos en los camiones de extracción se utilizan distintas transmisiones. En la figura 6-9 se presenta un ejemplo de una pala eléctrica de cable



Fig. 6-9 Ejemplo de Pala eléctrica de cable

Las dimensiones del modelo Bucyrus495HR se puede observar en la Tabla N°6-12

Tabla 6-12 Parámetros de potencia de Pala Bucyrus 405HR

Dimensión	Cantidad
Cuchara de carga	110 toneladas
Capacidad de cuchara	30.6 m ² - 61.2 m ²
Longitud del brazo o pluma	20.4m
Longitud efectiva del mango de la cuchara	10.9m
Longitud total del mango de la cuchara	14.3m

Se presenta como información el Layout de la Pala Bucyrus 495HR, donde se muestra la ubicación de las cabinas eléctricas y las distancias de trabajos asociadas a esta. (Ver figura 6-10 y tabla 6-13)

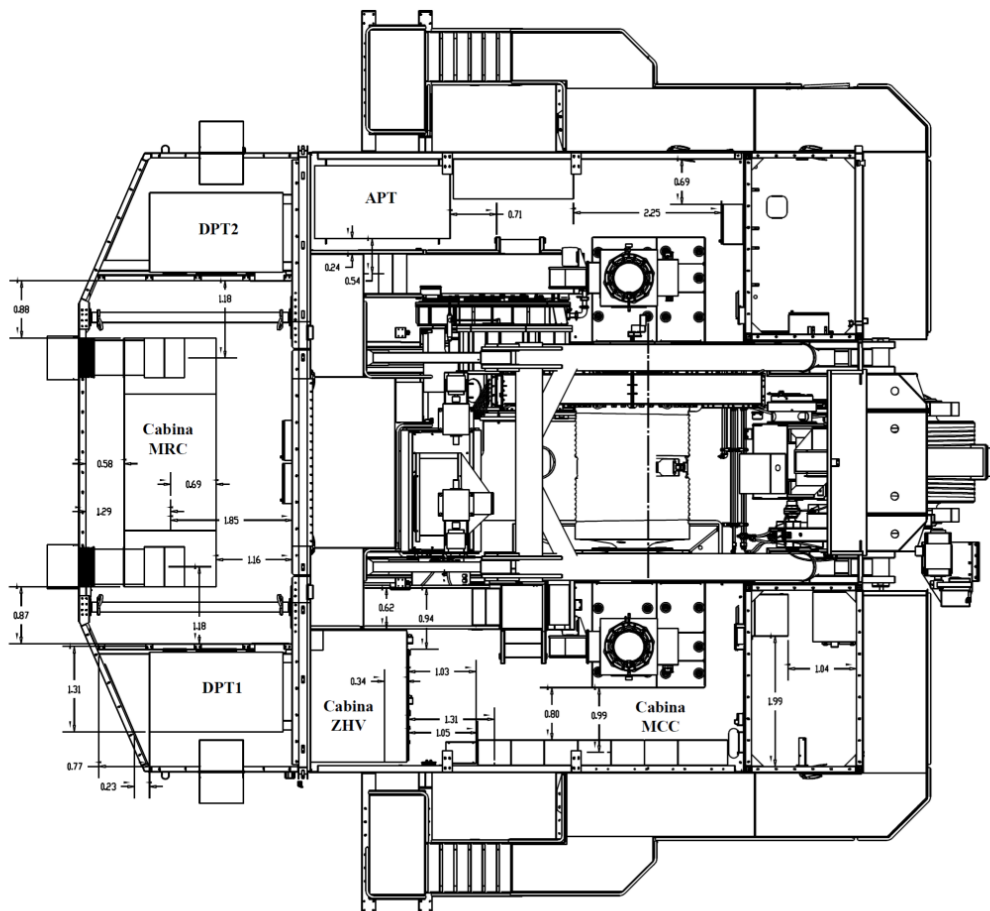


Fig. 6-10 Levantamiento distancias de trabajo en cabinas eléctricas potencias en vista de planta de pala Bucyrus 495HR (dimensiones en metro)

Tabla 6-13 Resumen de distancias de trabajo en cabinas de potencia en Palas Mineras para evaluación de energía incidente por arc flash

Cabina de potencia	Tensión (kV/V)	Clase de equipo	Gap bus [mm]	Distancia de trabajo[mm]
Cabina ZHV	7.2 kV	Switchgear 5kV	104	910
Cabina MRC – lado AC (frontal)	900V	Switchgear 5kV	104	910
Cabina MRC – Lado AC (posterior)	900V	Switchgear 5kV	104	610
Cabina MRC (Barra DC)	1200V	-	-	910
Cabina MCC	380V	Low Voltage MCC	25	455

ZHV: Cabina de alta tensión

MRC: Cabina motion Regulator - SKID Siemens

Se presenta el diagrama unilineal de la pala eléctrica en la figura 6-11.

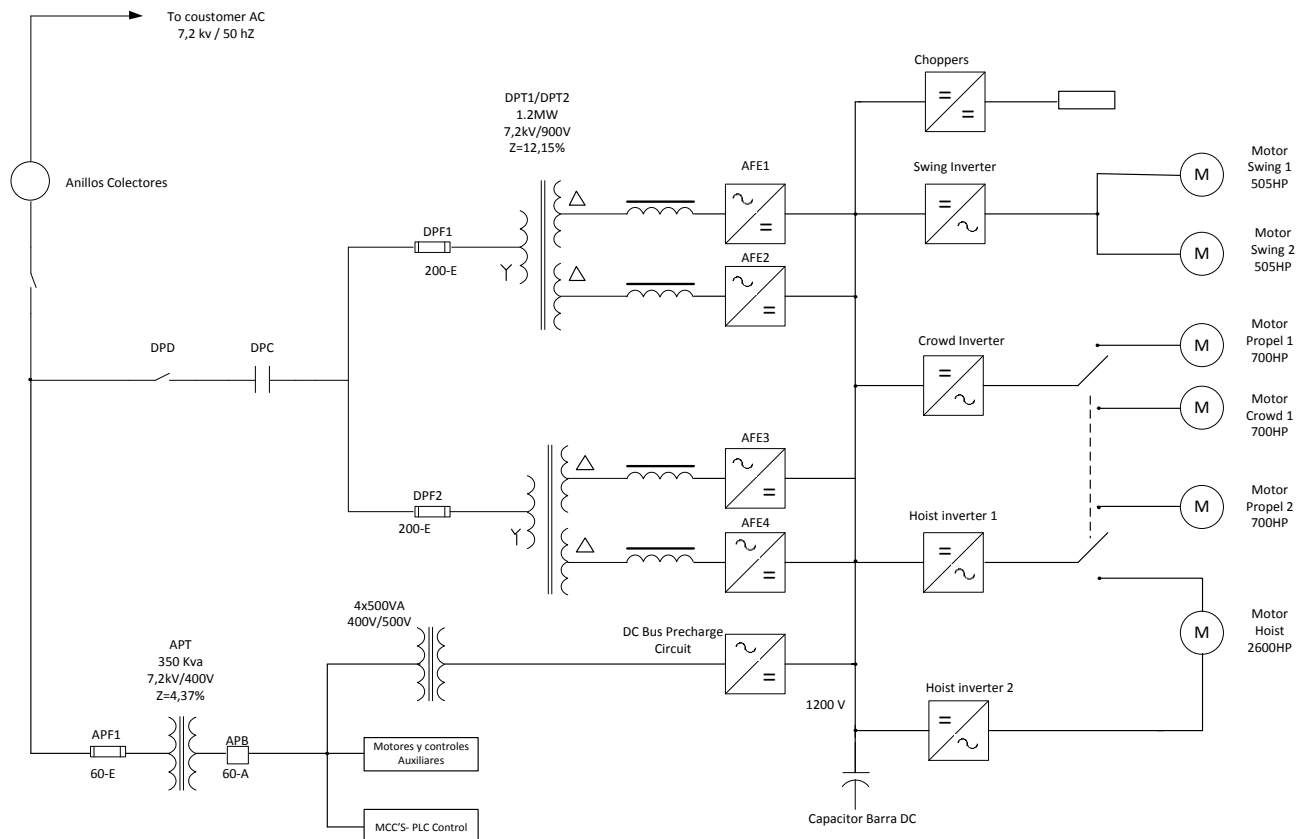


Fig. 6-11 Diagrama eléctrico de Pala eléctrica Bucyrus 495 HR

Las palas Bucyrus se alimentan de una red de alta tensión trifásica de 7200 V AC, luego pasa por transformadores de 1,2 [MW] que reduce el voltaje a 900 V AC donde los circuitos del primario

en estrella, están protegido por un fusible definido por DPF1 y DPF2 respectivamente, de 200[A] y el secundario cuenta con dos devanados en delta que alimentan el conjunto de rectificadores AFE.

Luego la energía va hacia una barra de 1200V DC para luego pasar por cuatro inversores (DC-AC) que alimentan entre 0 y 1400 V AC y 0 a 68 Hz a los motores de inducción jaula de ardilla, de las distintas transmisiones mediante una serie convertidores (AFE, Active Front End).

Los Convertidores DC-DC o Chopper frenado regenerativo disipa el exceso de energía generado durante el movimiento del Hoist, evitando que se inyecte energía a la red.

Los convertidores presentan una capacidad intrínseca de limitar corrientes de falla hacia su salida, normalmente limitada a 2 x FLA (Full Load Amperage) con tiempos de bloqueo/falla de semiconductores acotados en caso de producirse sobrecorriente elevadas, este tiempo de bloqueo es de 0.2 segundos.

Finalmente los inversores alimentan motores que son de transmisión para el movimiento de trabajo de la Pala.

Las principales transmisiones son:

- Hoist o levante: mueve el balde a través del banco, durante la fase de excavación y proporciona el levante y la bajada controlada del carguío durante otras fases de operación.
- Crowd Empuje: mueve el mango del balde hacia afuera o hacia dentro para controlar la profundidad de corte y posiciona el balde sobre el camión para vaciar la carga.
- Swing o giro: Gira la pala entre las posiciones de excavación y vaciado. El sistema de giro utiliza dos transmisiones, una de 180° a la izquierda y la otra 180° a la derecha.
- Propel o Propulsión: mueve la pala de una posición de excavación a otra. Dos mecanismos impulsores independientes proporcionan el avance y retroceso o giro mediante una dirección diferencial.

Cada transición o movimiento de la pala es realizada por un motor eléctrico, este se puede visualizar en la figura 6-10, donde se muestra el diagrama de potencia de la pala. Destacar que el motor Hoist es el que necesita más potencia, ya que es el movimiento encargado de levantar la carga. En la tabla 6-14 se presentan la potencia de los motores asociados a la pala Bucyrus 495HR.

Tabla 6-14 Potencia de motores asociada a la Pala Bucyrus 495HR

Motor / Movimiento	Potencia Asociado [HP]
Swing 1	505
Swing 2	505
Propel 1	700
Propel 2	700
Crowd 1	700
Hoist	2600

Los motores de transmisión dan los movimientos respectivos a la pala para el ciclo de carga y descarga:

El tiempo de duración del ciclo de carga es de aproximadamente 40 Segundos.

A. Durante un tiempo, la pala está cargando material a través de movimientos de las transmisiones de levante y empuje.

B. El revolving frame y el balde giran para posicionar el balde sobre el camión.

C. La puerta del balde se abre y el material empieza a ser descargado en el camión. Esta operación se facilita con pequeños movimientos ascendentes del balde.

D. El revolving frame y el balde giran para sacar el balde encima del camión.

E. El balde desciende a nivel de suelo y toma la posición para un nuevo ciclo de carga. Este movimiento se compone de tres partes:

- i) El balde acelera rápidamente para alcanzar su velocidad máxima.
- ii) Luego mantiene esta velocidad relativamente constante.
- iii) Desacelera rápidamente hasta quedar detenido.

Se presenta como información adicional el resumen de las protecciones de sobrecorriente en los transformadores de la pala eléctrica. (Ver tabla 6-15)

Tabla 6-15 Protecciones de sobrecorriente principales Transformadores de pala Bucyrus 495 HR

DPT (DPT1/DPT2) 2(1.2/1.2) MVA	Primario DPF (DPF1/DPF2)	Fusible Ferraz Shawmut Amp trap 200E
		Según Plano 2x100A/8.3kVmax/I.R:50kA, RMS Sym
	Secundario	Fusible Rectificadores 800A/1000V (lado AC)
		Fusible Inversores 1000A/1000V (lado AC)
		Bloqueo Semiconductores 2xFLA Tiempo de bloqueo 0.2 segundos
APT 350kVA	Primario APF	Fusible Ferraz Shawmut Amp trap 60E
		1x60A/8.3kVmax/IR:5kA. RMS Sym
	Secundario APB	Breaker moldes case 600V/600A

6.5.2 Principio de operación de un convertidor

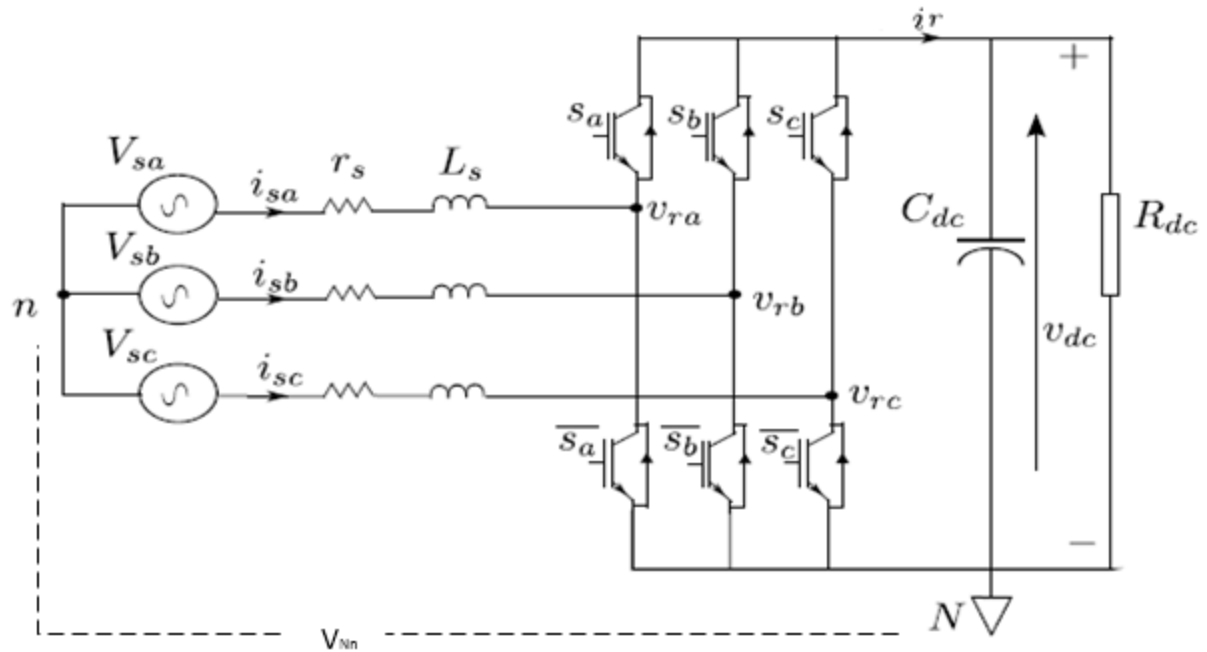


Fig. 6-12 Esquema de un convertidor controlado

El principio de operación de un convertidor controlado es mostrado de forma complementaria, debido a que son parte del esquema de operación de la pala. Esta estructura del convertidor es utilizado en el diagrama de la figura 6-11.

En la figura 6-12 se observa una el esquema de un convertidor controlado, en este caso por IGBT, el cual este switch se puede controlar tanto el encendido como el apagado. En este caso se observa en modo rectificador, se puede ocupar el mismo esquema para un inversor, solo que en el lado DC, debe tener una fuente de voltaje.

Se compone por un puente trifásico alterno, con un filtro inductivo conectado en la parte AC, compuesto por inductancias L_s y resistencias R_s que representas las perdidas en los filtros.

Un condensador C_{DC} y una carga resistiva R_{DC} que son considerados en el lado DC del convertidor.

Los estados de conmutación se definen por: $\{S_a, S_b, S_c\}$, donde el estado de conmutación toma el valor igual a 1 si esta encendido y un valor igual a 0 si está apagado, puede notarse que los dos interruptores de cada fase funcionan en complemento.

Por otra parte V_{Nn} corresponde al voltaje modo común entre el neutro flotante de la red y la barra negativa del rectificador.

6.6 Discusión

En el presente capítulo se mostró un estudio de corto circuito, basado en el procedimiento empírico del Std. IEEE 1584, que ayudaran a determinar la energía incidente.

Como se mencionó anteriormente la energía incidente depende de la distancia de trabajo, el tiempo de despeje de falla y la intensidad de corriente.

La recopilación de información, parámetros y análisis de operación de la subestación B y de la Pala Bucyrus 495 HR ayudaran a determinar las corrientes de corto circuito y corrientes de arco en la simulación. El levantamiento de protecciones incluyendo características y parámetros relevantes ayudara a determinar los tiempos de despeje de la falla. La distancia de trabajo es un parámetro que se basó en la norma NFPA 70-E, que de acuerdo a la cabina de potencia estudiada estaba asignada la clase de equipo y su distancia de trabajo asociado.

Capítulo 7. Implementación de modelo en software y diagnóstico de protecciones

7.1 Introducción

Luego de la recopilación de información y el estudio de corto circuito basado en la metodología para el estudio de Arc flash, se procede a la implementación de un modelo de simulación mediante el software especializado llamado Easy power. Además se realizará un estudio del diagnóstico de protecciones involucrado en las cabinas eléctricas de la pala Bucyrus 495HR.

7.2 Simulación

EasyPower es una herramienta de ingeniería asistida por computadora para el análisis y diseño de sistemas eléctricos de potencia industriales, servicios eléctricos y comerciales, integra funciones de cortocircuito, flujo de potencia, coordinación de dispositivos de protección y base de datos bajo el control interactivo gráfico del diagrama unilíneal. EasyPower permite trabajar directamente desde el diagrama unilíneal.

En primer lugar, al abrir el programa se procede a implementar el diagrama unilíneal de la subestación B. La configuración del sistema está presentado en el anexo del informe.

El diagrama unilíneal de la subestación B, está configurado tomando en cuenta la recopilación de información técnica:

- Tensión de las barras,
- Ubicación de los alimentadores,
- Ubicación de subestaciones móviles,
- Parámetros de subestaciones móviles,
- Parámetros de línea como el largo y tipo de cable,
- Configuración de protecciones de los alimentadores,
- Configuración de protecciones de las subestaciones móviles,
- Frecuencia del sistema (50Hz),
- Potencia Base,
- Z impedancia.

El diagrama dispone de cargas estáticas y cargas de Palas eléctricas de cable modelo Bucyrus 495 HR.

Debe considerar

- Tensión en las barras,
- Configuración de los convertidores y protecciones de sobrecorriente de transformadores de la pala de cable,
- Potencias de los motores de transmisión de movimiento.

Una vez implementado el modelo, el software permite simular una falla en las todas barras, entregando como resultados la energía incidente a una distancia determinada.

7.3 Diagnóstico de las protecciones a la falla de arco

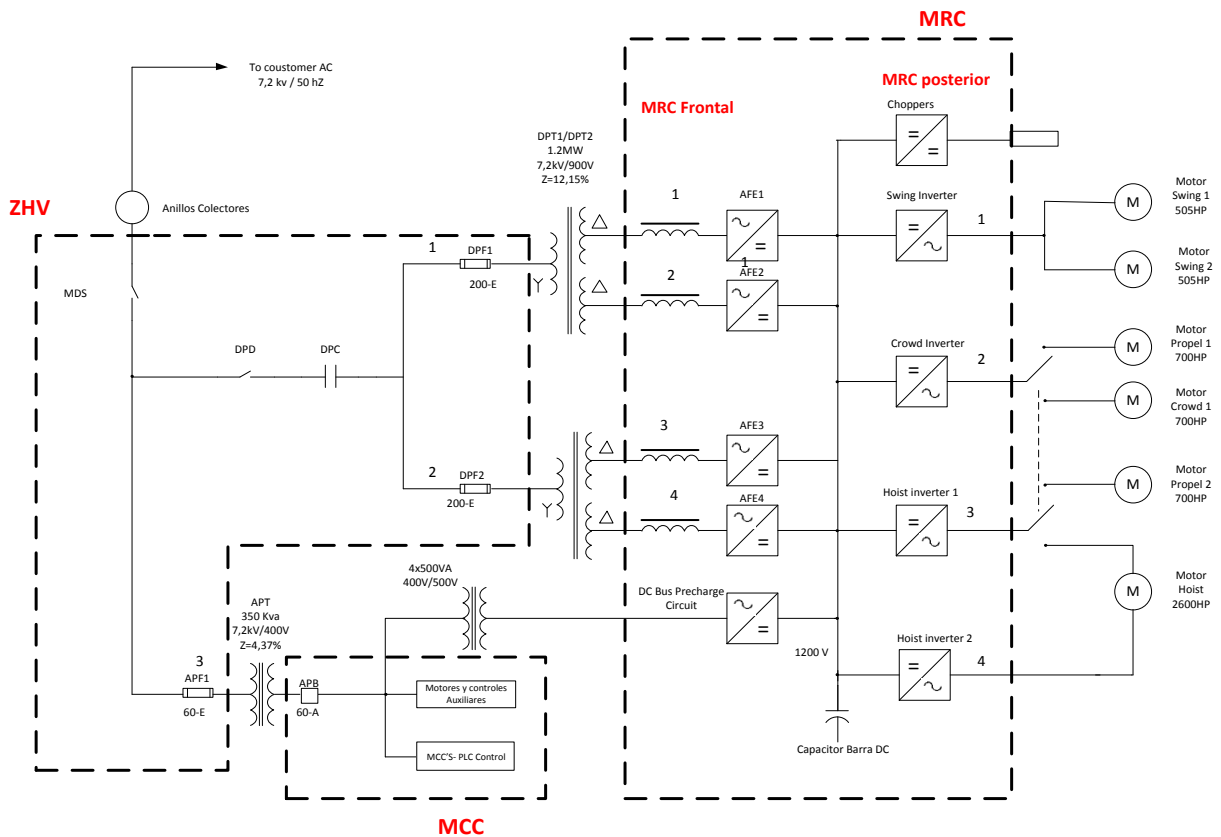


Fig. 7-1 Cabinas eléctricas en la Pala Bucyrus 495HR

De acuerdo al modelo del SEP y de la pala eléctrica de cable, se presenta un diagnóstico de protección a la falla de arco en las cabinas eléctricas, relacionado con la energía incidente. La evaluación se hace de forma empírica.

En la figura 7-1 se presenta el diagrama eléctrico de la pala de cable, detallado con la ubicación de las cabinas eléctricas y el equipo de protección asociado.

- A) Cabinas eléctricas ZHV.** Las cabinas ZHV presentaran un bajo nivel de energía incidente, idealmente categoría clase 0. Se justifica a que el equipamiento de protección que están ubicadas inmediatamente aguas arriba actúan en caso de una posible falla. Los fusibles de sobrecorriente DPF protegen a los transformadores DFT y el fusible de sobrecorriente APF protege al transformador APT. Además pueden actuar las protecciones de las subestaciones móviles, como el relé de sobrecorriente 50/51F en el secundario y el fusible de sobrecorriente en el primario, finalmente de forma parcial puede actuar el relé 50/51F de los alimentadores principales.
- B) Cabinas Eléctrica MCC.** La cabina MCC también presentará valores bajos de energía incidente, de categoría clase 0.
Se justifica debido a que existe una protección tipo Breaker (APB) para despejar la falla. Aguas arriba está el fusible APF que protege al transformador APT, pero que también puede despejar parcialmente una falla en la cabina MCC. El transformador APT representa una impedancia que limita la amplitud de la corriente aguas arriba. Además, fuera de la cabina MCC existen equipos de protección que también pueden despejar la falla de forma parcial, como el fusible de sobrecorriente APF1. Las protecciones de las subestaciones móviles y de los alimentadores principales, también pueden actuar de forma parcial.
- C) Cabinas eléctricas MRC frontal:** En la Cabina MRC (lado frontal) presentara valores altos de energía incidente, siendo las más alta y peligrosa en comparación a las demás cabinas eléctricas. Es justificable debido a que no existe un equipamiento de protección que actué inmediatamente en caso de falla o la protección no es satisfactoria, ya que no existen fusibles de sobrecorriente en los secundarios de los transformadores DPT. Los transformadores DPT representan una impedancia que limita la amplitud de la corriente aguas arriba. Los fusibles DPF podría de forma parcial actuar y despejar una falla en la cabina MRC, al igual que las protecciones de las subestaciones móviles y de los alimentadores principales ya mencionados, pero no siendo tan efectivos para limitar en gran escala la energía incidente.

D) Cabinas Eléctricas MRC (lado DC): La energía incidente en la cabina MRC (Lado DC) es relativamente satisfactoria, debido a que en caso de falla, los convertidores actúan como limitador de corrientes de falla, en ambas direcciones. También existen equipamientos que dan una protección parcial y están aguas arriba de la cabina, como las protecciones de las cabinas ZHV, MCC y MRC lado frontal, transformadores DPT y las protecciones de las subestaciones móviles y de alimentadores principales.

E) Cabinas eléctricas MRC (lado Posterior): La energía incidente de la Cabina MRC posterior será baja, de categoría clase 0, debido a que los convertidores que están aguas arriba de la barra actúan como limitador de corriente en ambas direcciones, además de los fusibles aguas abajo de los convertidores. Al igual que las otras cabinas, los equipamientos de protección que están aguas arriba de la cabina MRC lado posterior también pueden despejar una falla de forma parcial.

Capítulo 8. Escenarios

8.1 Introducción

Los sistemas eléctricos mineros son dinámicos, cambian de acuerdo a las necesidades de la mina, relacionado con la planificación de extracción minera. Es por ello que se evalúan diferentes escenarios para determinar energías incidentes máximas y mínimas que se pueden presentar en las cabinas eléctricas de las palas para condiciones normales de operación de una compañía de la gran minería en Chile.

El conjunto de escenarios resulta de considerar la variación de longitud de líneas aéreas de alimentadores principales, cambio de longitud de cables móviles, cambio de potencia de subestaciones móviles, evaluación de tecnología de accionamiento, modo regeneración y falla de corto circuito en la barra continua.

8.2 Longitud de cables desde subestaciones móviles a las palas

La evaluación se hace en distancias máximas y mínimas presentadas en la Tabla 8-1, para una cierta potencia en la subestación móvil. El aumento de los cables móviles se hace a través de paños que miden 300 m cada uno.

El aumento de longitud de las líneas móviles puede resultar beneficiosas ya que aumenta la impedancia de la línea, reduciendo las corrientes de falla, pero puede provocar problemas de regulación y sobrecalentamiento.

Tabla 8-1 Distancia de cables Alimentadores – S/E Móviles – Palas de cable

Alimentador	S/E Móvil	Distancia cables S/E Móvil – Pala	Distancia líneas Alimentador – S/E Móviles
S/E B Barra 1- 52C09	4 – 10 MVA	900 – 2100 m	800 - 4000 m
S/E B Barra 1- 52C11	4 – 10 MVA	900 – 2100 m	800 - 4000 m

La simulación se realizó tomando en cuenta solo la variación de los cables móviles, tomando en cuenta tres distancias (900m, 1500m y 2100m).

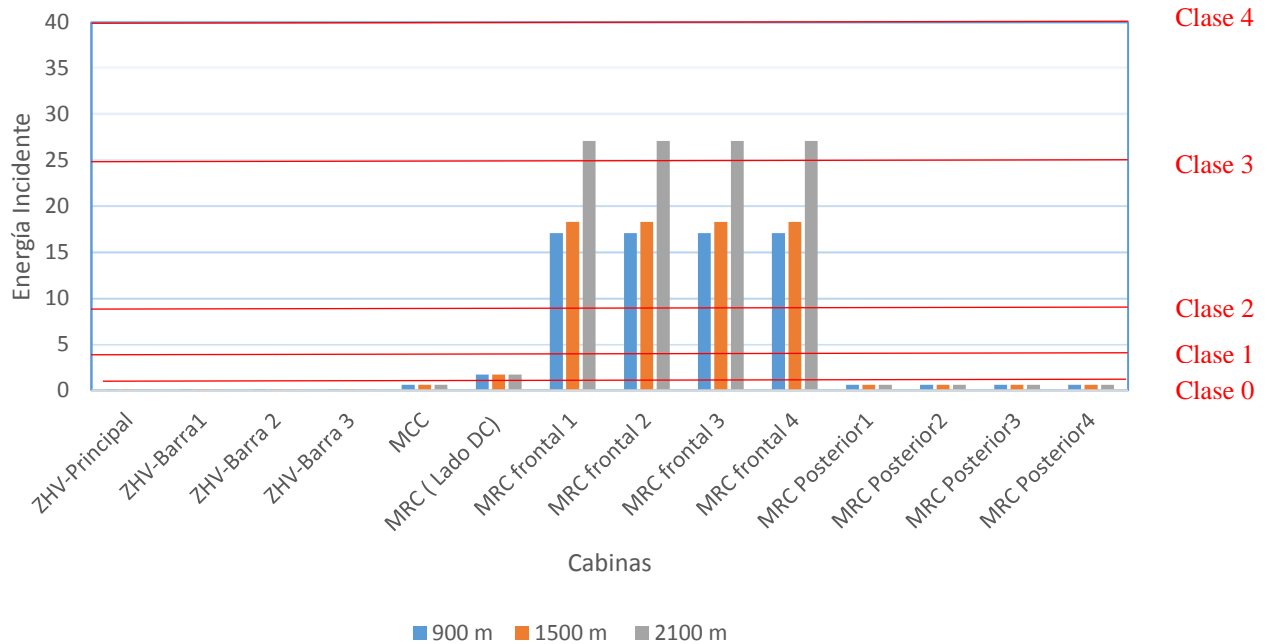


Fig. 8-1 Resultados de Energía Incidente en Cabinas Eléctricas

▪ **Resultados:**

Como resultado al aumento de impedancia de las líneas eléctricas, se puede apreciar que las cabinas ZHV MCC y MRC (lado posterior) se mantienen en clase 0, la cabina MRC (Lado DC) se mantiene en clase 1, no siendo afectadas por el aumento de longitud de los cables desde 900 m a 2.1 km, no así las cabinas MRC (lado frontal) que existe un incremento considerable de energía incidente, aumentando de clase 3 a clase 4, esto se explica ya que al aumentar la impedancia, disminuye la corriente de falla y de arco, lo que hace aumentar el tiempo de despeje de la falla en las protecciones y por consiguiente aumenta el tiempo de duración del arco eléctrico y la energía incidente, ya que las protecciones están asociadas a curvas de tipo inversa, (al disminuir la corriente de falla, disminuye el tiempo de despeje de la falla).

Se recomienda acotar largos máximos de los cables móviles, ya que se le asociara una menor impedancia con respecto a cables más largos. Al disminuir la impedancia, la corriente de falla aumentara, acotando los tiempos de despeje de falla en las protecciones de sobrecorriente.

8.3 Longitud de líneas aéreas desde alimentadores a Subestaciones móviles.

Usando la misma analogía anterior el aumento de longitud de las líneas puede resultar beneficiosas ya que aumenta la impedancia y reduce las corrientes de falla, pero puede provocar problemas de regulación y sobrecalentamiento. La distancia del alimentador dependerá de donde se esté conectando, cada uno de ellos tienen cierta distancia hacia las subestaciones móviles. En la tabla 8-1 se presentan las distancias de las líneas aéreas evaluadas.

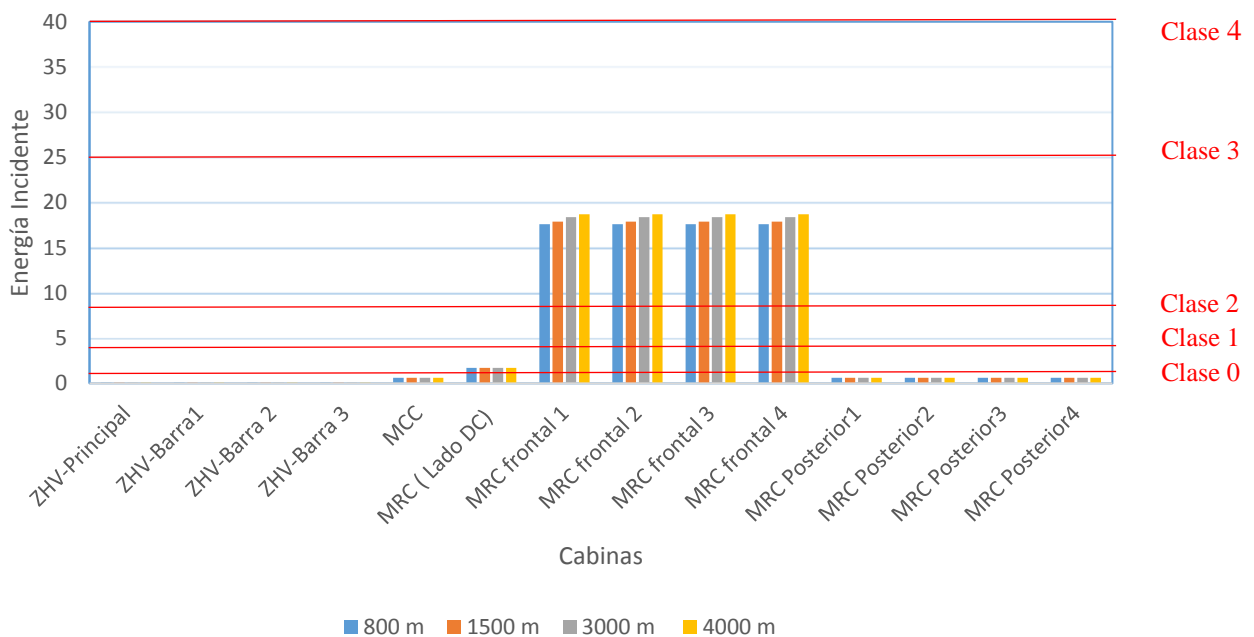


Fig. 8-2 Resultados de Energía Incidente en Cabinas Eléctricas

- Resultados:

Como resultado al aumento de impedancia de las líneas eléctricas, se puede apreciar que las cabinas ZHV MCC y MRC (lado posterior) se mantienen en clase 0, la cabina MRC (Lado DC) se mantiene en clase 1, no siendo afectadas por el aumento de longitud de los cables. En las cabinas MRC (lado posterior) aumenta la energía incidente en menor magnitud, manteniéndose en clase 3. Al aumentar la impedancia, disminuye la corriente de falla y de arco, lo que hace aumentar el tiempo de despeje de la falla en las protecciones y por consiguiente aumenta el tiempo de duración del arco eléctrico y la energía incidente, ya que las protecciones están asociadas a curvas de tipo inversa, (al disminuir la corriente de falla, disminuye el tiempo de despeje de la falla). Todo esto en menor

magnitud, debido a que existe una selectividad de protecciones, es decir en caso de falla en algún punto de la pala, actúan las protecciones que están más próximas a la falla. Las líneas aéreas están a un nivel superior en el sistema eléctrico, por ende existen protecciones intermedias.

Al igual caso anterior, se recomienda acotar largos máximos de las líneas aéreas, ya que se le asociara una menor impedancia con respecto a cables más largos. Al disminuir la impedancia, la corriente de falla aumentara, acotando los tiempos de despeje de falla en las protecciones de sobrecorriente.

Es importante tener en consideración el término de selectividad de protecciones. Hay selectividad de las protecciones cuando, en caso de falla en un punto de la instalación, solo actúa el dispositivo de protección ubicado inmediatamente aguas arriba del circuito en falla.

La selectividad permite asociar seguridad y continuidad del servicio además de facilitar la localización del circuito defectuoso.

La selectividad es total cuando es garantizada cual sea el valor de la intensidad de la corriente de falla hasta el valor máximo para la instalación (cortocircuito). Se dice parcial en el caso contrario. Para una correcta coordinación se debe considerar:

- Usar en lo posible relés de las mismas características.
- Asegurar que los relés lejanos a la fuente tengan una calibración igual o menor que los relés ubicados aguas arriba.

Por ejemplo en la figura 8-3 se aprecian dos curvas de diferentes dispositivos de protecciones de tiempo inverso. Están configuradas de tal forma que si la falla ocurre aguas abajo de la protección A, sea esta misma la que despeje la falla. Es por eso que existe un intervalo de tiempo, entre las curvas A y B

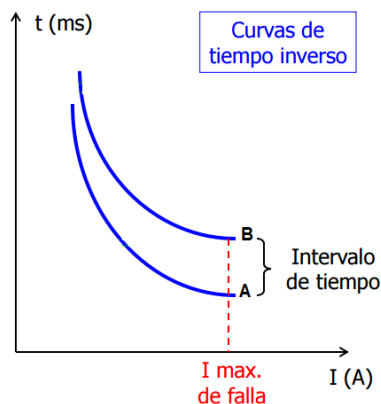


Fig. 8-3 Ejemplo de curvas de protección

8.4 Modificación de la potencia de las subestaciones móviles

El cambio de subestaciones móviles influye en la impedancia eléctrica que limita la corriente de falla trifásica.

El escenario a evaluar fue cambiar las potencias de los transformadores, teniendo en cuenta la modificación parámetros de impedancia y las configuraciones de los relés de protección del equipamiento.

Los parámetros de las subestaciones móviles a evaluar están mostradas en la tabla 8-2. Considerando el ajuste de protecciones mostrada en la tabla 6-4.

Tabla 8-2 Tabla resumen de parámetros de transformadores

Potencia MVA	Relación de vueltas	Impedancia [%]	X/R
4	13.8 kV/7.2kV	5.3	15
6.5	13.8 kV/7.2kV	5.5	15
8.5	13.8 kV/7.2kV	5.4	15
10	13.8 kV/7.2kV	5.5	15

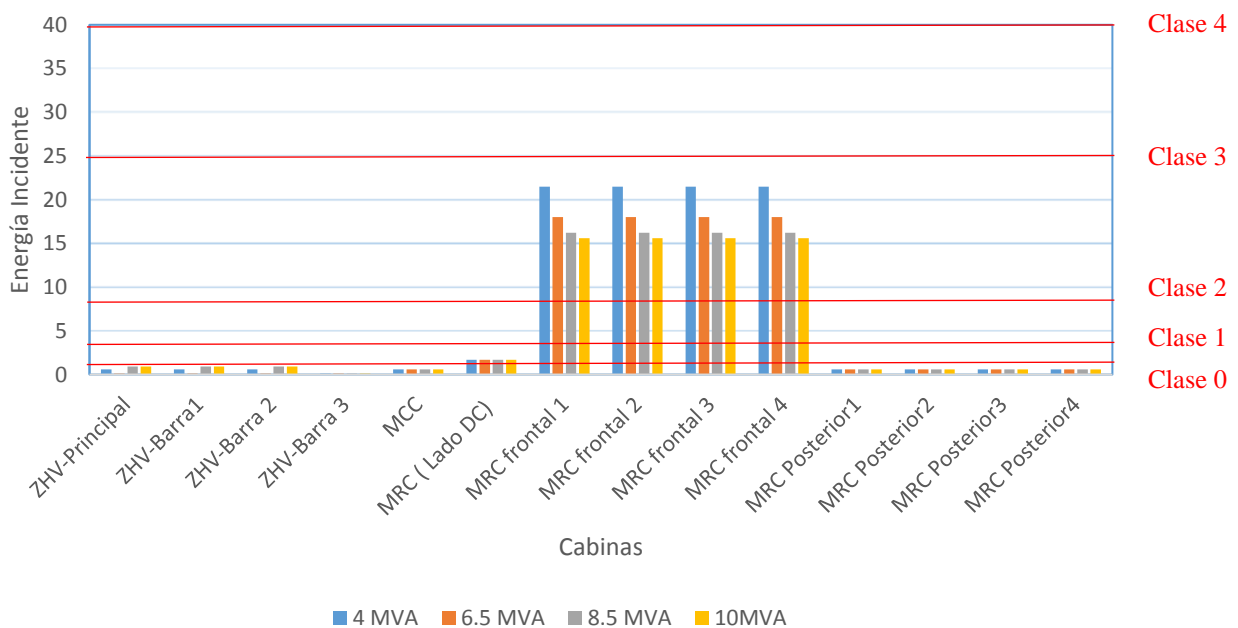


Tabla 8-3 Resultados de Energía Incidente en Cabinas Eléctricas

- Resultados:

Al aumentar la potencia de las subestaciones móviles, la energía incidente disminuye en la cabina MRC lado frontal. Esto se explica a que en caso de falla, la corriente de arco es mucho más alta, en consecuencia los ajustes de protecciones en los alimentadores de salida de las subestaciones móviles son mucho más rigurosos, con tiempos de detección más acotados y despejando la falla más rápido, haciendo disminuir la energía incidente.

Para subestaciones de menor potencia, los tiempos de respuesta de las protecciones son más lentas, aumentando la energía incidente.

Normalmente las protecciones tipo relé, fusible y breakers despejan la falla más rápido en sobrecorriente elevadas por sobrecorriente medianas, debido a la característica de tiempo de operación, a mayor veces sobre la corriente de operación , más rápido actuara las protecciones.

8.5 Tecnología de accionamiento

El uso de accionamiento en corriente alterna para el control de motores de inducción resulta ser más eficaz que en corriente continua, ya que permite despejar la falla de forma más efectiva.

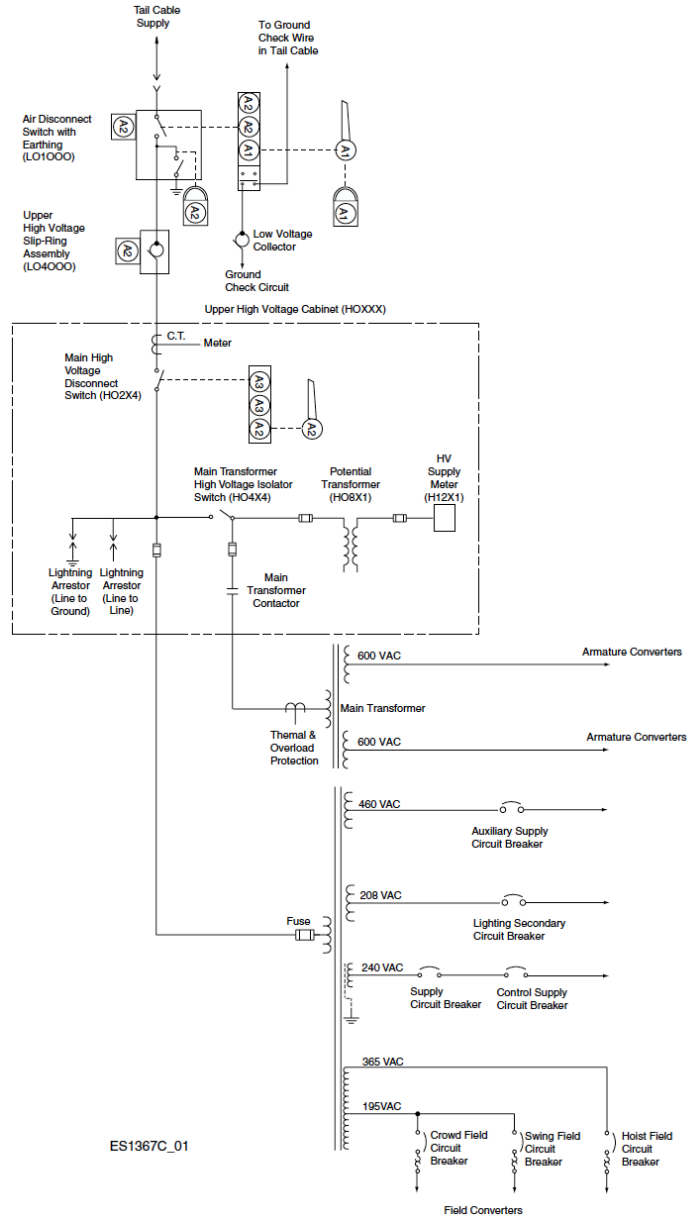
Los convertidores presentan una capacidad intrínseca de limitar corrientes de falla hacia su salida, normalmente limitada a 2 x FLA (Full Load Amperage) con tiempos de bloqueo/falla de semiconductores acotados en caso de producirse sobrecorriente elevadas, este tiempo de bloqueo es de 0.2 segundos.

El accionamiento en continua solo tiene una etapa de conversión (AC-DC) , no así el accionamiento en alterna, que tiene 2 etapas de conversión, (AC – DC y DC - AC), siendo más ventajosa, ya que en cada etapa existe un convertidor que puede actuar para despejar una posible falla.

La potencia de los convertidores en corriente alterna es más ajustado a la potencia de los motores siendo más eficiente y soportando de mejor forma condiciones de operación más exigentes. En cambio el uso de accionamiento en corriente continua hace tener un sobredimensionamiento peligroso, que en consecuencia hace operar con corrientes más elevadas, resultando obtener corrientes de fallas más elevadas y por consiguiente energías incidentes mayores. En La tabla 8-4 se presenta un cuadro resumen de la alimentación y del accionamiento de los motores de movimientos, respaldado por los diagramas unilineales de la figura 8-4, 8-5 y 8.-6. Donde se destaca principalmente a través de los diagramas de pala DC que tiene solo una etapa de conversión de energía alterna a continua.

Tabla 8-4 Cuadro resumen de los parámetros de una Pala de cable en continua modelo P&H 4100XPB DC

Movimiento	Numero de Motores	Alimentación	Módulos de accionamiento
Hoist	2 Motors DC	Transformador trifásico 600 VAC	2 convertidores de armadura y 1 convertidor de campo
Crowd	1 Motor DC	Transformador trifásico 600 VAC	1 convertidor de armadura y 1 convertidor de campo
Swing	3 Motors DC	Transformador trifásico 600 VAC	1 Convertidor de Armadura que acciona ambas armaduras y 1 convertidor de campo que alimenta ambos devanados
Propel	2 Motors DC	Transformador trifásico 600 VAC	2 convertidor de armadura y 1 convertidor de campo



ES1367C_01

Fig. 8-4 Diagrama unilineal del nivel de distribución eléctrica

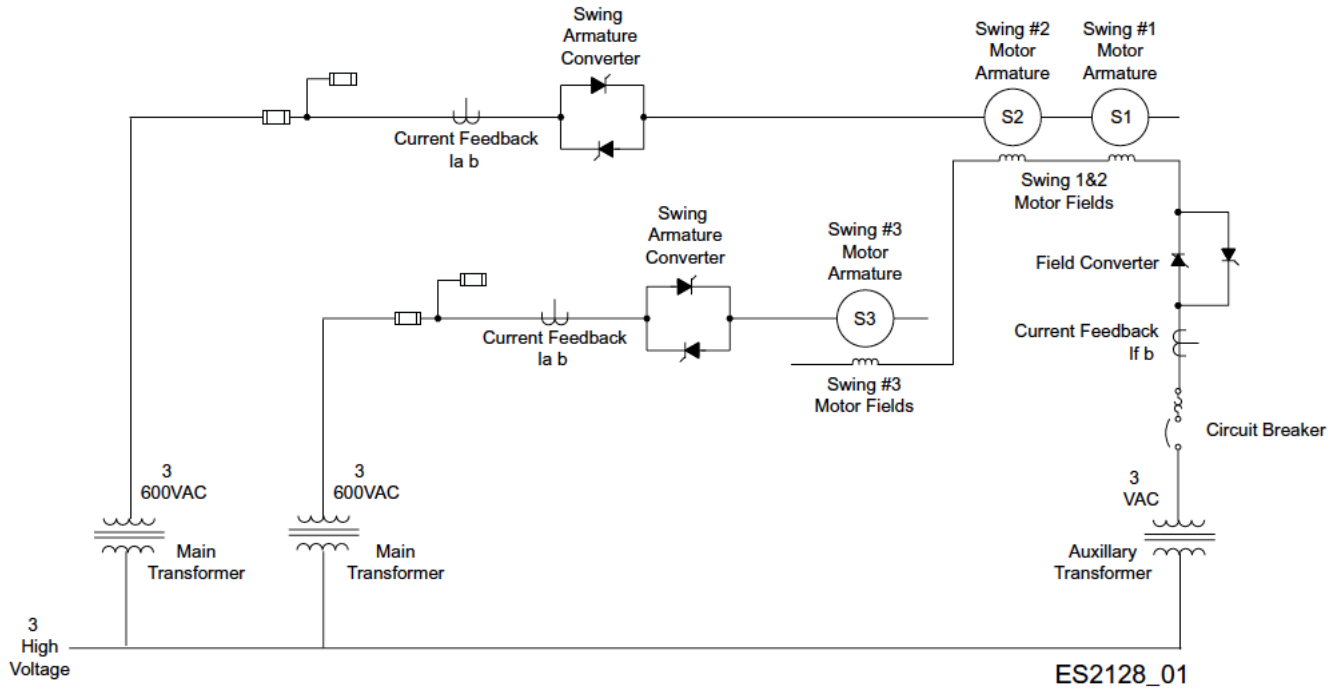


Fig. 8-5 Diagrama unilineal de accionamiento movimiento Swing.

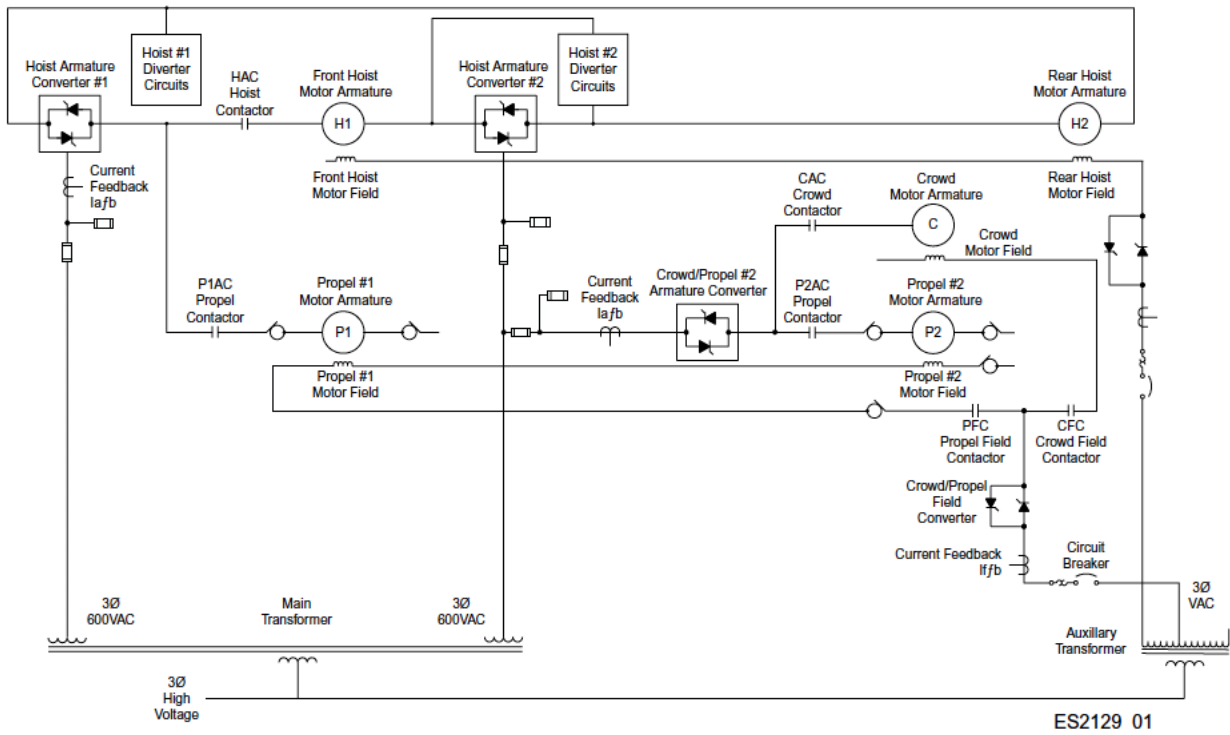


Fig. 8-6 Diagrama unilineal de accionamiento de motor Hoist, Crowd y propel

8.6 Modo regenerativo

Para el análisis en las cabinas eléctricas en términos de energía incidente, se presentan tres escenarios de operación con el movimiento Hoist.

Caso A: Pala conectada al sistema consumiendo energía.

En la figura 8-7 se presenta un diagrama simplificado del sistema eléctrico alimentado por el Sistema eléctrico Nacional en 13.8 kV. A simple escala, el flujo de energía va desde los alimentadores principales hacia las subestaciones móviles, distribuyéndose por cables aéreos. En las subestaciones móviles se reduce la tensión a 7.2 kV, para luego alimentar la pala a través de cables móviles. Durante la aceleración del Hoist, la energía es consumida por el motor, no actuando el Chopper porque no hay regeneración. En términos de riesgo, la evaluación de energía incidente en las cabinas eléctricas no cambia con respecto a lo evaluado previamente en los escenarios. El equipamiento de protección actuará de acuerdo a la potencia de cortocircuito en caso de existir una falla.

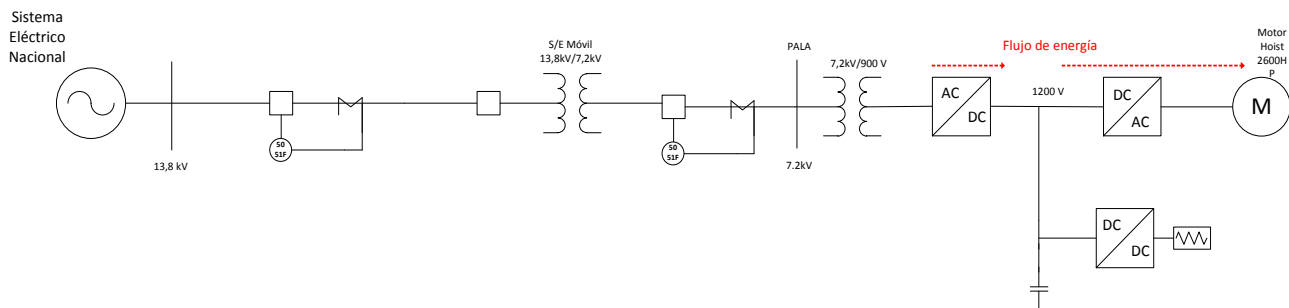


Fig. 8-7 Diagrama simplificado del sistema eléctrico, Caso A.

Caso B: Freno regenerativo, con operación de Chopper

En la figura 8.8 se presenta un diagrama simplificado del sistema eléctrico con la misma operación desde el alimentador principal hasta la pala de cable. El movimiento Hoist ocasiona regeneración de energía a la red cuando desacelera o frena, haciendo subir el voltaje en el capacitor. Es por ello que está conectado el convertidor Chopper, que disipa la energía de exceso en una resistencia de frenado dinámico. Este se activa automáticamente cuando la tensión de la barra DC supera un nivel determinado según la tensión nominal del inversor.

Tal como se muestra en la figura 8-8, el flujo de energía se invierte desde el motor a la barra continua, pasando por el convertidor DC-AC hacia el chopper, que disipa la energía en parrillas de resistencias. En base a ello, se mantienen las mismas condiciones de riesgo de Arc Flash en las cabinas

ZHV, MRC frontal y MCC, ya que el flujo de energía regenerada no circula por equipamiento que contiene las cabinas hacia el sistema eléctrico. Se mantiene la misma potencia de cortocircuito del sistema, ya que siguen conectadas a la red proveniente de las subestaciones móviles. Se puede aproximar a la misma condición las cabinas MRC posterior y MRC barra continua, ya que también siguen conectada a la red suministrada por las subestaciones móviles, incluso podrían tener menor energía incidente, debido a que la potencia aportada por el motor Hoist es mucho menor a la potencia de cortocircuito en la barra de conexión.

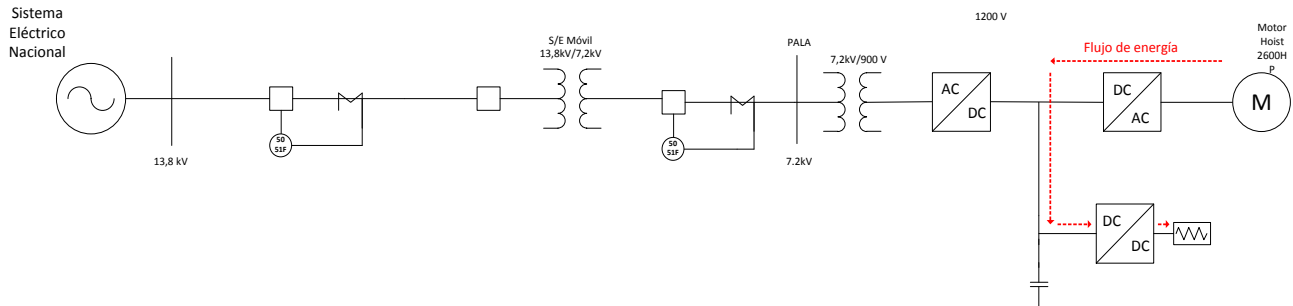


Fig. 8-8 Diagrama simplificado del sistema eléctrico, Caso B.

Caso C: Freno regenerativo, sin Chopper

En la figura 8-9 se presenta un diagrama simplificado del sistema eléctrico con la misma operación desde el alimentador principal hasta la pala de cable. En este caso también se evalúa el freno regenerativo pero sin Chopper. Al regenerar, el flujo de energía va desde el motor, hacia a los convertidores, el banco de condensadores y la red eléctrica o sistema de distribución eléctrica. Las cabinas eléctricas siguen teniendo las mismas condiciones de riesgo y energía incidente, de hecho podrían presentar menores valores de energía incidente, debido a que la potencia aportada por el motor Hoist es mucho menor a la potencia de cortocircuito en la barra de conexión. De este modo se mantiene el análisis, siendo cubierto por las mismas condiciones anteriores.

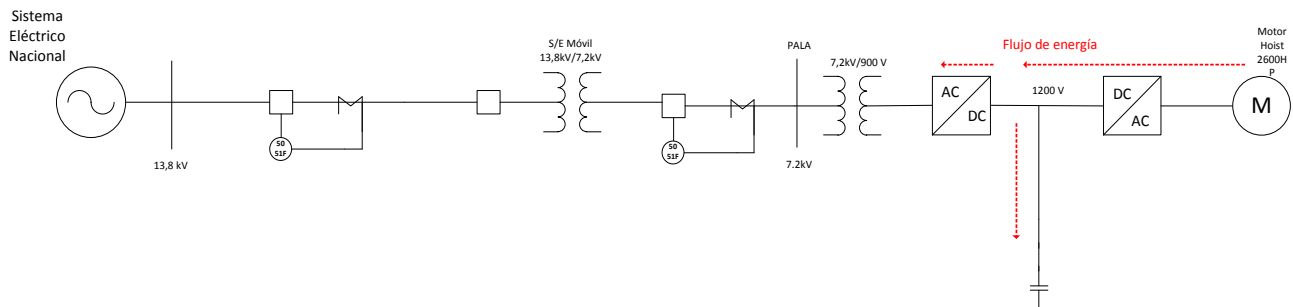


Fig. 8-9 Diagrama simplificado del sistema eléctrico, Caso C.

8.7 Falla en el enlace DC

Los gabinetes de potencia de los convertidores están diseñados de tal forma que la probabilidad de una falla en enlace DC sea muy baja (Ver figura 8-11).

El diseño de PEBB (Power Electronic Building Block) de módulos AC/DC o DC/AC con semiconductores, capacitores, y electrónica de control modular permite prevenir el contacto accidental de barras DC, ya sea por objetos atrapados (herramientas) o mala manipulación. Sin embargo existe una baja probabilidad de falla, pero con consecuencias mayores, esta falla puede ser causada por polvo conductor, condensación etc.

Al ocurrir una falla, la corriente de corto circuito es limitada por los convertidores, actuando de forma rápida.



Fig. 8-10 Modulo IGBT



Fig. 8-11 Gabinete de potencia de Convertidores

En la figura 8-11 se presenta un ejemplo de un gabinete de potencia de convertidores, el cual los módulos de los semiconductores (fig. 8-10) van insertados de forma Plug&Play. La barra DC se encuentra a una distancia considerable hacia el interior.

Capítulo 9. Propuestas de soluciones

Se presentan propuestas de soluciones, considerando el análisis de los resultados en términos de energía incidente. Para ello es necesario relacionarlo con una Jerarquía de control que consiste en eliminar, reducir o segregar el riesgo de exposición a peligros eléctricos, basado en la Norma ANSI Z10-2005. [5]



Fig. 9-1 Pirámide Jerarquía control de riesgos

En la figura 9-1 muestra la pirámide de Jerarquía de control de riesgos donde podemos destacar que las acciones posicionadas en el primer, segundo y tercer puesto tienen un grado mayor de efectividad por las siguientes razones:

Tienen acción preventiva; reducen el riesgo mediante eliminación por diseño y sustitución. Se basan en menor grado en el desempeño del personal. Es difícil ser vulnerada su efectividad.

Hasta este nivel, se le llaman “barreras duras”, característica que disminuye al bajar por la pirámide. En los niveles más abajo, llamadas “barreras blandas”, el control de riesgos depende en gran medida del juicio de las personas. Es por ello que se hace un principal énfasis en propuestas de soluciones basadas en las barreras duras.

Es importante identificar donde existen peligros, para así proponer el control de riesgo que nos permita alcanzar un nivel acotado de energía incidente en las cabinas de alta tensión, MRC, ZHV y MCC.

Desde el punto de vista de los escenarios, se identifica la cabina MRC Lado frontal, como la cabina donde existe un mayor riesgo de Arc Flash (ver figura 9-2).

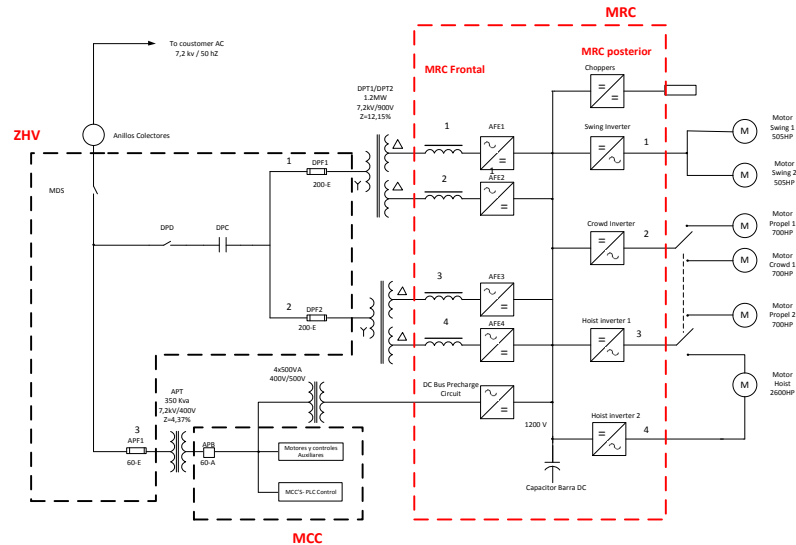


Fig. 9-2 Cabinas eléctricas en la Pala Bucyrus 495HR

9.1. Eliminar

Existen dos tipos de palas de cable, una accionada por corriente continua y la otra por corriente alterna.

Un caso de estudio realizado por P&H Mining Equipment comparó el rendimiento de palas AC y DC, el cual demuestra beneficios de la tecnología AC. [20]

Las palas comparadas fueron P&H 4100XPC AC y 4100XPC DC.

Esta superioridad de la pala AC incluye:

- Mayor confiabilidad operacional y eficiencia
- Menor mantenimiento e inventario de repuestos
- Tiempos de ciclos más cortos. Donde la pala 4100XPC AC tiene un tiempo de ciclo promedio de 3,5 segundos más rápido que el de la 4100XPC DC. Lo que representa una reducción significativa en los tiempos de carga de la pala.
- Productividad general estimada de 11.2% sobre la pala 4100XPC DC. [20].

El utilizar accionamiento AC permite reducir el nivel de peligro – riesgo de arc flash en cabinas de potencia con respecto a los niveles presente en palas DC [21].

Haciendo una evaluación entre una pala DC y una pala AC, se puede confirmar que la pala de corriente alterna presenta mejoras solamente por su topología.

En general, las capacidades de sobrecarga de los convertidores AC son más restringidas. Los convertidores DC generalmente se implementan con tiristores que soportan mayores sobrecargas que

los IGBT y los GTO. Esto también aumenta su energía incidente de arco eléctrico en condiciones de falla. [22]

Las palas de cable de corriente alterna presenta 5 etapas de protecciones en caso de falla, (Protecciones de sobrecorriente en alimentador principal, protecciones de sobrecorriente en subestaciones móviles, fusible en transformador principal de la pala, rectificadores e inversores), dando una mayor confiabilidad para condiciones operacionales. Por otro lado el uso de palas de cable de corriente en corriente continua presenta 4 etapas de protección (Protecciones de sobrecorriente en alimentador principal, protecciones de sobrecorriente en subestaciones móviles, fusible en transformador principal de la pala, rectificadores), siendo menos eficaz en caso de fallas. Otra ventaja se da en los semiconductores utilizados en los convertidores. Los semiconductores utilizados en los convertidores de la pala AC son transistores IGBT. Posee la ventaja de actuar como interruptor controlado, pudiendo manejar el encendido y el apagado a voluntad. Para encender el IGBT, el colector debe ser polarizado positivamente con respecto al emisor y se envía una señal de voltaje permanente en el terminal de puerta o gate. Para apagarlo se remueve la señal de voltaje en el terminal Gate. (Ver figura 9-3).

Los semiconductores utilizados en los convertidores de la pala DC son tiristores. Estos son dispositivos que habitualmente permiten un control al encendido y un apagado natural. Para el encendido se debe aplicar un pulso momentáneo de corriente en el terminal Gate cuando hay una tensión positiva entre ánodo y cátodo. Solo puede ser apagado con la interrupción de la fuente de tensión, abriendo el circuito, o bien, haciendo pasar una corriente en sentido inverso por el dispositivo, haciendo un control más lento (ver figura 9-4).

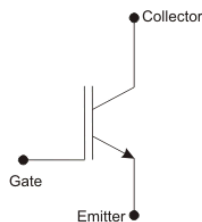


Fig. 9-3 Transistor IGBT

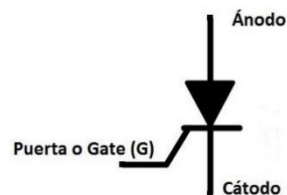


Fig. 9-4 Tiristor








Switch Parameter	Power Switch						
	SCR	BJT	MOSFET	GTO	IGBT	MCT	IGCT
max. rating volt./curr. [V/A]	6000/3500	1200/600	600/20	4500/3000	1400/600	1000/100	4500/3000
volt. drop (turn-on) [V]	2-3	1-2	$r_{DS(on)} \cdot I_{DS}$	2.5-35	2-4	1-1.5	2-3
voltage/current gating	current	current	voltage	current	voltage	voltage	current
linear/trigger gating signal	trigger	linear	linear	trigger	linear	trigger	trigger
max. switching freq. [Hz]	60	15 k	1 M	2 k	50 k	50 k	2 k
reverse voltage block cap.	yes	no	no	yes*	yes*	yes*	yes*
symbol							

Fig. 9-5 Comparación de semiconductores

En la figura 9-5 se presenta una comparación entre el tiristor SCR y transistores. Una de las principales características del tiristor es la alta capacidad de voltaje y corriente que puedan soportar, pero con una baja frecuencia de conmutación. Caso contrario es el IGBT, el cual posee una alta velocidad de conmutación, con rangos menores de voltaje y corriente con respecto al tiristor.

Los convertidores de ambas tecnologías presentan una capacidad intrínseca de limitar corrientes de falla hacia su salida, normalmente limitada a 2 x FLA (Full Load Amperage) con tiempos de bloqueo/falla de semiconductores acotados en caso de producirse sobrecorriente elevadas, este tiempo de bloqueo es de 0.2 segundos.

El control más lento de los tiristores permite que el tiempo de despeje de la falla sea más prolongado con respecto a los IGBT, aumentando la energía incidente en el punto de falla. Para eliminar riesgos, se sugiere evitar comprar y utilizar palas DC, haciendo retrofit a palas en corriente alterna.

Tomando en cuenta la comparación realizada entre una pala AC y DC, la pala AC presenta mejoras solamente por su topología en términos operacionales y de eficiencia. A éste análisis se le suma la condición de que los convertidores también actúan como equipo de protección. Como la pala AC presenta más etapas de conversión, sumándole las etapas de protección del sistema de potencia, presenta mayores ventajas para despejar una falla, pudiendo reducir la energía incidente en los diferentes puntos de interés.

En similares condiciones de operación de la pala AC y pala DC, la pala DC presenta una mayor energía incidente que la pala AC, presentando un mayor nivel de HRC.

Para eliminar categorías de riesgos, en caso de renovación de flotas de palas de cable, se sugiere evitar comprar y utilizar palas DC, haciendo retrofit a palas en corriente alterna.

El figura 9-6 y 9-7 se presenta los diagramas eléctricos correspondientes a la pala de cable continua y alterna, donde se destaca que la pala DC tiene una etapa de conversión, y pala AC tiene dos etapas de conversión.

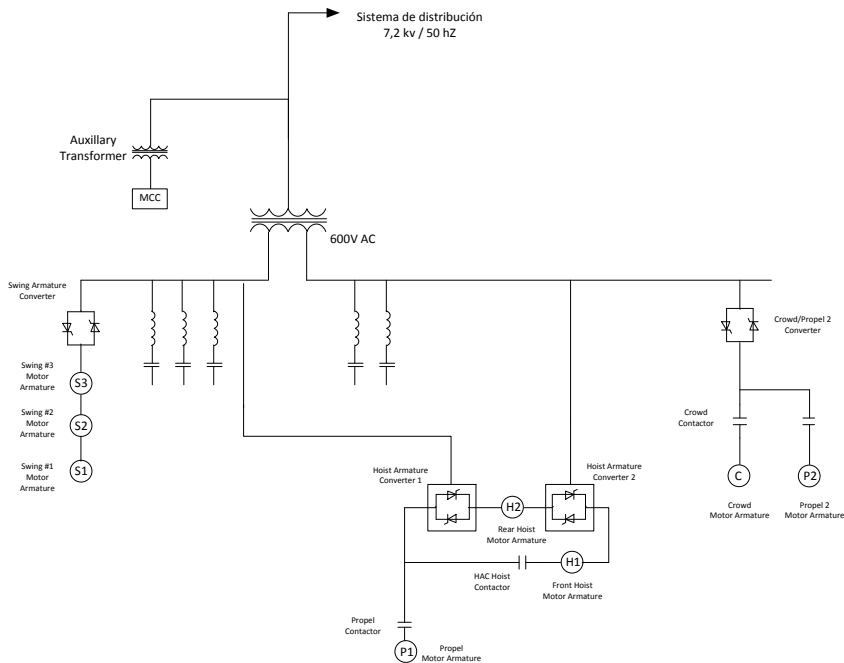


Fig. 9-6 Diagrama eléctrico de Pala de cable de corriente continúa

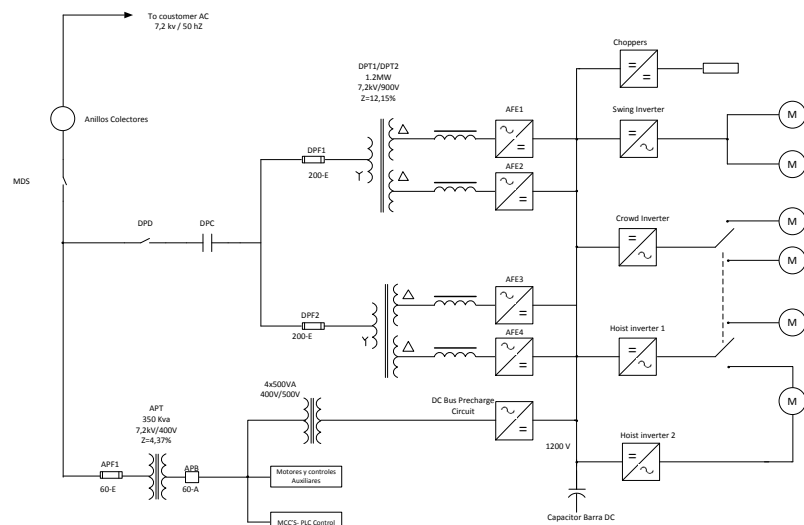


Fig. 9-7 Diagrama eléctrico de Pala de cable de corriente alterna

9.2 Sustitución

De forma general, considerando las ventajas en términos de acotar riesgos de arc flash de palas AC de la tecnología estudiada, se recomienda que la política de renovación de flotas prefiera palas de tecnología AC por sobre DC

9.3 Control de ingeniería

Los controles de ingeniería involucra el rediseño de equipos, infraestructuras o procesos. Existen restricciones de diseño de equipos el cual no es recomendable cambiar, como el equipamiento de la pala o del accionamiento porque ya están definidos por el fabricante, tomando en consideración múltiples factores cuyo análisis escapan al alcance de este proyecto. Cambiar las protecciones o modificar su configuración no sería aplicable en este informe, ya que su configuración sigue una metodología de protección y continuidad operacional no solo de las palas, también energizan otros equipamientos mineros.

También existen restricciones en términos de infraestructura, ya que requeriría de una inversión de capital, el cual involucraría otro tipo de estudio no aplicable al informe de habilitación profesional.

Es por ello que los controles de ingeniería van aplicados principalmente a los procesos.

Existen condiciones de requerimiento de la mina, donde al cambiar la localización de la pala se puede reducir la energía incidente.

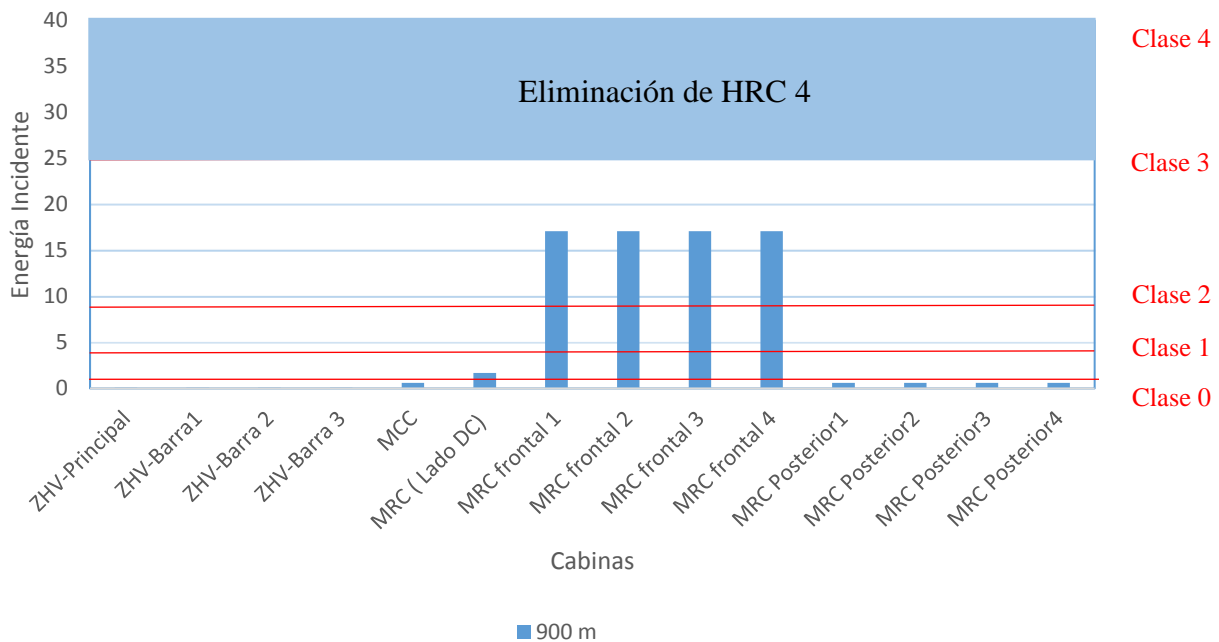
A. Distancia de líneas aéreas y cables móviles

Como se ha mencionado anteriormente, las líneas aéreas y cables móviles de mayor longitud definen una mayor impedancia del sistema eléctrico, haciendo corrientes de fallas de arco menores que hacen aumentar el tiempo de despeje de la falla. Como consecuencia aumenta la energía incidente, principalmente en la cabina MRC.

En la tabla 9-1 se presenta la distancia de las líneas aéreas y cables móviles. Se puede reducir el HRC de Arc Flash del nivel 4 a 3 en la cabina MRC utilizando distancias de 800m desde el alimentador a subestaciones móviles. (Ver figura 9-8)

Tabla 9-1 Distancia de cables Alimentadores – S/E Móviles – Palas de cable

Alimentador	S/E Móvil	Distancia cables S/E Móvil – Pala	Distancia líneas Alimentador – S/E Móviles	HRC
S/E B Barra 1-52C09	4 – 10 MVA	N/A	800 - 4000 m	N/A
S/E B Barra 1-52C11	4 – 10 MVA	900 – 2100 m	800 - 4000 m	4 a 3

**Fig. 9-8 Eliminación de HRC 4**

B. Subestaciones móviles

Otra estrategia para disminuir la energía incidente es aumentando la potencia en subestaciones móviles (cada subestación móvil existente presenta un ajuste de protecciones, considerando diferentes parámetros como la potencia, voltajes y razón x/r). Ya que si aumentamos la potencia, aumentara la corriente de falla, disminuyendo los tiempos de respuesta de las protecciones.

Se presenta en la tabla 9-2 las diferentes potencias utilizadas en el análisis de energía incidente, obteniendo por conclusión que el uso de una potencia de 10MVA reduce la energía incidente hasta 5.9 cal/cm² en la cabina MRC.

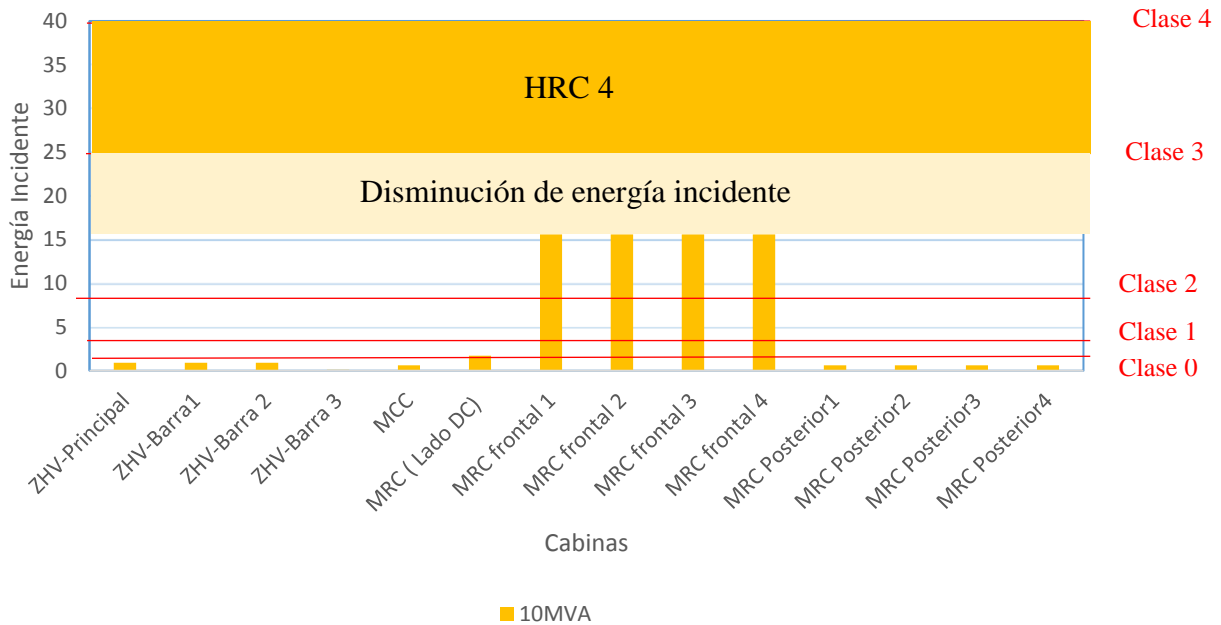


Fig. 9-9 Disminución de energía incidente

Tabla 9-2 Energía incidente en subestaciones móviles.

Cabina	E.incidente [cal/cm ²] a 4 MVA	E.incidente [cal/cm ²] a 6.5 MVA	E.incidente [cal/cm ²] a 8.5 MVA	E.incidente [cal/cm ²] A 10 MVA
MRC frontal 1	21,5	18	16,2	15,6
MRC frontal 2	21,5	18	16,2	15,6
MRC frontal 3	21,5	18	16,2	15,6
MRC frontal 4	21,5	18	16,2	15,6

9.4 Señalización, Advertencias y/o Controles Administrativos

Es el nivel de la jerarquía de control de riesgo que pertenece a las denominadas “barreras blandas”, donde el éxito de éstas depende en gran medida del personal. Corresponden a recomendaciones basadas en normativas que instruyen al personal en cómo ser seguro entorno a la energía eléctrica.

A continuación en la figura 9-10 se presenta un ejemplo de etiquetado, indicado los detalles de cada elemento de la etiqueta.

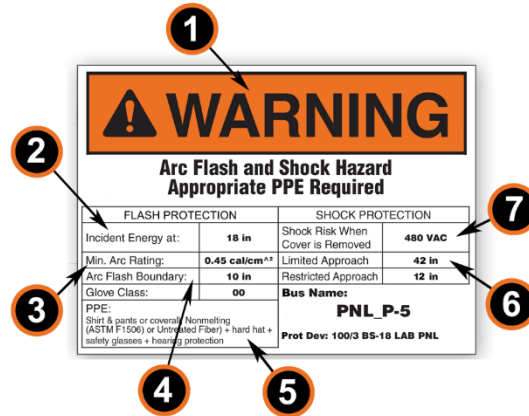


Fig. 9-10 Ejemplo de etiquetado

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

Encabezado de Peligro o Advertencia. Una directriz común es usar el encabezado "Peligro" cuando el voltaje es mayor a 600 o cuando la energía incidente es mayor a 40 cal/cm². Si es menor a este umbral, normalmente se usa un encabezado color naranja de "Advertencia".

“Energía incidente a” es la distancia de trabajo correspondiente. La IEEE define esto como, “la dimensión entre el punto posible de arco y la cabeza y cuerpo del trabajador colocados en el lugar para realizar la actividad asignada”.

“Clasificación Mín. de arco” es la energía incidente. Es una medida de energía térmica a una distancia de trabajo desde una falla de arco. Se mide en calorías/cm² o Joules/cm².

Límite de arco eléctrico. Esta es la distancia a la que una persona que esté trabajando más cerca al momento de un incidente de arco eléctrico pueda recibir una lesión permanente (empezando por una quemadura de segundo grado o peor) si no está protegido de forma adecuada por ropa resistente al fuego (FR).

Equipo de Protección Personal (EPP). Cada categoría de riesgo de peligro requiere un nivel diferente de protección. Las categorías se clasifican de 1 a 4. La categoría “0” fue eliminada en los cambios de 2015 a NFPA 70E. Allí puede encontrar el EPP requerido para cada categoría.

Los campos “Acercamiento limitado” y “Acercamiento restringido” están relacionados con los límites de acercamiento de peligro de choque. El límite “acercamiento prohibido” fue eliminado en la edición 2015 de NFPA 70E.

“Riesgo de choque si se retira la cubierta” es el voltaje.

A continuación se presentan ejemplos de etiquetado para las cabinas eléctricas de la Pala. El etiquetado incluye el peor caso para el riesgo de Arc Flash. Esto considera los parámetros de la tabla 9-3.

Tabla 9-3 Distancia de cables Alimentadores – S/E Móviles – Palas de cable

Alimentador	S/E Móvil	Distancia cables S/E Móvil – Pala	Distancia líneas Alimentador – S/E Móviles
S/E B Barra 1-52C11	4 MVA	2100 m	4000 m

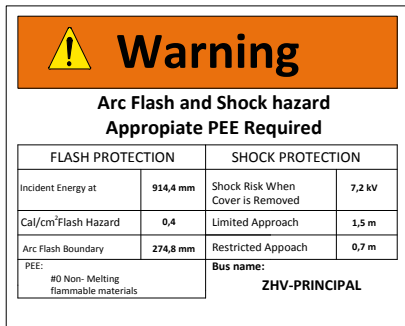


Fig. 9-11 Etiqueta para Cabina ZHV-PRINCIPAL

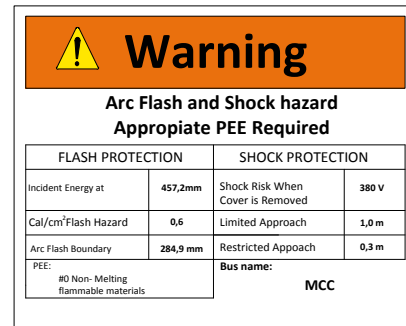


Fig. 9-12 Etiqueta para cabina MCC

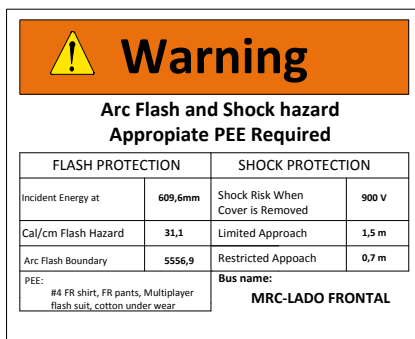


Fig. 9-13 Etiqueta para cabina MRC- LADO Frontal

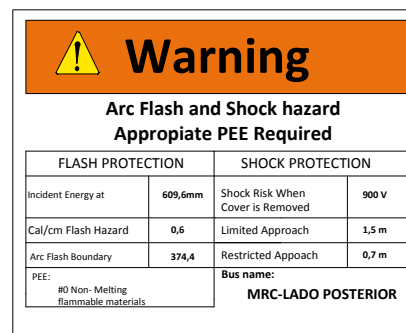


Fig. 9-14 Etiqueta para cabina MRC LADO POSTERIOR

9.5 Elementos de protección personal

El EPP contra arc flash se deberá incorporar para trabajar dentro de las fronteras por arco eléctrico donde la energía incidente es superior a $1,2 \text{ cal/cm}^2$ e inferior a 40 cal/cm^2 . Una vez definida esta energía se determinará en cuál de los cinco rangos categoría peligro/riesgo se encuentran los equipos de la subestación y por tanto el nivel de protección a utilizar.

En la figura 9-15 se presenta los elementos de protección personal a utilizar de acuerdo al HRC de energía incidente. Por recomendación de la norma NFPA 70-E, todo personal que puede estar expuesto al riesgo de arc flash debe utilizar ropa de HRC #2.

PPE CATEGORY LEVEL CHART		
 0	CATEGORY What Personal Protection Equipment (PPE) You Shall Wear: <input checked="" type="checkbox"/> Cotton Undergarments <input checked="" type="checkbox"/> Long Sleeved Shirt (Natural Fiber) <input checked="" type="checkbox"/> Long Pants (Natural Fiber) <input checked="" type="checkbox"/> Safety Glasses or Goggles <input checked="" type="checkbox"/> Hearing Protection (Inserts) <input checked="" type="checkbox"/> Leather Gloves (as needed) or Insulating Gloves w/Protectors	
 1	CATEGORY What Personal Protection Equipment (PPE) You Shall Wear: <input checked="" type="checkbox"/> Cotton Undergarments <input checked="" type="checkbox"/> Arc Rated Long Sleeved Shirt (or FR Coveralls) <input checked="" type="checkbox"/> Arc Rated Long Pants (or FR Coveralls) <input checked="" type="checkbox"/> Hard Hat with Arc Rated Face Shield <input checked="" type="checkbox"/> Hearing Protection (Inserts) <input checked="" type="checkbox"/> Safety Glasses or Goggles <input checked="" type="checkbox"/> Leather Gloves or Insulating Gloves w/Protectors <input checked="" type="checkbox"/> Leather Shoes (as needed)	
 2	CATEGORY What Personal Protection Equipment (PPE) You Shall Wear: <input checked="" type="checkbox"/> Cotton Undergarments <input checked="" type="checkbox"/> Short Sleeved "T" Shirt (Natural Fiber) <input checked="" type="checkbox"/> Arc Rated Long Sleeved Shirt and Long Pants or Arc Rated Coveralls instead <input checked="" type="checkbox"/> Hard Hat with Arc Rated Face Shield w/Sock Balaclava <input checked="" type="checkbox"/> Safety Glasses or Goggles <input checked="" type="checkbox"/> Hearing Protection (Inserts) <input checked="" type="checkbox"/> Leather Gloves or Insulating Gloves w/Protectors <input checked="" type="checkbox"/> Leather Shoes (as needed)	
 3	CATEGORY What Personal Protection Equipment (PPE) You Shall Wear: <input checked="" type="checkbox"/> Cotton Underwear <input checked="" type="checkbox"/> Short Sleeved "T" Shirt (Natural Fiber) <input checked="" type="checkbox"/> Arc Rated Long Sleeved Shirt and Long Pants <input checked="" type="checkbox"/> Arc Rated Coveralls (Over the above) <input checked="" type="checkbox"/> Arc Rated (25 cal) Arc Flash Suite Jacket <input checked="" type="checkbox"/> Arc Rated (25 cal) Arc Flash Suit Pants <input checked="" type="checkbox"/> Arc Rated (25cal) Arc Flash Suite Hood <input checked="" type="checkbox"/> Hard Hat <input checked="" type="checkbox"/> Safety Glasses or Goggles <input checked="" type="checkbox"/> Hearing Protection <input checked="" type="checkbox"/> Arc Rated Leather Gloves or Insulating Gloves w/Protectors <input checked="" type="checkbox"/> Leather Shoes	
 4	CATEGORY What Personal Protection Equipment (PPE) You Shall Wear: <input checked="" type="checkbox"/> Cotton Underwear <input checked="" type="checkbox"/> Short Sleeved "T" Shirt (Natural Fiber) <input checked="" type="checkbox"/> Arc Rated Long Sleeved Shirt and Long Pants <input checked="" type="checkbox"/> Arc Rated Coveralls (Over the above) <input checked="" type="checkbox"/> Arc Rated (40 cal) Arc Flash Suite Jacket <input checked="" type="checkbox"/> Arc Rated (40 cal) Arc Flash Suit Pants <input checked="" type="checkbox"/> Arc Rated (40 cal) Arc Flash Suite Hood <input checked="" type="checkbox"/> Hard Hat <input checked="" type="checkbox"/> Safety Glasses or Goggles <input checked="" type="checkbox"/> Hearing Protection <input checked="" type="checkbox"/> Arc Rated Leather Gloves or Insulating Gloves w/Protectors <input checked="" type="checkbox"/> Leather Shoes	

Always wear voltage rated rubber glove liners when working above 50 volts in all categories!

Fig. 9-15 EPP a utilizar según norma NFPA 70-E

Capítulo 10. Conclusiones

10.1 Conclusiones

En este informe se plantearon Estrategias para Administración de Riesgos Eléctricos de Arc. Flash en Tableros Eléctricos de Potencia de Palas Mineras de Cable.

Dentro de los riesgos asociados a la energía eléctrica, se estudió el riesgo de Arc flash, que es la condición peligrosa asociada a la liberación de energía térmica producida por la falla de arco eléctrico, que en el peor de los casos puede provocar la muerte.

En Chile no existen reglamentos y normativas específicas que regule directamente el riesgo de arc flash, pero si hay iniciativas e instituciones que velan por el cumplimiento de un buen funcionamiento de un sistema eléctrico, como la Superintendencia de electricidad y combustibles y el Sernageomin.

Se puede concluir que el riesgo de arc flash depende directamente de la energía incidente, y a su vez, la energía incidente depende de la distancia de trabajo, la corriente de arco y el tiempo de duración de la falla. En base a ello se planteó un modelo de corto circuito basado en el estándar IEEE 1584 y la norma NFPA70-E implementado en una subestación eléctrica minera, al cual llamamos Subestación B. Cabe mencionar que el principal foco de estudio fué Pala de cable Bucyrus 495 HR.

Este modelo fué simulado en el programa Easy power, donde se evaluaron diferentes escenarios que determinaron energías incidentes máximas y mínimas que se pueden presentar en las cabinas eléctricas de las palas para condiciones normales de operación de una compañía de la gran minería en Chile.

Desde el punto de vista de los escenarios, se concluyó que en la cabina MRC Lado frontal, existe un mayor riesgo de Arc Flash, presentando valores de energía incidente dentro de HRC 4, debido a que no existe un equipamiento de protección que actué inmediatamente en caso de falla.

Para poder eliminar o mitigar la energía incidente, se utilizó la implementación de una jerarquía de control de riesgos, basado en la norma ANSI Z10-2005 y NFPA 70-E para mejorar las condiciones de seguridad eléctricas en las cabinas de la pala de cable.

Se dio un principal énfasis en las barreras duras de seguridad, debido a que tienen un mayor grado de efectividad y se basan en un menor grado de desempeño personal.

Para eliminar riesgo en el futuro, se recomienda que la política de reemplazo y renovación de equipos considere palas en alterna por sobre las palas continuas.

Además se puede concluir que existen condiciones de requerimiento de la mina, donde al cambiar la localización de la pala se puede reducir la energía incidente. La categoría HRC 4 se puede eliminar tan solo disminuyendo la distancia de los cables desde subestaciones móviles a la pala. En menor grado, se puede reducir la energía incidente, disminuyendo la distancia de los cables desde los alimentadores a las subestaciones móviles y también aumentando la potencia de las subestaciones móviles.

Dentro de las barreras, se concluyó que el personal también puede ser advertido o capacitado en torno al riesgo de Arc Flash y el shock eléctrico, es por ello que se propusieron etiquetados a las cabinas eléctricas de la pala, que corresponden a recomendaciones basadas en normativas que instruyen al personal en cómo ser seguro entorno a la energía eléctrica. Finalmente, basado en la norma NFPA 70 –E se propuso el equipo de protección personal para diferentes categorías de riesgo para el personal. Una buena educación de las barreras blandas en el personal, permitirá reducir el riesgo de arc flash.

10.2 Trabajos Futuros

Como trabajos futuros, se podría profundizar un estudio de coordinación de protecciones en el sistema eléctrico, para una mejor configuración de equipos como relé de sobrecorriente y fusible.

Bibliografía

- [1] Morales, A. (2016). Occupational Health & Safety Issues on Mining & Industry. Presentation, Universidad de Concepción.
- [2] Manual de Riesgos Eléctricos, Asociación Chilena de seguridad (ACHS).
- [3] Bernardo Bello Rebolledo, “*Riesgos electricos en la mineria*”, SERNAGEOMIN
- [4] Andrea García, *Estrategia de Administración de Riesgos Eléctricos por Jerarquías de Control en Instalaciones Comerciales y Edificios Públicos, 2014*, Universidad de Concepción.
- [5] Paulina Gutiérrez, *Estrategias de Administración de Riesgo Eléctrico por Jerarquía de Control en Ambientes Industrial, 2015*, Universidad de Concepción
- [6] Marcel Riquelme, *Proyecto en monitoreo de condiciones para mantenimiento predictivos de palas electromecánica, 2013*, Universidad de Chile
- [7] Sitio web: [http:// www.fusibles.cl](http://www.fusibles.cl) Capitulo IV. Características Eléctricas y mecánicas de los fusibles
- [8] Electricidad, higiene Industrial, Universidad Nacional del Centro De la Provincia de Buenos Aires
- [9] National Electrical Code, NEC o NFPA 70, National Fire Protection Association, 2011.
- [10] Isaac Croquer, Ruben Hernandez, Relé de sobre corriente, Instituto Universitario Santiago Mariño
- [11] “Relay Protection of A-C Generators,” by AIEE Committee, AIEE Trans., 70, 1951
- [12] V. Rojas Castro, *Análisis de riesgo por fogonazo de arco eléctrico y seguridad eléctrica*, REPROCON S.A, 2012
- [13] Ministerio de Minería de Chile, Reglamento de Seguridad Minera Decreto Supremo No 132
- [14] Ministerio del Trabajo de Chile, "Ley N°16.744; Accidentes del Trabajo y Enfermedades Profesionales". 2013
- [15] OSHA, "Code of Federal Regulations, Title 30 Mineral Resources", 2013

- [16] Superintendencia de Electricidad y Combustibles, “Norma Chilena de Electricidad 4/2003 Instalaciones de Consumo en Baja Tensión,” 2003.
- [17] Guide for performing arc-flash hazard calculations, IEEE 1584, IEEE Industry Applications Society, IEEE, 2002
- [18] F. A. Manuele, “ANSI/AIHA Z10-2005: The new benchmark for safety management Systems,” ASSE Professional Safety, pp. 25–33, 2006.
- [19] NFPA, NFPA 70E: Norma para la Seguridad Eléctrica en Lugares de Trabajo, NFPA, 2004.
- [20] Eric N. Berkhimer, “Shovel Performance: AC vs. DC”, May 2012
- [21] Wiechmann, E., Morales, A., Llanos, C., Zulueta, R., & Aqueveque, P. (2011). “*Reducing arc flash Hazard/Risk Category (HRC) in mining shovels based on standard NFPA-70E*”, in *conf.*, Lake Buena Vista, FL, USA.
- [22] E. Wiechmann, P. Aqueveque, L. Muñoz, A. Morales, J. Henriquez, C. Llanos, “*A study of arc flash hazard risk on open pit mining shovels*”, *Australasian Power Technologies Publications Industrial Electrix*, pp. 57 - 61, July - September 2014.

Anexo A. Configuración en software

A.1. Configuración de parámetros en software EasyPower

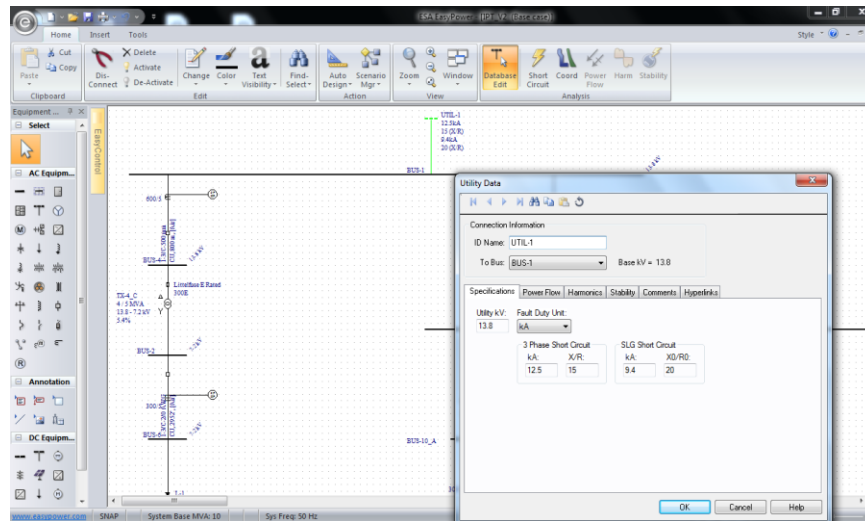


Fig. A-1 Configuración Barra principal

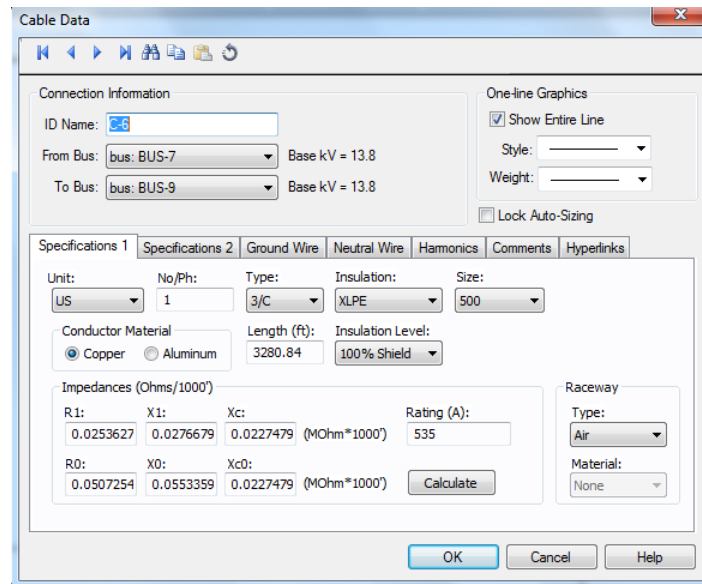


Fig. A-2 Configuración de línea eléctrica

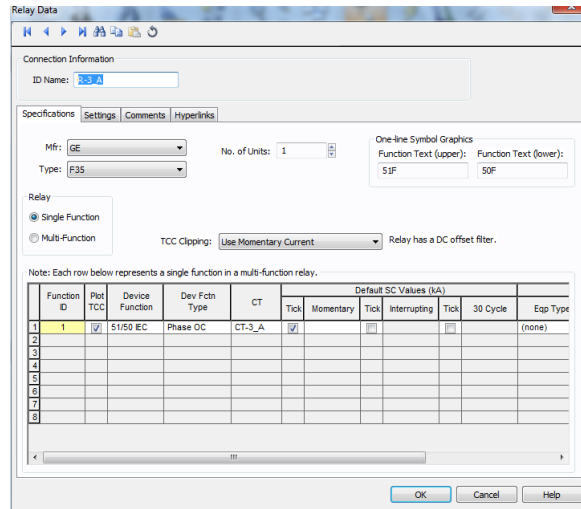


Fig. A-3 Configuración relé de protección 1

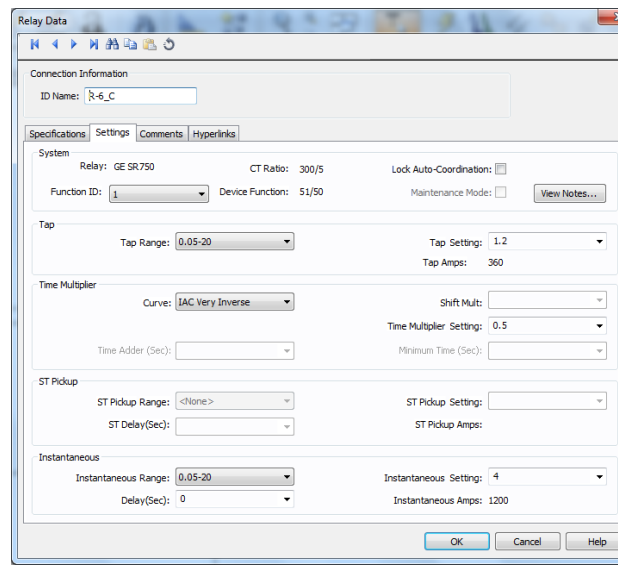


Fig. A-4 Configuración relé de protección 2

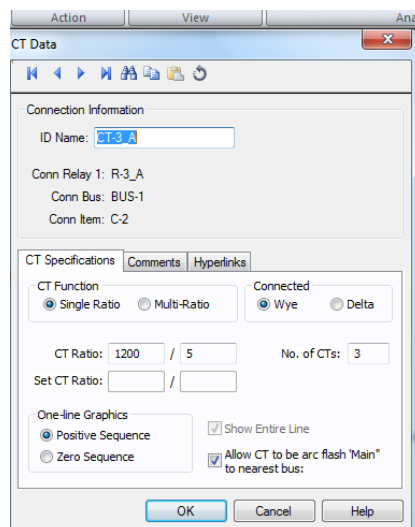


Fig. A-5 Configuración relé de protección 3

Inverter Data

Connection Information

ID Name: INV-1_AA

Input Bus: BUS-17_T Base kV = 1.2

Output Bus: BUS-21_X Base kV = 0.9

Specifications | Power Flow | Harmonics | Stability | Comments | Hyperlinks

AC Frequency = 50 Hz

Rectifier

Battery

Inverter

Output

Input

kVA: 1200 X/R: 23.7024 Calculate

FLA = 769.8

IGBT Thyristor

IGBT Fault X FLA: 2

IGBT Fault Time: 0.2 Seconds

Frequency = 0 Hz (DC)

OK Cancel Help

Fig. A-6 Configuración convertidor

Fused Switch Data

Connection Information

ID Name: APF-E

On Bus = BUS-4 Base kV: 13.8

Connection Type = Feeder

Open Closed

Lock Auto-Sizing

Lock Auto-Coordination

Specifications | Short Circuit | Switch | Mtr O/L | Harmonics | Stability | Comments | Hyperlinks

Mfr: Littelfuse Type: E Rated Style: E Rated Find Style

One-line Graphics

Fuse Only Fused Switch Fused Contactor

Plot Phase TCC

Model: 3C Library kV: 15.5 Size: 300E View Notes...

One-line Data Text

Automatic (Based on Size)

User Specified Field:

OK Cancel Help

Fig. A-7 Configuración de Fusible

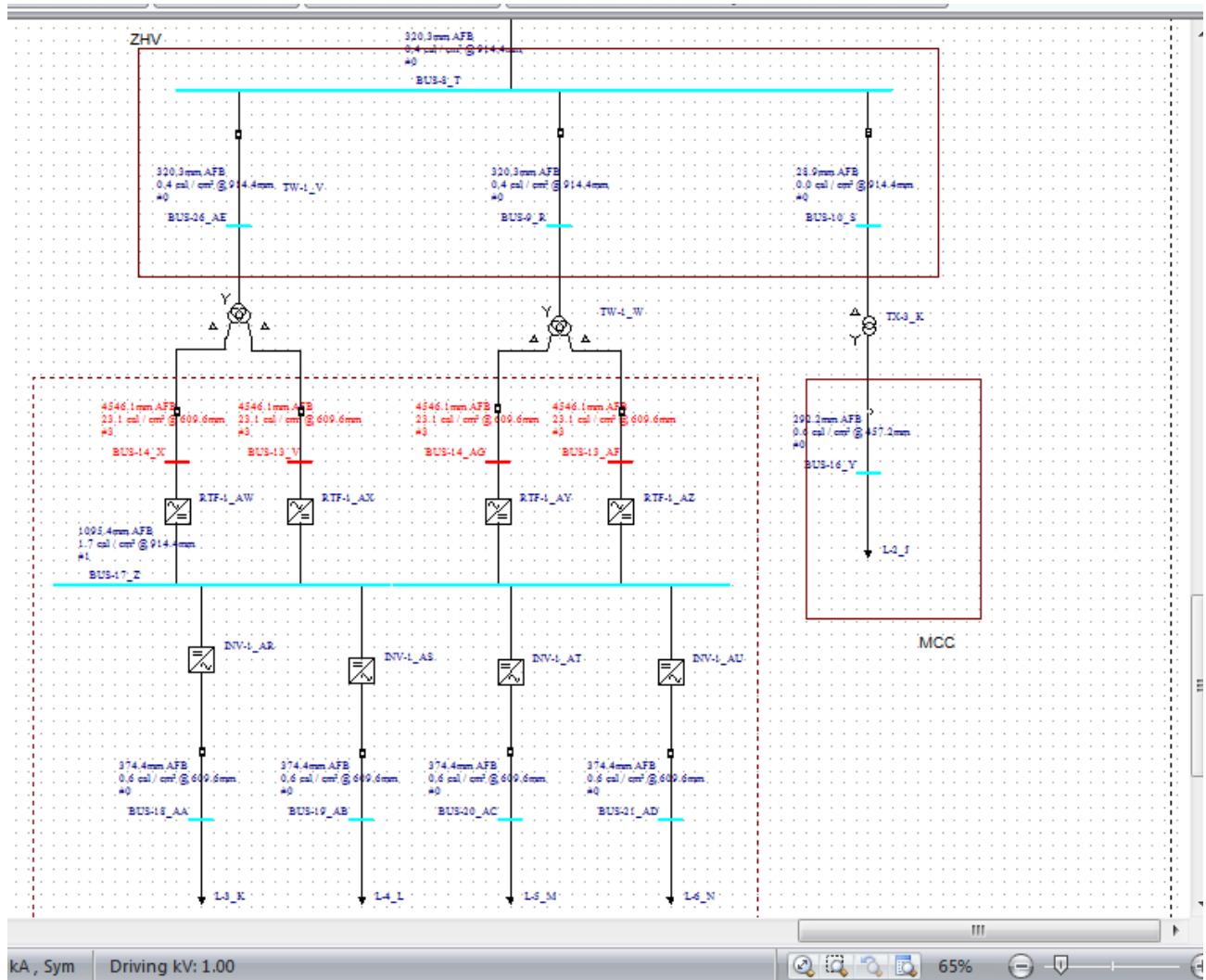


Fig. A-8 Ejemplo de resultado de energía incidente en Pala Bucyrus 495HR

Anexo B. Resultados de energía incidente

B.1. Energía incidente a diferentes distancias de cables móviles

Tabla B-1 Energía incidente a diferentes distancias de cables móviles

Cabina	E.incidente [cal/cm ²] a 900m	E.incidente [cal/cm ²] a 1500m	E.incidente [cal/cm ²] A 2100m
ZHV-Principal	0,1	0,1	0,1
ZHV-Barra1	0,1	0,1	0,1
ZHV-Barra 2	0,1	0,1	0,1
ZHV-Barra 3	0,1	0,1	0,1
MCC	0,6	0,6	0,6
MRC (Lado DC)	1,7	1,7	1,7
MRC frontal 1	17,1	18,3	27,1
MRC frontal 2	17,1	18,3	27,1
MRC frontal 3	17,1	18,3	27,1
MRC frontal 4	17,1	18,3	27,1
MRC Posterior1	0,6	0,6	0,6
MRC Posterior2	0,6	0,6	0,6
MRC Posterior3	0,6	0,6	0,6
MRC Posterior 4	0,6	0,6	0,6

B.2. Energía incidente a diferentes distancias de líneas aéreas

Tabla B-2 Energía incidente a diferentes distancias de líneas aéreas

Cabina	E.incidente [cal/cm ²] a 800m	E.incidente [cal/cm ²] a 1500m	E.incidente [cal/cm ²] a 3000m	E.incidente [cal/cm ²] A 4000m
ZHV-Principal	0,1	0,1	0,1	0,1
ZHV-Barra1	0,1	0,1	0,1	0,1
ZHV-Barra 2	0,1	0,1	0,1	0,1
ZHV-Barra 3	0,1	0,1	0,1	0,1
MCC	0,6	0,6	0,6	0,6
MRC (Lado DC)	1,7	1,7	1,7	1,7
MRC frontal 1	17,6	17,9	18,4	18,7
MRC frontal 2	17,6	17,9	18,4	18,7
MRC frontal 3	17,6	17,9	18,4	18,7
MRC frontal 4	17,6	17,9	18,4	18,7
MRC Posterior1	0,6	0,6	0,6	0,6
MRC Posterior2	0,6	0,6	0,6	0,6
MRC Posterior3	0,6	0,6	0,6	0,6
MRC Posterior 4	0,6	0,6	0,6	0,6

B.3. Energía incidente a diferentes potencias de subestaciones móviles

Tabla B-3 Energía incidente a diferentes potencias de subestaciones móviles.

Cabina	E.incidente [cal/cm²] a 4 MVA	E.incidente [cal/cm²] a 6.5 MVA	E.incidente [cal/cm²] a 8.5 MVA	E.incidente [cal/cm²] A 10 MVA
MRC frontal 1	21,5	18	16,2	15,6
MRC frontal 2	21,5	18	16,2	15,6
MRC frontal 3	21,5	18	16,2	15,6
MRC frontal 4	21,5	18	16,2	15,6