



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

“NOCIONES ESPECÍFICAS PARA PUESTA A TIERRA EN INSTALACIONES
MINERAS”

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA

FÉLIX SEBASTIÁN CANALES PÉREZ

SANTIAGO DE CHILE
ENERO 2011



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

“NOCIONES ESPECÍFICAS PARA PUESTA A TIERRA EN INSTALACIONES MINERAS”

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA

FÉLIX SEBASTIÁN CANALES PÉREZ

PROFESOR GUÍA:
NELSON MORALES OSORIO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ARIEL VALDENEGRO ESPINOZA
LUIS GARCÉS RODRÍGUEZ

SANTIAGO DE CHILE
ENERO 2011

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA
POR: FÉLIX SEBASTIÁN CANALES PÉREZ
FECHA: 11/01/2011
PROF. GUÍA: SR. NELSON MORALES OSORIO

NOCIONES ESPECÍFICAS PARA PUESTA A TIERRA EN INSTALACIONES MINERAS

En Chile la minería es la principal industria, generando grandes recursos y está en constante crecimiento. En coordinación con este desarrollo, la seguridad tanto para equipos y personas debe mantener la normativa, que cada vez es más exigente. Las normativas nacionales no detallan técnicamente las puestas a tierra de la minería, por lo que las empresas mineras se acogen a normas internacionales.

El presente trabajo de título tiene como objetivo identificar los problemas e interrogantes presentes en los sistemas de puesta a tierra propios de los sistemas eléctricos mineros, y luego entregar recomendaciones y argumentos técnicos para dichos puntos, los cuales pretenden ser factibles y de clara comprensión.

En el trabajo se consideraron cuatro aspectos relacionados con las puestas a tierra: el acoplamiento entre puestas a tierra diferentes en una mina, determinando las posibles causas y se entregan recomendaciones para afrontarlo; el diseño apropiado de la resistencia de neutro a tierra considerando los efectos capacitivos del sistema, entregando un método aproximado que determina los valores de la resistencia y corrientes de fallas; equipos de protección relacionados con las resistencias de neutro a tierra, indicando sus consideraciones especiales de ellos; y condiciones de seguridad de los cables de arrastre subterráneos para tres niveles distintos de tensiones (menores a 1000 V, 1000 V, y sobre 1000 V), analizando la construcción y comportamiento frente a daños mecánicos de estos.

Las principales recomendaciones son interconectar dos puestas a tierra si el acoplamiento de voltaje es mayor que un 33% entre ellas; diseñar la resistencia de neutro a tierra considerando la capacitancia distribuida provocada por los cables de arrastre mediante cálculos aproximados, los cuales se ejemplifican; se debe monitorear de forma permanente el conductor de tierra y la resistencia de neutro a tierra, y no ocasionalmente; y siguiendo las normas para cables de arrastre subterráneos de tensiones mayores a 1000 Vac, estos confieren mayor seguridad que los cables de menor voltaje.

Se propone como trabajo futuro analizar el sistema de puesta a tierra de una mina en particular siguiendo las recomendaciones propuestas en este trabajo; comparar las normas eléctricas en sistemas mineros canadienses y estadounidenses en cuanto a la seguridad conferida; y diseñar un monitor continuo de resistencia de neutro a tierra.

A mi familia.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	i
ÍNDICE DE FIGURAS	iv
ÍNDICE DE TABLAS	viii
1 Introducción	1
1.1. Objetivos	2
1.1.1. Objetivos específicos	2
1.2. Estructura de la memoria	2
2 Antecedentes Generales	4
2.1. Puesta a tierra	4
2.1.1. Objetivos de una puesta a tierra	4
2.1.2. Clasificación de puesta a tierra	6
2.1.3. Conducción de suelos	6
2.1.4. Efectos de la corriente por el cuerpo humano	8
2.1.5. Diferencias de potencial en puesta a tierra	14
2.2. Antecedentes generales de la minería	18
2.2.1. Técnicas de explotación	19
2.3. Instalaciones eléctricas en la industria de la minería	30
2.3.1. Equipos de distribución eléctrica	31
2.3.2. Esquemas de distribución de energía	40
2.3.3. Sistemas de puesta a tierra en minas	49
2.3.4. Plantas de procesamiento de minerales	51
2.4. Accidentes eléctricos en la industria minera	57
2.4.1. Estadísticas de accidentes de Puestas a tierra	59
3 Acoplamiento entre puestas a tierra en minas	61
3.1. Mecanismos de acoplamiento entre puestas a tierra	62
3.1.1. Interconexión directa accidental	63
3.1.2. Objeto conductor intermediario	63
3.1.3. Insuficiente separación	63
3.2. Dificultades en la reducción del acoplamiento	64
3.2.1. Junturas de material aislante	64
3.2.2. Cubiertas y revestimientos no conductores	65

3.2.3.	Dimensiones de los sistemas de puesta a tierra _____	65
3.3.	Acoplamiento entre electrodos grandes _____	66
3.4.	Criterios generales de seguridad _____	66
3.5.	Interconexión de mallas de tierras _____	68
3.5.1.	Método de cálculo aproximado de puestas a tierra interconectadas _____	68
3.5.2.	Efectos sobre el sistema _____	70
4	Resistencia de neutro a tierra _____	72
4.1.	Técnicas de conexión de neutro a tierra _____	72
4.1.1.	Sistema sin conexión a tierra _____	72
4.1.2.	Sistema de neutro rígido a tierra _____	73
4.1.3.	Resistencia de neutro a tierra _____	73
4.2.	Características de Sistemas con resistencia de neutro a tierra _____	74
4.2.1.	Criterio de diseño básico _____	75
4.2.2.	Problemas del diseño básico _____	77
4.3.	Efectos de la capacidad distribuida _____	78
4.4.	Procedimientos recomendados _____	83
4.4.1.	Tamaño de la NGR y configuración del pickup _____	83
4.4.2.	Ejemplo de distribución de una mina _____	86
4.4.3.	Ejemplo de un sistema de mina de tajos largos de alto voltaje _____	89
4.5.	Análisis _____	91
4.6.	Normas Internacionales _____	92
5	Equipos de protección asociados a las resistencias de neutro a tierra _____	95
5.1.	Consideraciones especiales para las protecciones del sistema _____	95
5.1.1.	Sistemas de protección _____	95
5.1.2.	Disparo simpático (<i>sympathetic tripping</i>) _____	96
5.1.3.	Coordinación de relés _____	97
5.1.4.	Armónicos de corriente _____	98
5.1.5.	Selección del relé de falla a tierra _____	98
5.2.	Monitor del conductor de tierra _____	99
5.2.1.	Características del monitor de conductor de tierra deseadas _____	100
5.2.2.	Limitaciones del monitor de conductor de tierra _____	101
5.3.	Monitor de NGR _____	102
5.3.1.	Monitoreo de la NGR _____	102
5.3.2.	Modos de falla de la NGR _____	103
5.3.3.	Causas y periodicidad de las fallas de las NGR _____	103
5.3.4.	Consecuencias de una falla en una NGR _____	105
5.3.5.	Métodos de detección de fallas de la NGR _____	105
5.3.6.	Requisitos del monitoreo continuo _____	107
6	Cables de arrastre en minas subterráneas _____	112
6.1.	Cables de Distribución _____	112
6.2.	Cables de Arrastre en minas subterráneas _____	116

6.3.	Análisis de seguridad de los cables	117
6.3.1.	Cable de baja tensión	117
6.3.2.	Cable de Media Tensión	118
6.3.3.	Cable de alta tensión	119
6.3.4.	Circuito Modelo	120
6.3.5.	Análisis de Peligros	123
6.4.	Análisis de descarga	126
6.4.1.	Protección de falla a tierra	126
6.4.2.	Características del relé	127
6.4.3.	Análisis de las corrientes por el cuerpo	129
7	Conclusiones	131
	Bibliografía	133
	Anexos	138
A.	Extracto de normas internacionales sobre resistencias de neutro a tierra	138
B.	Características de técnicas de puestas a tierra	145
C.	Extracto de normas eléctricas chilenas de seguridad minera	146
D.	Equipos de la minería	163

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Curvas de seguridad (I vs t) con trayectoria mano izquierda-pies.....	10
Figura 2.2: Modelo de la Impedancia del cuerpo humano.....	12
Figura 2.3: Valores porcentuales relativos de la impedancia del cuerpo humano para diferentes trayectorias.....	13
Figura 2.4: Voltaje de paso, de contacto y transferido: V_p , V_c , V_t respectivamente	16
Figura 2.5: Mina de rajo abierto	20
Figura 2.6: Mina de superficie	21
Figura 2.7: Cantera.....	21
Figura 2.8: Mina de placer	22
Figura 2.9: Esquema de mina subterránea.....	23
Figura 2.10: Mina subterránea de roca dura.....	24
Figura 2.11: Mina de cámaras y pilares.....	25
Figura 2.12: Mina Longwall	26
Figura 2.13: Minería por dragado.....	27
Figura 2.14: Sistema eléctrico de potencia básico de una mina	31
Figura 2.15: Centro de poder	32
Figura 2.16: Acopladores enchufables utilizados en la minería.....	32
Figura 2.17: Diagrama simplificado de un centro de poder de mina	33
Figura 2.18: Celdas de maniobra móvil	36

Figura 2.19: Diagrama simplificado de una celda de maniobra.....	36
Figura 2.20: Subestación principal.....	37
Figura 2.21: Diagrama simplificado de una subestación.....	38
Figura 2.22: Subestación portátil.....	38
Figura 2.23: Generador eléctrico diesel portátil.....	40
Figura 2.24: Sistema de distribución radial aplicado a una mina de superficie.....	41
Figura 2.25: Sistema de distribución selectivo secundario aplicada a una mina de rajo abierto.....	42
Figura 2.26: Sistema de distribución radial de mina de superficie usando líneas aéreas.....	44
Figura 2.27: Sistema de distribución radial con doble línea de base aplicada a una mina de superficie.....	45
Figura 2.28: Sistema de distribución de mina de tajo abierto donde se ilustra el anillo principal.....	46
Figura 2.29: Sistema de distribución radial de una mina subterránea.....	47
Figura 2.30: Sistema de distribución selectivo secundario de una mina subterránea.....	48
Figura 2.31: Sistema de distribución radial aplicado a planta de procesamiento mineral.....	51
Figura 2.32: Planta de Chancado.....	52
Figura 2.33: Planta de Concentración.....	53
Figura 2.34: Planta de lixiviación.....	54
Figura 2.35: Planta de fundición.....	55
Figura 2.36: Planta de refinación electrolítica.....	56
Figura 2.37: Planta de electro-obtención.....	57
Figura 3.1: Flujo de corriente a través de la tierra sobrepasando la juntura aislada de la tubería.....	65
Figura 3.2: Acoplamiento de voltaje en un conductor remoto generado por una malla representada por una semiesfera.....	66
Figura 3.3: Interconexión de dos mallas de tierra.....	68

Figura 3.4: Circuito de corriente de falla monofásica a tierra.....	71
Figura 4.1: Sistema sin conexión a tierra	73
Figura 4.2: Sistema con neutro rígido a tierra.....	73
Figura 4.3: Sistema con resistencia de neutro a tierra.....	74
Figura 4.4: Corrientes de falla Fase-Tierra para el caso de que la falla ocurre en la fase A.....	77
Figura 4.5: Modelo de un sistema trifásico con una falla Fase-Tierra	79
Figura 4.6: Circuito simplificado de una falla Fase-Tierra	79
Figura 4.7: Disposición general de un sistema de potencia de tajos largos tipo inby de 2400 V.....	80
Figura 4.8: Disposición general de un sistema de potencia de tajos largos tipo outby de 4160 V	82
Figura 4.9: Ejemplo de diagrama unilineal del sistema distribución de alto voltaje de una mina subterránea.....	87
Figura 4.10: Diagrama típico de un sistema de potencia de tajos largos de 4160 V.....	90
Figura 5.1: Corrientes leídas durante falla a tierra en un sistema con NGR.....	96
Figura 5.2: Elemento de una NGR	103
Figura 5.3: Fallas térmicas de NGR.....	104
Figura 5.4: NGR de intemperie cubierta por una malla metálica.....	105
Figura 5.5: Prueba de inyección primaria de corriente con NGR abierta	106
Figura 5.6: Método efectivo de monitoreo de NGR durante una falla	108
Figura 5.7: Medidor de resistencia usado como monitor de NGR.....	108
Figura 5.8: a) Influencias externas CC en el sistema. b) Continuidad durante la falla a tierra	109
Figura 5.9: a) Medidas del Monitor continuo de NGR. b) Monitor continuo de NGR.....	110
Figura 6.1: Corte transversal de los cables más usados en la minería	114
Figura 6.2: Cable de arrastre típico para bajo voltaje.....	118
Figura 6.3: Cable de arrastre típico para medio voltaje.....	119

Figura 6.4: Cable de arrastre típico para alto voltaje.....	120
Figura 6.5: Circuito trifásico genérico que modela los riesgos eléctricos de un sistema minero.....	121
Figura 6.6: Sección transversal de un cable SHD que ilustra la capacitancia shunt.....	123
Figura 6.7: Escenario 1	124
Figura 6.8: Escenario 2.....	124
Figura 6.9: Escenario 3.....	124
Figura 6.10: Relé de falla a tierra.....	127
Figura 6.11: Curvas características del tiempo de despeje de una falla para diferentes tensiones.....	129

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Resistividad de distintos tipos de suelos.....	7
Tabla 2.2: Efectos fisiológicos del paso de corriente eléctrica por el cuerpo humano.....	9
Tabla 2.3: Factor de corriente de corazón para distintas trayectorias.....	14
Tabla 2.4: Productos mineros de Chile.....	28
Tabla 2.5: Consumo de energía eléctrica y total de los sectores industriales en Chile.....	29
Tabla 2.6: Consumo de energía eléctrica y total de minas de distintos minerales en Chile.....	29
Tabla 2.7: Coeficientes unitarios de consumo de energía eléctrica, de combustibles y energía total por área minera.....	30
Tabla 2.8: Porcentaje de accidentes fatales según categoría durante 1990 a 1999.....	58
Tabla 2.9: Cantidad de trabajadores accidentados según grado de lesión de accidentes eléctricos.....	58
Tabla 4.1: Valores típicos de la capacitancia para cables MP-GC ($\epsilon = 3,2$).....	84
Tabla 4.2: Valores típicos de la capacitancia para cables SHD-GC ($\epsilon = 3,2$).....	85
Tabla 4.3: Resumen Normas Estadounidense.....	92
Tabla 4.4: Resumen de Normas del departamento de Pensilvania.....	93
Tabla 4.5: Resumen de Normas Canadienses.....	93
Tabla 6.1: Resumen del análisis de las corrientes por el cuerpo.....	130

CAPÍTULO 1

Introducción

El concepto de proteger los equipos eléctricos de las minas y el personal mediante una puesta a tierra ha existido desde que la electricidad se introdujo en la minería. Ya en 1916, en los E.E.U.U., la Oficina de Minas recomendó conectar a tierra las carcasas como medio de prevención de descargas eléctricas para los mineros que trabajan en o alrededor del equipo eléctrico. Una conexión a tierra adecuada ha sido un problema difícil para la industria minera, a veces más compleja y desafiante que en otras industrias. Los peligros asociados con fallas a tierra son amplificadas por la naturaleza de los equipos móviles, con puestas a tierra que están interrelacionadas a otros equipos o sistemas. Una técnica recomendada para otorgar seguridad en el caso de equipos móviles de gran potencia, es la conexión de neutro a tierra a través de una resistencia.

En Chile la minería es la principal industria, generando grandes recursos y está en constante crecimiento. Por otro lado la seguridad tanto para equipos y personas debe cumplir la normativa, la cual es dinámica y cada vez más exigente. Las normativas nacionales no detallan técnicamente las puestas a tierra de la minería, por lo que las empresas mineras se acogen a normas internacionales.

Las normas internacionales de puestas a tierra en sistemas eléctricos mineros indican los criterios a seguir, límites a cumplir y equipos a utilizar. Sin embargo, en ciertas ocasiones no se comprende la razón de ellas y se desconoce el modo de llevarlas a cabo. Por tal motivo es que en esta memoria se estudiarán algunos aspectos de estas normas, con el propósito de entregar fundamentaciones, recomendaciones y propuestas a seguir. Tales aspectos son el acoplamiento entre puestas a tierra en una mina, el diseño apropiado de una resistencia de neutro a tierra, equipos de protección relacionados con estas resistencias, y condiciones de seguridad de los cables de arrastre.

1.1. Objetivos

Dentro del contexto descrito, esta memoria tiene dos objetivos principales:

- Estudiar las principales limitaciones técnicas de los sistemas eléctricos mineros.
- Entregar fundamentación y recomendaciones para dichas situaciones, las cuales pretenden ser factibles y de clara comprensión.

1.1.1. Objetivos específicos

Los objetivos específicos que se desea conseguir son:

- Describir los sistemas eléctricos de las minas.
- Presentar los conceptos principales de una puesta a tierra y las características particulares de los sistemas de puesta a tierra en minas.
- Determinar los factores que provocan acoplamiento entre puestas de tierra en minas, y cómo enfrentar dicho problema.
- Proponer un método aproximado de cálculo del valor óhmico de la resistencia de neutro a tierra en los sistemas de puesta a tierra por alta resistencia en minas.
- Establecer los equipos y consideraciones adicionales al sistema de protección eléctrica de una mina, en la técnica de conexión de neutro a tierra por resistencia.
- Analizar la seguridad de los cables de arrastre para sistemas eléctricos de la minería subterránea.

1.2. Estructura de la memoria

En el capítulo 2, se estudian los conceptos primordiales de toda puesta a tierra incluyendo los efectos de la electricidad en el cuerpo humano. También se analiza los sistemas eléctricos de la minería, en que se detalla su esquema típico, los equipos presentes y las formas de distribución eléctrica dentro de la mina. Luego se presentan datos estadísticos de accidentes en la minería, donde hay un especial enfoque en los accidentes de origen eléctrico.

En el capítulo 3, se indican las posibles causas del acoplamiento entre dos puestas a tierra en una mina, los problemas para eliminarlo y recomendaciones. Después se analiza la interconexión de dos mallas de tierra, mediante modelos aproximados.

En el capítulo 4, se propone un procedimiento para determinar el valor óhmico de la resistencia de neutro a tierra, considerando los efectos producidos por los cables de arrastre de la mina. Además se estiman las corrientes de falla y configuración de las protecciones de falla a tierra.

En el capítulo 5, se dan indicaciones especiales para los sistemas de protección de la minería, donde se mencionan las protecciones de falla a tierra, monitor de conductor de tierra y monitor de resistencia de neutro a tierra.

En el capítulo 6, se evalúa la seguridad de los cables de arrastre de minas subterráneas, para cables de distintas tensiones nominales.

El capítulo 7, corresponde a las conclusiones de los temas tratados y se presentan recomendaciones trabajos posibles a futuro.

CAPÍTULO 2

Antecedentes generales

2.1. Puesta a tierra

2.1.1. Objetivos de una puesta a tierra

Una puesta tierra puede tener múltiples objetivos ya que obedece a razones y situaciones diversas, por lo que puede tener un objetivo principal o un conjunto de ellos que determinarán el dimensionamiento y requisitos de ésta.

El suelo sufre variaciones de potencial debidas a la circulación de corrientes por el terreno, cuya procedencia viene de diversas fuentes: corrientes "naturales" de tierra de baja intensidad, corrientes procedentes de sistemas de tracción, de líneas de transporte de energía con fallas, de descargas atmosféricas. Estos cambios de potencial pueden alcanzar niveles peligrosos para las personas o pueden afectar equipos.

El objetivo de una puesta a tierra desde el enfoque de seguridad es limitar estas diferencias de potencial, de modo que no se alcancen niveles peligrosos tanto para el personal de explotación y mantenimiento, así como también para los usuarios y equipos de una instalación. El control de dichos voltajes normalmente se efectúa mediante conexiones conductivas de baja impedancia entre las diferentes partes metálicas de la instalación (bastidores, estructuras metálicas, cubiertas protectoras, pantallas de cables, etc.), y entre esas partes y el suelo sobre el que se encuentran.

Las componentes bajo tensión de un sistema eléctrico (equipos de poder, control, comunicaciones, etc.) presentan el peligro de quedar sometidos a diferencias de potencial con respecto a partes metálicas conectadas a tierra, lo que puede provocar una falla en la aislación del equipo; y por consiguiente las personas quedan en riesgo.

Desde el punto de vista del comportamiento y seguridad de un sistema eléctrico, la puesta a tierra debe cumplir diversas funciones, de las cuales algunas son prioritarias. Ejemplos de estas funciones son [34]:

- Asegurar valores de tensión adecuadamente bajos, de acuerdo a estándares, entre las fases sanas y tierra, durante fallas a tierra en los sistemas de potencia.
- Proporcionar una vía de baja impedancia para la operación rápida y eficaz de las protecciones (relés, fusibles, pararrayos, etc.) de las instalaciones o equipos.
- Conducir a tierra, en forma eficiente, las corrientes provenientes de descargas atmosféricas, limitando las diferencias de potencial que pudieran producirse en la instalación.
- Prevenir la presencia de voltajes peligrosos entre estructuras o cualquier elemento expuesto y el terreno, tanto durante fallas como en condiciones normales de operación.
- Evitar gradientes de potencial peligrosos sobre la superficie del suelo durante fallas del sistema o descargas atmosféricas, en un área determinada.
- Reducir los efectos de inducción de voltaje por parte de sistemas de transmisión o instalaciones eléctricas de potencia de baja tensión.
- Limitar a valores prescritos, la diafonía (trastorno causado por los campos eléctricos o magnéticos de una señal de telecomunicaciones que afectan a una señal en un circuito adyacente) y los ruidos inducidos en los circuitos de telecomunicaciones.
- Asegurar el empleo de la tierra como trayecto de retorno para sistemas eléctricos o electrónicos con retorno por tierra. Es el caso de instalaciones de tracción eléctrica, el neutro en instalaciones de distribución, circuitos de telefonía con onda portadora, protección catódica, y transmisión de energía en corriente continua.

2.1.2. Clasificación de puesta a tierra

Según la norma chilena de electricidad NCH4, en una instalación podrá existir una puesta a tierra de servicio y una puesta a tierra de protección [45]:

Se entenderá por tierra de servicio la puesta a tierra de un punto de la alimentación, en particular el neutro del empalme en caso de instalaciones conectadas en BT o el neutro del transformador que alimente la instalación en caso de empalmes en media o alta tensión, alimentados con transformadores monofásicos o trifásicos con su secundario conectado en estrella. Su finalidad es definir una referencia de voltaje para una correcta operación del sistema.

Se entenderá por tierra de protección a la puesta a tierra de toda pieza conductora que no forma parte del circuito activo, pero que en condiciones de falla puede quedar energizada. Su finalidad es proteger a las personas contra tensiones de contacto peligrosas.

2.1.3. Conducción de suelos

La conducción eléctrica a través de un material se define por su valor de conductividad o por su recíproco, la resistividad. La resistividad específica de un material es la resistencia al paso de una corriente continua entre las caras paralelas opuestas de una porción de material donde el largo y área de las caras es unitaria uniforme. En el sistema MKS, la resistividad queda expresada en $\Omega\cdot m$ [33].

En general los minerales presentes en los suelos (arenas, arcillas, rocas, etc.) son malos conductores de la electricidad. Sin embargo, cuando se les agrega agua, su resistividad disminuye considerablemente volviéndose conductores aceptables, aunque muy pobres en comparación con los conductores metálicos clásicos. Esta fuerte influencia de la humedad en la resistividad de los minerales se debe a que para la mayoría de ellos, la conducción eléctrica es mixta, dado que se forman enlaces covalentes y iónicos en este proceso, siendo estos últimos los más importantes. El proceso de conducción eléctrica en el terreno es mayoritariamente de carácter electroquímico, donde los portadores de las cargas eléctricas son los iones disueltos en el agua atrapada. En algunos minerales, la conducción es gracias a su contenido de metales, siendo los electrones los portadores principales de las cargas eléctricas [39].

Entonces la resistividad de un suelo depende principalmente de la cantidad de agua atrapada, de la resistividad de esta agua considerando la presencia de sales en ésta y de otras características particulares del suelo. Se consideran importantes para su resistividad, las siguientes propiedades del suelo:

- Sales solubles

- Tipo de suelo.
- Contenido de humedad.
- Composición química y concentración de las sales disueltas en el agua.
- Temperatura.
- Granulometría del material que lo conforma.
- Compactibilidad.

Cabe destacar que la cantidad de corriente transportada puede alcanzar valores importantes aún en un mal conductor, si el volumen que participa es considerable.

Cualquier corriente que circula por un medio de alta resistividad, produce en él una diferencia de potencial importante en el medio. Por lo tanto la circulación de corriente por el terreno podría producir un gradiente de potencial elevado y afectar las zonas adyacentes a éste, en particular sobre la superficie del suelo.

Realizar una clasificación rigurosa de los tipos de suelos es complejo debido a la gran variedad de minerales presentes en ellos. De este modo dos suelos que presentan una apariencia muy similar, pueden tener resistividades muy diferentes.

Clasificando a grandes rasgos los suelos, se puede considerar que gran parte de éstos están formados por distintas mezclas de arenas, arcillas y rocas. Dependiendo de la cantidad de agua contenida por los diferentes minerales y de las características de estas aguas, la resistividad del suelo puede variar dentro de rangos muy amplios. La Tabla 2.1 indica rangos de resistividad de algunos tipos de suelos.

Tipo de Terreno	ρ (Ω-m)
Terrenos vegetales húmedos	10 a 50
Arcillas, Gredas, limos	20 a 60
Arenas arcillosas	80 a 120
Fangos, turbas	150 a 300
Arenas	250 a 500
Suelos pedregosos	300 a 400
Rocas	1000 a 10000
Concreto húmedo	100 a 240
Concreto seco	10000 a 50000

Tabla 2.1: Resistividad de distintos tipos de suelos

Es necesario tener presente que esta clasificación es un tanto arbitraria y que los valores indicados están fuertemente influidos por las características geológicas del lugar de donde proceden.

La resistividad del terreno es determinante en el diseño de una puesta a tierra y la única forma de conocerla con exactitud es mediante medidas directas de campo. La resistividad del terreno varía tanto en la superficie como en el nivel de profundidad. En general la variación de resistividad en la superficie es reducida comparada con las dimensiones normales de una puesta a tierra y puede por lo tanto ser despreciada.

Un terreno en la práctica puede ser razonablemente representado por un modelo de estratos paralelos a la superficie del suelo, donde cada uno de ellos tiene un espesor y un valor constante de resistividad. Los métodos para determinar la resistividad y el número de estratos comúnmente usados son el sondeo vertical y la configuración de Schlumberger [33].

2.1.4. Efectos de la corriente por el cuerpo humano

La circulación de corriente eléctrica por el cuerpo humano puede provocar diversos efectos desde lesiones físicas hasta el fallecimiento por fibrilación ventricular. Entre los efectos que produce la corriente eléctrica se distinguen:

- **Asfixia:** si el centro nervioso que regula la respiración se ve afectado por la corriente, puede producir un paro respiratorio.
- **Tetanización:** movimiento incontrolado de los músculos debido a la acción de la corriente eléctrica, donde normalmente se pierde el control de brazos y piernas.
- **Fibrilación ventricular:** arritmia cardíaca que puede ocasionar el fallecimiento de la persona.

Los efectos de la corriente eléctrica sobre el cuerpo humano dependen principalmente de los siguientes factores [46]:

- Intensidad de la corriente eléctrica.
- Tiempo de contacto o de paso de la corriente.
- Tensión o diferencia de potencial.
- Frecuencia (Hz) de la corriente.

- Trayectoria o recorrido de la corriente a través del cuerpo.

A continuación se detallará cada factor indicando de qué modo participa en los efectos fisiológicos del paso de la corriente eléctrica.

2.1.4.1. Influencia de la intensidad de la corriente eléctrica

Si R_C es la resistencia del cuerpo humano, la intensidad de corriente que circula para una diferencia de potencial V , según la ley de Ohm es: $I = V/R_C$. Los efectos fisiológicos producidos sobre una persona adulta, con un peso mínimo de 50 kg, donde los puntos de entrada y salida del flujo de corriente corresponden a dos extremidades, para una frecuencia de 50/60 Hz, se indican en la Tabla 2.2.

Intensidad (mA)	Efectos fisiológicos
0,4 - 1,2	Umbral de percepción: detección de leve sensación de cosquilleo.
1,2 - 6	Corrientes de reacción: sensibles pero inhabilitan el control muscular.
6 - 9	Umbral de contracciones musculares involuntarias y calambres.
9 - 25	Incapacidad para desligarse; dificultad para respirar; aumento de la presión arterial; contracciones musculares violentas.
26 - 50	Paralización de la respiración; fuerte tetanización; quemaduras.
51 - 100	Umbral de fibrilación ventricular y arritmias cardíacas.
sobre 100	Cesa circulación sanguínea; hidrólisis de la sangre.
1000	Fibrilación y paro cardíaco; quemaduras muy graves. Alto riesgo de muerte.

Tabla 2.2: Efectos fisiológicos del paso de corriente eléctrica por el cuerpo humano

La norma IEC-60479/2005 describe los efectos de la corriente eléctrica que pasa por el cuerpo humano para corrientes alternas de frecuencia comprendida entre 15 Hz y 100 Hz y establece cuatro zonas delimitadas por las curvas que aparecen en la Figura 2.1.

a) Umbral de percepción

Se define como el valor mínimo de la intensidad de corriente que provoca una sensación en una persona. Esta sensación es percibida en corriente alterna en todo momento, mientras que en continua, la percepción se tiene sólo cuando varía la intensidad. La norma IEC-60479/2005 considera un umbral de percepción de 0,5 mA en corriente alterna y 2 mA en corriente continua. Considerando intensidades y tiempo de contacto iguales, la corriente continua tiene menores efectos que la alterna.

b) Umbral de reacción

Valor mínimo de la corriente que provoca una contracción muscular.

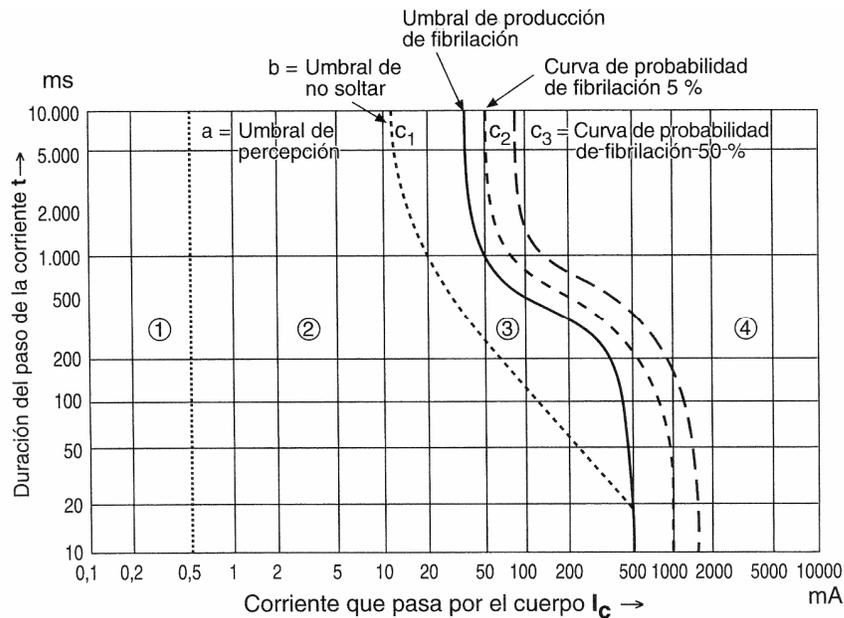


Figura 2.1: Curvas de seguridad (I vs t) con trayectoria mano izquierda-pies

c) Umbral de no soltar

Valor máximo de la corriente que permite a una persona mantener control muscular y soltar unos electrodos. Este umbral depende del tiempo de exposición. En corriente alterna este umbral es 10 mA independiente del tiempo de exposición y en corriente continua es 25 mA. El efecto térmico provocado por la corriente está presente durante todo el periodo de exposición.

d) Umbral de fibrilación ventricular

Menor valor de la corriente que puede ocasionar la fibrilación ventricular, causa principal de la muerte por choque eléctrico. En la Figura 2.1 se muestra para corriente alterna este umbral y la influencia sobre el mismo del tiempo de exposición. Cabe destacar que el umbral de fibrilación para corriente continua es notablemente mayor que para corriente alterna.

2.1.4.2. Influencia del tiempo de contacto

El tiempo o duración del contacto eléctrico es junto con la intensidad uno de los factores de mayor influencia en el tipo y magnitud de las lesiones que puede producir la electricidad.

En la Figura 2.1 se distinguen un conjunto de curvas que definen cuatro zonas de riesgo de la corriente eléctrica en función de la intensidad y el tiempo de exposición. En dicha Figura se

aprecia la importancia del tiempo de exposición. Por ejemplo los efectos del paso de una corriente de 200 mA por 50 ms son los mismos que los de una corriente de 20 mA durante 1 s.

2.1.4.3. Influencia de la tensión e impedancia del cuerpo humano

Según la ley de Ohm, la intensidad de la corriente es proporcional a la tensión, pero también lo es en forma inversa a la impedancia o resistencia del cuerpo humano. Esta última depende de diversos factores, estos son:

- Tensión de contacto.
- Condiciones de contacto: presión y área de contacto.
- Condiciones fisiológicas y estado, dureza y espesor de la piel.
- Recorrido de la corriente por el organismo y estado fisiológico del mismo.

Los tejidos de la piel pueden compararse con un dieléctrico formado por la dermis y epidermis, formando un sistema capacitivo similar a un condensador.

La impedancia del cuerpo humano está muy influenciada por las condiciones de humedad de la piel, como también la superficie de contacto con el electrodo o parte activa bajo tensión. El área de contacto tiene una notable influencia, ya que por ejemplo un contacto puntual de unos 100 mm² (dedo), presenta una impedancia del orden de 50 veces menor que para un contacto de unos 8.000 mm² (correspondiente a la superficie de toda una mano).

2.1.4.4. Influencia de la frecuencia

La frecuencia del suministro eléctrico en Chile y Europa es de 50 Hz, y en otras zonas geográficas como USA y Japónes de 60 Hz. Aunque la mayoría de las aplicaciones de la electricidad emplean estos valores de la frecuencia, existen otros usos que utilizan otras frecuencias, tales como: electrónica militar y aeronáutica (400 Hz), electrosoldadura (450 Hz), y electroterapia (4000 Hz).

En la impedancia del cuerpo humano participa la tensión de contacto y la frecuencia. La impedancia tiende a disminuir si aumenta la frecuencia, hecho que puede explicarse según el siguiente modelo de IEC-60479/2005.

La impedancia total que presenta el cuerpo humano al paso de la corriente se compone de tres impedancias en serie, según se muestra en la Figura 2.1:

- Impedancia de la piel correspondiente al punto de entrada de la corriente.
- Impedancia interna del propio cuerpo.
- Impedancia de la piel correspondiente al punto de salida de la corriente.

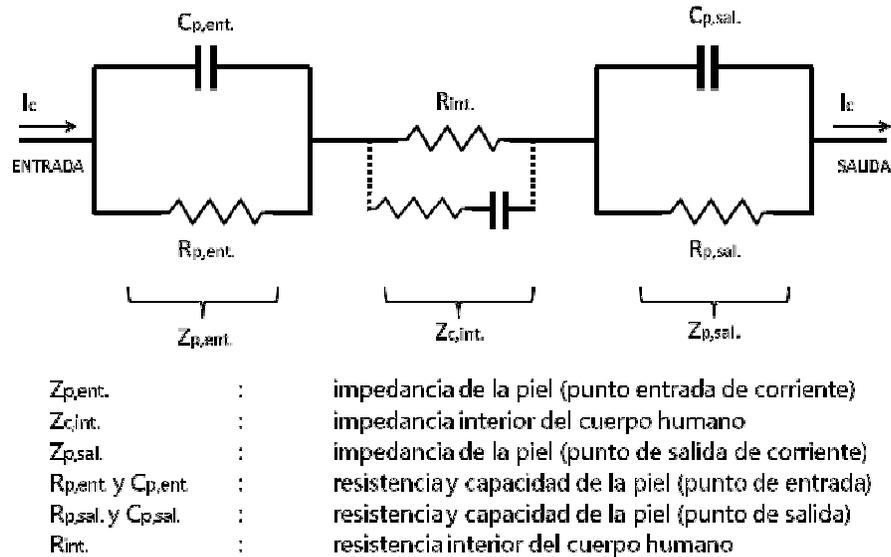


Figura 2.2: Modelo de la Impedancia del cuerpo humano

Las impedancias de los puntos de entrada y salida del cuerpo humano (piel) se componen de una parte resistiva y otra capacitiva, mientras que la impedancia interna del cuerpo humano es prácticamente resistiva que depende de la trayectoria de corriente y del punto de contacto, en que su mínimo valor puede considerarse de 500 Ω [34]. Debido a la causa expuesta, la impedancia de la piel está fuertemente influida por el estado de la misma, la que más contribuye a la impedancia total del cuerpo humano. El carácter resistivo es debido a los poros de la piel, mientras que el capacitivo a la membrana semiconductor. La impedancia total de la piel viene dada por la impedancia equivalente de un circuito paralelo R-C, según la expresión (2.1):

$$Z = \frac{R}{\sqrt{1 + (R \cdot C \cdot \omega)^2}} \quad (2.1)$$

Donde R y C son la resistencia y capacidad de la piel ($\omega = 2 \pi$ frecuencia) respectivamente.

En consecuencia, tal como puede deducirse de la expresión (2.1) la impedancia de la piel disminuye con la frecuencia (f), de tal forma que para altas frecuencias, prácticamente es despreciable, quedando como impedancia total del cuerpo, únicamente la interna del mismo (alrededor de unos 500 Ω).

El riesgo de fibrilación es menor para frecuencias muy altas ya que a partir de unos 100 kHz los efectos peliculares son apreciables. Para estas frecuencias no se conocen umbrales de no soltar ni de fibrilación cardíaca y sólo se aprecian efectos térmicos (quemaduras) si la tensión de contacto es lo suficientemente elevada como para que pase una intensidad importante por el individuo.

2.1.4.5. Influencia del recorrido de la corriente

La gravedad de un accidente depende de la trayectoria recorrida por la corriente eléctrica a través del cuerpo humano. Generalmente, el recorrido de la corriente sigue la trayectoria que presenta menor impedancia. Los trayectos en que se ven involucrados órganos vitales (cerebro, corazón, pulmones, etc.) presentan un mayor riesgo, por lo que los efectos de los recorridos que pasan por la cabeza y el tronco son potencialmente los de mayor gravedad.

Otros factores que pueden agravar los efectos de la corriente corresponden al sexo, a la edad o bien al estado del organismo (cansancio, miedo, ingesta de alcohol, etc.)

En la Figura 2.3 se indican los porcentajes del valor de la impedancia entre una mano y diferentes partes del cuerpo (Figura 2.3a), y entre dos manos y distintas partes del cuerpo (Figura 2.3b) respecto a la impedancia correspondiente a la trayectoria mano-mano. Por ejemplo una trayectoria mano-cabeza con un índice 30, tendrá una impedancia de tan sólo un 30% de la impedancia que corresponde a una trayectoria mano-mano.

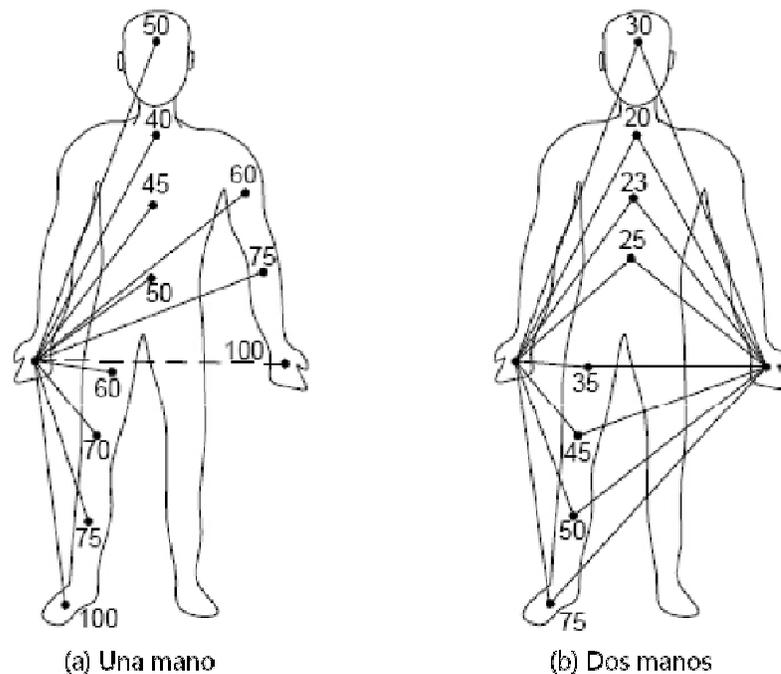


Figura 2.3: Valores porcentuales relativos de la impedancia del cuerpo humano para diferentes trayectorias

Las curvas que indican los efectos sobre el organismo de la intensidad de corriente y el tiempo de contacto y que se muestran en la Figura 2.1 están trazadas para el recorrido "mano izquierda - dos pies". Si la trayectoria es diferente, la intensidad (I_{eq}) que produce un riesgo equivalente se determina a través de un factor F, llamado factor de corriente de corazón, que incorpora la variabilidad de la impedancia del cuerpo según el recorrido de la corriente. Para el cálculo de la intensidad equivalente se usa la siguiente expresión:

$$I_{eq} = \frac{I_{ref}}{F} \quad (2.2)$$

Donde:

- I_{ref} : intensidad correspondiente al trayecto mano izquierda - dos pies.
- F: factor de corriente de corazón (ver Tabla 2.3).

Trayectoria de la corriente (entra-salida)		Factor de corriente de corazón (F)
Mano izquierda - pecho		1,5
Mano derecha - pecho		1,3
Mano izquierda - pie derecho	Mano izquierda - dos pies	1
Mano izquierda - pie izquierdo	Dos manos - dos pies	
Mano derecha - pie izquierdo	Mano derecha - dos pies	0,8
Mano derecha - pie derecho		
Mano izquierda - nalgas	Mano izquierda - espalda	0,7
Mano derecha - nalgas	Dos manos - nalgas	
Mano - mano		0,4
Mano derecha - espalda		0,3

Tabla 2.3: Factor de corriente de corazón para distintas trayectorias

2.1.5. Diferencias de potencial en puesta a tierra

En condiciones normales, el electrodo de puesta a tierra de una instalación eléctrica se encuentra al mismo potencial del terreno y ambos igualan el potencial de la tierra remota. Durante una falla, la porción de corriente de falla que fluye por el electrodo desde o hacia el terreno, establece un potencial para éste y una distribución de potencial en el terreno, en

particular sobre la superficie. Esta elevación de potencial es proporcional a la magnitud de la corriente disipada a tierra y a la resistencia del electrodo de puesta a tierra.

En la figura 2.4 se tiene un equipo S que presenta una falla tal que hay contacto eléctrico entre una fase y tierra, produciéndose una circulación de corriente I_E hacia la malla de puesta a tierra SCT, sobre la que se ubican tres personas en distintas posiciones.

Cuatro situaciones básicas implican riesgo para una persona durante una falla. Cada una de estas situaciones define un voltaje aplicado al individuo, según su acción y ubicación relativa a la disposición de los conductores de la puesta a tierra:

a) Voltaje de paso (Step Voltage)

La persona 1 de la Figura 2.4 soportará una diferencia de potencial V_p entre sus dos pies, debido a que cada pie está en contacto con puntos a diferentes potenciales en la superficie del terreno.

b) Voltaje de contacto (Touch Voltage)

La persona 2 de la Figura 2.4 soportará una diferencia de potencial V_c entre la mano o parte del cuerpo que toca el equipo y sus pies, debido a que el equipo está a diferente potencial del punto de contacto de los pies con el terreno.

c) Voltaje transferido (Transferred voltage)

Esta es una forma particular del voltaje de contacto, agravado por el hecho de que la persona está en un punto distante del SCT (Sistema de Conexión a Tierra), y no en sus inmediaciones como en los casos anteriores. La diferencia de potencial a que está sometida la persona 3 de la Figura 2.4 es mayor que la de los casos anteriores. En el caso extremo de una persona ubicada en un punto remoto, la diferencia de potencial a la cual estará sometida será la denominada Elevación del Potencial de Tierra (EPT), conocida por sus siglas en idioma inglés GPR (*Ground Potential Rise*). El potencial EPT de un SCT es el potencial que adquiere respecto a un punto remoto, cuando circula por él una corriente de determinado valor hacia el terreno.

d) Voltaje de retículo (Mesh voltage)

Corresponde a la situación extrema de voltaje de contacto dentro del perímetro de la malla y recibe tal denominación por el hecho de encontrarse habitualmente cerca del centro de un retículo de la malla de puesta a tierra.

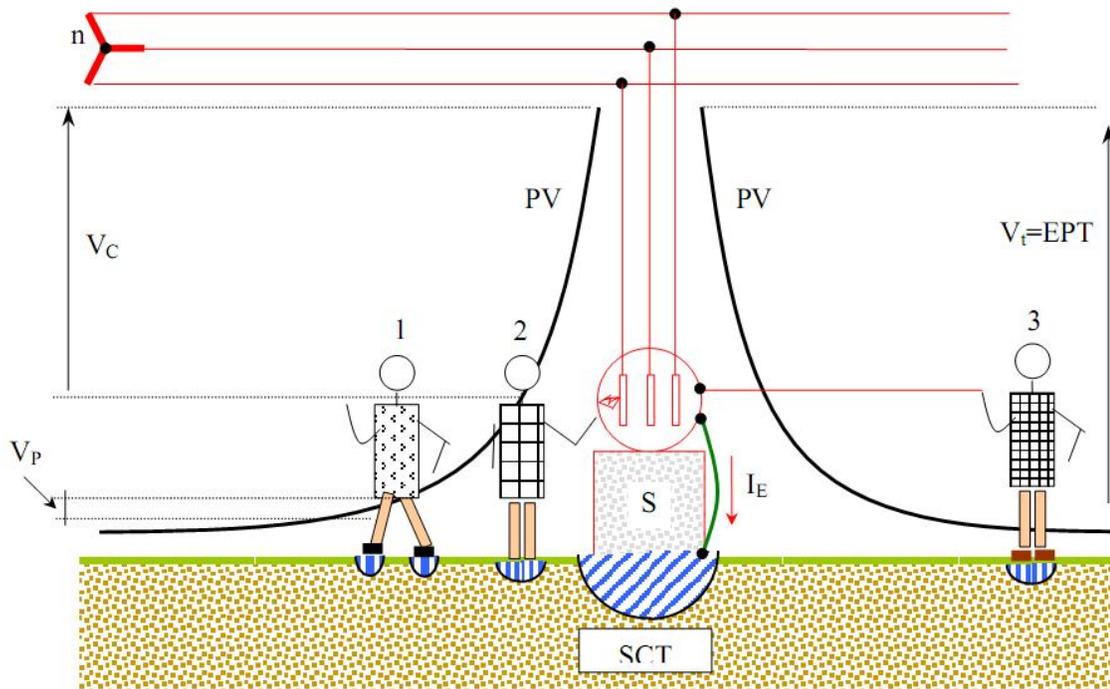


Figura 2.4: Voltaje de paso, de contacto y transferido: V_p , V_c , V_t respectivamente

Corresponde a un caso especial de voltaje de contacto, con el riesgo de que la persona quede sometida prácticamente al potencial máximo que adquiere la malla con respecto a la tierra remota, si existe conexión eléctrica entre la malla y el conductor.

Es importante evitar la conexión eléctrica de una malla de tierra con cualquier conductor que se extienda fuera del perímetro de la malla o bien evitar que una persona en un lugar remoto haga contacto directo con este conductor; no obstante, potenciales de menor magnitud pueden transferirse por elementos conductores como cañerías de agua, vías férreas u otros que pasen cerca de la malla. Deberán usarse uniones o recubrimientos aislantes en este segundo caso.

En atención al comportamiento del cuerpo humano frente al paso de corriente y a los efectos que ésta produce, todo proyecto de puesta a tierra debe incluir un estudio de la magnitud de los voltajes de paso, contacto y eventualmente transferidos fuera de la instalación.

2.1.5.1. Voltajes de seguridad para las personas

El Estándar N° 80 de IEEE [23] define en función de la resistencia del cuerpo humano y la máxima corriente tolerable, la máxima diferencia de potencial a que puede ser sometido el cuerpo humano, en base a los posibles puntos de contacto.

Diversas publicaciones relacionadas, sugieren valores típicos entre 500 Ω y 3000 Ω para la impedancia total del cuerpo humano entre extremidades. Un valor de 1000 Ω es recomendado por la Estándar N° 80 del IEEE en su última versión. Normalmente se asume este último valor, a pesar de que el reglamento chileno sobre instalaciones en baja tensión considera 2000 Ω [23].

El mecanismo de muerte por descarga eléctrica más común es la fibrilación ventricular que consiste en la contracción desfasada de las fibras musculares que forman los ventrículos, lo cual impide al corazón expulsar la sangre. Los efectos de corrientes inferiores no son permanentes y desaparecen al interrumpirse ésta, o en los casos de mayor gravedad, los individuos responden a las técnicas de respiración artificial o resucitación.

Dalziel estableció mediante experimentos realizados en animales de peso comparable al del hombre, por tiempos entre 0,03 y 3 segundos de duración, que el valor efectivo de la máxima corriente tolerable que no produce fibrilación ventricular, es función de la energía absorbida por el cuerpo y responde a la ecuación:

$$I_h = \frac{K}{\sqrt{t}} \quad (2.3)$$

Donde K es una constante empírica relacionada con la energía absorbida en la descarga por el X% de una población. En experimentos a frecuencia industrial, se determinó que para X = 99,5%, la constante K valía 0,116 para individuos de 50 kg y 0,157 para individuos de 70 kg. El valor de t corresponde al tiempo de exposición en la descarga.

Ocupando la máxima corriente tolerable para un individuo de 50 kg y sustituyendo en las expresiones de voltaje, se obtiene respectivamente los siguientes límites [31]:

Máximo voltaje de paso permisible:

$$V_p = \frac{116 + 0,696 \cdot c_s \cdot \rho_s}{\sqrt{t}} \quad (2.4)$$

Máximo voltaje de contacto permisible:

$$V_c = \frac{116 + 0,174 \cdot c_s \cdot \rho_s}{\sqrt{t}} \quad (2.5)$$

En donde:

- ρ_s (Ω -m) : resistividad de la capa superficial.
- t (s) : tiempo global de exposición.

- c_s : factor de corrección debido a la presencia de la capa resistiva superficial.

$$c_s = 1 - \frac{0,09 \cdot (1 - \rho/\rho_s)}{2 \cdot h_s + 0,09} \quad (2.6)$$

Donde h_s (m) corresponde al grosor de la capa resistiva superficial.

2.2. Antecedentes generales de la minería

La minería corresponde a la obtención selectiva de minerales y otros materiales (salvo materiales orgánicos de formación reciente) a partir de la corteza terrestre. Actualmente todos los materiales empleados por la sociedad han sido obtenidos mediante minería, o necesitan productos mineros para su fabricación.

La minería tiene como fin obtener minerales o combustibles. Un mineral se define como una sustancia de origen natural con una composición química definida y presenta propiedades predecibles y constantes. Los combustibles más importantes son los hidrocarburos sólidos, que, por lo general, no se definen como minerales. Un recurso mineral es un volumen de la corteza terrestre que presenta una concentración anormalmente elevada de un mineral o combustible determinado. Se convierte en una reserva si dicho mineral si este se puede recuperar mediante la tecnología del momento con un coste que permita una rentabilidad razonable de la inversión en la mina. Generalmente, se dice que una mina es explotable cuando la inversión para la explotación es inferior al beneficio obtenido por la comercialización del mineral.

Hay gran variedad de materiales que se pueden obtener de dichos yacimientos. Pueden clasificarse en 4 tipos:

Metales: incluyen los metales preciosos (el oro, la plata y los metales del grupo del platino), los metales siderúrgicos (hierro, níquel, cobalto, titanio, vanadio y cromo), los metales básicos (cobre, plomo, estaño y cinc), los metales ligeros (magnesio y aluminio), los metales nucleares (uranio, radio y torio) y los metales especiales, como el litio, el germanio, el galio o el arsénico.

Minerales industriales: incluyen los de potasio y azufre, el cuarzo, la trona, la sal común, el amianto, el talco, el feldespato y los fosfatos.

Materiales de construcción: incluyen la arena, la grava, los áridos, las arcillas para ladrillos, la caliza y los esquistos para la fabricación de cemento. En este grupo también se incluyen la pizarra para tejados y las piedras pulidas, como el granito, el travertino o el mármol.

Gemas: incluyen los diamantes, los rubíes, los zafiros y las esmeraldas.

Combustibles: incluyen el carbón, el lignito, la turba, el petróleo y el gas (aunque generalmente estos últimos no se consideran productos mineros). El uranio se incluye con frecuencia entre los combustibles.

2.2.1. Técnicas de explotación

2.2.1.1. Explotación minera superficial

La minería de superficie es el sector más amplio de la minería, y se utiliza para más del 60% de los materiales extraídos. Puede emplearse para cualquier material. Los distintos tipos de mina de superficie tienen diferentes nombres, y, por lo general, suelen estar asociados a determinados materiales extraídos. Las minas a rajo abierto suelen ser de metales; en las explotaciones al descubierto se suele extraer carbón; las canteras suelen dedicarse a la extracción de materiales industriales y de construcción, y en las minas de placer se suelen obtener minerales y metales pesados (con frecuencia oro, pero también platino, estaño y otros).

En minería de superficie las máquinas generalmente utilizadas son: Dumper, pala excavadora, cargadora, bulldozer, Excavadora de rueda o cadena de cangilones, dragalina, transportadores de cinta, Perforadoras para agujeros de dinamitado, y apiladoras radiales. Las imágenes de estas máquinas se pueden ver en el Anexo D.

Existen cuatro tipos de minas de superficie: mina de rajo abierto, mina de superficie, cantera, y mina de placer.

a) Mina de rajo abierto

Son minas de superficie que adoptan la forma de grandes fosas en terraza, cada vez más profundas y anchas. A menudo tienen una forma más o menos circular. En la Figura 2.5 muestra un ejemplo de mina de rajo abierto.

La extracción empieza con la perforación y voladura de la roca. Ésta se carga en camiones con grandes palas eléctricas o hidráulicas, o con excavadoras de carga frontal, y se retira del foso. Un avance de la minería moderna consiste en que las palas descarguen directamente en una trituradora móvil, desde la que se saca de la mina la roca triturada en cintas transportadoras.

El material clasificado como mineral se transporta a la planta de recuperación, mientras que el clasificado como desecho se vierte en zonas asignadas para ello. A veces existe una tercera categoría de material de baja calidad que puede almacenarse por si en el futuro pudiera ser rentable su aprovechamiento.

Muchas minas empiezan como minas de superficie y, cuando llegan a un punto en que es necesario extraer demasiado material de desecho por cada tonelada de mineral obtenida, se empiezan a utilizar métodos de minería subterránea.



Figura 2.5: Mina de rajo abierto

b) Mina de superficie

Las explotaciones de superficie se emplean con frecuencia para extraer carbón y lignito. La principal diferencia entre estas minas y las de rajo abierto es que el material de desecho extraído para descubrir la veta de carbón, en lugar de transportarse a zonas de vertido lejanas, se vuelve a dejar en la cavidad creada por la explotación reciente. Por tanto, las minas van avanzando poco a poco, rellenando el terreno y devolviendo a la superficie en la medida de lo posible el aspecto que tenía antes de comenzar la extracción. Al contrario que una mina de rajo abierto, que suele hacerse cada vez más grande, una explotación de superficie alcanza su tamaño máximo en muy poco tiempo. Cuando se completa la explotación, el foso que queda se puede convertir en un lago o rellenarse con el material procedente de la excavación realizada al comenzar la mina.

El equipo empleado en las explotaciones de superficie es el mismo que el de las minas a cielo abierto. En la Figura 2.6 se muestra una mina de superficie.



Figura 2.6: Mina de superficie

c) Cantera

La cantera es bastante similar a la minería de rajo abierto, y el equipo empleado es el mismo. La diferencia es que los materiales extraídos suelen ser minerales industriales y materiales de construcción. En general, casi todo el material que se obtiene de la cantera se transforma en algún producto, por lo que hay bastante menos material de desecho. A su vez, esto significa que al final de la vida útil de la cantera queda una gran excavación. Debido a los bajos precios que suelen tener los productos de la mayoría de las canteras, éstas tienen que estar situadas relativamente cerca de los mercados. Si no fuera así, los gastos de transporte podrían hacer que la cantera no fuera rentable. . En la Figura 2.7 se muestra una cantera.



Figura 2.7: Cantera

d) Mina de placer

La minería de placer implica la excavación de depósitos de aluvión poco compactos, como arena, grava, limo o arcilla. Los minerales valiosos se separan de los materiales de aluvión mediante un sistema de cribas y lavaderos. Entre los minerales de placer figuran metales como el oro, el platino o el estaño y gemas como diamantes y rubíes. . En la Figura 2.8 se muestra una mina de placer



Figura 2.8: Mina de placer

2.2.1.2. Explotación minera subterránea

Las minas subterráneas se abren en zonas con yacimientos minerales que sean rentables. El pozo es la perforación vertical principal y se emplea para el acceso de las personas a la mina y para sacar el mineral. Un sistema de ventilación situado cerca del pozo principal lleva aire fresco a los mineros y evita la acumulación de gases peligrosos. Un sistema de galerías transversales conecta el yacimiento de mineral con el pozo principal a varios niveles, que a su vez están conectados por aberturas llamadas alzamientos. Las gradas son las cámaras donde se extrae el mineral. En la Figura 2.9 se muestra un esquema de una mina subterránea.

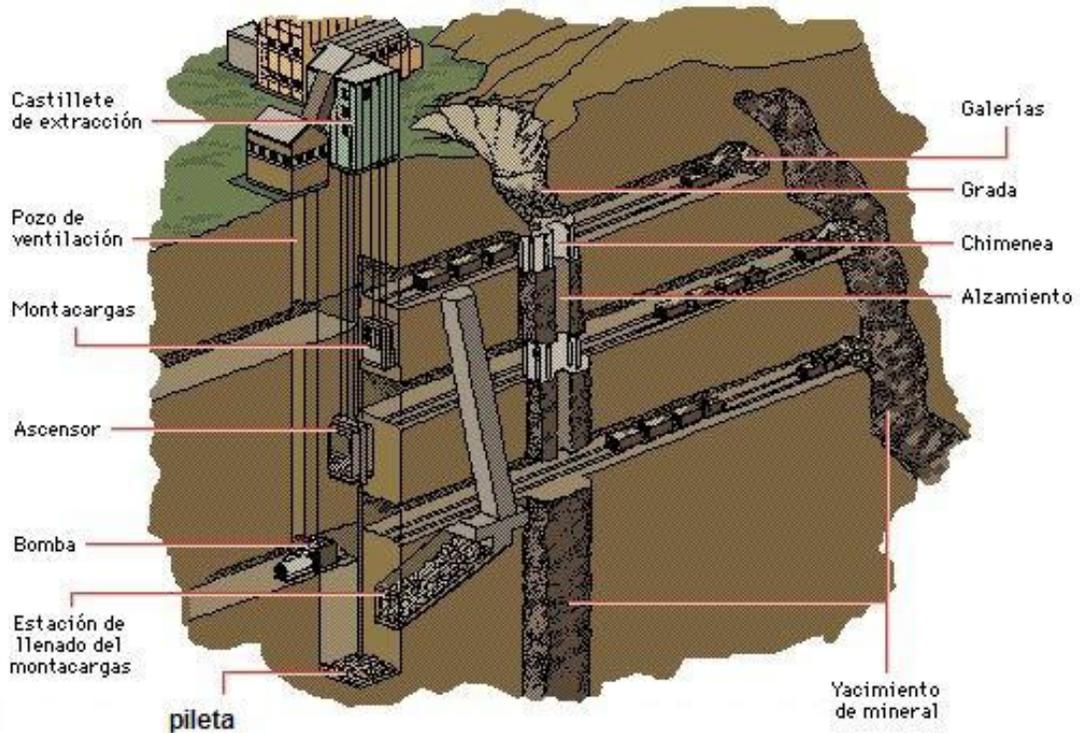


Figura 2.9: Esquema de mina subterránea

La minería subterránea es la más peligrosa, en todas las galerías subterráneas los mineros se enfrentan a los mismos peligros: posible acumulación de gases peligrosos o polvo de carbón explosivo y riesgo de derrumbe del techo. Para reducir el peligro se emplean buenos sistemas de ventilación, se espolvorea la roca con caliza y se entiban las galerías con acero. A pesar de estas precauciones se prefiere emplear alguno de los métodos superficiales siempre que resulte posible. Además, la explotación subterránea de un yacimiento exige una mayor complejidad técnica, aunque las instalaciones para la extracción varían notablemente según las características de la estructura del propio yacimiento, del tamaño de la unidad de producción y del coste de la inversión.

Las máquinas utilizadas en la minería subterránea son: rozadora, cargadora, cucharón, perforadora, plataforma elevadora, rafadora continua, y cinta transportadora subterránea. Las imágenes de estas máquinas se pueden ver en el Anexo D

La minería subterránea se puede subdividir en minería de roca blanda y minería de roca dura. Los ingenieros de minas hablan de roca blanda cuando no exige el empleo de explosivos en el proceso de extracción. En otras palabras, las rocas blandas pueden cortarse con las herramientas que proporciona la tecnología moderna. La roca blanda más común es el carbón, pero también lo son la sal común, la potasa, la bauxita y otros minerales. La minería de roca dura son los metales y minerales que requieran de explosivos como método de extracción.

a) Minería subterránea de roca dura

En la mayoría de las minas de roca dura, la extracción se realiza mediante perforación y voladura. Primero se realizan agujeros con perforadoras de aire comprimido o hidráulicas. A continuación se insertan barrenos en los agujeros y se hacen explotar, con lo que la roca se fractura y puede ser extraída. Después se emplean máquinas de carga especiales muchas veces con motores diesel y neumáticos para cargar la roca volada y transportarla hasta galerías especiales de gran inclinación. La roca cae por esas galerías y se recoge en el pozo de acceso, donde se carga en contenedores especiales denominados cucharones y se saca de la mina. Más tarde se transporta a la planta de procesado, si es mineral, o al vertedero, si es material de desecho. Para poder acceder al yacimiento de mineral hay que excavar una red de galerías de acceso, que se suele extender por la roca de desecho que rodea el yacimiento. En la Figura 2.10 se muestra una mina subterránea de roca dura.



Figura 2.10: Mina subterránea de roca dura

b) Minería subterránea de roca blanda

Se refiere a un grupo de técnicas de la explotación minera subterránea usadas para extraer minerales o materiales geológicos de rocas sedimentarias. Debido a que los depósitos en rocas sedimentarias se acodan y son relativamente de menor dureza, los métodos utilizados son diferentes a minas con depósitos ígneos o rocas metamórficas (rocas duras), los cuales son cuatro. Existen de cuatro tipos distintos: minería de cámaras y pilares, minería Longwall, mediante explosiones, y shortwall.

i) Minería de cámaras y pilares

La minería de cámaras y pilares se excava el yacimiento lo más completamente posible, dejando secciones de mineral como pilares para sostener el techo. Las dimensiones de las cámaras y los pilares dependen de la estabilidad del techo y el mineral mismo. La explotación tiene como objetivo extraer el mineral lo más completamente posible sin poner en peligro las condiciones de trabajo.

Los pilares son después minados cuando la mina o una parte de la mina es cerrada. El techo se hunde después de que los pilares del cuarto son minados. Este método de minería es común en minas carboneras. En la Figura 2.11 se muestra una mina de cámaras y pilares.

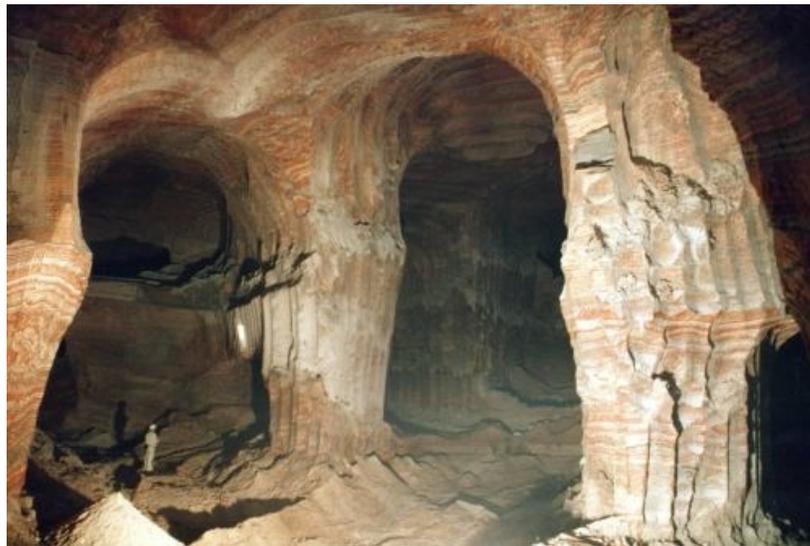


Figura 2.11: Mina de cámaras y pilares

ii) Minería Longwall o de tajos largos

Es una técnica altamente productiva la minería subterránea del carbón. Las máquinas de la minería Longwall consisten en esquiladores múltiples montados sobre una serie de soportes para su techo hidráulico. Estas máquinas mineras tienen dimensiones aproximadas de 240 metros de ancho y de 1,5 a 3 metros de altura, con las se obtienen bloques rectangulares de carbón del ancho de la maquinaria. Como la máquina avanza a lo largo de un panel, el techo hidráulico evita el colapso de la mina.

La minería Longwall fue introducida por primera vez en los años 1950 y 1960. Hoy en día, representa más de la mitad de toda la producción de carbón en los Estados Unidos. En un día normal un sistema Longwall típico es capaz de extraer entre 10.000 y 30.000 toneladas. Cabe considerar que la desventaja principal es el alto valor de inversión inicial.

La minería de tajos largos sustituye a la "método de cámaras y pilares", según el cual el carbón se extrae manualmente y los pilares sostienen el techo para que los mineros puedan

trabajar con seguridad. En las regiones mineras con grandes longitudes el método de la cámaras y pilares se vuelve menos rentable que el sistema de tajos largos, ya que el tamaño de los pilares necesarios para sostener el techo son mucho más grandes por lo que significa que el carbón no se puede extraer de ellos. En la Figura 2.12 se muestra una mina Longwall.



Figura 2.12: Mina Longwall

iii) Minería mediante explosiones

Método que utiliza los explosivos de dinamita romper para la veta del carbón, después de lo cual el carbón se recolecta y se carga para el retiro a un área central del cargamento. Este tipo de explotación minera es menor al 5% de la producción subterránea total en E.E.U.U.

iv) Minería Shortwall

Un método carbonífero que corresponde a menos del 1% de la producción del carbón de E.E.U.U. La minería Shortwall emplea máquinas de explotación minera continua similares a las de la minería Longwall.

2.2.1.3. Explotación minera por dragado

El dragado es un tipo de explotación minera que opera en aguas poco profundas, que se considera el método más económico de extracción de minerales. Por aguas poco profundas se entienden aguas con un máximo de profundidad de 65 m. En esas condiciones se pueden recuperar sedimentos poco compactos empleando dragas con cabezales de corte situados en el extremo de los tubos de succión, o con una cadena de cangilones de excavación que gira alrededor de un brazo. En la Figura 2.13 se muestra una explotación minera por dragado.

La minería oceánica es un método reciente. En la actualidad se realiza en las plataformas continentales, en aguas relativamente poco profundas. Entre sus actividades están la extracción de áridos, diamantes (frente a las costas de Namibia y Australia) y de oro (en diversas partes del mundo).

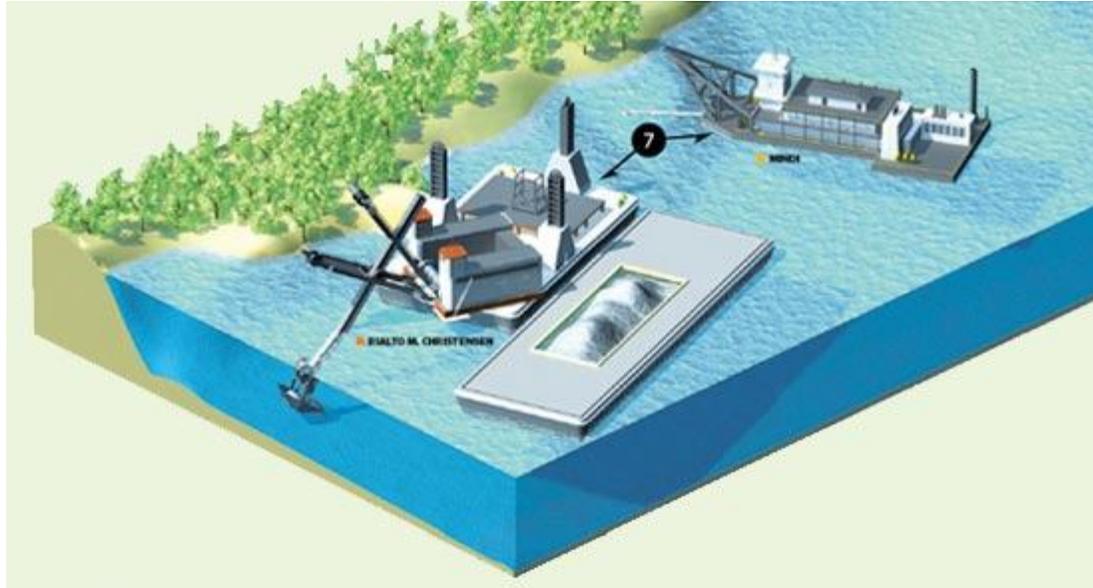


Figura 2.13: Minería por dragado

2.2.1.4. Explotación minera por pozos de perforación

Numerosos materiales pueden extraerse del subsuelo a través de un pozo de perforación sin necesidad de excavar galerías ni túneles. Así ocurre con los materiales líquidos como el petróleo y el agua. También se pueden recuperar materiales solubles en agua haciendo pasar agua por ellos a través del pozo de perforación y extrayendo la disolución. Este sistema se denomina extracción por disolución. También se puede emplear un disolvente que no sea agua para disolver algún mineral determinado; en ese caso suele hablarse de lixiviación in situ. En la actualidad también existen métodos para recuperar materiales insolubles a través de pozos de perforación. Estos materiales son algunos sólidos, como el carbón, que son lo suficientemente blandos o están lo suficientemente fracturados para poder ser cortados por un chorro de agua a presión. Si se rompen en trozos pequeños, éstos pueden bombearse a la superficie en forma de lodo a través de un pozo de perforación.

2.2.1.5. Minería en Chile

Chile es reconocido como un país minero debido a la importancia de la participación de la minería en el desarrollo económico del país. Actualmente en Chile los productos principales producidos por la minería son [24]:

Minería Metálica: Cobre, Oro, Plata, Molibdeno, Hierro, Zinc, Manganeso, y Plomo

Minería No Metálica: Salitre, Yodo, Carbonato de litio, Caliza, Petróleo, Cloruro de Sodio, Ulexita, y Carbón

La Tabla 2.4 indica la producción según las regiones del país:

Región	Productos	
	Metálicos	No Metálicos
"Tarapacá" y "Arica y Parinacota"	Cobre y Molibdeno	Yodo, Cloruro de Sodio, Ulexita y Salitre
"Antofagasta"	Cobre, Molibdeno, Oro y Plata	Salitre, Yodo, Carbonato de litio, Caliza y Ulexita
"Atacama"	Cobre, Molibdeno, Oro, Plata y Hierro	Caliza
"Coquimbo"	Cobre, Molibdeno, Oro, Plata, Hierro y Manganeso	
"Valparaíso"	Cobre, Molibdeno, Oro y Plata	Caliza
"Libertador Gral. Bernardo O'Higgins"	Cobre, Molibdeno, Oro y Plata	
"Biobío"		Carbón
"Aisén del Gral. Carlos Ibáñez del Campo"	Oro, Plata, Zinc y Plomo	
"Magallanes y la Antártica Chilena"		Petróleo, Caliza y Carbón
"Metropolitana de Santiago"	Cobre, Oro, Plata y Molibdeno	Caliza

Tabla 2.4: Productos mineros de Chile

La industria minera es muy importante en el país y por lo tanto su consumo energético también lo es. En la Tabla 2.5 indica el consumo energía eléctrica y energía total de la industria minera chilena. Se puede apreciar que el consumo de energía total es menor al 10% del total del país, sin embargo el consumo eléctrico es de un 36,4%, lo cual la convierte en la industria con mayor consumo de electricidad de Chile [9].

En la Tabla 2.6 el consumo energético se divide según el material explotado, donde la minería del cobre corresponde al 79.9% del consumo de energía total de la minería, y un 88% de la energía eléctrica [9]. Estos porcentajes se deben a que la minería del cobre es la más grande del país, y la diferencia porcentual entre consumo total y eléctrica de esta minería se debe a los procesos involucrados en su extracción y procesamiento.

Sector	Consumo Eléctrico		Consumo Total de Energía	
	GWh	%	GWh	%
Transporte	427	0,8%	104.608	25,3%
Comercial	6.199	11,1%	11.520	2,8%
Público	1.439	2,6%	2.068	0,5%
Residencial	8.750	15,7%	58.952	14,3%
Energético	2.326	4,2%	11.822	2,9%
Centros de Transformación de energía	0	0%	116.523	28,2%
Industrial	16.358	29,3%	68.284	16,5%
Minero	20.283	36,4%	39.387	9,5%
Total	55.781	100%	413.165	100%

Tabla 2.5: Consumo de energía eléctrica y total de los sectores industriales en Chile

Mineral	Consumo Eléctrico		Consumo Total de Energía	
	GWh	%	GWh	%
Cobre	17.851	88%	31.453	79,9%
Salitre	405	2%	1.387	3,5%
Hierro	473	2,3%	1.242	3,2%
Minas varias	1.554	7,7%	5.304	13,5%
Total	20.283	100%	39.387	100%

Tabla 2.6: Consumo de energía eléctrica y total de minas de distintos minerales en Chile

En la Tabla 2.7 se detalla el consumo de combustible, de energía eléctrica, y energía total por tonelada de cobre fino. La minería de superficie tiene un consumo de 12,3% de energía eléctrica, en cambio la subterránea presenta un 52,2%. A partir de este dato se comprende que la energía eléctrica es de gran importancia en las minas bajo tierra, en cambio la maquinaria de superficie emplea motores a base de combustible [8].

Las plantas de procesamiento varían los porcentajes dependiendo de las características de los procesos, en que algunos son esencialmente eléctricos, como las plantas concentradoras. Los detalles de estos procesos se describen en el punto 2.3.4.

Área	Consumo de Combustible		Consumo de energía eléctrica		Consumo total
	Coefficiente unitario	% del consumo total	Coefficiente unitario	% del consumo total	Coefficiente unitario
Mina Rajo (kWh / TMF en mineral)	1.121,0	87,7%	156,8	12,3%	1.277,8
Mina Subterránea (kWh / TMF en mineral)	427,0	47,8%	466,3	52,2%	893,3
Concentradora (kWh / TMF en concentrado)	51,5	2,4%	2.054,9	97,6%	2.106,4
Fundición (kWh / TMF en ánodos)	1.339,6	56,1%	1.049,6	43,9%	2.389,3
Refinería (kWh / TMF en cátodos electrorefinados)	445,7	56,5%	342,6	43,5%	788,3
Lixiviación, Extracción por Solvente, Electro-obtención (kWh / TMF en cátodos electro-obtenidos)	826,9	22,8%	2.802,6	77,2%	3.629,4
Servicios (kWh / TMF total producido)	77,4	37,5%	129,1	62,5%	206,5

Tabla 2.7: Coeficientes unitarios de consumo de energía eléctrica, de combustibles y energía total por área minera

2.3. Instalaciones eléctricas en la industria de la minería

Los sistemas eléctricos en la industria minera se caracterizan por su complejidad y por estar sujetos a restricciones legales, tales como la CSA M421-00 (canadiense), la 30 CFR (estadounidense) o el decreto supremo N°132 del Ministerio de Minería en Chile. Los equipos de minería por lo general son móviles y motorizados, la mayoría se alimenta eléctricamente a través de cables portátiles y, por seguridad, deben ser parte de un sistema de puesta a tierra elaborado. Las máquinas y equipos de distribución de energía rara vez son fijos y deben resistir niveles extremos de polvo, la humedad y las vibraciones. Las cargas eléctricas de la maquinaria de minería son cíclicas y pueden ser extremadamente variables. El escenario de la minería es de constante movimiento, donde la distribución de la energía permanentemente se traslada, y el riesgo de accidentes está siempre presente.

El diseño y el mantenimiento de dicho sistema eléctrico son exigentes y difíciles. Se requiere un especialista con conocimientos tanto de minería como de ingeniería eléctrica. También la gestión eficaz de una mina requiere que la persona responsable de la producción y la seguridad esté familiarizada con el sistema eléctrico de minas.

El ingeniero requiere un sólido conocimiento de los sistemas de alimentación eléctrica de minas, pero esta comprensión no puede basarse en un sistema eléctrico normalizado, pues dicha norma no existe: no hay dos minas que sean exactamente iguales. El ingeniero tiene que recurrir a los conceptos fundamentales, las experiencias anteriores de lo que ha funcionado en el pasado, y una clara comprensión de las limitaciones legales.

2.3.1. Equipos de distribución eléctrica

La evolución de los sistemas eléctricos de las minas se ha reflejado en la definición de equipos eléctricos, donde cada uno cumple una función específica. Un esquema del sistema se puede observar en la Figura 2.14 y los equipos se pueden enumerar como:

1. Centros de poder.
2. Celdas de maniobra
3. Subestaciones principales.
4. Subestaciones portátiles.
5. Distribución (conductores y conectores).
6. Generación.

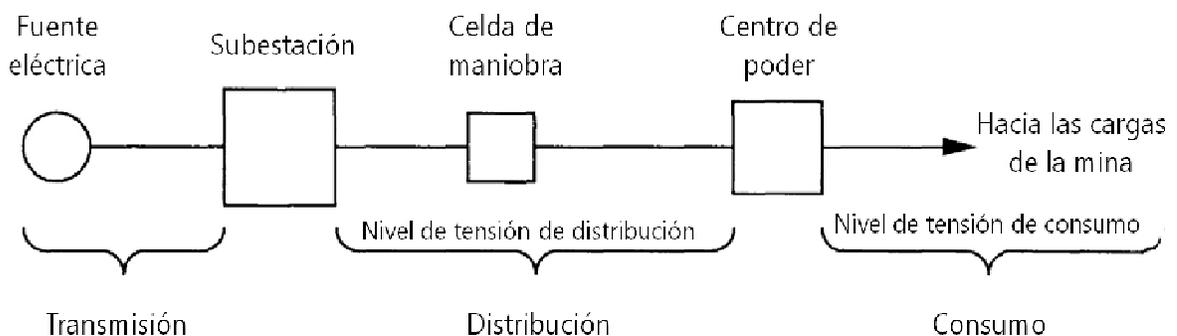


Figura 2.14: Sistema eléctrico de potencia básico de una mina

2.3.1.1. Centro de poder

El centro de poder es una de las unidades más importante del sistema eléctrico para las minas subterráneas y, en menor grado, para minas rajo abierto. Su función principal es convertir la tensión de alimentación a la tensión de utilización de los equipos que operan a lo largo de la mina. También debe incorporar circuitos de protección para garantizar una operación segura, eficiente y confiable. La Figura 2.15 muestra un de estos equipos.



Figura 2.15: Centro de poder

Los componentes eléctricos del centro de poder suelen tener un encapsulado metálico (*metal clad*), es decir, que se encuentran en una caja de acero de alta resistencia. Los terminales o acopladores enchufables se encuentran comúnmente en cada extremo del centro de poder permitir el traslado a medida que avanza la mina o para retirar el equipo (ver Figura 2.16).



Figura 2.16: Acopladoras enchufables utilizados en la minería

El centro de poder en minas rajo abierto consta de componentes al aire libre montado en subestaciones portátiles con una cerca o puertas para impedir la entrada no autorizada. La Figura 2.17 muestra los componentes internos típicos de un centro de poder de minas, para luego describirlos brevemente.

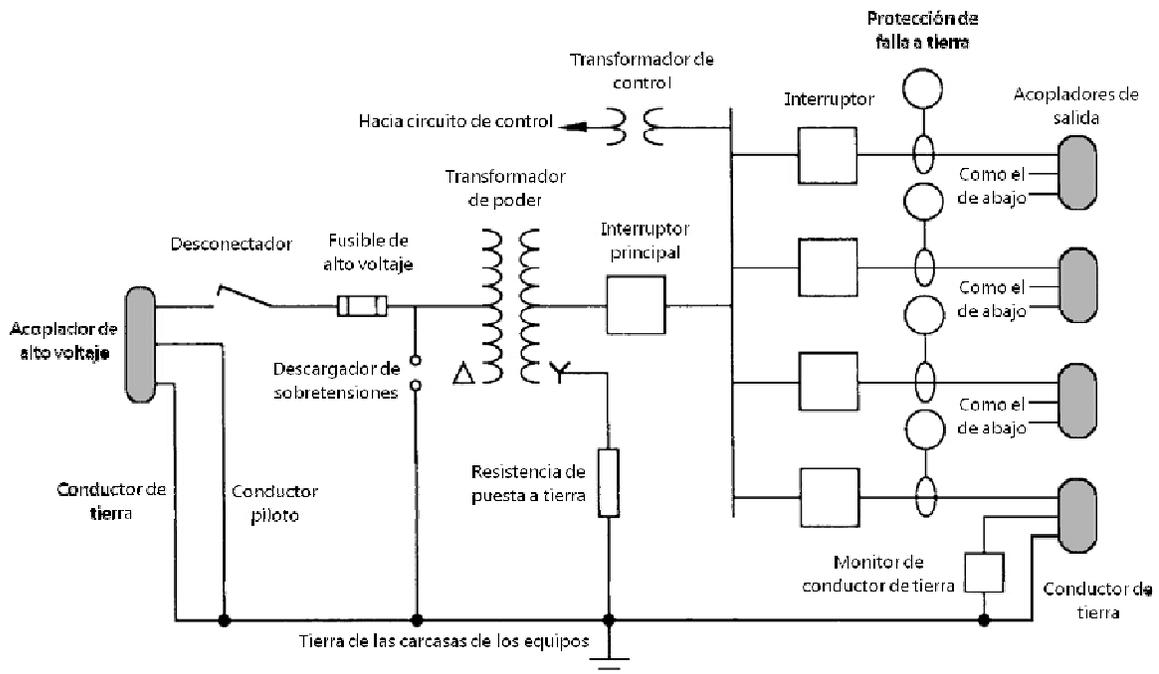


Figura 2.17: Diagrama simplificado de un centro de poder de mina

a) Compartimiento de alta tensión

El desconectador es operado mecánicamente o con aire comprimido. Su función principal es permitir desconectar rápidamente el primario del transformador de potencia de la unidad.

b) Fusibles limitadores de corriente

Se utilizan normalmente en los centros de poder de las minas para proteger el primario del transformador. Con altas corrientes de falla, operan muy rápidamente, y sólo una parte del corto circuito se pasa a través de éste.

c) Los descargadores de sobretensiones (surge arresters)

Se utilizan para proteger el transformador de sobretensiones transitorias, que pueden ser causadas por rayos, sobretensiones de maniobra, y algunos tipos de fallas. La función de un

descargador de sobretensiones es mitigar la energía asociada a una sobretensión transitoria, limitar e interrumpir la corriente transitoria que fluye del pararrayos, y volver a las condiciones normales sin interrumpir el suministro de energía a la carga. Este equipo debe coordinarse con el nivel de aislamiento (nivel de impulso básico) del transformador.

d) Transformador de potencia

El transformador se considera el equipo principal del centro de poder ya que su función es convertir el nivel de la tensión de distribución a aquellos niveles utilizados por las máquinas de la mina. La selección adecuada es imprescindible desde el punto de vista de la seguridad, eficiencia y fiabilidad.

Todos los transformadores de centros de poder de minas normalmente son trifásicos debido a que presentan menores costos, mayor eficiencia, ocupan menos espacio, y tienen menos interconexiones expuestas que tres unidades monofásicas.

Delta primaria y secundaria en estrella son las conexiones estándar preferidas para estos transformadores. La estrella secundaria es un medio fácil para la puesta a tierra, y el primario conectado en delta proporciona el aislamiento del circuito de distribución con el de consumo desde el punto de vista de las corrientes de tierra.

La conexión delta-estrella también estabiliza el punto neutro secundario y reduce al mínimo la producción de tensiones armónicas.

e) Compartimiento de interruptor de baja y media tensión

Se utiliza normalmente interruptores dentro de un encapsulado metálico (*molded case*) para proteger los equipos AC y los cables correspondientes para aplicaciones de hasta 1000 V.

Para tensiones superiores a 1000 V requiere interruptores de vacío o en aceite. Los interruptores encapsulados también se utilizan para aplicaciones de 300 V de corriente continua.

Los interruptores protegen tanto cortocircuitos como sobrecargas. Existen otros equipos de protección externos, como el relé de falla a tierra o un control de verificación de tierra, pueden utilizar el mismo disparador de mínima tensión del interruptor.

La selección de los interruptores automáticos encapsulados se basa en el voltaje, frecuencia, capacidad de interrupción, valor promedio de corriente continua, y la configuración del disparo.

f) Protección de falla a tierra

La Figura 2.17 muestra la protección por falla a tierra en cada circuito de salida. El relé de secuencia cero es el método más común de detección de falla a tierra. Con este método, los conductores de tres líneas pasan a través de un transformador de corriente de tipo ventana, y el secundario del transformador de corriente está conectado a un relé de falla a tierra. Los contactos normalmente abiertos del relé están conectados en serie con el relé de mínima tensión del interruptor en un encapsulado metálico. Si se produce una falla a tierra, los sensores del transformador de corriente notarán un desequilibrio en los conductores de tres líneas, activando el relé de disparo a tierra. Los contactos del relé de disparo de tierra después abren y desactivan el relé de mínima tensión que se traduce en disparo del interruptor encapsulado.

g) Monitor de conductor de tierra e hilo piloto

En la Figura 2.17 se indica el control de verificación de tierra de cada circuito de salida. Su objetivo es vigilar constantemente la continuidad del hilo piloto (conductor de verificación a tierra), pues la corriente de falla en un equipo remoto debe regresar por este conductor, y no por el terreno. El hilo piloto consiste en un conductor que forma parte de los cables de alimentación de los equipos y se utiliza como indicador de la continuidad del conductor de tierra.

Los monitores de uso común en la minería son los tipos de impedancia y tipos de continuidad. Los monitores de impedancia requieren el cable flexible para tener un hilo piloto. El monitor se calibra a la impedancia del bucle formado por los conductores piloto y puesta a tierra. El dispositivo controla el cambio de impedancia según la calibración inicial. Si la impedancia del circuito aumenta más allá de un valor prefijado, el monitor ordenará el disparo del interruptor asociado mediante contactos en serie con el relé de mínima tensión. Los monitores de continuidad, también llamados monitores inalámbricos o sin piloto, no requieren de un hilo piloto. El monitor genera una frecuencia de audio que se junta con el conductor de puesta a tierra por medio de una bobina transmisora. Si el conductor de puesta a tierra está abierto, la bobina receptora no captará la señal, y el monitor hará una serie de contactos para abrir en el circuito de baja tensión de su interruptor asociado. Este equipo se estudiará más detalladamente en el capítulo 5.

2.3.1.2. Celdas de maniobra

Las Celdas de maniobra son equipos portátiles que protegen y proporcionan un medio para la segregación del sistema de distribución eléctrico. Los componentes de una Celda de maniobra (Figura 2.7) se encuentran dentro de un encapsulado metálico, de construcción similar a la de los centros de poder de mina. La Figura 2.18 muestra un de estos equipos.



Figura 2.18: Celdas de maniobra móvil

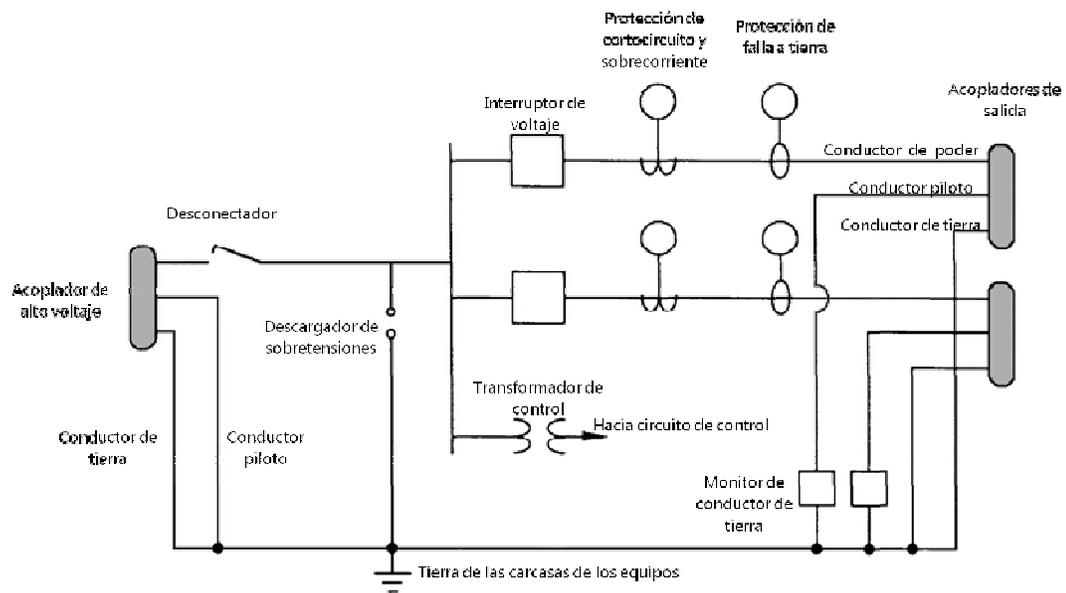


Figura 2.19: Diagrama simplificado de una celda de maniobra

Los componentes internos consisten en unidades visibles de desconexión y protección. Al igual que con los centros de poder, la función principal del interruptor es desconectar manualmente, desde el equipo, la energía desde la mina al alimentador respectivo, que está conectado al sistema de distribución. Se secciona para la ramificación de la distribución y proveer protección al sistema de distribución mediante relés de protección en cada ramificación. El componente principal es el interruptor. Los interruptores de vacío y de aceite se utilizan en las Celdas de maniobra, pero los interruptores de vacío son los más utilizados.

Los relés de protección en una celda de maniobra deben coordinarse con otros equipos de protección aguas arriba y aguas abajo. A diferencia de los interruptores encapsulados, los dispositivos de sobrecorriente no son una parte integral del interruptor de alta tensión.

2.3.1.3. Subestaciones

Es una práctica común de la minería comprar toda o la mayor parte de energía eléctrica a las empresas de servicios públicos. Los componentes típicos de una subestación para la minería se muestran en la Figura 2.21. La subestación principal corresponde a la que se alimenta directamente de las líneas de transmisión, y reduce la tensión a valores menores para la alimentación de los sistemas de subtransmisión o redes de distribución. Puede variar su capacidad desde 500 kVA con suministro de 380 V sólo para las bombas y cintas transportadoras, hasta 50000 kVA para la operación de minas de gran superficie y plantas de procesamiento. La Figura 2.20 muestra una subestación principal.



Figura 2.20: Subestación principal

Además de los transformadores, las subestaciones contienen un conjunto de interruptores, aparatos de protección y dispositivos de puesta a tierra, en que todos cumplen una función de seguridad. La naturaleza de la operación minera y sus requisitos de energía determinan cuántas subestaciones principales se requieren y dónde deben colocarse.

Las subestaciones portátiles son utilizadas principalmente para los requisitos de carga pequeños y, en instalaciones más grandes, pueden servir para transformar la tensión de distribución primaria a un nivel de distribución inferior. Estas subestaciones se han diseñado y construido como una única unidad. En una implementación de minería de superficie, una red de gran tamaño puede requerir 24 kV, mientras que las palas y equipos para la minería necesita 4160 V. La Figura 2.22 muestra una subestación portátil.

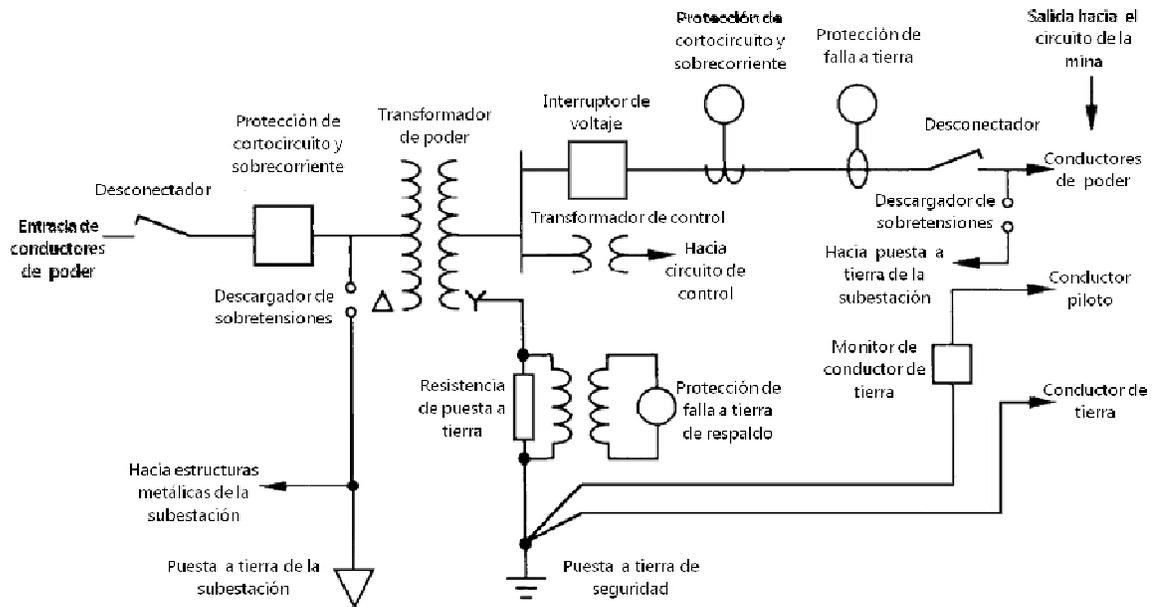


Figura 2.21: Diagrama simplificado de una subestación



Figura 2.22: Subestación portátil

Los transformadores de poder son los principales equipos de las subestaciones y permiten transmitir la energía a plantas de preparación y carga general de la superficie, tales como bombas, ventiladores, talleres de mantenimiento y oficinas e instalaciones de baños. En el caso de una mina subterránea se recomienda disponer además de un transformador separado para el sistema eléctrico subterráneo.

La selección de la capacidad del transformador debe basarse en una estimación de la carga eléctrica, determinando el consumo de los equipos y el factor de carga de la planta.

Otros elementos importantes en la subestación son los equipos de protección, que proporcionan la desconexión para aislar fallas y para el mantenimiento mediante interruptores de cuchillas o interruptores fusibles, que se encuentran en el primario y secundario del transformador de la subestación. Los interruptores de cuchillas suelen tener encapsulado metálico, mientras que los interruptores fusibles se montan en postes. Fusibles o interruptores pueden ser utilizados para la protección del transformador. Una regla general es usar un interruptor en el primario con relé de protección cuando la capacidad del transformador es de 5000 kVA o más.

Las protecciones de corto circuito, sobrecarga, y por falla a tierra son esencialmente los mismos que se emplean en las Celdas de maniobra.

2.3.1.4. Abastecimiento y alimentación eléctrica vía líneas aéreas

Abastecimiento externo

En Chile consiste en conectarse a sistemas interconectados, ya sea Norte, Centro y actualmente Austral, cuyas líneas son entre 230 KV y 13 KV en zonas rurales con contratos de suministros, con algunas de las Empresas productoras de Energía nacionales. La conexión se realiza mediante una Subestación (del sistema interconectado, no confundir con las subestaciones interna de la mina), que debe poseer a lo menos uno o varios transformadores, más un sistema de malla de tierra.

Abastecimiento propio

Se requiere tener grupos electrógenos que abastecen de energía a mina y planta. Es normal su uso cuando la distancia a los sistemas interconectados es muy grande o en pequeña minería por no justificarse el costo de interconexión. También hay que señalar que algunas minas compran la energía eléctrica y también utilizan generadores diesel de emergencia para la energía eléctrica. Si la fuente primaria de energía se pierde, un generador diesel puede entrar rápidamente en marcha para suministrar energía de emergencia a los equipos críticos, tales como ventiladores y el personal de ascensor o montacargas. La Figura 2.23 muestra un generador eléctrico portátil de una empresa minera.



Figura 2.23: Generador eléctrico diesel portátil

Adicionalmente la altura de las postaciones debe respetar que los cables de alta tensión deben estar a 4 m con respecto a cualquier elemento o persona que esté debajo, los de mediana tensión a 3 m y los de baja tensión a 2 m.

No se permite ninguna instalación debajo de una línea eléctrica y en caso de ser necesario un camino, éste debe respetar con una persona en su parte superior, los valores anteriormente indicados [30].

Los conductores aéreos están dispuestos en distintas configuraciones para reducir los contactos de línea debido al viento, la carga de hielo, o la pérdida súbita de la carga de hielo. Los conductores de aluminio con refuerzo de acero (ACSR) son comúnmente utilizados debido a su resistencia mecánica y su relativamente bajo precio, pero en aplicaciones especiales se pueden utilizar otros materiales tales como el cobre.

Los tipos de instalaciones de líneas aéreas utilizadas para aplicaciones de minería son similares a los de los sistemas de distribución urbana. Estas líneas se instalan normalmente en un sólo poste de madera y puede llevar sólo dos conductores, como en el suministro de una sola fase, o tener hasta seis conductores, tres de ellos de alimentación, un conductor de puesta a tierra, un chequeo de tierra (hilo piloto), y estática [30].

2.3.2. Esquemas de distribución de energía

Los esquemas de distribución para las aplicaciones industriales son radiales, selectivo secundario, principal selectivo, circuito primario principal, y redes secundarias de terreno o en el punto de trabajo (*secondary-spot networks*). Los sistemas radiales son las configuraciones más utilizados en la minería, aunque otras configuraciones se pueden encontrar cuando las circunstancias especiales exigen una mayor fiabilidad del sistema. Las minas de superficie tienen, por supuesto, una mayor flexibilidad que las minas subterráneas y emplean una gama más

amplia de disposiciones de distribución. Las redes secundarias in situ, que son sistemas muy utilizados en grandes instalaciones en otros sectores industriales, son poco comunes en la minería, pero se podría aplicar a las plantas de preparación y molienda. Las siguientes descripciones de los disposiciones de distribución principales se basan en definiciones de IEEE [18].

2.3.2.1. Sistemas de distribución eléctrica utilizados en minería

a) Sistema radial

Distribución radial: En su forma más simple consiste en una sola fuente de energía y que es suministro de todos los equipos de la subestación. Los sistemas radiales son los menos costosos de instalar ya que no hay respaldo de equipos, y se puede ampliar fácilmente mediante la ampliación de los alimentadores primarios. La desventaja principal está ligada a su simplicidad; en el caso de que un componente primario falle o por necesidad se requiere detener un equipo primario, todo el sistema queda inactivo (ver Figura 2.24).

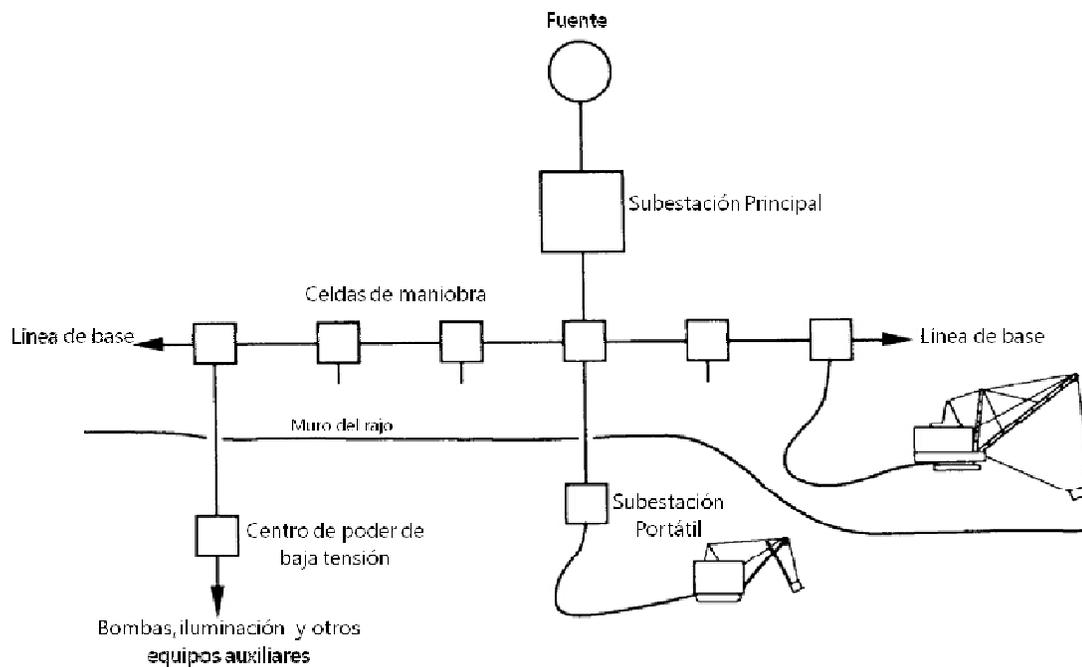


Figura 2.24: Sistema de distribución radial aplicado a una mina de superficie

Sistema radial ampliado: llamado también centro de carga radial, se utiliza comúnmente en la industria minera. Al igual que en la Figura 2.14, los niveles de dos o más tensiones son definidos, pero los alimentadores forman una estructura de árbol que se extienden desde la fuente. Este sistema tiene las ventajas del sistema simple. Si los centros de carga o los transformadores de distribución se sitúan lo más cerca posible a las cargas reales, la mayoría de la distribución será

en el voltaje más alto. Esto permite que disminuya la inversión en conductores, menos pérdidas eléctricas, y una mejor regulación de voltaje.

b) Sistema selectivo secundario

Este sistema tiene un par de subestaciones secundarias que se conectan a través de un interruptor normalmente abierto. Este esquema permite una mayor confiabilidad y flexibilidad que un sistema radial. En general, la distribución es radial, de cada subestación. Si un alimentador primario o subestación principal falla, el circuito con problemas puede ser retirado del servicio, y el contactor (*tie breaker*) se cierra de forma manual o automática. Es posible el mantenimiento y reparación de cualquier circuito primario sin requerir de un corte de energía ni el desprendimiento de cargas no esenciales por el periodo de operación con capacidad reducida (ver Figura 2.25).

Económicamente se justifica este esquema si los requisitos de la subestación están por encima de 5000 kVA.

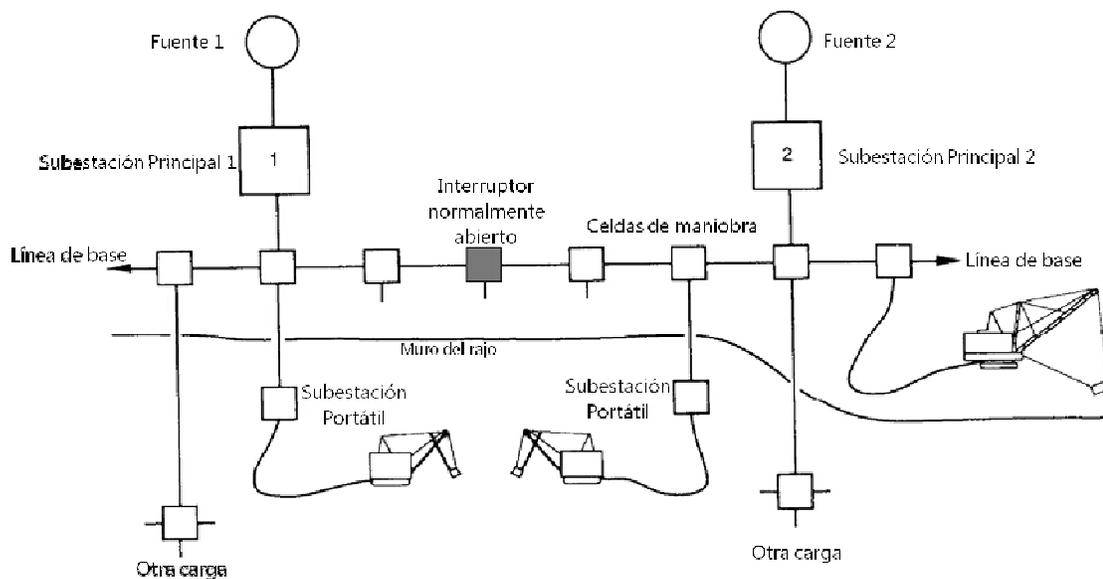


Figura 2.25: Sistema de distribución selectivo secundario aplicada a una mina de rajo abierto

c) Otros sistemas de distribución

Sistema selectivo principal: En este esquema cada subestación puede recibir alimentación conectándose a cualquiera de los dos alimentadores primarios. Durante el servicio normal, cada alimentador debe manejar la mitad de la carga. El sistema es simple y confiable, pero los costos son más altos que el sistema radial o secundaria selectiva debido a la duplicación de los equipos primarios.

Sistema de red secundaria en terreno: Presenta dos o más transformadores de distribución que suministran por separado a los alimentadores de distribución primaria. Los secundarios están unidos a través de interruptores de circuito especiales, llamados protectores de red. Los alimentadores secundarios radiales están conectados a una barra que alimenta las cargas. Este sistema crea el sistema de distribución más confiable disponible para las plantas industriales. Sin embargo, el esquema es costoso, y el aumento de la confiabilidad no está garantizado para la mayoría de las aplicaciones de minería.

2.3.2.2. Distribución en minas de superficie

Los sistemas eléctricos de la minería se pueden dividir en tres categorías dependiendo del propósito de la parte específica: (1) la transmisión o subtransmisión, (2) la distribución y (3) consumo.

Las instalaciones eléctricas de un sistema pueden variar en gran medida en los niveles de distribución y de consumo, pero en algunas minas, distribución y consumo puede ser el mismo sistema.

La ubicación de la subestación de la mina es generalmente un compromiso económico entre el costo de funcionamiento de las líneas de transmisión y las pérdidas de energía en la distribución primaria. Desde la subestación principal, la energía se distribuye a los distintos centros de carga en la operación. Sin embargo, las cargas individuales o complejas, tales como plantas de preparación y otras instalaciones de superficie, pueden tener grandes necesidades de energía, o estar tan aisladas de la distribución primaria volviéndose poco práctica. En estos casos, o por razones de seguridad, la transmisión del suministro debe extenderse cerca de la carga. La extensión se designa como sistema de subtransmisión, y los conductores suelen estar suspendidos como las líneas aéreas. Subtransmisión comúnmente requiere un patio de maniobras de los equipos de operación de alto voltaje.

Los circuitos de subtransmisión, patio de maniobras, y subestaciones principales no son afectados por la operación minera. La subestación principal es donde se establece la puesta a tierra para la mina. Esta tierra se lleva a lo largo de las líneas de poder a través de conductores aéreos o en los cables y se conecta a las carcasas de todos los equipos móviles de la minería, por lo que no hay otros puntos de puesta a tierra.

La distribución de energía eléctrica de las minas, donde su forma más simple es radial, se muestra en la Figura 2.14 que consiste en una subestación, distribución, y un centro de poder que alimenta a los equipos de la mina. Este esquema es muy común en las operaciones de pequeña superficie, donde la tensión de distribución es comúnmente 4160 V, pero puede ser 2300 V en equipos antiguos. En las minas más pequeñas, la energía es comprada en baja tensión

y alimenta a una caja de distribución a la que los motores y los equipos están conectados. A veces, los sistemas radiales simples se emplean en las minas de gran superficie, donde una sola máquina debe ser operada, o donde no se puede establecer una extensa red de distribución primaria, como en algunas operaciones en los extremos de la mina.

La gran mayoría de las minas de superficie emplean distribución radial, pero el selectivo secundario también se puede encontrar; ejemplos simplificados de estos sistemas se proporcionan en las Figuras 2.24 hasta 2.27. En todas las configuraciones, una porción de la distribución primaria se establece como una línea de base o en barra (*baselines* o *bus*).

Los cables de arrastre (estos cables se describen en el capítulo 6) por lo general son de 300 m de longitud, aunque se pueden encontrar cables superiores a los 500 m. Los cables deben llegar a un interruptor portátil (*breaker skid*); los sistemas de acoplamiento de la línea comúnmente están montados sobre patines (*skid*) pequeños para facilitar el movimiento. El manejo de cable de arrastre para equipos de extracción es a menudo asistido por carretes de cable montado en patines o carros motorizados. Las excavadoras grandes pueden requerir un grupo de carretes.

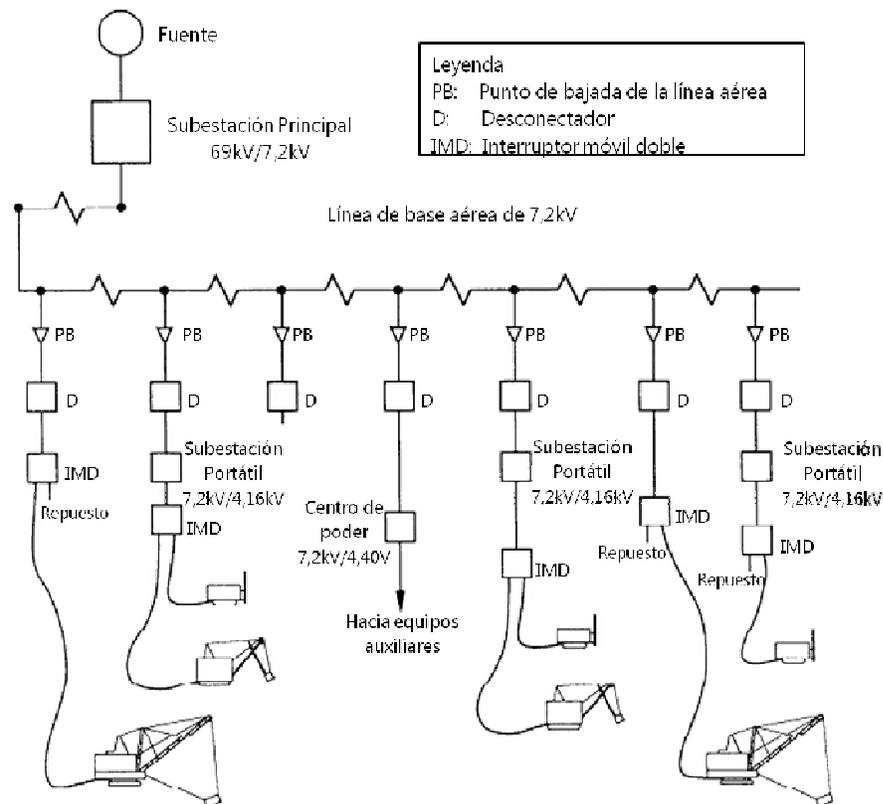


Figura 2.26: Sistema de distribución radial de mina de superficie usando líneas aéreas

La disposición de los cables para la distribución de todas las minas es muy similar a las ya descritas. En este caso, sin embargo, la línea de base se monta con los cables de interconexión

de las celdas de maniobra. El enfoque común consiste en utilizar desconectores móviles (*disconnect skids*) con tres interruptores internos en la línea de base y tener interruptores portátiles con los cables que alimentan la maquinaria. Otro enfoque consiste en combinar los interruptores portátiles en una única línea de base de la celda de maniobra.

Cuando se utiliza una configuración secundaria selectiva, como se muestra en la Figura 2.25, se coloca un interruptor normalmente abierto en la línea de base en una zona aproximadamente equidistante de las subestaciones principales. En algunas operaciones, las dos subestaciones y el interruptor de poder pueden estar en el mismo lugar con dos alimentadores de la zona que va desde la subestación a la línea de base. Más de dos subestaciones principales podrán establecerse en operaciones de gran tamaño.

La tensión de distribución de la mina a rajo abierto puede ser 7,2 kV, 13 kV, 23 kV, y en menor medida 4,16 kV. Los taladros y palas de producción por lo general funcionan a 7200 o 4160 V. Por lo tanto, cuando son necesarios niveles más altos de tensión, se utilizan comúnmente las subestaciones portátiles en el rajo. Un ejemplo sería cuando la carga consumida por una máquina de gran tamaño es varias veces mayor que el conjunto de cargas de las máquinas auxiliares. Otro método consiste en establecer dos líneas para dos voltajes de distribución, como se muestra en la Figura 2.27. Aquí, una gran subestación se conecta a dos líneas de base. Incluso en esta situación, como puede verse en los dibujos anteriores, las subestaciones o centros de poder requieren de baja tensión para los equipos auxiliares.

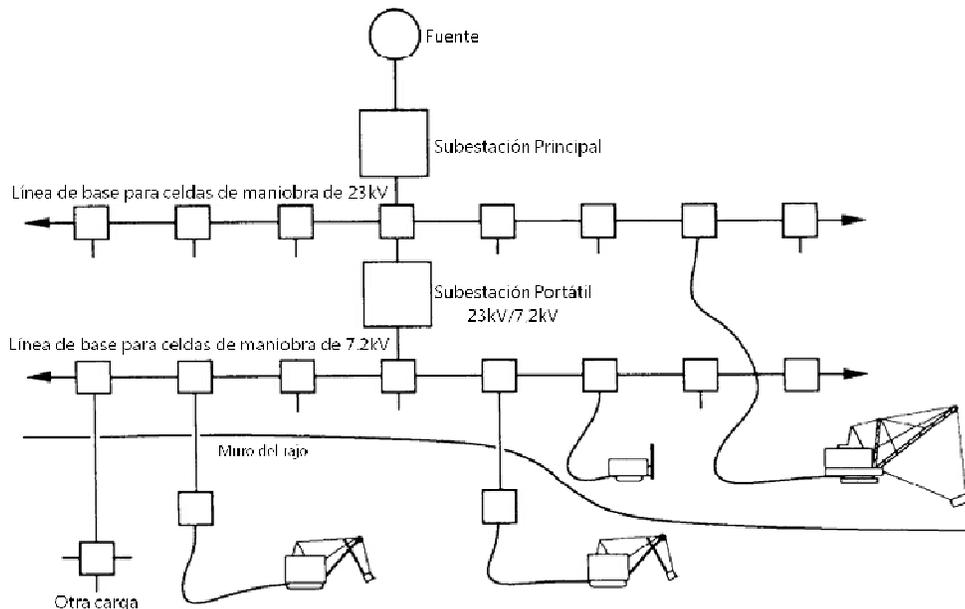


Figura 2.27: Sistema de distribución radial con doble línea de base aplicada a una mina de superficie

El objetivo principal de cualquier sistema de distribución en una mina a rajo abierto es proporcionar una fuente de alimentación flexible, que fácilmente se puede desplazar o modificar

debido a la gran movilidad de los equipos mineros. Los diseños de estos sistemas deben ser considerados como parte integrante de la operación total de la mina. Los sistemas de distribución, tanto para minas de superficie como subterránea, que utilizan equipos portátiles están sujetos a los peligros propios de la maquinaria, y como resultado, estos sistemas debe ser diseñados con una óptima flexibilidad y considerando la seguridad del personal.

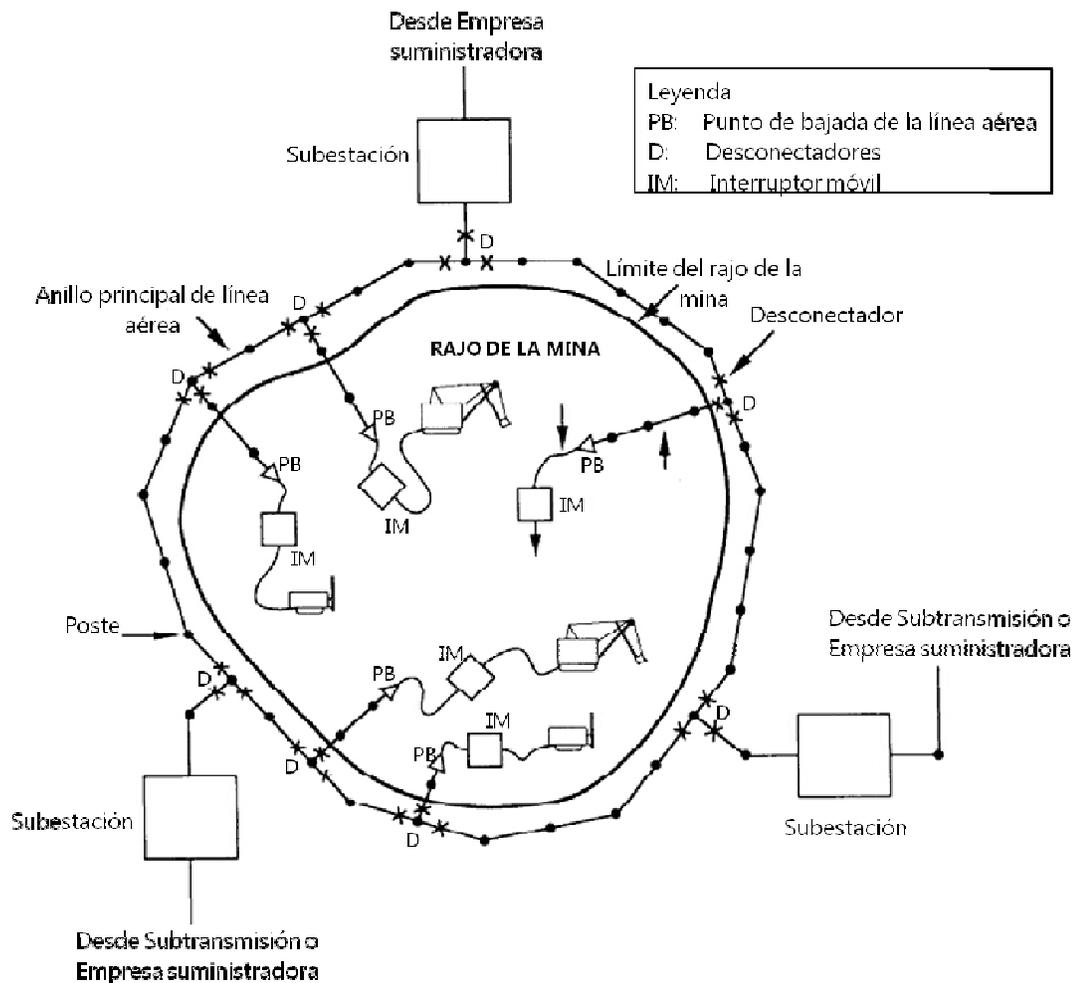


Figura 2.28: Sistema de distribución de mina de rajo abierto donde se ilustra el anillo principal

Los sistemas eléctricos de las minas de rajo abierto en cuanto equipos son similares a los de minas de superficie, pero difieren en su distribución: la distribución general, establece un anillo de conexión que está parcial o totalmente en el rajo. El esquema radial conecta la barra con todas las celdas de maniobra localizados en el rajo, y los equipos portátiles se alimentan nuevamente por cables de arrastre. Un ejemplo se muestra en la Figura 2.28. La tensión de distribución es normalmente 4,16 kV, pero 6,9 kV o 7,2 kV y 13,8 kV se utilizan a veces. Las subestaciones se emplean si las tensiones de los equipos son más bajas. La distribución del sistema casi siempre se construye con líneas aéreas.

2.3.2.3. Distribución en minas subterráneas

La Figura 2.29 muestra un sistema de energía de mina subterránea, el cual es más complicado que las aplicaciones de superficie. Un sistema de energía de una mina carbón es representado en el ejemplo. Por la naturaleza de la mina y sus requisitos de servicio, la distribución debe casi siempre ser radial, donde la libertad de distribución que gozan minas de superficie no está disponible para las subterráneas. Para una mayor confiabilidad, se emplean subestaciones principales selectivas secundarias (Figura 2.30). La tensión de distribución más común es 7200 V, sin embargo, sistemas más viejos de 4160 V todavía se pueden encontrar, y 12470 V ha aumentado su aplicación en los últimos años.

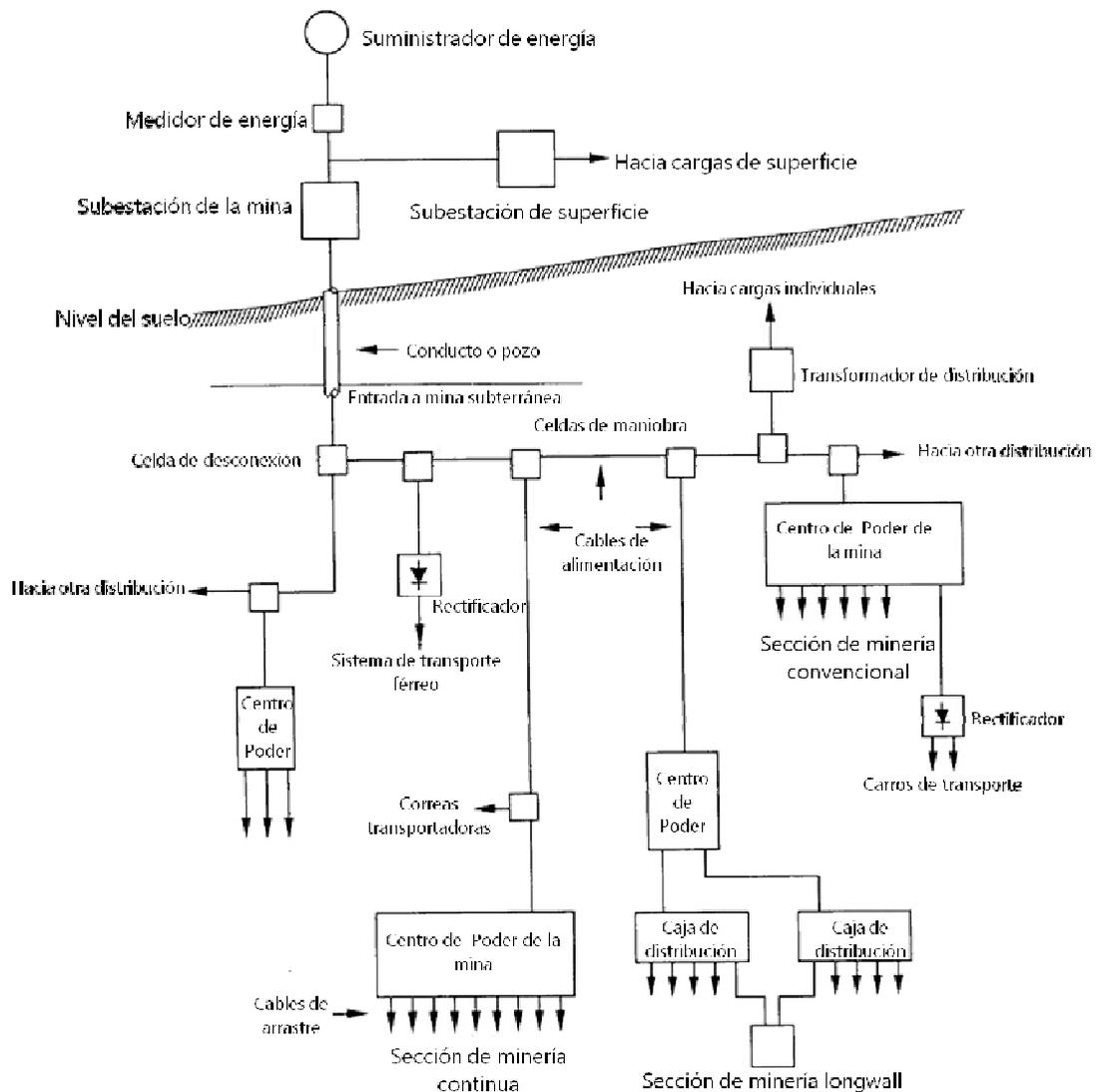


Figura 2.29: Sistema de distribución radial de una mina subterránea

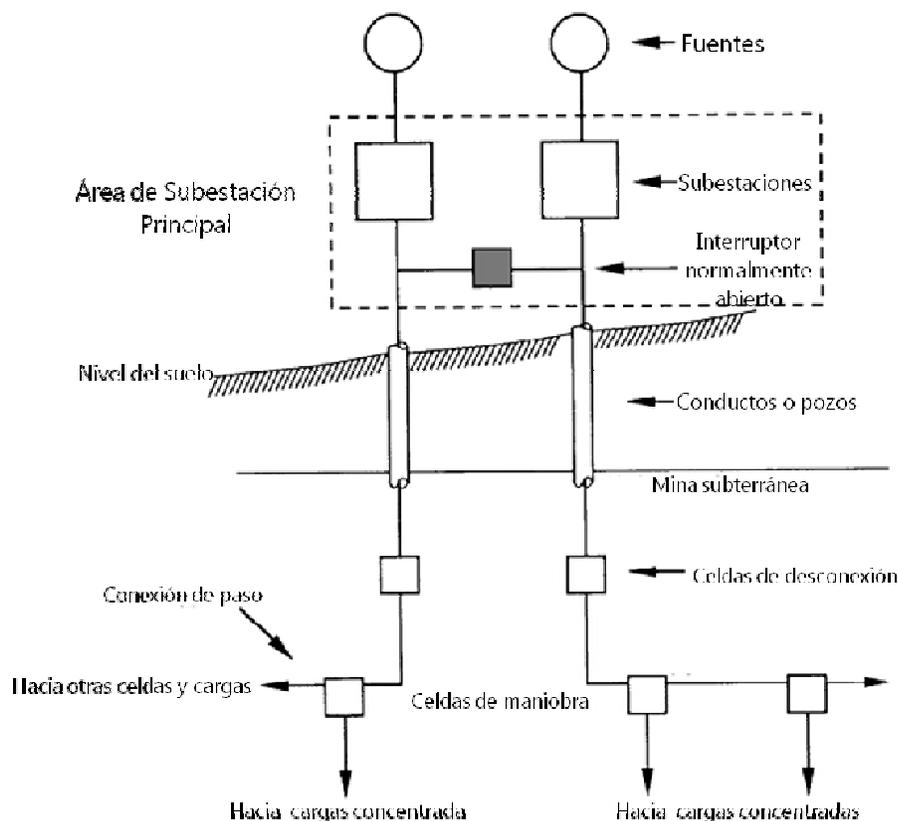


Figura 2.30: Sistema de distribución selectivo secundario de una mina subterránea

La energía y la puesta a tierra de la mina subterránea llegan desde la superficie por medio de cables aislados, ya sea a través de un conducto o pozo de entrada. En las minas subterráneas, estos cables deben terminar en los desconectores ubicados a una distancia mínima de 152 m del punto de entrada de la veta. Estos desconectores permiten la eliminación del suministro eléctrico de la mina subterránea en caso de emergencia. Desde los desconectores, que pueden ser parte de una celda de maniobra, la energía se distribuye a través de cables a los centros de poder o rectificadores que se encuentran tan cerca de la maquinaria como sea posible. Todos los cables de los circuitos de alta tensión, tienen pantallas protectoras.

Las concentraciones de carga principal en la minería subterránea son separadas por secciones. Distribución termina en la sección del centro de poder, que es un transformador combinado con una barra y los circuitos de protección. A partir de éste, varias máquinas son alimentadas a través de acopladores y cables de arrastre.

Si se usan correas de transporte, los transformadores de distribución se sitúan cerca de las unidades de las cintas transportadoras, por lo que se conocen como transformadores de correas transportadoras. Después de la transformación, la energía se suministra mediante circuitos de partida hacia los motores. Para el transporte férreo, la distribución llega a las unidades rectificadoras, que son una combinación de transformadores y rectificadores. Las unidades

rectificadoras se encuentran en la entrada o al lado de la vía férrea, entre dos segmentos de la línea (la vía férrea se divide en segmentos para su alimentación), y típicamente suministran los extremos de dos segmentos de una línea del ferrocarril, en que cada alimentador tiene su propio circuito de protección para detectar fallas. En algunas minas, existen equipos y pequeños motores de corriente continua, que obtienen su suministro a partir de los alimentadores del sistema férreo. La distribución de CC también puede dar energía directamente a grandes motores a través de celdas, sin embargo, esta práctica es poco común.

Todos los equipos eléctricos usados en minas subterráneas deben ser resistentes, portátiles, autónomos, y específicamente diseñados para la instalación y operación en espacios reducidos. Además, todos los equipos y cables de conexión deben estar protegidos contra cualquier falla que podría provocar una descarga eléctrica al personal. Esto es proporcionado principalmente por el relé de protección incorporado en cada parte del sistema, y con redundancia para maximizar la seguridad.

2.3.3. Sistemas de puesta a tierra en minas

El concepto de la protección de personas o equipos eléctricos de minas frente a fallas eléctricas mediante conexión a tierra adecuada, ha existido desde que la electricidad se introdujo en las minas. Ya en 1916, la Oficina de Minas de EE.UU. recomienda el uso de puesta a tierras como un medio de prevenir una descarga eléctrica a los mineros que trabajan con equipos eléctricos o cerca de ellos. Para la industria minera, un sistema de puesta a tierra adecuada siempre ha sido un problema complicado, ya que es más compleja y difícil que en otras industrias.

2.3.3.1. Mallas de tierra

En las minas, los cables de distribución eléctrica y los circuitos de transmisión aérea llevan a la mina uno o más conductores de puesta a tierra, además de los conductores de línea. Cada pieza de un equipo AC tiene su estructura sólidamente conectada través de estos conductores a una malla de tierra de seguridad comúnmente situada cerca de la subestación principal y que consiste en enterrar conductores horizontales, varillas de tierra, o una combinación de ambos. El neutro del secundario del transformador de la subestación, también está conectado con la malla de tierra de seguridad.

La subestación en realidad requiere de dos mallas de tierra, como en la Figura 2.21, instaladas a cierta distancia. Las descargas atmosféricas y otras descargas del transformador en el lado primario son dirigidas a la puesta a tierra del sistema o de la estación. La puesta a tierra del sistema y la puesta a tierra de seguridad deben mantenerse separadas de modo tal que el flujo de corriente que pasa por una, no afecte en la otra (acoplamiento). Es esencial para la operación segura del sistema eléctrico de minas que la resistencia de las mallas de tierra sea

menor a $5,0 \Omega$. Una malla de tierra dentro de este rango de resistencia a menudo se le denomina malla de tierra de baja resistencia.

2.3.3.2. Puesta a tierra en minas de superficie

El sistema de puesta a tierra típico de una mina a rajo abierto es similar a la de la minería subterránea. Una o más subestaciones se emplean para transformar la tensión de línea de entrada a un potencial más bajo utilizado por las máquinas de la minería. En este nivel de tensión, la distribución se realiza por líneas aéreas o cables de suministro de las celdas de maniobra ubicadas cerca de un equipo particular. Los cables de arrastre completan el circuito de alimentación de la celda de maniobra a la máquina. Una celda de maniobra a veces se conecta por cable a una subestación portátil que suministra la energía a más baja tensión a la producción, equipos auxiliares, o iluminación. Las puestas a tierra de las subestaciones presentan mallas de tierra de sistema y de seguridad, que están físicamente separadas y eléctricamente aisladas entre sí como también de otras puestas a tierra de la mina.

2.3.3.3. Puesta a tierra en minas subterráneas

Antiguamente en la minería subterránea se utilizaba como puesta a tierra una varilla de metal en el piso de la mina. En casi todos los casos, este sistema demostró ser inaceptable desde el punto de vista de la seguridad, pues la resistencia de contacto de la maquinaria minera con el piso de la mina es demasiada alta para una puesta a tierra adecuada. Como solución, Griffith y Gleim (1943) propusieron que la puesta a tierra de una mina subterránea debe ser ubicada en el exterior, es decir, en la superficie. Dicha práctica actualmente se utiliza en la minería.

Una forma simple de conexión a tierra es suministrar la energía a los equipos mediante cables trifásicos que entran a la mina, provenientes de un transformador. Dicha energía llega a equipos AC y a los rectificadores. Excepto por el sistema de transporte férreo, todas las carcasas de equipos alternos y continuos están conectados a una salida común que llega a la malla de tierra de seguridad en la superficie. Para que el sistema sea eficaz, los conductores de puesta a tierra deben ser permanentemente monitoreados para verificar la continuidad.

El sistema férreo generalmente utiliza los cables aéreos como conductor positivo y los rieles como negativo. Ninguno de estos está conectado a la tierra de los marcos de las unidades rectificadoras. Sin embargo, debido a que los rieles están en contacto con el suelo de la mina, el conductor negativo del sistema férreo está puesto a tierra.

En cada etapa de transformación de voltaje del sistema, tal como en los centros de poder, un punto neutro adicional debe establecerse en el secundario del transformador. El neutro se conecta a través de una resistencia de puesta a tierra al marco de los equipos, luego a los conductores de tierra, para llegar finalmente a la malla de tierra de seguridad de la superficie.

2.3.4. Plantas de procesamiento de minerales

Las actividades en la superficie de las minas, que pueden incluir tiendas, oficinas, ventiladores, equipos de elevación, las plantas de procesamiento, y así sucesivamente, pueden tener grandes necesidades de energía. Por razones de seguridad, estas instalaciones deberán tener al menos una fuente de alimentación aislada y, a veces, una subestación independiente.

En las plantas de procesamiento de minerales, los esquemas de distribución utilizados generalmente son radial ampliado o selectivo secundario. El diseño del sistema se muestra en la Figura 2.31. En tanto, la tensión de distribución se encuentra en 2,4 a 13,8 kV, donde la más común es 4160V. La energía se distribuye a los centros de carga eléctrica. Esta energía puede ser consumida directamente por motores, pero usualmente se utiliza para alimentar a grupos motores o motores de una alta potencia. Los centros de poder deben estar en un lugar elevado o totalmente cerrados debido al ambiente presente en estas plantas (temperatura, gases, polvo, etc.).

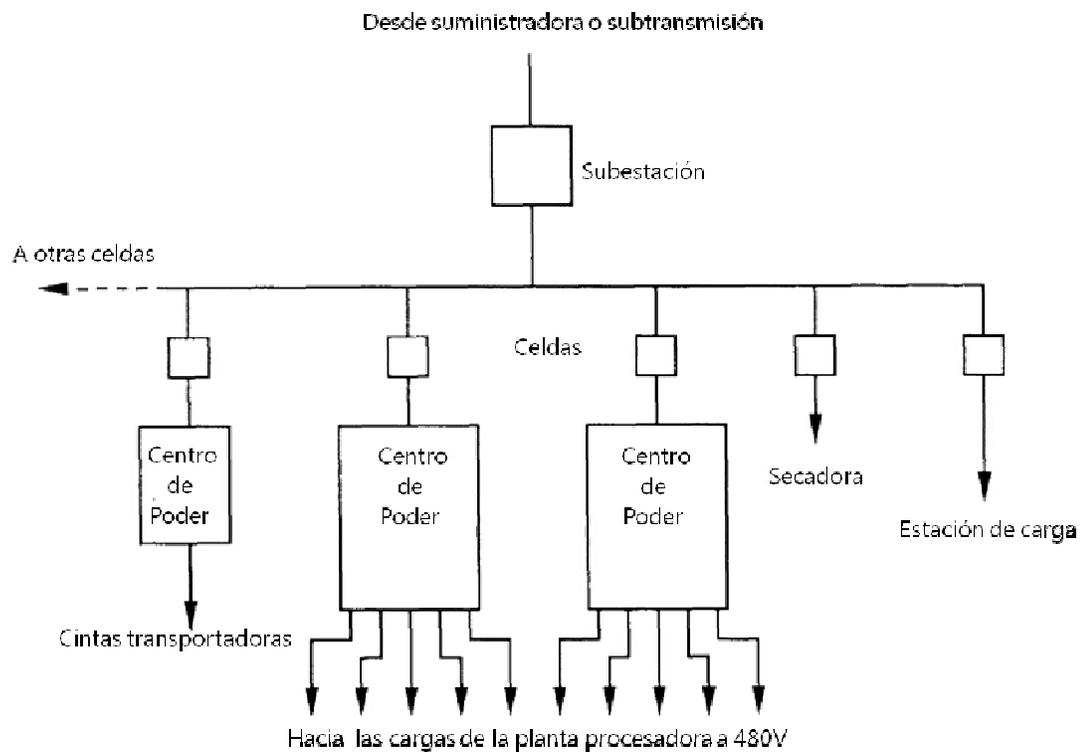


Figura 2.31: Sistema de distribución radial aplicado a planta de procesamiento mineral

2.3.4.1. Electrificación en plantas de reducción de tamaño y concentración

Debido a que los minerales se encuentran asociados a la ganga (conjunto de minerales no metálicos que acompañan al mineral a extraer), se hace necesaria la reducción de tamaño de manera que exista una liberación de los granos mineral desde la matriz. La reducción de tamaño

es la etapa de mayor consumo energético, por lo que ella debe ser óptima para asegurar una buena liberación de las partículas y evitar la sobremolienda que provocaría un aumento en el consumo energético, además de generar partículas demasiado finas, las que perjudican la etapa global de concentración.

La reducción de tamaño comienza con el chancado primario de grandes trozos de mineral por acción de fuerzas de compresión. Como el producto generado tiene un tamaño demasiado grande para el tratamiento metalúrgico de concentración, se hace necesario etapas posteriores de molienda, con el objeto de obtener un tamaño óptimo.

Por ser una operación en seco, se crea un ambiente de polvo en chancadores y traspasos. Los equipos eléctricos deben ser blindados a prueba de polvo y tener una mantención rigurosa. Todos los sistemas deben estar conectados a las tierras de los diferentes transformadores que los alimentan. Por existir numerosas partes móviles, chancadores, cintas transportadoras y parrillas, deben existir sistemas de detención de fácil uso y de rápido funcionamiento, para proteger al personal. La Figura 2.32 muestra una planta de chancado.



Figura 2.32: Planta de Chancado

El proceso de concentración tiene como objetivo la recuperación de los metales de interés presentes en un mineral extraído de un yacimiento. Las plantas de concentración en general se dividen en dos partes, una parte seca y otra húmeda.

La parte seca generalmente concentradores gravimétricos que se basan en las características de diferencia de densidad de los elementos contenidos en materiales heterogéneos, es decir que se basa en el mayor peso, influenciados por la fuerza de la gravedad, de un elemento con respecto a otros. Existen sistemas de recuperación gravimétrica se basa en el incremento de la gravedad por la aplicación de fuerza centrífuga, lo que multiplicado por la alta densidad de los metales preciosos permite que las densidades proyectadas tenga un mayor diferencial entre uno y otro elemento centrífugos o mesas de aire. La parte seca tiene las mismas precauciones que el caso de las plantas de reducción de tamaño. La Figura 2.33 muestra una planta de concentración.



Figura 2.33: Planta de Concentración

La parte húmeda, tal como dice su nombre, es una zona que se trabaja con gran cantidad de agua, y corresponde al proceso de concentración de flotación.

La flotación es un proceso de separación de materiales de distinto origen que se efectúa desde sus pulpas acuosas por medio de burbujas de gas y a base de sus propiedades hidrofílicas e hidrofóbicas. Se puede efectuar la separación de varios componentes en dos grupos: flotación Colectiva donde el concentrado contiene a lo menos 2 ó más componentes y flotación Selectiva donde se efectúa una separación de compuestos complejos en productos que contengan no más de una especie individual. Normalmente, consiste en un circuito celdas de flotación, espesadores, filtros y gran cantidad de bombas de agua y pulpa.

Como la humedad hace más peligroso el uso de energía eléctrica, todos los motores eléctricos deben ser blindados y protegidos contra la humedad. Debe existir una buena conexión a tierra con las mallas de los diferentes transformadores y sus protectores diferenciales deben estar bien mantenidos.

2.3.4.2. Electrificación en plantas de lixiviación

El término lixiviación es el proceso que consiste en disolver el elemento que se quiere recuperar y retirarlo de la solución. Esto puede ser impuro, como los cementos, o puro, como los cátodos. La Figura 2.34 muestra una planta de lixiviación.



Figura 2.34: Planta de lixiviación

Para lixiviar existen tres métodos, uno a base de pilas que se riegan con el líquido disolvedor, otro es percolación que consiste en piscinas donde circula el agente disolvedor y el tercero es agitación que consiste en un tambor que se carga con material fino y al girar mejora la mezcla con el líquido.

En general, los motores son del sistema de chancado que deben cumplir lo indicado en las plantas de concentración seco y el resto es movimiento de soluciones y/o ácidos mediante bombas y mangueras. Muchos ácidos tienden a vaporizarse y producen aerosoles los que pueden afectar las instalaciones eléctricas y motores, disminuyendo su aislamiento.

Capítulo especial es la planta de extracción por Solventes donde se trabaja en un ambiente combustible que es muy fácil de inflamar. Por esa razón, el Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile exige que los circuitos eléctricos en la plantas de extracción por Solventes sean

"Intrínsecamente seguras (*Flame Proof*)". Estas plantas en su gran mayoría están en lugares secos. Por lo tanto, el hombre con sus movimientos puede cargarse eléctricamente. Deben instalarse en el sector cables de cobre conectados a tierra y el personal cada cierto tiempo debe tocarlo para descargarse. El personal debe usar ropa adecuada para evitar cargarse con electricidad estática.

2.3.4.3. Electrificación de fundiciones

La fundición es un proceso pirometalúrgico cuyas aplicaciones se recomiendan en el caso de metales de alta ley tales como concentrados diversos. En esta planta los metales son colectados por fusión debido a altas temperaturas, de modo que se concentra en el fondo del recipiente que los contiene, usualmente un crisol.

Estas instalaciones se caracterizan por las altas temperaturas del sector; por eso, los circuitos e instalaciones eléctricas, sobre todo las más cercanas a los hornos, deben tener protección contra la temperatura. Los diferenciales y circuitos a tierra deben calcularse pensando que gran parte de la estructura, pasillos y escaleras son de fierro. La Figura 2.35 muestra una planta de fundición.

En la mayor parte de las fundiciones existen plantas de ácido sulfúrico y en ese lugar, el ambiente tiene aerosoles de ácido. Las aislaciones de los equipos eléctricos deben ser resistentes al ácido.



Figura 2.35: Planta de fundición

2.3.4.4. Electrificación de refinerías y plantas de electro-obtención

La refinación electrolítica es un proceso de purificación de los metales, que consiste en la aplicación de corriente eléctrica, para disolver el metal impuro, en una celda electrolítica, y depositarlo selectivamente en forma muy pura sobre los cátodos. Parte de las impurezas que acompañan al metal pasan a la solución acuosa, el resto pasa al barro anódico. La Figura 2.36 muestra una planta de refinación electrolítica.



Figura 2.36: Planta de refinación electrolítica

La electro-obtención es un proceso de recuperación de un elemento metálico desde una solución de sus iones, mediante el uso de corriente eléctrica. La electro-obtención se caracteriza por la utilización de ánodos prácticamente insolubles, sobre los cuales se produce la reacción de oxidación, la que frecuentemente corresponde a la oxidación de agua. Además, emplea cátodos de acero inoxidable, sobre los cuales se deposita el metal. La electrolisis se lleva a cabo en celdas especiales, a través de las cuales se hace circular la solución portadora de la especie disuelta del metal, previamente purificada y concentrada. La Figura 2.37 muestra una planta de electro-obtención.

En estas plantas se usa corriente continua para establecer celdas que pueden ser de refinación o electro-obtención. La energía se baja al voltaje adecuado y después, los rectificadores la convierten en corriente continua. Como normalmente es un ambiente ácido, todo el sistema eléctrico debe ser a prueba de ácido.



Figura 2.37: Planta de electro-obtención

2.3.4.5. Electrificación de talleres y campamentos

Debe cumplirse con todo lo que establece el Reglamento de Servicios Eléctricos para construcción de casa habitación y lo mismo con los talleres.

2.4. Accidentes eléctricos en la industria minera

Las estadísticas realizadas por la MSHA (*Mine Safety and Health Administration of USA*) indican que los accidentes eléctricos son la cuarta causa de muerte en la minería en Estados Unidos. Adicionalmente los accidentes eléctricos son desproporcionadamente mortales en comparación con la mayoría de otros tipos de accidentes mineros, ya que como se ve en la Tabla 2.8 el porcentaje promedio de accidentes que resultaron fatales de toda la minería es 0,37%, en cambio para accidentes eléctricos es 3,89% lo que indican que son aproximadamente 10,5 veces más fatales que el resto de los accidentes de la minería. Se puede argumentar que cada accidente eléctrico es potencialmente fatal, salvo que ocurra un conjunto fortuito de circunstancias combinadas que eviten la muerte de la víctima [6].

Categoría	Porcentaje de Fatalidad
Caídas o deslizamientos de rocas o materiales de cualquier tipo	10,69%
Explosivos	7,92%
Eléctricas	3,89%
Desprendimiento de paredes	2,39%
Explosión de recipientes bajo presión	2,03%
Ignición y la explosión de gas o de polvo	1,85%
Transporte de materiales (con motor)	1,42%
Caída de techo o respaldos	0,54%
Fuego (no eléctrico o de explosión)	0,53%
Maquinaria	0,44%
No clasificados en otra parte	0,44%
Inundación	0,37%
Resbale o caída de la persona	0,15%
Elevación	0,13%
Herramientas de mano	0,05%
Manipulación de materiales	0,01%
Promedio de fatalidades de todas las causas	0,37%

Tabla 2.8: Porcentaje de accidentes fatales según categoría durante 1990 a 1999

En la Tabla 2.9 se indica el grado de lesión de los accidentes eléctricos obtenidos del mismo estudio estadístico de la MSHA en que se detalla la cantidad de accidentes eléctricos de un total de 1926 casos durante 1990 y 1999 en la industria minera de Estados Unidos.

Grado de lesión	Casos
Fatalidad	75
Incapacidad permanente (parcial o total)	9
Días fuera del trabajo solamente	1109
Días de distancia y actividad restringida	80
Días de actividad restringida sólo	105
Lesiones sin muerte, días fuera, o actividad restringida	441
Enfermedad profesional	0
Grave, lesión fatal debido a causas naturales	0
Grave, lesión fatal - contratistas en la propiedad de la mina	5
NEC (primeros auxilios sólo, la muerte no imputable / discapacidad)	14
No hay lesiones	88
TOTAL	1926

Tabla 2.9: Cantidad de trabajadores accidentados según grado de lesión de accidentes eléctricos

El análisis de las causas de los accidentes eléctricos en un total de 1926 accidentes, identifica que las principales causas son:

- Interruptores: 313 equivalente a 16,3% del total.
- Cables: 309 equivalente a 16% del total.
- Baterías: 242 equivalente a 12,6% del total.
- Equipos energizados: 163 equivalente a 8,5% del total.
- Puestas a tierra: 204 equivalente a 10,6% del total.
- Mediciones eléctricas: 90 equivalente a 4,7% del total.

Como se observa los accidentes en que se relacionan las puestas a tierra son la cuarta causa más importante.

2.4.1. Estadísticas de accidentes de Puestas a tierra

De los 204 accidentes relacionados con puestas a tierra, sólo 129 en verdad representan un problema de puesta a tierra, los otros participan en el accidente pero no son la causa de éste. Estos 129 accidentes de tierra se agrupan en ocho categorías causales:

- Falla al desenergizar los equipos (intencionalmente o no) antes de realizar trabajos con la puesta a tierra - 47 casos.
- Defectos del sistema de puesta a tierra, componentes, o aislación de equipos - 29 casos.
- Usando equipos de prueba o medida en las puestas a tierra - 13 casos.
- Defectos de puesta a tierra de equipo móvil - 13 casos.
- Defectos de los conductores de la puesta a tierra - 12 casos.
- Defectos de los cables portátiles de la puesta a tierra - 3 casos.
- Causas desconocidas - 8 casos.
- Soldadura - 4 casos.

Como análisis se observa que los accidentes eléctricos son altamente fatales en la minería, dentro de los cuales los accidentes de puestas a tierra son la cuarta causa. Es por esta razón que el siguiente capítulo se analizará los problemas de puestas a tierras propios de la industria minera y las posibles soluciones a estos.

CAPÍTULO 3

Acoplamiento entre puestas a tierra en minas

El uso de mallas de tierra y otras técnicas para limitar los potenciales de contacto y de paso dentro de una subestación o una zona de trabajo reciben una atención importante. En una industria donde los trabajadores están en un edificio o en un área fija, los riesgos de shock eléctricos pueden ser mínimos mediante el establecimiento de una superficie equipotencial en toda el área de trabajo. Esto se puede lograr simplemente uniendo todos los conductores del área de trabajo que no estén específicamente destinados a transportar potencia o señales de comunicación y que no estén aislados. Así, todas las estructuras de acero y las barras de refuerzo del concreto en un edificio están unidas entre sí, las tuberías de agua y gas se conectan, y cualesquiera otras estructuras están unidas a tierra. Los riesgos de shock eléctricos se eliminan porque todo en el área de trabajo está al mismo voltaje. Si los rayos golpean al edificio o si se produce una falla a tierra, todo el entorno de los trabajadores puede subir a una tensión elevada, pero al igual que las aves en una línea eléctrica están seguros porque no existe diferencia de voltaje entre los objetos que ellos pueden tocar en ese momento.

La situación en las áreas de trabajo de una mina es diferente. En la mayoría de los casos los únicos conductores eléctricos presentes son las carcasas de los equipos en operación. A fin de limitar las sobretensiones sobre las aislaciones y proporcionar un método para detectar las fallas a tierra, estos equipos están ligados a la puesta a tierra del sistema de alimentación en la fuente de energía de la mina, que puede estar muy lejos de la zona de trabajo. Es muy difícil, o al menos poco práctico, garantizar que el piso y los muros de la mina estén bien conectados a la tierra del sistema de alimentación, ya que hay pocas vigas y barras de refuerzo de acero interconectadas que estén incrustadas en dichos lugares de la mina. Por lo tanto, la protección del trabajador no se puede asegurar mediante el establecimiento de una superficie equipotencial bien conectada que incluye tanto los pisos de la mina y los marcos de los equipos. En consecuencia, el criterio de seguridad adoptado es que el terreno de las minas debe mantenerse en todo momento a un potencial absoluto de seguridad. De este modo, si los

equipos que trabajan en la superficie o dentro de la mina y mueven los materiales del suelo de la mina presentan potenciales de seguridad independientes, entonces la diferencia entre estos se puede mantener segura también.

Así, las puestas a tierra en las minas deben ser diseñadas para limitar los potenciales a valores seguros, incluso durante la caída de rayos y fallas a tierra, un problema mucho más difícil que mantener un edificio a un mismo potencial. Esta puesta a tierra de alta calidad para las áreas de trabajo es comúnmente conocida como "puesta a tierra de seguridad en las minas". Para garantizar que la tierra de seguridad no se energice a un nivel peligroso durante un golpe de un rayo a una línea de alimentación de entrada o durante una falla a tierra en el sistema de energía primaria de la mina, las regulaciones indican que la puesta a tierra de seguridad esté aislada eléctricamente de la puesta a tierra de la subestación y de los pararrayos [30]. Además, la malla de tierra de seguridad deberá estar separada físicamente de las otras mallas de tierra en al menos 8 m (25 pies) [22]. Esta indicación se discutirá más adelante en este capítulo.

A pesar de los intentos de limitar los potenciales manteniendo una separación de las puesta a tierra entre instalaciones de superficie y subterráneas, grandes estructuras conductoras tales como carcasas de montacargas y de cintas de transporte, líneas de agua, y rieles de transporte de carga pueden acoplar potenciales desde un sistema de puesta a tierra a otro. En muchos casos, los esfuerzos realizados para mantener la separación de las puestas a tierra, no han dado buenos resultados y los potenciales entre puestas a tierra siguen acoplados.

3.1. Mecanismos de acoplamiento entre puestas a tierra

Si la tensión que aparece en una puesta a tierra que no sea la puesta a tierra de seguridad provoca que una tensión aparezca en esta última, entonces ambos sistemas están "acoplados". Si sólo una fracción de la tensión en un sistema de tierra se transfiere a la otra porque el acoplamiento es pequeño, entonces el riesgo de electrocución para los trabajadores será menor. En el pasado la MSHA ha intentado garantizar que el acoplamiento sea lo suficientemente bajo al exigir que las mallas de tierra estén físicamente separadas por lo menos a 8 m. Algunos inspectores exigen también que la resistencia medida de la malla de tierra de seguridad no sea más que 5Ω . Estos criterios no garantizan que el acoplamiento sea pequeño, ya que los sistemas de tierra pueden estar estrechamente unidos de varias otras formas.

3.1.1. Interconexión directa accidental

Las puestas a tierra pueden interconectarse por dos situaciones: errores de cableado, o bien, por fallas de aislación dentro de la subestación, la resistencia de puesta a tierra del neutro, o las tuberías de los pozos. Las medidas tradicionales de resistencia de la malla de tierra no detectan este problema. Menos evidentes son las interconexiones directas que se producen a través de las carcasas de los montacargas, cintas de transporte, o líneas de agua. Estas estructuras se puede extender como un conductor directo desde las instalaciones de superficie (donde suelen estar conectadas a la subestación o a la puesta a tierra del edificio) a los alrededores de la mina (en el que están conectadas la puesta a tierra de seguridad). Aunque estas conexiones entre ambas puestas a tierra no son "directas", frecuentemente las grandes dimensiones de las mallas de las minas generan un acoplamiento de todos modos.

3.1.2. Objeto conductor intermediario

El acoplamiento puede ser mediante un gran objeto conductor que no está directamente conectado con ninguna puesta a tierra. Si este conductor se encuentra lo suficientemente cerca de la puesta a tierra de una subestación, las tensiones pueden acoplarse a este objeto rápidamente, el cual puede estar lo suficientemente cerca de la tierra de seguridad. Luego la tensión de esta tierra se acopla a la del objeto, produciéndose un acoplamiento significativo entre puestas a tierra existentes.

Estos conductores intermediarios pueden ser rieles de líneas férreas, tubos de pozos, tuberías, y tubos de transporte de desechos (el hormigón armado húmedo es un conductor relativamente bueno, tan bueno que puede ser utilizado efectivamente para los electrodos de tierra). El acoplamiento de este tipo puede ocurrir de muchas maneras, por consiguiente es difícil tener la certeza de su existencia sin medir directamente.

El decreto N°132 del Ministerio de Minería indica que toda maquinaria fija, línea férrea (ferrocarril no electrificado), cañerías de aire y de agua instaladas en el nivel, las estructuras metálicas y artefactos metálicos, deberán ir conectados eléctricamente al cable de tierra [30]. Sin embargo esto no elimina la posibilidad de acoplamiento entre puestas a tierras.

3.1.3. Insuficiente separación

El acoplamiento entre los electrodos en la tierra (mallas de tierra) es principalmente una función de las dimensiones físicas de las mallas. La norma de la MSHA determina que una separación de 8 m es adecuada para asegurar que el acoplamiento sea mínimo entre las típicas minas de baja resistividad del suelo, pero no puede garantizar la adecuada separación bajo otras

condiciones. El acoplamiento está directamente relacionado con el tamaño; si las mallas de tierra de seguridad y de la subestación se duplican en tamaño (cada dimensión lineal es del doble), entonces se tienen que mover dos veces más lejos para evitar un aumento en el acoplamiento. Se ha visto en varias minas que la puesta a tierra es de una superficie muy grande (que cubre una fracción significativa de una hectárea). Eliminar el acoplamiento de potencial al mover la malla de tierra de seguridad sería muy costoso y probablemente puede causar más riesgos de los que eliminaría. Afortunadamente, el gran tamaño de estas mallas de tierra hace disminuir los riesgos de electrocución (se indicarán más adelante en este capítulo) ya que se contrarresta el riesgo de descarga eléctrica causada por aumentar el acoplamiento.

3.2. Dificultades en la reducción del acoplamiento

En algunos casos, el acoplamiento entre puestas a tierra puede reducirse significativamente sin necesidad de grandes modificaciones ni inversiones. Tal es el caso de interconexiones directas debido a errores en el cableado de las fallas de aislamiento. Estos problemas se deben encontrar y reparar, si es necesario, para que las puestas a tierra de la mina permanezcan desacopladas.

Se indica a continuación algunos mecanismos que podrían ayudar a reducir el acoplamiento.

3.2.1. Junturas de material aislante

En ciertos casos el acoplamiento se produce a través estructuras metálicas (acoplamiento provocado por interconexión directa o como un objeto conductor intermediario) como por ejemplo las tuberías de agua o pozos. Algunas minas han tratado de desacoplar las puestas a tierra mediante la inserción de una juntura de material aislante en cada unión de las tuberías. La eficacia de esta medida es muy limitada, por el hecho de que la mayoría de estas tuberías y estructuras están en contacto con la tierra. Este contacto con la tierra, que es conductora, permite que la corriente que fluye en la estructura pueda eludir las junturas utilizando como camino la tierra. La Figura 3.1 muestra un esquema del flujo de corriente en la tierra en torno a una juntura de material aislante.

Se ha calculado que para una tubería de 8 pulgadas de diámetro enterrada horizontalmente en un suelo de resistencia homogénea uniforme de $400 \Omega\text{-m}$, con solamente una juntura de material aislante de 2.5 cm de grosor a los 15 metros, agrega alrededor de 11Ω a la resistencia de extremo a extremo de una estructura de 30 m. Si el tubo se llena de agua altamente mineralizada, común en la minería, la resistencia podría ser significativamente más baja. El acoplamiento entre puestas a tierra causado por una estructura metálica o de concreto

reforzado que está en contacto con la tierra en una porción sustancial de su longitud no puede ser eliminado mediante la inserción de estas juntas de material aislante.

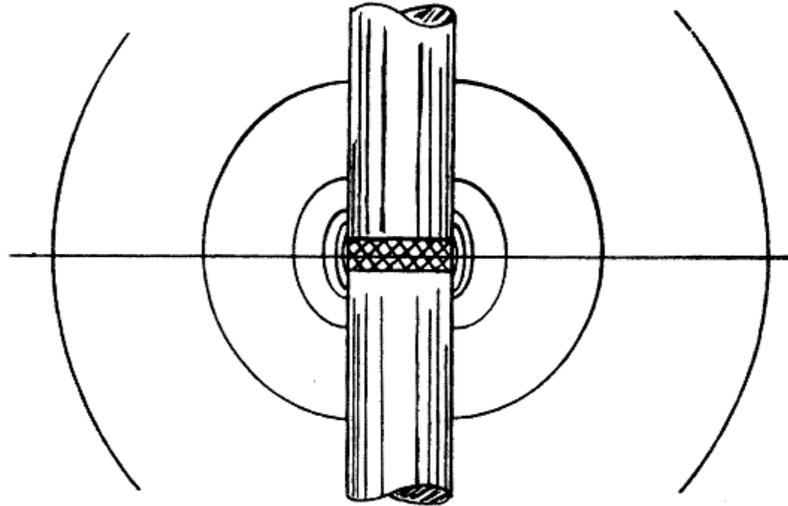


Figura 3.1: Flujo de corriente a través de la tierra sobrepasando la junta aislada de la tubería

3.2.2. Cubiertas y revestimientos no conductores

El acoplamiento entre puestas a tierra puede ser eliminado por el uso de materiales no conductores en las estructuras intermedias que causan acoplamiento. Dichos materiales pueden ser caucho, plástico, madera seca, y fibra de vidrio. Sin embargo, estos materiales solo se emplean en aplicaciones como líneas de agua y tubos protectores. Los materiales no conductores actualmente no son permitidos como sustitutos del acero ni del hormigón.

3.2.3. Dimensiones de los sistemas de puesta a tierra

Si se consideran sistemas de puesta a tierra en contacto con el suelo, pero sin interconexiones entre estos, se puede demostrar que el grado en que el voltaje en un sistema de tierra se ve afectado por la tensión en el otro sólo depende fundamentalmente del tamaño y la forma de la puesta a tierra. Este aspecto particular de la puesta a tierra no está bien entendido por la mayoría y no es considerado por el reglamento actual de la MSHA. Si las puestas a tierra son amplias, entonces es muy probable que estén acopladas, y los intentos de mantener la separación no pueden mejorar significativamente la seguridad.

3.3. Acoplamiento entre electrodos grandes

La Figura 3.2 muestra un modelo simple de análisis, representando una malla de tierra por una semiesfera afectando un pequeño conductor a una distancia d del centro de la esfera de radio r , que lleva una corriente I .

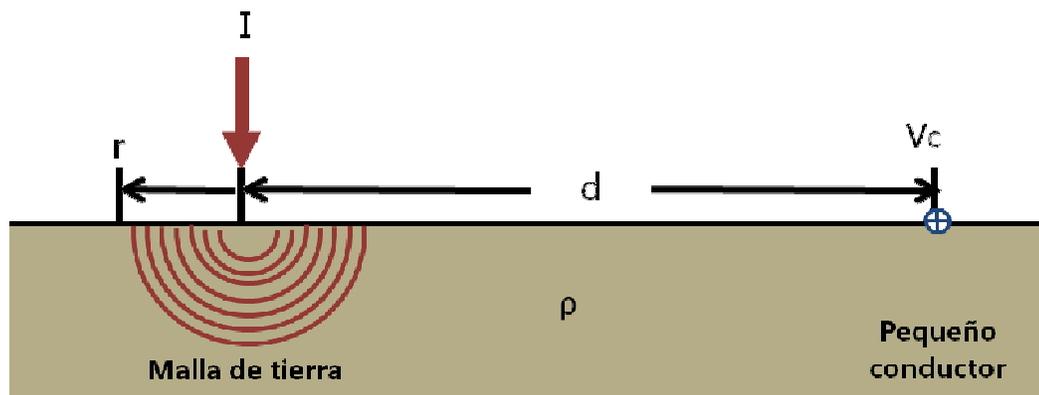


Figura 3.2: Acoplamiento de voltaje en un conductor remoto generado por una malla representada por una semiesfera

Considerando un terreno homogéneo, el voltaje inducido en un conductor remoto está determinado por el voltaje del electrodo que lleva la corriente I y la razón de su tamaño respecto de la distancia al conductor afectado, el que se puede calcular como [10]:

$$V_c = V \cdot \left(\frac{r}{d}\right) \quad (3.1)$$

Esto lleva a la conclusión general de que la tensión de acoplamiento en un conductor en un punto, está determinado por la tensión de la semiesfera y la razón entre su tamaño, y la distancia al punto remoto. Por lo tanto, si la malla que conduce la corriente es grande, puede inducirse voltajes sobre grandes distancias.

3.4. Criterios generales de seguridad

Dado que cada mina es una mezcla única de las exposiciones de descargas eléctricas, fallas probables y limitaciones del medio ambiente, no hay recomendaciones universales que se puedan hacer sobre la interconexión de los sistemas de tierra. Sin embargo es posible establecer algunos criterios generales respecto a las condiciones de seguridad:

- Si el acoplamiento de voltaje estimado entre la puesta a tierra de la mina y la puesta a tierra de la subestación es alto y no puede ser reducido significativamente, la seguridad de las personas se mejora interconectando sólidamente ambas tierras.
- Si el acoplamiento de voltaje estimado es menos de 33% y es improbable que un trabajador pueda estar en contacto simultáneamente con ambas tierras, es preferible mantener las tierras separadas. Igualmente, si la medida de resistencia de ambas tierras interconectadas es menor que la resistencia medida entre las tierras (desconectadas)[10]
- Los potenciales de shock pueden aparecer de muchas maneras en los sistemas de tierra o entre sistemas de tierra; por otro lado existen muchos requisitos para reducir todas las posibilidades de riesgo global sin que puedan evaluarse con cierto grado de confianza. Como existe poca evidencia en las estadísticas de accidentes eléctricos de minas para determinar que la separación es mejor o peor que la interconexión, no parece haber ninguna razón de peso para intentar cambiar un sistema de tierra a otro modo. Entonces si se puede conseguir un bajo acoplamiento y una buena aislación eléctrica, se recomienda la separación.

Cabe destacar que estas recomendaciones excluyen el caso de acoplamiento entre la puesta a tierra de servicio y la de protección, pues la norma chilena impide esta situación.

La medición de acoplamiento se realiza energizando una malla de las dos mallas (malla 1) respecto de su tierra remota, que fuera también tierra remota de la otra malla con que se medirá el acoplamiento (malla 2) y midiendo respecto de esta tierra remota, la elevación de potencial de la malla 2. Luego la razón entre el voltaje medido en la malla 2 y la corriente que se ingresó para energizar la malla 1, corresponde a la resistencia mutua o de acoplamiento. Por lo tanto exige medir corriente en malla 1 y potencial en malla 2.

Existe un dilema entre mantener una separación de las mallas de tierra, o bien interconectarlas. La interconexión es por razones de seguridad; con el fin de evitar voltajes peligrosos (producto de diferencias de potencial entre mallas en el momento de circulación de corriente a tierra por una de ellas) o lograr una resistencia de puesta a tierra más baja para el conjunto.

3.5. Interconexión de mallas de tierras

La interconexión de dos o más mallas de tierra se analiza considerando los efectos mutuos respectivos y aplicando posteriormente el método de cálculo de resistencia de electrodos compuestos, para lo cual se supone a cada malla individual como un electrodo componente [33].

3.5.1. Método de cálculo aproximado de puestas a tierra interconectadas

El cálculo exacto de puestas a tierra interconectadas se puede efectuar siguiendo el mismo procedimiento utilizado para análisis de una sola, considerando los elementos de todas las puestas a tierra y los elementos de interconexión. A pesar de lo anterior, resulta conveniente y suficiente emplear métodos aproximados de cálculo más simples, que proporcionen una exactitud adecuada.

Una forma para calcular aproximadamente la resistencia de puestas a tierra interconectadas, es considerar a cada uno de los componentes que conforman la interconexión: puestas a tierra propiamente tales y cables de interconexión, como electrodos equivalentes. De este modo, conociendo la resistencia propia de cada uno y las resistencias mutuas entre ellos, se configura un sistema de ecuaciones similar al de una puesta a tierra simple. Entonces se analiza la interconexión de dos o más mallas de tierra considerando los efectos mutuos respectivos y aplicando el método de cálculo de resistencia de electrodos compuestos, para lo cual se supone a cada malla individual como un electrodo componente.

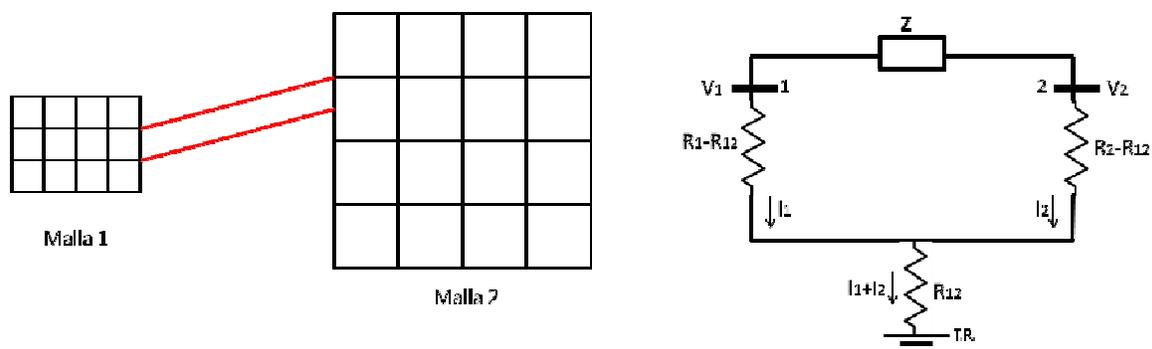


Figura 3.3: Interconexión de dos mallas de tierra

En la Figura 3.3 se muestran dos mallas interconectadas entre sí y su respectivo circuito equivalente; en este circuito:

- R_1 = resistencia de puesta a tierra de malla 1.
- R_2 = resistencia de puesta a tierra de malla 2.

- R_{12} = resistencia mutua entre mallas 1 y 2.
- Z = impedancia de cables de unión entre mallas o equivalente de todos los elementos de unión.

Es conveniente duplicar el conductor de unión de dos mallas, con el propósito de asegurar la conexión frente a daño mecánico o de otro tipo. Habitualmente se conoce R_1 , R_2 y Z ; la resistencia mutua entre mallas, R_{12} se estima por el método de la semiesfera equivalente. Este método, propuesto por Tagg, asigna a cada malla una semiesfera de radio tal, que tenga igual resistencia de puesta a tierra y la resistencia mutua resulta:

$$R_{12} = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot s} \quad (3.2)$$

Donde:

- ρ = resistividad del terreno, homogéneo.
- s = distancia entre los centros de las mallas de tierra o de sus semiesferas equivalentes.

Cuando se produzca una circulación de corriente al terreno, se considera la peor situación de corriente de falla I_F , con corrientes I_1 e I_2 difundidas respectivamente por las mallas 1 y 2, de esta manera se determina finalmente la resistencia equivalente del circuito de la Figura 3.3.

Se cumple:

$$I_F = I_1 + I_2 \quad (3.3)$$

$$V_1 = R_1 \cdot I_1 + R_{12} \cdot I_2 \quad (3.4)$$

$$V_2 = R_{12} \cdot I_1 + R_2 \cdot I_2 \quad (3.5)$$

$$V_1 = Z \cdot I_2 + V_2 \quad (3.6)$$

Conociendo la impedancia Z , se conforma un sistema consistente de ecuaciones para las corrientes y los voltajes por malla. Luego las corrientes por cada malla serán:

$$I_1 = I_F \cdot \frac{R_2 - R_{12} + Z}{R_1 + R_2 - 2R_{12} + Z} \quad (3.7)$$

$$I_2 = I_F \cdot \frac{R_1 - R_{12}}{R_1 + R_2 - 2R_{12} + Z} \quad (3.8)$$

Donde $I_F = I_1 + I_2$ es la corriente total de falla y $V_M = R \cdot I_F$ la elevación de voltaje de ambas mallas. Si la impedancia de los componentes de interconexión es muy pequeña ($Z \approx 0$), se acepta que $V_1 = V_2$ y se obtiene como resultante la expresión similar a un electrodo compuesto:

$$R = \frac{R_1 \cdot R_2 - R_{12}^2}{R_1 + R_2 - 2 \cdot R_{12}} \quad (3.9)$$

La distancia de separación entre dos mallas que se interconectan tiene una relación directa en la resistencia mutua R_{12} entre ambas. Cuando las mallas interconectadas están lo suficientemente alejadas, este efecto mutuo desaparece y la interconexión provoca la combinación paralela de ambas mallas, lo que conlleva una reducción significativa del valor final de resistencia de puesta a tierra. En cambio si las mallas están próximas, traslapando sus zonas de influencia, la interconexión externa al terreno es ineficiente, pues el valor final de resistencia no será significativamente menor. En este caso, la unión de las mallas con conductores enterrados, formando una sola malla, aparece en general como una solución más atractiva. El valor final de resistencia de puesta a tierra en este caso debe evaluarse empleando las expresiones de Laurent o Schwarz [33].

3.5.2. Efectos sobre el sistema

Considerando la interconexión de mallas o la unión con conductor enterrado, la corriente de falla total en cada instalación aumenta, debido a la reducción de la resistencia de puesta a tierra final. Por otro lado, esta corriente de falla circulará por ambas mallas, según la proporción definida por las expresiones anteriores, y las condiciones de seguridad en esta nueva situación no necesariamente serán más riesgosas que antes. Otro punto a tener en cuenta es que esta nueva corriente de falla circula también por algún alimentador, por lo que será más exigido, trayendo como consecuencia la obligación a revisar la calibración de las respectivas protecciones para que operen adecuadamente y la capacidad de corriente de falla del mismo alimentador.

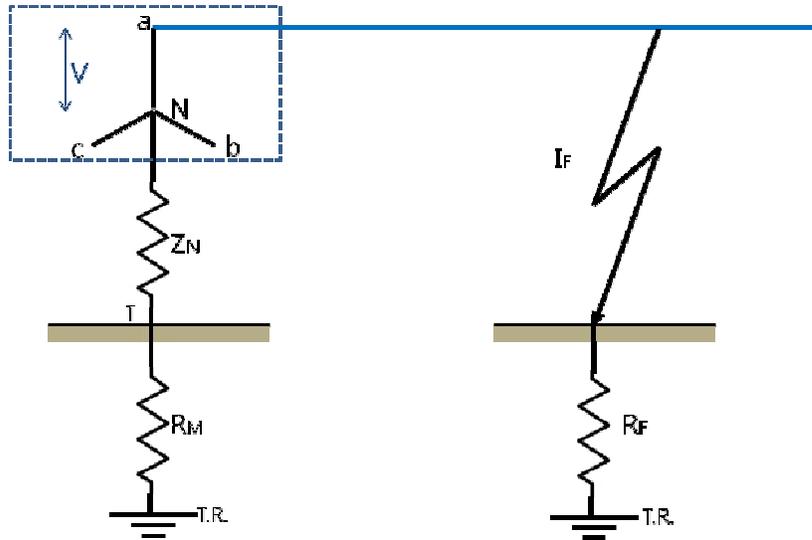


Figura 3.4: Circuito de corriente de falla monofásica a tierra

Definiendo Z_0 , Z_1 y Z_2 como las impedancias de secuencia cero, positiva y negativa respectivamente, vistas desde el punto de falla, entonces la corriente de falla queda definida por la expresión:

$$I_F = \frac{3\dot{V}}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3 \cdot (Z_N + R_F + R_M)} \quad (3.10)$$

Los voltajes entre las fases sanas y tierra en esta contingencia son:

$$\dot{V}_{b,c} = -\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \dot{V} \cdot \frac{\sqrt{3}(Z_0 + 3Z_T) \pm j(Z_0 + 2Z_2 + 3Z_T)}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3Z_T} \quad (3.11)$$

Donde Z_T representa la impedancia total del camino de tierra (ver Figura 3.4):

$$Z_T = Z_N + R_F + R_M \quad (3.12)$$

A partir de estas expresiones, si se reduce el valor de R_M aumenta I_F y modifica también los voltajes generados en las fases sanas, aún cuando su incidencia en este caso es de menor relevancia.

El comportamiento general descrito anteriormente es completamente diferente cuando la falla no es remota, sino que la corriente de falla entra y deja el terreno por dos puestas a tierra relativamente cercanas. En este caso aparecen distorsiones que deben ser estudiadas necesariamente sin seguir el comportamiento anterior.

CAPÍTULO 4

Resistencia de neutro a tierra

4.1. Técnicas de conexión de neutro a tierra

Las clasificaciones comunes de las puestas a tierra que se encuentran en sistemas de potencia industriales son los "sin conexión a tierra", "con neutro rígido a tierra", y "con resistencia de neutro a tierra", a pesar de que también existen variaciones de estos métodos [22]. Aunque esta memoria trata de la conexión a tierra de alta resistencia, las características de los tres sistemas se describirán brevemente donde el sistema de puesta a tierra con alta resistencia de neutro a tierra puede presentar algunas de las características de los otros dos sistemas.

4.1.1. Sistema sin conexión a tierra

En los sistemas sin conexión a tierra, no hay una conexión intencional entre ninguna parte del sistema eléctrico y la tierra. Sin embargo, el término sin conexión a tierra es un nombre inapropiado, ya que en realidad cada línea de la red se acopla a tierra a través de una inherente capacitancia a cada fase de los cables, líneas de transmisión, bobinas de transformadores, y las bobinas de motor. La Figura 4.1 es una representación simplificada de un sistema sin conexión a tierra, donde se ilustra el acoplamiento capacitivo a tierra. Las ventajas de este tipo de sistema es que la primera falla entre un conductor de línea y la tierra no produce interrupción del circuito, por lo tanto no hay pérdida de energía que pueda interrumpir los procesos de tipo continuo. Sin embargo, el acoplamiento capacitivo puede provocar el riesgo de que el sistema presente sobretensiones peligrosas por fallas a tierra intermitentes y efectos de resonancia debido a fallas a tierra a través de reactancias altamente inductivas. De este modo, los sistemas sin conexión a tierra son generalmente susceptibles a fallas de aislamiento.

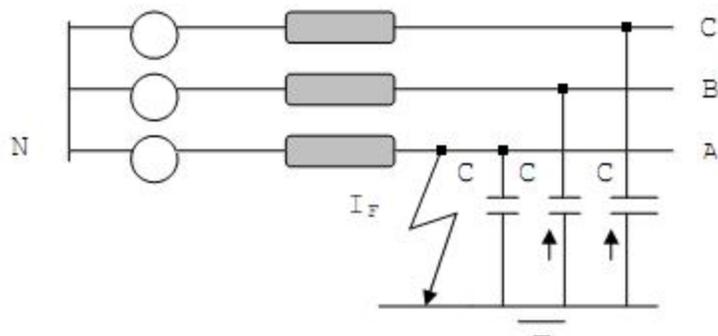


Figura 4.1: Sistema sin conexión a tierra

4.1.2. Sistema de neutro rígido a tierra

El punto neutro está conectado directamente a tierra mediante un conductor. Una falla Fase-Tierra provoca una gran intensidad de corriente, que puede ser fácilmente detectada por los circuitos de protección y se aísla rápidamente. Sin embargo, puesto que no hay impedancia intencional en la conexión del neutro, las corrientes de falla a tierra son muy altas, y pueden ser capaces de causar la explosión de los encapsulados de protección, iniciar incendios y causar riesgos de contorneos de la aislación. El control de sobretensión es una de las principales ventajas de este sistema, porque el neutro del sistema está rígidamente referenciado a la tierra. En la Figura 4.2 se representa este sistema.

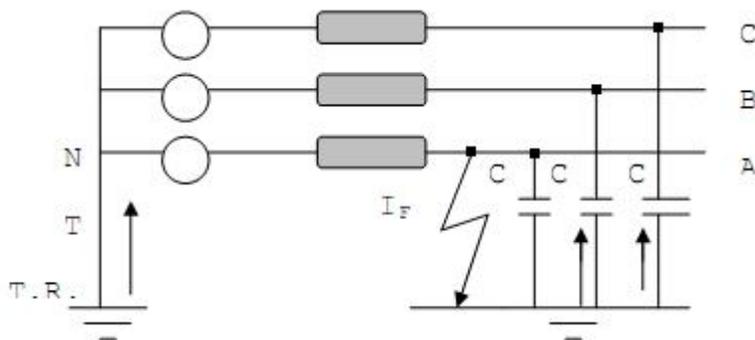


Figura 4.2: Sistema con neutro rígido a tierra

4.1.3. Resistencia de neutro a tierra

El sistema de resistencia de neutro a tierra puede considerarse como un compromiso entre los sistemas sin conexión a tierra y los de neutro rígido a tierra. Este sistema se establece mediante la inserción de una resistencia entre el neutro del sistema y la tierra. Por lo tanto, la corriente máxima de falla a tierra es controlada por el valor óhmico de la resistencia, siempre

que la resistencia efectiva sea significativamente mayor que la componente de impedancia capacitiva del sistema. En la Figura 4.3 hay una representación simplificada de un sistema de resistencia a tierra. Esta falla de menor corriente requiere de un relé de protección adicional, pero prácticamente se eliminan los arcos eléctricos y peligros de descargas por contorneo (*flashover*), al tiempo que limita la amplitud de las sobretensiones.

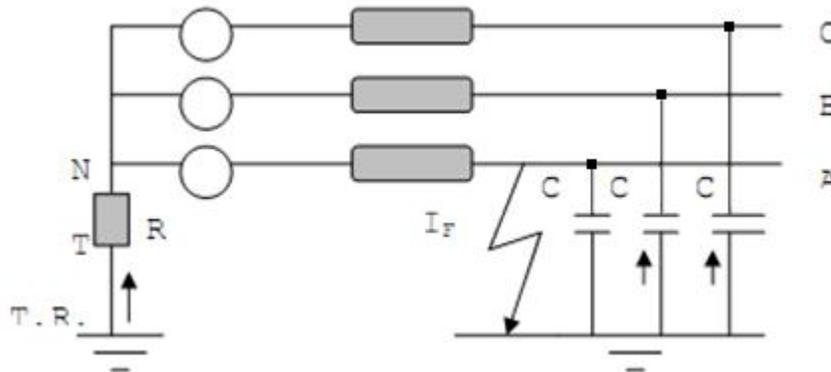


Figura 4.3: Sistema con resistencia de neutro a tierra

4.2. Características de Sistemas con resistencia de neutro a tierra

Cuando están correctamente instalados, los sistemas de resistencia a tierra pueden proporcionar muchos beneficios en comparación con otros tipos de sistemas de puesta a tierra. En general, se caracterizan por proveer:

- Bajo estrés mecánico en los dispositivos en los que circula la corriente de falla a tierra.
- Bajos efectos de combustión y fusión en los equipos que participan en la falla eléctrica.
- Bajo riesgo de descarga eléctrica al personal causado por la corriente de falla a tierra en el retorno por tierra.
- Bajo riesgo de arcos o "flash" para el personal que pueda estar en las proximidades de una falla a tierra.
- Control de las sobretensiones transitorias.
- Baja pendiente de la tensión durante fallas a tierra.

Aunque no existen normas para definir la resistencia de puesta a tierra, por lo general se dividen en dos tipos: conexión a tierra de baja resistencia y puesta a tierra de alta resistencia. El primero permite corrientes de falla a tierra de 100 A o más, con valores típicos de 200 a 1000 A. El segundo tipo, típicamente limita la corriente de falla a tierra a 10 A o menos, aunque hay sistemas de clase 15 kV que tienen mayores corrientes de falla a tierra. Ambos tipos de sistemas deben ser diseñados para limitar sobretensiones transitorias a menos de 250% de la nominal [22].

La inserción de una resistencia de alto valor óhmico puede aplicarse cuando la interrupción inmediata del servicio, en la primera falla a tierra, se puede evitar. Sin embargo, esto no es aplicable en la industria minera porque la protección por falla a tierra tiene que operar instantáneamente, o después de un breve lapso de tiempo cuando la coordinación del relé sea necesaria. En cambio, la conexión a tierra por una alta resistencia se requiere en las minas subterráneas, debido a que limita la cantidad de energía disipada y controla la elevación del potencial de las carcasas, durante una falla a tierra.

La práctica estándar requiere que la conexión a tierra de alta resistencia se diseñe de manera que la corriente de carga capacitiva del sistema sea menor o igual a la corriente que fluye por la resistencia bajo una condición de falla a tierra. La intención de esta práctica es evitar que el sistema desarrolle algunas de las características no deseables presentes en los sistemas sin conexión a tierra mencionadas anteriormente. En la Figura 4.3 se muestra un sistema de alta resistencia a tierra y, si se considera que el valor óhmico de dicha resistencia tiende a infinito, el sistema tiende a operar como un sistema sin conexión a tierra.

4.2.1. Criterio de diseño básico

Uno de los criterios para un diseño adecuado de la resistencia del sistema a tierra es considerar $R_0 \leq X_{C0}$, donde R_0 es la resistencia por fase de secuencia cero del sistema y X_{C0} es la reactancia capacitiva distribuida por fase del sistema a tierra. Es más práctico considerar en los sistemas de potencia que la resistencia de secuencia cero es solamente la resistencia de puesta a tierra del neutro, entonces para un sistema con resistencia de neutro alta, se requiere que $R_N \leq \frac{1}{3} X_{C0}$, donde R_N es el valor óhmico de la resistencia de puesta a tierra del neutro (en adelante NGR).

En caso de una falla Fase-Tierra en la fase A como se indica en la Figura 4.4:

$$\text{Corriente de Carga} = |I_{\text{Cap-B}} + I_{\text{Cap-C}}| = \left| \frac{E_{LL}}{X_{C0}} + \frac{E_{LL} \angle 120^\circ}{X_{C0}} \right| = \sqrt{3} \cdot \frac{E_{LL}}{X_{C0}} = 3I_{C0} \quad (4.1)$$

Donde

- $I_{\text{Cap-B}}$: Corriente capacitiva de la fase B.
- $I_{\text{Cap-C}}$: Corriente capacitiva de la fase C.
- E_{LL} : Voltaje Fase-Fase de las líneas.
- E_{LG} : Voltaje Fase-Tierra de las líneas.
- X_{C0} : Reactancia capacitiva (50Hz) de Fase-Tierra.
- I_{C0} : Corriente de descarga.

En el caso de una falla Fase-Tierra, la componente resistiva de la falla debe ser mayor que la componente capacitiva, luego:

$$I_{\text{R}} > 3 \cdot I_{\text{C0}} \quad (4.2)$$

Utilizando la ley de Ohm:

$$I_{\text{R}} = \frac{E_{\text{LT}}}{R_{\text{N}}} \quad (4.3)$$

Donde R_{N} es la resistencia de neutro a tierra. Escribiendo la ecuación (4.1) respecto a la tensión Fase-Tierra:

$$3 \cdot I_{\text{C0}} = \frac{E_{\text{LT}}}{\left(\frac{X_{\text{C0}}}{3}\right)} \quad (4.4)$$

Finalmente reemplazando en (4.2) las identidades de (4.3) y (4.4), se tiene una expresión para conocer el valor de la resistencia de neutro a tierra:

$$R_{\text{N}} > \frac{X_{\text{C0}}}{3} \quad (4.5)$$

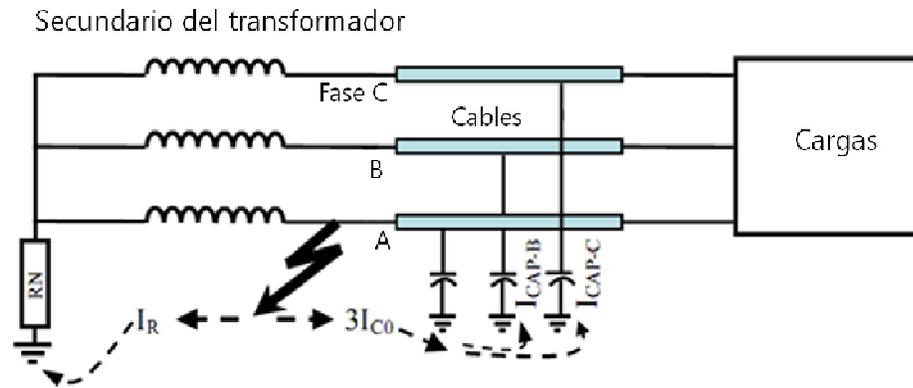


Figura 4.4: Corrientes de falla Fase-Tierra para el caso de que la falla ocurre en la fase A

4.2.2. Problemas del diseño básico

Los sistemas que no cumplen con la definición de la NGR de alta resistencia experimentan los problemas que generalmente son característicos de los sistemas sin conexión a tierra. En primer lugar, aunque muchas referencias mencionan a la corriente que pasa por la NGR como la corriente de falla a tierra, hay que reconocer que las dos son diferentes. A pesar que la resistencia de puesta a tierra del neutro ayuda a controlar la corriente de falla a tierra, será mayor la corriente que fluye por la NGR debido a la capacitancia distribuida del sistema. Adicionalmente, dependiendo de los valores de R_N y X_{C0} , la corriente de falla a tierra puede ser mayor que la de la resistencia de puesta a tierra del neutro. En segundo lugar, la selectividad de los relés de protección se puede perder a causa de la corriente de secuencia cero en las ramas que no presentan fallas, debido a que la corriente de carga capacitiva puede superar el nivel de corriente (*pickup*) establecido en los relés de protección de dichas rama. Estos sistemas son propensos a problemas de sobretensión debido a fallas a tierra por arcos, o de una falla provocada por una inductancia cuya reactancia es similar a la capacitancia distribuida del sistema.

La industria de la minería del carbón subterránea ha utilizado NGR de alta resistencia por muchos años debido a los beneficios mencionados anteriormente. Con respecto a los sistemas subterráneos de distribución de alta tensión, la resistencia de puesta a tierra del neutro debe ser de un valor óhmico adecuado para limitar la caída de tensión en el circuito de tierra (sin considerar la NGR en el circuito) a un valor no mayor que 100 V [22]. En la práctica, este requisito se suele cumplir limitando la corriente de la resistencia de puesta a tierra de neutro a 25 A y que el ajuste de activación (*pickup*) de falla sea el 40% de este límite (es decir, 10A). Los sistemas de tajos largos o *longwall* de alta tensión de 2400 V o menos deben tener una NGR que limite la corriente del neutro a no más de 6,5 A, mientras que los sistemas tajos largos de alta tensión de más de 2400 V deben tener un límite de no más de 3,75 A. Además, los motores de alta tensión

y circuitos de las esquiladoras (*shearer*) deben contar con protecciones de falla a tierra instantánea, cuya configuración no supere los 125 mA. A la protección de falla a tierra del centro de poder se le permite tener un retardo de 0,25 s, tiempo para permitir la coordinación con la protección en la unidad de partida del motor. El máximo pickup de ajuste para el relé del centro de potencia es de 40% de la corriente límite de la NGR.

Los cables presentes en el sistema eléctrico de la mina tienen una capacitancia intrínseca, y que forma parte de la capacitancia distribuida del sistema. Los cables apantallados (*shielded*) tienen una capacitancia significativamente mayor que los cables no blindados, en que los primeros son requeridos para aplicaciones de alta tensión en la industria minera. De esta manera, con tramos largos de cable para tensiones de 4160 V, los efectos de la capacitancia del sistema son muy pronunciados. La referencia [27] muestra que, con una tensión típica de 4160 V en un sistema de tajos largos, la magnitud de la corriente de carga supera significativamente la magnitud de la corriente de la NGR (aproximadamente de siete veces) en situaciones de falla a tierra. Estas corrientes capacitivas pueden causar un error de disparo en circuitos que no participen en la falla, comprometiendo selectividad de los relés de falla a tierra.

En el punto 4.3 siguiente, se revisarán los efectos de la capacitancia distribuida tanto en los sistemas de distribución de alta tensión y sistemas de tajos largos. Posteriormente, se indicarán los procedimientos para la determinación de la capacitancia del sistema, el tamaño de la NGR, y el ajuste del pickup de los relés.

4.3. Efectos de la capacidad distribuida

La Figura 4.5 ilustra una falla Fase-Tierra de un sistema trifásico modelado como un circuito pi-equivalente. En esta Figura, " $R_L + jX_L$ " es la resistencia y la reactancia inductiva de la línea, " $-X_{C0} / 2$ " es la mitad de la reactancia de la capacitiva por fase, y R_N es la resistencia de la NGR.

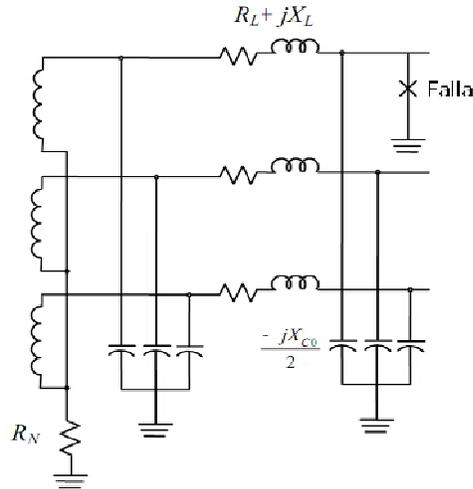


Figura 4.5: Modelo de un sistema trifásico con una falla Fase-Tierra

Para los casos en los que la resistencia de la NGR es grande y la impedancia en serie de la línea se desprecia, el sistema de la Figura 4.5 se puede aproximar por el sistema de la Figura 4.6. De este esquema, se ve que la corriente de falla fluye de nuevo a la fuente a través de la capacidad distribuida del sistema, así como por la resistencia de puesta a tierra del neutro. En los casos en que se cumpla con la definición de puesta a tierra de alta resistencia, es decir, $R_N > \frac{1}{3} X_{C0}$, fluye más corriente a través de la capacitancia distribuida del sistema que por la NGR y el sistema comienza a adquirir las características de un sistema sin conexión a tierra.

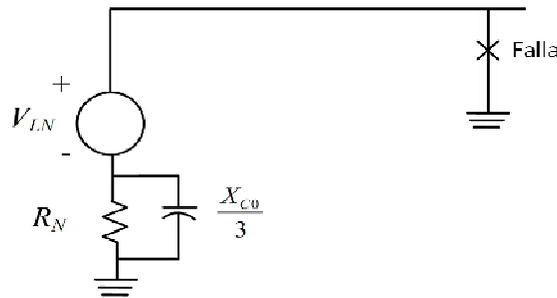


Figura 4.6: Circuito simplificado de una falla Fase-Tierra

Los problemas asociados con los sistemas de la minería en los que la definición de la conexión a tierra de alta resistencia no se cumple, han sido documentados previamente para los sistemas de tajos largos de alta tensión [26] y los sistemas subterráneos de distribución de alta tensión [27]. Un breve resumen de los resultados se proporciona a continuación.

Considerando un típico sistema de tajos largos tipo *inby* (*inby* se refiere a equipos y sistemas que se encuentran cerca de la zona de trabajo, en cambio *outby* se refiere a que se encuentran lejos de la zona de trabajo, específicamente en la entrada de la mina o de un pozo)

de 2.400 V que tiene un centro de poder de 5 MVA con dos cables apantallados en paralelo de calibre 500 MCM y de 250 m de largo, que conectan el centro de potencia con la compuerta de la unidad de partida del motor y el controlador que se encuentra en la cara frontal de la compuerta (ver Figura 4.7). Cables incluidos en este equipo son:

- 370 m de 2/0 AWG al motor de la esquiladora.
- 370 m de 2/0 AWG al motor trasero.
- 15 m de 2/0 AWG al motor frontal 1.
- 15 m de 2/0 AWG al motor frontal 2.
- 15 m de 2 AWG al motor de correa transportadora 1.
- 15 m de 2 AWG al motor de correa transportadora 2.
- 15 m de 2 AWG al molino.

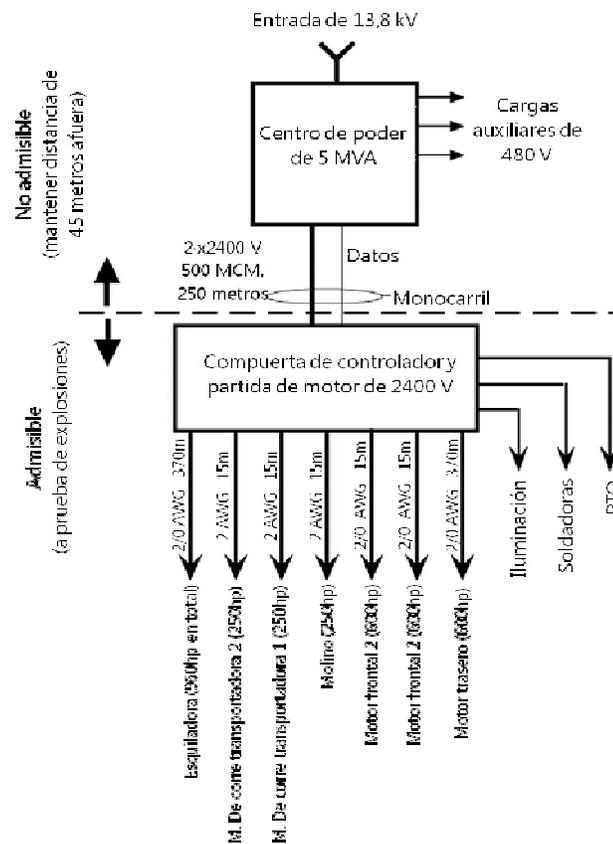


Figura 4.7: Disposición general de un sistema de potencia de tajos largos tipo inby de 2400 V

Las simulaciones en Spice¹ de este sistema reportadas en [26] indican el tamaño de la NGR, para que cumpla con el límite de 6,5 A de la corriente de falla a tierra, produce un sistema que opera bien dentro de los límites de un sistema de puesta a tierra de alta resistencia.

Sin embargo, las simulaciones mostraron que el sistema es propenso a la pérdida de la selectividad de los relés debido a la capacitancia distribuida de los cables. Por ejemplo, las simulaciones de Spice para una falla Fase-Tierra rígida, en las terminales de salida del centro de poder han indicado que aproximadamente un valor de 344 mA para la corriente de secuencia cero que fluye en los cables de la esquiladora y el motor trasero. Debido a que cada uno de estos debe disparar instantáneamente a 125 mA, cada uno de estos circuitos dispararía por error antes de que el relé en el centro de potencia despeje la falla. Por lo tanto, en este caso, los avisos (*flag*) de disparo se indicarán en tres lugares diferentes.

Para un sistema de tajos largos de 4160 V, los problemas con la capacitancia son más pronunciados. Como ejemplo, en la Figura 4.8 se considera un sistema de tajos largos tipo outby de 4160 V de 5 MVA, en que el centro de potencia y la unidad de partida del motor se encuentran fuera de la faena (es decir, al menos 45.7 metros de distancia). Para este sistema, los cables típicos incluidos son:

- 610 m de 1 AWG al motor de la esquiladora.
- 370 m de 4 AWG al motor de correa transportadora 1.
- 370 m de 4 AWG al motor de correa transportadora 2.
- 370 m de 4 AWG al molino.
- 370 m de 1 AWG al motor frontal 1.
- 370 m de 1 AWG al motor frontal 2.
- 610 m de 1 AWG al motor trasero.

¹ El programa SPICE, acrónimo inglés de *Simulation Program with Integrated Circuits Emphasis* (Programa de simulación con énfasis en circuitos integrados) es un estándar internacional cuyo objetivo es simular circuitos electrónicos analógicos compuestos por resistencias, condensadores, diodos, transistores, etc. Para ello hay que describir los componentes, describir el circuito y luego elegir el tipo de simulación (temporal, en frecuencia, en continua, paramétrico, Montecarlo, etc.).

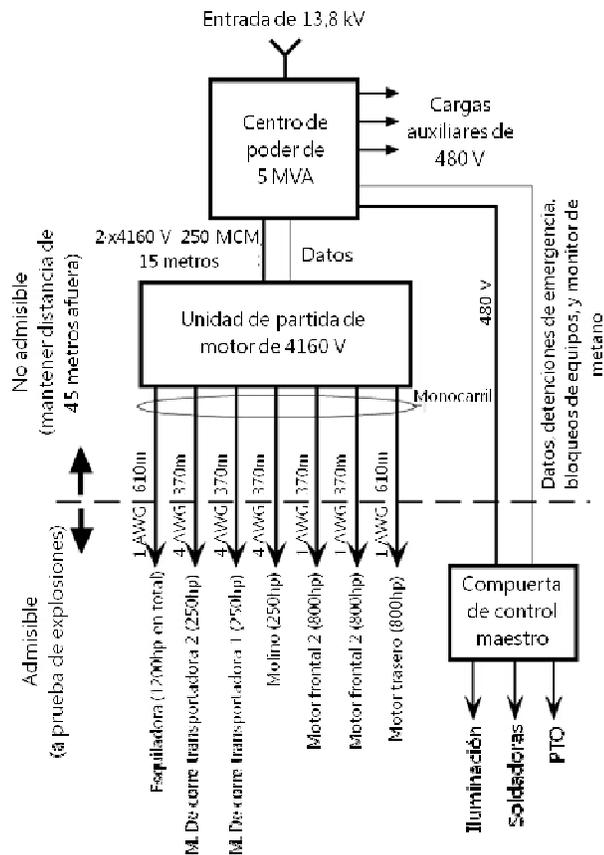


Figura 4.8: Disposición general de un sistema de potencia de tajos largos tipo outby de 4160 V

Las simulaciones de Spice de este sistema reportadas en [26] indican que el límite de 3,75 A para la corriente de la NGR, da como resultado que dicha corriente es de un valor muy cercano al de la corriente de carga capacitiva, que justamente responde a la definición de una alta resistencia a tierra del sistema. Sin embargo, las simulaciones que investigaban la selectividad de los relés mostraron que una falla en los terminales de salida del centro de potencia produce corrientes de secuencia cero por encima de los 125 mA, que corresponde a la configuración de disparo instantáneo en todos los circuitos de salida. Por lo tanto, todas las salidas estarían indicando avisos de disparo.

Las simulaciones de un sistema de distribución de una gran mina, realizadas y reportadas en [27], se llevan a cabo en dos secciones continuas de la mina. Estas indicaron que los problemas de selectividad del relé y la sobretensión se deben a la capacitancia distribuida del sistema. La configuración del sistema simulado consistió de un cable dentro de un tubo de pozo de 259 m de largo y de calibre 500 MCM, y un cable alimentador con un largo de 22.921 m, 4/0 de calibre y operando a 12,47 kV, con una NGR que limita la corriente a 25 A y un pickup fijado en 10 A. Las simulaciones de Spice de una falla Fase-Tierra revelaron que la corriente de falla a tierra del sistema de distribución de la mina puede ser casi tres veces el límite de corriente en la de resistencia de neutro a tierra. Además, para una condición de falla con resonancia en la que la

reactancia inductiva de falla es igual a la reactancia capacitiva del sistema, las simulaciones muestran que las sobretensiones podrían ser aproximadamente tres veces la tensión Fase-Tierra nominal. También hubo numerosas situaciones en las que se pierde la selectividad de relé con un ajuste del pickup de 10 A.

4.4. Procedimientos recomendados

4.4.1. Tamaño de la NGR y configuración del pickup

Las recomendaciones que aquí se presentan han sido desarrolladas en base a resultados de simulaciones en Spice para fallas a tierra de un sistema de distribución de alta tensión y un sistema de potencia de una mina de tajos largos realizadas en la referencia [38]. Sin embargo, estas recomendaciones no requieren de ningún software especializado o análisis detallado. Por otra parte, los posibles problemas de la pérdida de la selectividad de los relés serán examinados.

En base a resultados investigados, el tamaño de la resistencia a tierra debe cumplir con la definición de sistema a tierra de alta resistencia con el fin de lograr todos los beneficios de un sistema de resistencia de neutro a tierra que se presentaron en el comienzo del capítulo. Aunque no sea posible eliminar por completo los problemas de selectividad del relé debido al deseo de tener los ajustes de pickup lo suficientemente bajos para detectar los arcos por fallas a tierra mínimos, la configuración del pickup debe ser seleccionada con la consideración de selectividad también.

Como ya se mencionó anteriormente, es recomendable que el valor de la NGR, denominada R_N , cumple con:

$$R_N \leq \frac{|X_{C0}|}{3} \quad (4.6)$$

Donde X_{C0} es la reactancia capacitiva distribuida por fase del sistema a tierra.

Debido a que todos los cables del sistema de distribución y el sistema de tajos largos de alta tensión deben estar protegidos, la determinación de la capacidad del sistema distribuido es directa. Los valores pueden ser obtenidos del fabricante, o pueden determinarse a partir de la siguiente relación [38]:

$$C = \frac{7,354 \cdot \epsilon}{\log_{10} \left(1 + \frac{2t}{d_{BA}} \right)} \frac{\text{pF}}{\text{ft}} = \frac{7,354 \cdot \epsilon}{\log_{10} \left(\frac{d_{SA}}{d_{BA}} \right)} \frac{\text{pF}}{\text{ft}} = \frac{24,127 \cdot \epsilon}{\log_{10} \left(\frac{d_{SA}}{d_{BA}} \right)} \frac{\text{pF}}{\text{m}} \quad (4.7)$$

Donde:

- ϵ = Constante dieléctrica de la aislación.
- t = Espesor de la aislación del conductor.
- d_{BA} = Diámetro bajo la aislación (en pulgadas si se quiere en pF/ft, o milímetros para el caso pF/m).
- d_{SA} = Diámetro sobre la aislación (en pulgadas si se quiere en pF/ft, o milímetros para el caso pF/m).

Los valores típicos para el ϵ , espesor de la aislación, y el diámetro bajo la aislación se pueden obtener de los fabricantes de cables. En ausencia de información específica, los valores que se dan a conocer en la Tabla 4.1 para cables MP-GC (acrónimo inglés de Mine Power Feeder with Ground-Check, en español Alimentador de poder con hilo piloto) y en la Tabla 4.2 para cables SHD-GC (acrónimo inglés de Shielded Round Portable with Ground-Check, en español portable con apantallado con hilo piloto).

Calibre del Conductor	Voltaje	d_{BA}		d_{SA}		Capacitancia	
	KV	in	mm	in	mm	pF/ft	pF/m
2/0 AWG	8	0,45	11,4	0,695	17,7	124,7	38,009
4/0 AWG	8	0,555	14,1	0,8	20,3	148,2	45,171
350 MCM	8	0,701	17,8	0,946	24,0	180,8	55,108
500 MCM	8	0,828	21,0	1,073	27,3	209,1	63,734
2/0 AWG	15	0,45	11,4	0,81	20,6	92,2	28,103
4/0 AWG	15	0,555	14,1	0,915	23,2	109,4	33,345
350 MCM	15	0,701	17,8	1,06	26,9	131	39,929
500 MCM	15	0,828	21,0	1,189	30,2	149,7	45,629

Tabla 4.1: Valores típicos de la capacitancia para cables MP-GC ($\epsilon = 3,2$)

Calibre del Conductor	Voltaje	d _{BA}		d _{SA}		Capacitancia	
	KV	in	mm	in	mm	pF/ft	pF/m
4 AWG	5	0,305	7,7	0,53	13,5	98,1	29,901
2 AWG	5	0,321	8,2	0,61	15,5	84,4	25,725
1 AWG	5	0,396	10,1	0,64	16,3	112,9	34,412
1/0 AWG	5	0,455	11,6	0,68	17,3	134,9	41,118
2/0 AWG	5	0,51	13,0	0,735	18,7	148,3	45,202
4/0 AWG	5	0,625	15,9	0,85	21,6	176,2	53,706
250 MCM	5	0,651	16,5	0,9	22,9	167,3	50,993
350 MCM	5	0,784	19,9	1,05	26,7	185,5	56,540
500 MCM	5	0,902	22,9	1,165	29,6	211,8	64,557
1/0 AWG	8	0,455	11,6	0,77	19,6	103	31,394
2/0 AWG	8	0,51	13,0	0,83	21,1	111,3	33,924
4/0 AWG	8	0,625	15,9	0,935	23,7	134,5	40,996
250 MCM	8	0,651	16,5	0,985	25,0	130,8	39,868
350 MCM	8	0,805	20,4	1,125	28,6	161,9	49,347
500 MCM	8	0,95	24,1	1,27	32,3	186,6	56,876
1/0 AWG	15	0,455	11,6	0,9	22,9	79,4	24,201
2/0 AWG	15	0,5	12,7	0,93	23,6	87,3	26,609
4/0 AWG	15	0,625	15,9	1,075	27,3	99,9	30,450
250 MCM	15	0,68	17,3	1,112	28,2	110,2	33,589
350 MCM	15	0,8	20,3	1,23	31,2	126	38,405
500 MCM	15	0,95	24,1	1,36	34,5	151	46,025

Tabla 4.2: Valores típicos de la capacitancia para cables SHD-GC ($\epsilon = 3,2$)

Se recomienda que el ajuste del pickup se fije en el 40% del límite de corriente de la NGR. Este nivel de pickup se ha utilizado en la industria minera con éxito durante décadas, y no se ha encontrado ninguna razón de peso para recomendar un nivel diferente. Notar que esto se refiere a los sistemas de distribución de alta tensión, así como los sistemas de tajos largos de alto voltaje.

Los problemas de selectividad del relé se pueden determinar fácilmente a partir de estas recomendaciones. La ecuación (4.8) se puede utilizar para estimar el nivel de corriente de carga capacitiva que circulará en una rama sin falla (rama sana) durante una falla Fase-Tierra [38]:

$$3I_{A0} \cong \left| \frac{V_{LL}}{\sqrt{3} \cdot \frac{X_{Co(rama)}}{3}} \right| = \left| \frac{\sqrt{3} \cdot V_{LL}}{X_{Co(rama)}} \right| \quad (4.8)$$

Donde, X_{C0} (rama) es la reactancia capacitiva por fase de la rama sana de interés.

Al aplicar esta relación, es importante reconocer que es aplicable a los sistemas de distribución radial, y que la rama sana se refiere a las partes del sistema que están en paralelo a la rama que presenta la falla, o al lado de la carga de la falla.

También es posible estimar la corriente de falla a tierra máxima que circulará durante una falla Fase-Tierra, considerando el circuito de la Figura 4.6:

$$I_F \approx \frac{V_{LL}}{\sqrt{3} \cdot \left(\frac{1}{R_N} + \frac{1}{-jX_{C0}/3} \right)^{-1}} \quad (4.9)$$

4.4.2. Ejemplo de distribución de una mina

La Figura 4.9 muestra el diagrama unilíneal de la mina usado para ilustrar las recomendaciones. En este sistema, sólo las cargas más importantes han sido incluidas. Además, las cargas se representan como la suma de máquinas o motores individuales.

Este sistema se compone de cables de pozo tipo MP-GC de 259 m de largo y calibre 500 MCM, y para el resto del sistema de distribución se usa cable tipo MP-GC de 22,920 m de largo y de calibre 4/0. Usando la lista de capacitancias de la Tabla 4.1, la reactancia capacitiva total por fase total distribuida del sistema es:

$$C = 45,629 \cdot 10^{-12} \cdot 259 + 33,345 \cdot 10^{-12} \cdot 22920 = 8,36 \mu\text{F} \quad (4.10)$$

$$X_{C0} = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi(50) \cdot 8,36 \cdot 10^{-6}} = 380,8 \Omega \quad (4.11)$$

La resistencia de la NGR no debe exceder:

$$R_N = \frac{380,8}{3} \approx 127 \Omega \quad (4.12)$$

La corriente por la resistencia de neutro a tierra se estima como:

$$I_N = \frac{12470}{\sqrt{3} \cdot 127} = 56,7 \text{ A} \quad (4.13)$$

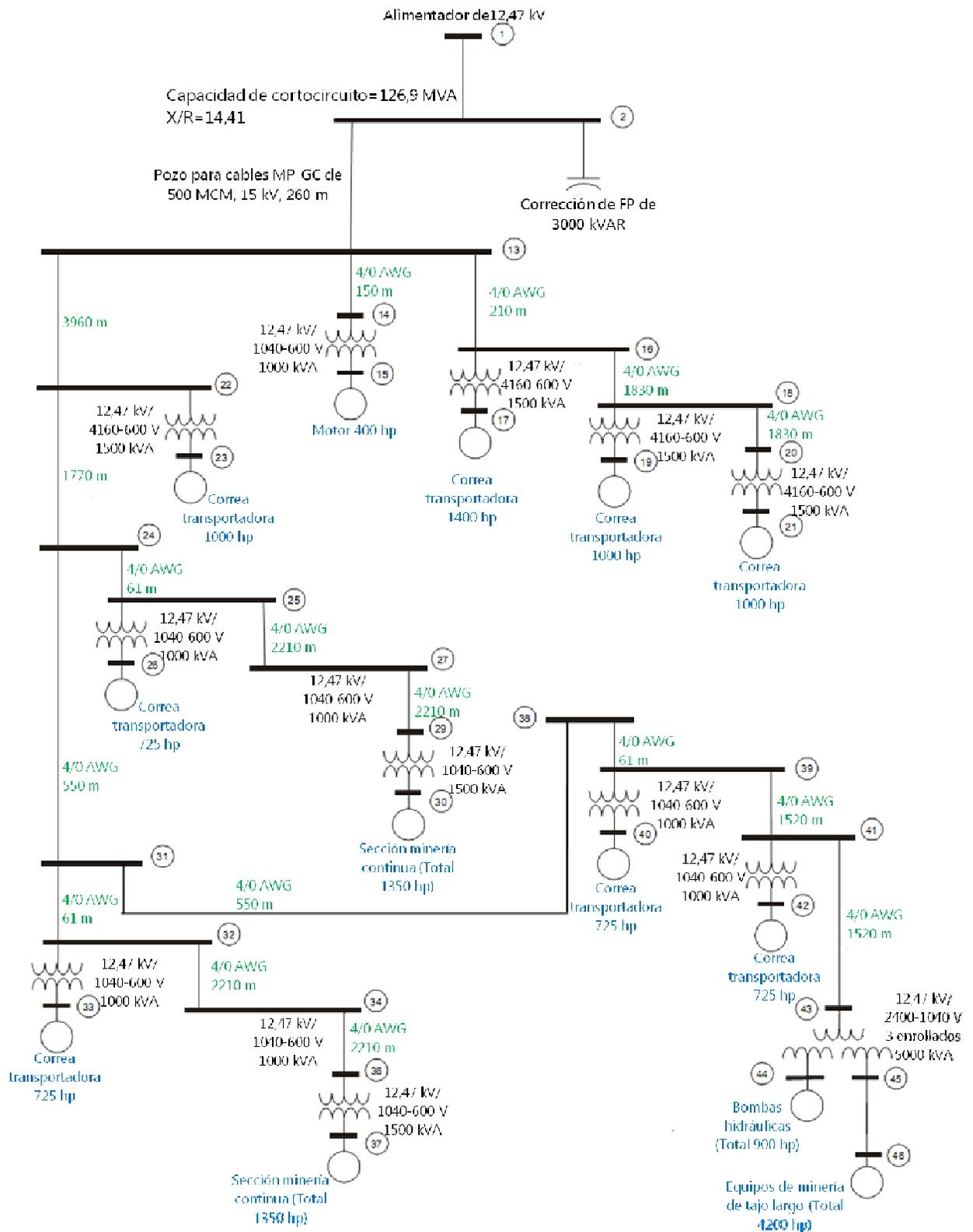


Figura 4.9: Ejemplo de diagrama unilíneal del sistema distribución de alto voltaje de una mina subterránea

El valor del pickup debe ser:

$$I_{\text{Pickup}} = 0,4 \cdot 56,7 \approx 23 \text{ A} \quad (4.14)$$

Con este valor óhmico de la resistencia de neutro a tierra, debe haber un buen control de las sobretensiones debidas a fallas por arco a tierra, o fallas a través de una reactancia inductiva cerca o dentro del sistema de reactancia capacitiva. El ajuste del pickup es de 23 A que proporcionará la selectividad del relé para todas las situaciones en las que la corriente de carga de cualquier rama sana sea menor a 23 A.

Para este diseño, la corriente de falla a tierra máxima se estima en:

$$I_F = \frac{12470}{\sqrt{3} \cdot \left(\frac{1}{127} + \frac{1}{-j380,8/3} \right)^{-1}} = 80,2 \text{ A} \quad (4.15)$$

También es apropiado tener en cuenta los problemas de selectividad del relé para este sistema. Revisando la Figura 4.9, se observa que los alimentadores conectados a la rama de 13-22 representan una gran parte del sistema de distribución que podría tener una gran corriente de carga, en que la coordinación del relé probablemente se pierda por fallas de Fase-Tierra en la rama de 13-14 o de cualquiera de los cables conectados a la rama 13-16. Sin embargo, esta situación no puede evitarse a menos que se seleccione un valor muy alto del pickup.

Para ilustrar esto, se considera una falla en la rama 13-14. La capacidad por fase para la parte del sistema conectada a la rama 13-16 y la corriente de secuencia cero resultante de esa rama se estima en:

$$C = 33,345 \cdot 10^{-12} \cdot 3871 = 1,39 \mu\text{F} \quad (4.16)$$

$$X_{C0(\text{rama } 13-16)} = \frac{1}{2\pi(50) \cdot 1,39 \cdot 10^{-6}} = 2289 \Omega \quad (4.17)$$

$$3 \cdot I_{A0(13-16)} \cong \left| \frac{\sqrt{3} \cdot V_{LL}}{X_{C0(\text{rama})}} \right| = \left| \frac{\sqrt{3} \cdot 12470}{1908} \right| = 9,417 \text{ A} \quad (4.18)$$

Realizando el mismo cálculo para la rama 13-22 se obtiene un valor estimado de:

$$3 \cdot I_{A0(13-22)} \cong 46 \text{ A} \quad (4.19)$$

Estas estimaciones indican que una falla en la rama 13-14 generará una corriente de secuencia cero de aproximadamente 46 A en la rama 13-22 y la selectividad del relé se perderá. Pese a lo anterior, no sería recomendable que el ajuste del pickup se eleve a un valor superior a 46 A, ya que puede crear una situación en la que la mínima falla de arco a tierra no pueda ser detectada.

Los resultados de la simulación Spice y sus detalles realizados en [38], indican que los valores estimados en (4.13), (4.14), (4.18) y (4.19) son buenas aproximaciones, validando estas ecuaciones.

4.4.3. Ejemplo de un sistema de mina de tajos largos de alto voltaje

Un sistema de tajos largos también puede ser utilizado para ilustrar la aplicación de las recomendaciones, el cual fue tomado de la referencia [38]. Considerando el sistema de tajos largos de 4160 V que se muestra en la Figura 4.10. Se trata de un sistema típico comúnmente usado para minas de tajos largos tipo outby de 4160 V en el que se mantiene la unidad de partida del motor a una distancia mínima

Para este sistema, la capacitancia por fase total se puede determinar cómo:

$$C = 34,412 \cdot 10^{-12} \cdot 1951 + 29,901 \cdot 10^{-12} \cdot 732 = 0,96 \mu\text{F} \quad (4.20)$$

La reactancia por fase es:

$$X_{C0} = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi(50) \cdot 0,96 \cdot 10^{-6}} \approx 3312 \Omega \quad (4.21)$$

La resistencia de la NGR no debe exceder:

$$R_N = \frac{3312}{3} = 1104 \Omega \quad (4.22)$$

La máxima corriente de falla a tierra se estimada en:

$$I_F = \frac{4160}{\sqrt{3} \cdot \left(\frac{1}{1104} + \frac{1}{-j3312/3} \right)^{-1}} = 3,08 \text{ A} \quad (4.23)$$

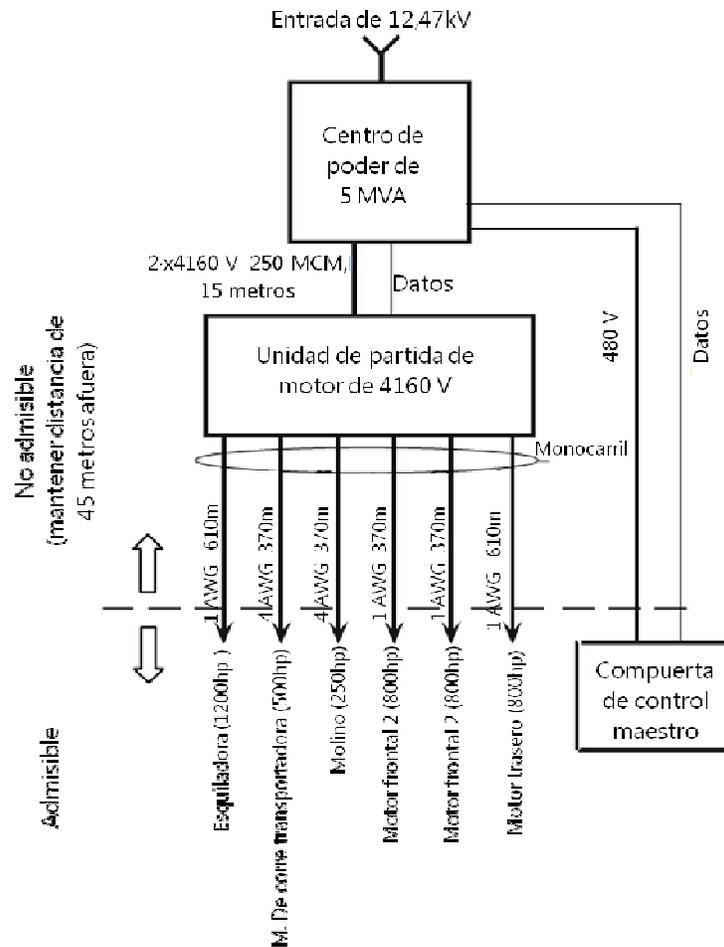


Figura 4.10: Diagrama típico de un sistema de potencia de tajos largos de 4160 V

La corriente de diseño de la resistencia de neutro a tierra será:

$$I_N = \frac{4160}{\sqrt{3} \cdot 1104} = 2,18 \text{ A} \quad (4.24)$$

El valor del pickup debe ser:

$$I_{\text{Pickup}} = 0,4 \cdot 2,6 = 0,872 \text{ A} \quad (4.25)$$

Acerca de los problemas de selectividad del relé, el valor recomendado del pickup es de 0,872 A. Considere una falla en los terminales de salida del transformador del centro de carga. Por esta situación, la corriente de carga para la capacitancia más alta de las ramas, es decir, el motor trasero o esquiladora, puede estimarse como:

$$3 \cdot I_{A0(\text{esquiladora})} \cong \left| \frac{\sqrt{3} \cdot V_{LL}}{X_{C0(\text{rama})}} \right| = \left| \frac{\sqrt{3} \cdot 4160}{-11750} \right| = 0,508 \text{ A} \quad (4.26)$$

Este valor está por debajo del pickup de 0,872 A, por lo tanto, no debería haber ningún problema de la selectividad con la resistencia NGR recomendados y ajuste de pickup. Las otras ramas pueden ser estudiadas de una manera similar, y se puede corroborar que no debería haber ningún problema de la selectividad en el sistema con la recolección de ajuste de 0,872 A.

4.5. Análisis

Los sistemas de distribución de alta tensión en minas y los sistemas de potencia de tajos largos, pueden tener un significativo valor de capacitancia distribuida debido a sus cables blindados. Esta capacitancia, combinada con las prácticas actuales de conexión a tierra puede crear situaciones en las que la definición de sistema a tierra de alta resistencia no se cumple, haciendo que el sistema comience a presentar las características indeseadas de un sistema sin conexión a tierra. En este capítulo se han dado a conocer algunos de los problemas asociados con los sistemas de puesta a tierra que no cumplen la definición de puesta tierra de alta resistencia, y se dan recomendaciones para mejorar la operación del sistema eléctrico de la mina y su seguridad.

Para los sistemas de distribución de alta tensión de las minas, se recomienda que el sistema de puesta a tierra siga la definición de la conexión a tierra de alta resistencia, en lugar de seleccionar arbitrariamente un límite de 25 A para la corriente de la resistencia de neutro a tierra. Con los procedimientos presentados en este capítulo, la corriente máxima de falla a tierra se puede determinar y la selectividad de los relés puede ser estudiada.

Sobre los sistemas de tajos largos de alto voltaje, los reglamentos de la MSHA [19] exigen que la corriente de la NGR se limite a 6,50 A para sistemas de 2400 V y 3,75 A para los sistemas de 4160 V. No obstante de que estos actuales límites cumplen con la definición de la conexión a tierra de alta resistencia, es posible que en los próximos años, debido al crecimiento de estos sistemas, se excedan los límites de corriente de la resistencia de puesta a tierra de neutro, no cumpliendo así la definición de la conexión a tierra de alta resistencia. Por tal motivo es posible que los reglamentos actuales sufran modificaciones futuras.

4.6. Normas Internacionales

Actualmente en Estados Unidos y Canadá existen normas que indican dónde se requiere de las NGR y cuando deben monitorearse. A continuación se resumen los artículos relacionados de estas normas se indican en las Tablas 4.3, 4.4 y 4.5. Adicionalmente en el Anexo A se presentan los extractos de dichos artículos.

Norma Estadounidense

Artículo	Comentarios
NEC 250.188	Alto Voltaje - No se puede operar con la NGR abierto
30 CFR 18.47	Minas con Gases o Túneles *Monitoreo continuo del sistema a tierra. Se puede interpretar que incluye el NGR * Mantener las carcasas de los equipos de trabajo y auxiliares al potencial de tierra. No se puede operar con la NGR abierta
30 CFR 56.12028, 57.12028	Minas subterráneas y superficie, de metales o no *La continuidad de la NGR debe ser confirmada después de la instalación o reparación y anualmente. Los registros deben estar disponibles
30 CFR 75.814(3)	Minas Subterráneas de carbón *Una protección de falla a tierra, en el caso de una falla con la NGR abierta

Tabla 4.3: Resumen Normas Estadounidense

Normas del Departamento de seguridad en minas de Pensilvania

Artículo	Comentarios
Subestación de Poder de la Mina	La corriente de falla a tierra debe ser limitada por una resistencia de protección (NGR)
Centros de Carga	*Una protección de potencial para falla a tierra, en el caso de una falla con la NGR abierta *Monitoreo continuo de la NGR es aceptable en lugar de un protector de potencial

Tabla 4.4: Resumen de Normas del departamento de Pensilvania

Norma Canadiense

Artículo	Comentarios
C22.1-06 10-1102.3	Las líneas con descargas en el neutro requieren un monitoreo continuo de la NGR
CSA M421-00 Sección 3.5.5	Donde se utilice la protección de falla a tierra, el suministro debe: *Poner a tierra a través de un dispositivo a puesta a tierra en el neutro que limite la tensión de falla a tierra a 100 V o menos
CSA M421-00 Sección 3.6.2	Dispositivos de puesta a tierra en el neutro generales *Monitoreo continuo para cualquier NGR es requerido *Desenergizar el suministro en menos de 60 segundos si la NGR se abre

Tabla 4.5: Resumen de Normas Canadienses

En resumen las normas en la minería canadiense son claras:

- Donde exista una protección de falla a tierra se requiere una puesta a tierra de alta resistencia.
- Donde exista una puesta a tierra empleada como NGR, esta debe ser continuamente monitoreada.

El concepto de monitorear la resistencia de neutro a tierra se explicará en el próximo capítulo, en que se detalla la necesidad de un monitor de NGR y cómo se realiza.

En Chile no existen normas acerca de la instalación de NGR, por lo que se emplean las internacionales.

CAPÍTULO 5

Equipos de protección asociados a las resistencias de neutro a tierra

5.1. Consideraciones especiales para las protecciones del sistema

5.1.1. Sistemas de protección

En la aplicación de resistencias de puesta a tierra, la tensión del sistema y la corriente permitida de la NGR son las consideraciones principales que influyen en la posibilidad de instalar un sistema de sólo alarma (*alarm-only*) o disparo (*tripping*). Un sistema de sólo alarma continúa operando aunque ocurra una falla a tierra en el sistema por un cierto periodo de tiempo no especificado. En un sistema de disparo una falla a tierra se elimina automáticamente mediante relés de protección y dispositivos de interrupción de circuitos. Los sistemas de sólo alarma se suelen limitar a corriente de la NGR de 10 A o menos.

La corriente permitida de la NGR promedio en un sistema de sólo alarma, debe ser menor que 10 A. Este valor de corriente de falla suele ser lo suficientemente pequeño como para evitar la quema del aislamiento y la escalada que conlleva a fallas entre fases, y la quema del material del núcleo de los motores, generadores y transformadores [2]. Este nivel es el máximo de la corriente permitida de un sistema de sólo alarma que se define en la sección 10-1102 del Código Eléctrico Canadiense (C.E.C) que se indica en el Anexo A.

Los sistemas de sólo alarma rara vez se utilizan en tensiones sobre 5 kV debido a que un sistema de capacitancia alta necesita una corriente permitida de la NGR mayor que 10 A, y porque una tensión mayor incrementa la probabilidad de una escalada de falla a tierra a una

falla de fase a fase. En un sistema de disparo, una NGR con una corriente permitida promedio mayor, presenta comúnmente valores de 15 A y 25 A. Los sistemas de mayor voltaje, deben disparar frente a una falla a tierra, pueden tener corrientes permitidas de cientos de amperes. Los proyectistas que aplican los sistemas de neutro rígido a tierra a menudo prefieren resistencias de neutro a tierra con corrientes permitidas más grandes de lo necesario tanto para la estabilidad del sistema como para la coordinación selectiva. Esta práctica aumenta los potenciales daños para los equipos y el personal durante una falla a tierra.

5.1.2. Disparo simpático (*sympathetic tripping*)

La Figura 5.1 muestra un sistema con una resistencia de puesta a tierra en el neutro de 5,0 A como corriente permitida. Si la fase A presenta una falla a tierra en uno de sus alimentadores (en el caso de la Figura es el alimentador 2), la corriente de falla es la suma vectorial de la corriente de la NGR y la corriente de carga del sistema. El sistema en la Figura 5.1 tiene tres alimentadores iguales, las corrientes se indican en la misma Figura. Los amperímetros A_1 y A_3 en los alimentadores sin falla indican una corriente de 1,0 A, que corresponde a la corriente de carga de sus respectivos alimentadores. La corriente normal y con falla de la NGR se mantiene sin variación en 5,0 A y 5,8 A respectivamente. El amperímetro A_2 en el alimentador con falla leerá 5,4 A, que corresponde a la suma vectorial de la corriente de la NGR y las corrientes de carga de los alimentadores que no tengan fallas.

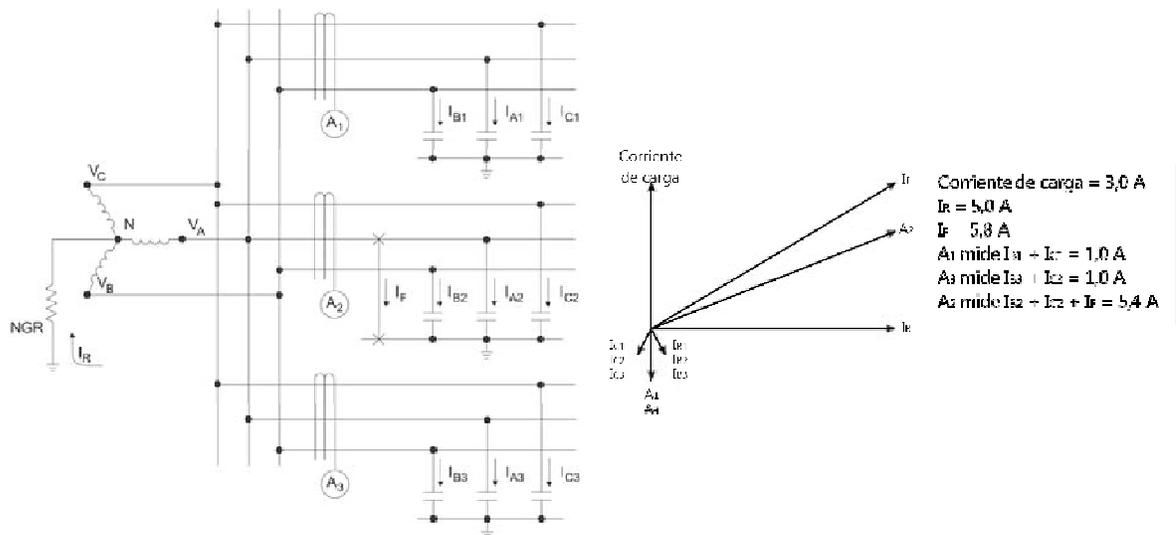


Figura 5.1: Corrientes leídas durante falla a tierra en un sistema con NGR

El disparo simpático es cuando los alimentadores sin falla se disparan en respuesta a una falla a tierra en otra parte del sistema, y es una situación indeseable. El disparo simpático puede ocurrir si el valor de funcionamiento de los relés de falla a tierra de los alimentadores es menor que la corriente de carga de éstos. El disparo simpático no puede ocurrir, independientemente

de los tamaños relativos de los alimentadores, si el valor de operación utilizado en todos los relés de falla a tierra en el sistema es mayor al valor de la corriente de carga del alimentador más grande. Los niveles de protección para el personal a causa de una falla a tierra son difíciles de lograr en un sistema trifásico debido a la magnitud de las corrientes de carga.

5.1.3. Coordinación de relés

Las instalaciones con sistemas con resistencia de neutro a tierra permiten despejar las fallas a tierra de forma ordenada. En un sistema de neutro rígido a tierra, una falla sólida puede resultar en una carrera de relés en la que varios dispositivos de protección, tanto de sobrecorriente y falla de tierra, detectan la falla y empiezan a disparar al mismo tiempo. La falla se despeja por el dispositivo que opera más rápido en vez del dispositivo que desconecte la menor cantidad de equipos del sistema. Este problema se puede resolver usando enclavamientos selectivos de zona, pero esto requiere una gran cantidad de cableado de control.

Por el contrario un sistema de resistencia de puesta a tierra puede ser diseñado de manera que la corriente de falla a tierra sea mucho menor que el pickup de ajuste de los dispositivos de sobrecorriente, por tanto, sólo los relés de falla a tierra responderán a una falla a tierra. Puesto que la corriente de falla a tierra es controlada a un nivel que reduce el daño de la falla, y los arcos eléctricos no se producen, hay un lapso de tiempo que permite la coordinación de disparo.

La coordinación selectiva de tiempo de una falla a tierra para que dispare el sistema, requiere que relés de falla a tierra sean configurados para operar para el mismo valor de corriente, con los relés de falla a tierra más lejanos de la red, configurados para operar con el mínimo retardo. Avanzando hacia la fuente el tiempo de retardo es mayor. Cuando se produce una falla, el relé de corriente más cercano es el primero en operar. La coordinación se logra sin necesidad de enclavamientos selectivos de zona. En un sistema de alarma, una falla a tierra puede ser fácilmente localizada por la indicación dada por un relé aguas arriba.

La protección por falla a tierra confiable requiere la adición de un monitoreo continuo de la NGR. Cuando una NGR falla, el modo de fallo es por lo general de circuito abierto, dejando el camino de tierra de retorno incompleto. La medición de corriente en las protecciones de falla a tierra, que es el tipo más comúnmente empleado en un sistema de puesta a tierra en el neutro, no funcionará con una NGR abierta. A menos que se incluya una protección adicional, las ventajas de la resistencia de puesta a tierra se pierden sin saberlo. Este equipo se detallará más adelante en este capítulo.

5.1.4. Armónicos de corriente

La presencia de tensiones de frecuencias armónicas (múltiplos enteros de la frecuencia fundamental) en un sistema eléctrico causan circulación de corrientes de frecuencias armónicas que pueden afectar la detección de falla a tierra y los disparos con *set point* de menor valor. Los armónicos pueden ser el resultado de la utilización de variadores de velocidad y partidores de estado sólido (*solid-state starters*). La conmutación estática de las corrientes de línea causa tensiones armónicas que conducen a una corriente "armónica-capacitiva" desde las fases a tierra. La impedancia capacitiva es inversamente proporcional a la frecuencia ($X_c = 1 / (2 \cdot \pi \cdot f \cdot C)$ donde f = frecuencia en Hertz). Cuanto mayor sea la frecuencia, menor será la impedancia capacitiva, y mayor será la corriente por Volt. A excepción de la "triplens" (armónicas que son múltiplo de la tercera armónica), las corrientes armónicas a tierra se suman de la misma forma que los componentes fundamentales de la corriente capacitiva a tierra. Sólo la componente del desequilibrio contribuye a la corriente de neutro.

Las corrientes de frecuencias armónicas triplens presentan un caso especial. En un sistema trifásico, los armónicos triplens están en la fase y su suma es tres veces la magnitud individual. En un sistema de 50 Hz, las componentes 150 Hz, 300 Hz, 450 Hz, etc., se suman a la componente fundamental de 50 Hz y pueden causar falsos disparos de falla a tierra.

Las componentes de frecuencias armónicas de la corriente pueden hacer que sea necesario establecer altos niveles de corriente de falla a tierra para los pickup de las protecciones de corriente, para evitar un disparo no deseado. Para eliminar este problema, se utiliza un dispositivo de protección de falla a tierra que ignora los *offsets* de corriente continua y corrientes de frecuencias armónicas, y sólo responde a la componente de la frecuencia fundamental de la corriente. La característica de filtrado es que debe ser rápido para permitir disparos de falla a tierra en un tiempo corto. El filtrado digital de la forma de onda de la corriente de secuencia cero proporciona una solución rápida y precisa a muchos problemas de detección de falla a tierra de bajo nivel.

5.1.5. Selección del relé de falla a tierra

La siguiente lista resume los elementos necesarios para seleccionar la corriente permitida de la NGR y la protección de falla a tierra [43].

- Determinar la corriente de carga del sistema.
 - Esto se puede hacer a través de la estimación, cálculo o medición.
- Determinar si el sistema es sólo alarma o de disparo

- El sólo alarma debe ser considerado solamente para los sistemas donde la tensión es inferior a 5 kV y la corriente que circula por la NGR es menor que 10 A.
- Si el sistema es de disparo, determinar la cantidad de tiempo que una falla se le permitirá permanecer en el sistema.
- Determinar el nivel de disparo deseado para la protección de falla a tierra.
 - El nivel de disparo debe estar por encima de la corriente de carga del alimentador más grande (Ver capítulo 4).
 - El relé de falla a tierra con el filtro de armónicos deben ser utilizado para eliminar la falsa operación de las protecciones debido a las corrientes armónicas.
- Seleccionar una razón de disparo apropiado, por lo general entre 5 y 10 veces.
 - Cuanto mayor sea la razón de disparo, los relés de falla a tierra detectarán mejor las fallas a tierra de alta resistencia. Si es mayor que 10 A la corriente de falla a tierra, el disparo del sistema debe ser utilizado.
- Determinar la corriente permitida de la NGR basada en el nivel de disparo de la protección de falla a tierra, y la razón de disparo.
- Incluir el monitoreo continuo de la NGR, ya que una falla de la NGR implica pérdida en la detección de corrientes por parte de la protección de falla a tierra, y la pérdida de los beneficios de la técnica de resistencia por puesta a tierra.

5.2. Monitor del conductor de tierra

Cuando la corriente permitida de la NGR es de magnitud mayor que la corriente de carga del sistema, la corriente de falla a tierra será limitada por la resistencia de neutro a tierra y la impedancia del retorno por tierra. La impedancia del retorno por tierra debe ser baja para minimizar la tensión de falla a tierra y evitar interferencias en la detección de falla a tierra. Un monitor del conductor de tierra se utiliza para asegurar la integridad del circuito de puesta a tierra externo a la NGR. La mayoría de los monitores de conductores de tierra usan un cable de verificación de tierra (incluido en el cable portátil) para supervisar la continuidad del conductor de tierra. Si la resistencia del circuito del cable de verificación de tierra se vuelve excesiva, el monitor hace que los conductores de poder sean desconectados.

Además de supervisar el conductor de tierra, un monitor del conductor de tierra ofrece varios beneficios adicionales. Cuando el cable de verificación de tierra se utiliza bajo carga, la carga debe estar conectada antes que los conductores de fase sean alimentados. Un interruptor de detención de partida (*start-stop*) en un circuito de verificación de tierra se utiliza a menudo para controlar un monitor que controla la potencia suministrada a los equipos móviles. A pesar de que los acopladores de cable no pueden ser desacoplados bajo carga, un monitor del conductor de tierra ofrece cierta protección en este aspecto. Dado que el conector (*pin*) del verificador de tierra es el más rápido, este iniciará el disparo antes de que los enchufes de fuerza se desconecten si el acoplamiento está desconectado inadvertidamente. Sin embargo, esto puede ser peligroso debido a que los contactos de potencia pueden intentar interrumpir bajo carga si el acoplamiento se separa demasiado rápido para que el dispositivo de interrupción funcione.

5.2.1. Características del monitor de conductor de tierra deseadas

Un monitor de conductor de tierra debe tener las siguientes características:

- El voltaje de circuito abierto del verificador de tierra debe ser bajo. La norma canadiense CSAM421 permite 100 V. En lugares húmedos una tensión de 100 V pueden presentar un peligro para el personal.
- El monitor debe utilizar qué es para que los cortocircuitos del Verificador de tierra-Tierra puedan ser detectados. Las investigaciones de la MSHA indican que los empalmadores de cables tienen una tendencia a conectar el conductor de verificación de tierra a la tierra cuando se empalma un cable, que corresponde a una acción errada.
- El monitor debe tener una alta tolerancia a la corriente alterna inducida en el circuito de verificación de tierra. El verificador de tierra y conductores de tierra van en paralelo a los conductores con altas corrientes por fase, en que la inducción AC está presente frecuentemente. La MSHA aprueba el requerimiento de monitores para tolerar 50 V inducidos o indicar en el equipo esta limitación.
- Los circuitos de verificación de tierra deben ser a prueba de fallas. La MSHA define un circuito a prueba de fallas si la falla de cualquiera de los componentes de circuito (considerando todas las posibles causas de la falla) inicia la función de disparo, o permite que el circuito siga funcionando en forma adecuada.
- El monitor no debe tolerar una alta resistencia en el circuito de verificación de tierra. De hecho, un buen diseño debe considerar tanto la resistencia de tierra y el valor de

operación de los relés de falla a tierra, de modo que las tensiones de falla a tierra sean inferiores a 100 V.

- El monitor debe operar sobre un amplio rango de temperaturas.
- El monitor debe operar en un amplio rango de tensiones de alimentación y tolerar grandes caídas de tensión (voltaje puede caer un 50% en los cables largos).
- El relé de salida debe ser capaz de conmutar corrientes de sólo unos pocos miliamperes. Esto es importante cuando el monitor se utiliza para energizar la bobina de un relé de mínima tensión (*undervoltage release*) que puede requerir 20 mA o menos. Los relés de contacto bifurcados están diseñados para conmutar las corrientes entre 1mA a 2mA.

5.2.2. Limitaciones del monitor de conductor de tierra

Las siguientes limitaciones se pueden encontrar con algunos monitores de conductor de tierra:

- Algunos monitores de conductor de tierra usan señales de frecuencia de línea. Los circuitos de este tipo frecuentemente no pueden discriminar entre los cambios de impedancia del circuito y la inducción en el circuito de verificación de tierra.
- Algunos monitores de tipo impedancia utilizan un transformador reductor para detectar un aumento de la impedancia de un circuito de verificación de tierra. La bobina secundaria está conectada en serie con el cable de verificación de tierra y un aumento de la impedancia del circuito es observada como una disminución en la corriente del transformador. Este método funciona muy bien en un cable desenergizado y sin tensión inducida en el circuito de verificación de tierra, sin embargo, un pequeño voltaje inducido en oposición a la tensión del secundario original causa una disminución similar en el transformador de corriente y el disparo del monitor. Para evitar el disparo indeseado, los monitores de este tipo debe tener un interruptor de inversión de fase por lo que la tensión inducida se puede agregar al control de tensión del secundario. El problema con esto es que la impedancia del circuito ahora puede aumentar muy por encima del nivel de disparo sin detectarlo. Por ejemplo, un monitor con un transformador 32 V/3,2 V y un circuito de 4 Ω , el circuito permitirá que la impedancia del circuito aumente en 4 Ω para cada 3,2 V de la tensión inducida.
- Algunos monitores de conductor de tierra usan un diodo rectificador al final del dispositivo. Los voltajes inducidos en el circuito de verificación de tierra son alternos pero el diodo sólo permite que la corriente fluya en una dirección. En consecuencia, los diodos

de finalización son susceptibles al daño de los transitorios de interrupción a menos que estén protegidos en la dirección contraria por un supresor. Estas unidades pueden ser afectadas por la inducción alterna que puede provocar disparos molestos. La reducción de esta sensibilidad se logra a menudo a expensas de la capacidad de detectar el aumento de la impedancia del circuito verificador de tierra.

- Algunos monitores de conductor de tierra usan señales de alta frecuencia. Estos circuitos a menudo se limitan a longitudes de cable pequeñas por la capacitancia de línea a tierra de los cables de arrastre.

5.3. Monitor de NGR

Los sistemas con resistencia de neutro a tierra tienen un elemento crítico que corresponde a la resistencia de neutro a tierra (NGR). Un sistema con resistencia a tierra debe tener su control de NGR permanente. Durante una falla Fase-Tierra, la corriente fluye desde el devanado del transformador o del generador, pasando por el conductor de la fase que presenta la falla, luego por la falla y finalmente por la tierra, volviendo al devanado de la fuente a través del camino de tierra de retorno y a la NGR. Cuando una NGR falla, el modo en que se manifiesta es por lo general un circuito abierto, dejando el camino de tierra de retorno abierto. La protección de detección de corrientes de falla a tierra, que es el tipo más empleado en los sistemas de resistencia a tierra, no funcionará con una resistencia abierta, y las ventajas de la resistencia de puesta a tierra se pierden sin saberlo. Una operación inadvertida de un sistema sin conexión a tierra y una protección de falla a tierra inoperante se puede evitar mediante el uso de un monitor continuo de NGR. A continuación se describen los aspectos más importantes de un monitor de NGR.

5.3.1. Monitoreo de la NGR

Una NGR correctamente aplicada puede limitar los daños en los puntos de falla, eliminando las sobretensiones transitorias, reduciendo el riesgo de un arco eléctrico, garantizar la continuidad del servicio con una falla a tierra, y proporcionar la corriente adecuada para la detección de falla a tierra y la coordinación selectiva.

Por desgracia, las ventajas de la NGR se sustituyen por las desventajas de un sistema sin conexión a tierra cuando un NGR falla. La consecuencia de la operación inadvertida con un sistema sin conexión a tierra se puede evitar con la adición de un monitor continuo de NGR.

En la minería, la NGR es reconocida como una parte integral del camino de tierra de retorno, y las fallas NGR ocurren con regularidad suficiente como para que la Asociación Canadiense de Estándares exija un monitor de NGR (ver capítulo 4).

Un monitor de NGR bien diseñado confirma el camino eléctrico desde el neutro del transformador o generador pasando por la NGR hasta la puesta a tierra de la estación. Cuando se alimenta de una fuente independiente, el monitor se activa si el sistema está energizado y garantiza un disparo o una alarma si se produce una falla de NGR.

5.3.2. Modos de falla de la NGR

El modo en que falla una NGR suele ser de circuito abierto. Un elemento típico de la NGR, (que se muestra en la Figura 5.2) se construye de tiras de alambre de resistencia o de metal (acero inoxidable) en espiral y que se envuelven alrededor de aisladores de porcelana. Estos elementos se agrupan según sea necesario para la aplicación. La falla durante un cortocircuito es muy poco probable, y es análoga a una ampolleta de luz incandescente en cortocircuito.

Una NGR puede estar en cortocircuito accidentalmente durante su construcción o mantenimiento. A diferencia de un circuito abierto de la NGR, un cortocircuito en ésta resulta en un sistema puesto a tierra y estable eléctricamente. La corriente de falla a tierra fluirá durante una falla, y será despejada por una protección de sobrecorriente o de falla a tierra.



Figura 5.2: Elemento de una NGR

5.3.3. Causas y periodicidad de las fallas de las NGR

Una NGR es un componente mecánico y está sujeto a fallas mecánicas. Aunque la NGR no tiene partes móviles, hay varios otros factores que afectan la integridad de una NGR. Un estudio

basado en datos de los fabricantes de NGR revela que estos equipos fallan debido a rayos, tormentas, terremotos, sobrecargas, o prolongar la vida útil [13]. Otras causas de fallas son ambientes corrosivos, cambios bruscos de temperatura, corrientes armónicas triplens, los granizos, defectos de fabricación, y la vibración. La Figura 5.3 muestra una falla térmica de una NGR.



Figura 5.3: Fallas térmicas de NGR

Cada dispositivo tiene una vida de servicio útil y las NGR no son diferentes. La Figura 5.4 muestra un NGR situada a la intemperie, cubierta por una malla de acero. Los equipos instalados al aire libre están sujetos a las temperaturas extremas y humedad de la zona geográfica en que se ubica. En una instalación como ésta, las resistencias, aislantes, terminales, uniones soldadas, y los cables están expuestos a la caída de la lluvia y el viento, nieve, y granizos.

Una de las causas desconocidas de una falla de NGR fue reportada en la referencia [14]. Se indica de varias fallas de las NGR en subestaciones de consumo de 26 kV. La causa probable de las fallas es la oscilación de alta frecuencia (125 kHz) provocada por la inductancia inherente de la NGR y la capacitancia del sistema. La oscilación del sistema que es desencadenada por los transitorios producidos por fallas de línea a tierra de los circuitos de los alimentadores a 26 kV. Las sobretensiones se encuentran de dos a cuatro veces la tensión nominal del sistema.



Figura 5.4: NGR de intemperie cubierta por una malla metálica

5.3.4. Consecuencias de una falla en una NGR

Las fallas de una NGR convierten un sistema de resistencia a tierra en un sistema sin conexión a tierra. Sin un control continuo de la NGR, no hay indicios de que el sistema se haya convertido en un sistema sin conexión a tierra. Los operadores no se darían cuenta que la detección de corriente de la protección de falla a tierra ya no es operativa y que el riesgo de sobretensiones transitorias existe.

Otro riesgo potencial es que una prueba del voltaje Fase-Tierra en un sistema sin conexión a tierra no puede indicar la presencia de voltaje en un conductor energizado. Un electricista podría creer que es seguro tocar los conductores de fase energizado.

5.3.5. Métodos de detección de fallas de la NGR

Una NGR en circuito abierto podría no mostrar signos externos de fallas. En los casos en que la monitorización continua no se emplea, el sistema sigue funcionando normalmente hasta que la resistencia abierta se descubre después de un evento.

En ocasiones, las resistencias abiertas son descubiertas durante el mantenimiento preventivo. En los casos en que el plan de mantenimiento consiste en la medición de la resistencia NGR, una NGR abierta probablemente se descubra. Sin embargo, no hay garantías. Por ejemplo, una empresa que realiza el mantenimiento de una NGR con una soldadura rota. La NGR permaneció cerrada hasta que una falla a tierra se produjo. El calentamiento dado por I^2R de las bobinas hace que sus bordes se expandan, lo cual provocó que la soldadura se rompa abriendo el circuito. Esto ilustra la necesidad de que un monitor de NGR detecte una falla de esta en un sistema donde las fallas a tierra se indican sólo por una alarma. La medición de la resistencia NGR durante el mantenimiento sólo proporciona la confirmación de que la NGR estaba buena en el momento en que la resistencia se midió. Sin embargo, la NGR podría fallar en cualquier momento después que la medición fue tomada o no se vuelve a reconectar después de la medición.

Cuando la mantención incluye una prueba a los relés de falla a tierra utilizando una falla a tierra intencional, una NGR abierta probablemente será descubierta como resultado de una investigación sobre el por qué los relés de falla a tierra no funcionan.

Cuando los relés de falla a tierra son probados por la inyección primaria de corriente, como se muestra en la Figura 5.5, puede ocurrir una falsa confirmación del funcionamiento del relé de falla a tierra. Los relés de falla a tierra responderán a la corriente inyectada y parecerá funcionar como fueron diseñados, a pesar de la presencia de una NGR abierta. Este procedimiento de mantenimiento falsamente confirmaría la operación de la protección de falla a tierra.

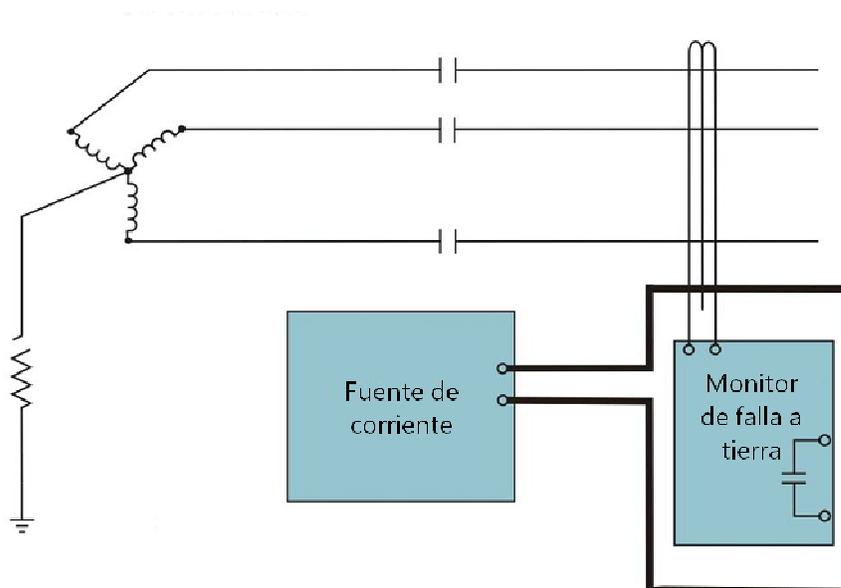


Figura 5.5: Prueba de inyección primaria de corriente con NGR abierta

El plan de mantenimiento no es el medio ideal para determinar que la NGR no presenta problemas. Una NGR abierta no es una condición que se debe permitir que permanezca en el sistema durante ningún periodo de tiempo. Además, ha habido casos en que la NGR se desconecta durante las pruebas y no se vuelve a conectar

Examinar a la NGR mediante el mantenimiento preventivo sugiere que una solución mejor es emplear un dispositivo de control automático.

5.3.6. Requisitos del monitoreo continuo

Los requisitos de un monitor continuo de NGR son los siguientes [12]:

- Un monitor de NGR debe ser capaz de detectar una falla de NGR con o sin la presencia de una falla a tierra en el sistema.
- El monitor debe trabajar modo sólo alarma o en disparo.
- El monitor no debe estar expuesto al voltaje del neutro durante una falla a tierra.
- El monitoreo de la NGR debe incluir el monitoreo de las conexiones de neutro y tierra.
- El monitor no debe acoplarse inductiva o capacitivamente a la NGR, ya que esto podría contribuir a la ferorresonancia si la resistencia falla.
- Si la protección de falla a tierra está incluida, el monitor debe ser capaz de detectar una falla a tierra cuando el NGR está abierto.

Un transformador de tensión y un relé de tensión con retraso de tiempo conectados a través de un NGR no son un monitor continuo de NGR. Este es un detector de falla a tierra basado en el voltaje, y no controla la continuidad de la NGR. Por el contrario, controla la tensión del neutro y no funcionará hasta que se produce una falla a tierra, independientemente de la condición de las NGR.

Un enfoque similar es aplicar una medida de sobretensión (59 N), una medición de sobrecorriente (51 N), y un circuito lógico a la NGR como se muestra en la Figura 5.6. La combinación de estos dispositivos puede detectar una falla de NGR sólo si hay una falla a tierra en el sistema. Si la medida de voltaje indica la presencia de la tensión y la medición de la corriente indica la presencia de la corriente, entonces hay una falla a tierra en el sistema. Dado que no es corriente que fluye a través de la NGR, esta debe ser continua. Si la medida de voltaje indica la presencia de tensión, pero la medida de corriente en el NGR es cero, entonces la NGR

debe estar abierta. Este diseño no es el monitoreo continuo de NGR porque se basa en la presencia de una falla a tierra para funcionar.

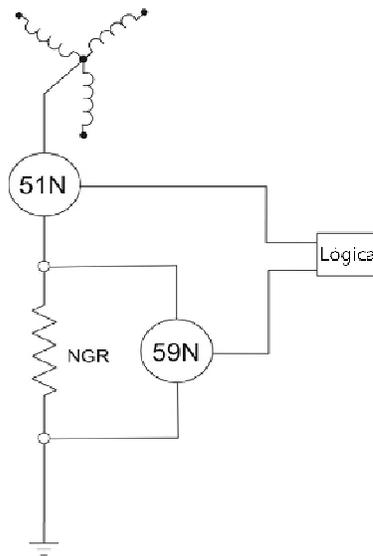


Figura 5.6: Método efectivo de monitoreo de NGR durante una falla

Otra posibilidad es el uso de un medidor de resistencia, similar a un óhmetro, y un contacto de salida como el de un monitor de NGR (que se muestra en la Figura 5.7). Los problemas con el método de medición de la resistencia son las posibles interferencias debido a las influencias externas de corriente continua, como se muestra en la Figura 5.8a, y la posibilidad de que continuidad durante una falla a tierra puede ser reconocida como la continuidad de la NGR, tal como se muestra en la Figura 5.8b.

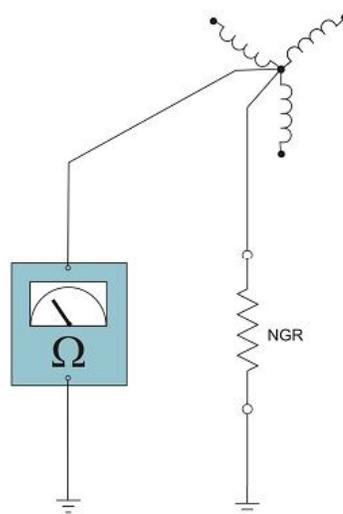


Figura 5.7: Medidor de resistencia usado como monitor de NGR

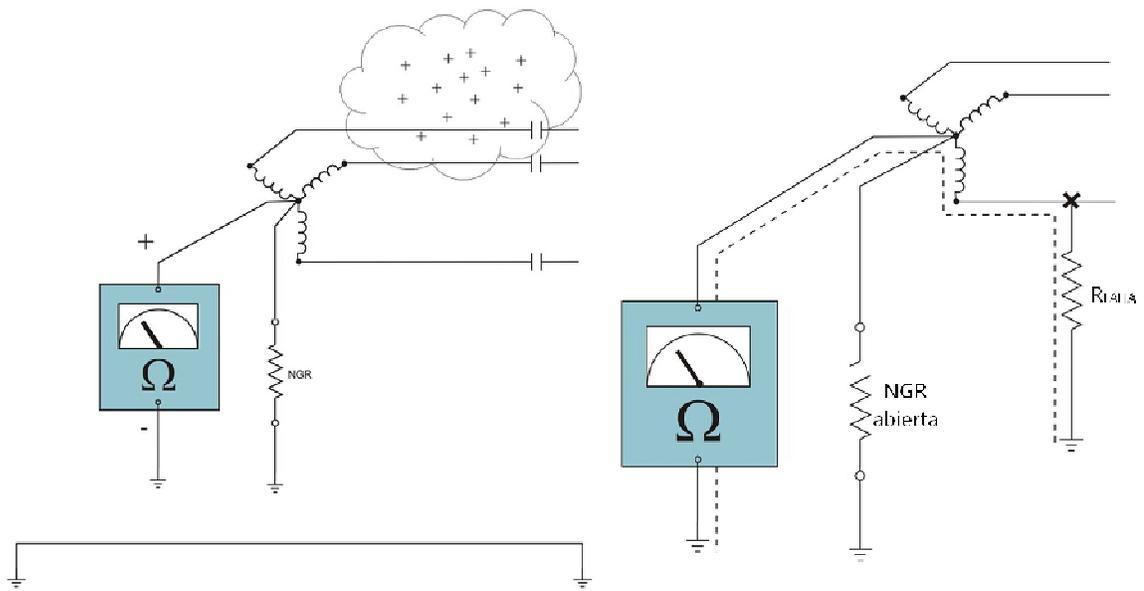


Figura 5.8: a) Influencias externas CC en el sistema. b) Continuidad durante la falla a tierra

La medición de la resistencia puede ser influenciada por las corrientes de CC en el circuito de medición. Hay muchas posibles fuentes de tensión CC parásitas en sistemas eléctricos industriales: elevadas corrientes continuas pueden afectar al sistema, tales como una falla a tierra en la barra CC de un variador de velocidad y más fuentes ocultas como las condiciones eléctricas atmosféricas. La Figura 5.8a muestra una nube cargada que impacta con una tensión continua en el sistema. Bajo ciertas condiciones, esta nube cargada puede interferir con la medición de la resistencia en un grado que podría causar que no funcione como está diseñada.

Otro problema con este método de medición de la resistencia es la posibilidad de medir la continuidad a través de una falla a tierra. Cuando se produce una falla a tierra, hay dos caminos paralelos que se le presentan al dispositivo de medición de la resistencia. Hay un camino a través de la NGR y otro camino a través del devanado del transformador o generador de la fase con la falla, a la falla, y de nuevo al dispositivo de medición a través del suelo.

Si la NGR falla durante una falla a tierra, el dispositivo de medición de la resistencia podría medir una resistencia similar a la NGR, midiendo el camino de la falla a tierra. La Figura 5.8b muestra cómo un dispositivo de monitoreo de la resistencia puede no indicar problemas de la NGR mediante la medición de la resistencia de un camino paralelo durante una falla a tierra. En estas circunstancias, las medidas de resistencia falsamente indicarían que la NGR tiene continuidad.

Una solución mejor es la combinación de un medidor de sobretensión (59 N), un medidor de sobrecorriente (51N), y un medidor de la resistencia como se muestra en la Figura 5.9a. Esta solución es mejor porque hay un monitoreo permanente de la continuidad de la NGR.

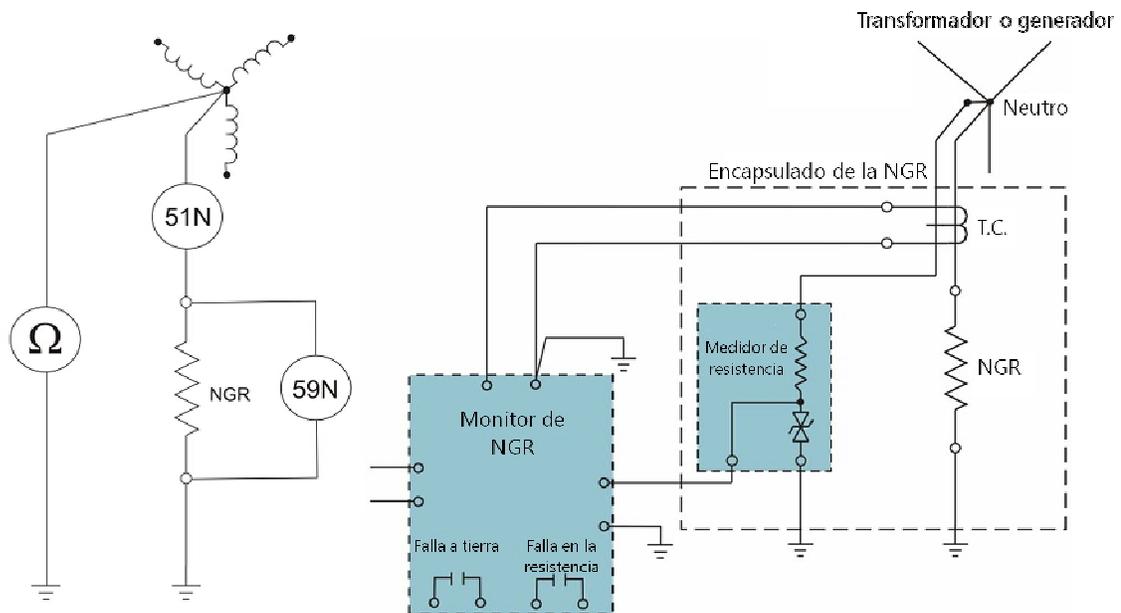


Figura 5.9: a) Medidas del Monitor continuo de NGR. b) Monitor continuo de NGR

Un monitor continuo de NGR combina las medidas de la corriente de la NGR, el voltaje del neutro del transformador o generador, y la resistencia NGR para determinar continuamente la salud de la NGR. La Figura 5.9b muestra un monitor de NGR típico y las conexiones con la NGR.

La medición de la resistencia es la suma de la resistencia del medidor de resistencia hasta el punto neutro, la NGR hasta tierra, y el retorno a tierra del monitor. Conectar el medidor de la resistencia a un terminal de conexión separado en la barra de neutro asegura que la conexión de la NGR hasta el neutro es parte del circuito de monitoreo.

Cuando no hay una falla a tierra en el sistema, el medidor de resistencia de NGR es suficiente para confirmar la continuidad de la NGR. El monitor determina la presencia de una falla a tierra a través de los medidores de tensión y corriente. La tensión en el neutro y la corriente en la NGR indican una falla a tierra.

Cuando se presenta una falla a tierra, el medidor de la resistencia no es suficiente para confirmar continuidad de la NGR debido a la posibilidad de medir la continuidad del camino de la falla, como se muestra en la Figura 5.8b. Debido a que una medida de resistencia por sí sola no es suficiente para confirmar la continuidad de la NGR, el monitor evalúa constantemente las medidas de resistencia, corriente, y voltaje.

Cuando el voltaje del neutro se eleva y la corriente fluye a través de la NGR, la NGR debe tener continuidad. Cuando la tensión del neutro se eleva, pero no pasa corriente a través de la NGR, la NGR debe estar abierta. La capacidad de detectar una NGR abierta en presencia de una

falla a tierra es particularmente importante en los sistemas de sólo alarma, donde las fallas a tierra pueden permanecer en el sistema durante largos períodos.

Cuando una falla a tierra se produce en un sistema con resistencia de neutro a tierra, el voltaje aparece en el neutro del sistema. En el caso de una falla sólida, el neutro del transformador o generador se eleva a la tensión Fase-Neutro. Un monitor de NGR que está directamente conectado con el neutro del sistema trae un conductor con tensión Fase-Neutro durante una falla a tierra a un tablero de control de baja tensión. Esto no es aceptable en muchas aplicaciones. El medidor de resistencia, como se muestra en la Figura 5.9b, conecta el monitor al sistema de potencia, aislando este a la tensión del neutro. El medidor de resistencia limita el voltaje de transferencia del neutro del sistema al monitor NGR. Los elementos resistivos del medidor de resistencia no contribuirán a la ferorresonancia. La ferorresonancia es una condición en la que la saturación magnética de un núcleo de hierro, más la capacitancia del sistema da como resultado oscilaciones de tensión. Estas oscilaciones pueden producir sobretensiones, que pueden exceder de dos a tres veces la tensión nominal del sistema. Una falla en el medidor de resistencia puede generar un disparo de falla de la NGR debido a que el medidor interpreta que hay un circuito abierto.

CAPÍTULO 6

Cables de arrastre en minas subterráneas

6.1. Cables de Distribución

La distribución abarca todas las líneas de alta tensión, cables, acopladores de cable, líneas eléctricas aéreas, y puesta a tierra entre los equipos eléctricos y las cargas. Esta categoría, los cables de arrastre es el eslabón más débil en los sistemas eléctricos de minas.

Los cables llevan la energía eléctrica desde la subestación, donde se toma el suministro de las líneas de la empresa de servicios públicos, hasta las máquinas de explotación minera, las bombas, cintas transportadoras, u otros equipos. Hay muchas posibles variaciones en la distribución de las minas, y varios tipos de cables de usos similares.

El tipo de cable depende de la aplicación, algunos permanecen en lugares fijos por varios años, mientras que otros se mueven con frecuencia. Los cables que están conectados a las máquinas de la minería se denominan portátiles. Existen normas que denominan a estos cables como "cable de arrastre" (*trailing cables*) para los cables portátiles utilizados en las minas. Este tipo de cable debe ser resistente al fuego y flexible.

Los cables portátiles que alimentan el centro de poder, o se conectan al lado de alto voltaje, tienen que ser trasladados cuando el centro de poder se mueve, pero no se mueven tan a menudo como los cables de arrastre.

La mayoría de los cables fijos son los que traen la energía a la mina, por ejemplo, para la perforación del pozo y a una celda de maniobra portátil. Estos son los cables alimentadores (*feeder*), y específicamente los cables alimentadores de minas se pueden utilizar para las

instalaciones fijas durante varios años. Cabe destacar que el uso de la palabra alimentador es para denotar un tipo de cable en lugar de la aplicación en la distribución. Tanto los cables alimentadores y portátiles puede utilizarse para aplicaciones de alimentación, donde estos cables suministran a dos o más cargas importantes.

En las minas de superficie, los cables que alimentan desde las celdas de maniobra o subestaciones portátiles a los equipos móviles son los cables de arrastre. Aquellos que son trasladados ocasionalmente y que no están conectados directamente a una máquina son los cables portátiles. Los cables estacionarios pueden ser del tipo alimentador o portátil.

En la Figura 6.1 se muestra las secciones transversales y los componentes de varios tipos de cables usados en minas. Los tres componentes básicos de cable son los conductores, aislamiento, y la chaqueta, aunque también puede haber rellenos (*fillers*), cintas semiconductoras (*binding*), pantallas (*shielding*), y armaduras (*armor*). Los conductores están rodeados por el aislamiento y la chaqueta cubre el aislamiento. La selección de los cables se basa en una serie de parámetros, entre ellos, la capacidad de corriente, voltaje, y la configuración. Componentes y parámetros de selección se describen en los párrafos siguientes.

Con el fin de obtener la flexibilidad necesaria, los conductores del cable se componen de muchas hebras conductoras combinadas en secciones, donde una serie de filamentos forman cada hebra. Los conductores son de cobre o de aluminio, este último es más barato y más liviano, pero tiene una menor conductividad. El aluminio se utiliza a veces en los cables de alimentación, pero la pobre flexibilidad impide su uso en cables de arrastre. El área de la sección de los conductores es importante para la resistencia mecánica y está estrechamente relacionado con la capacidad de corriente. El área de la sección del cable o calibre utilizados son AWG (*American Wire Gauge*) y circulares denominadas MCM (mil-circular-mil).

El aislamiento es necesario para soportar el estrés del calor, la tensión, y el desgaste mecánico. Esta debe ser especialmente diseñada para proteger al personal de una descarga eléctrica, y también aislar los cables de fuerza con los del circuito de puesta a tierra. El calor excesivo es especialmente destructivo para los compuestos de aislamiento, en que las principales fuentes de calor son la temperatura ambiente y pérdida de potencia por la resistencia del cable conductor.

La calificación de capacidad de corriente generalmente se basa en el aumento de la temperatura máxima del conductor, con el límite de la temperatura elegida sobre la base de la esperanza de vida del aislamiento del cable. La clase de temperatura (siempre se da en grados Celsius) describe la temperatura máxima admisible del conductor sostenida en una temperatura ambiente de 40°C (104 ° F).

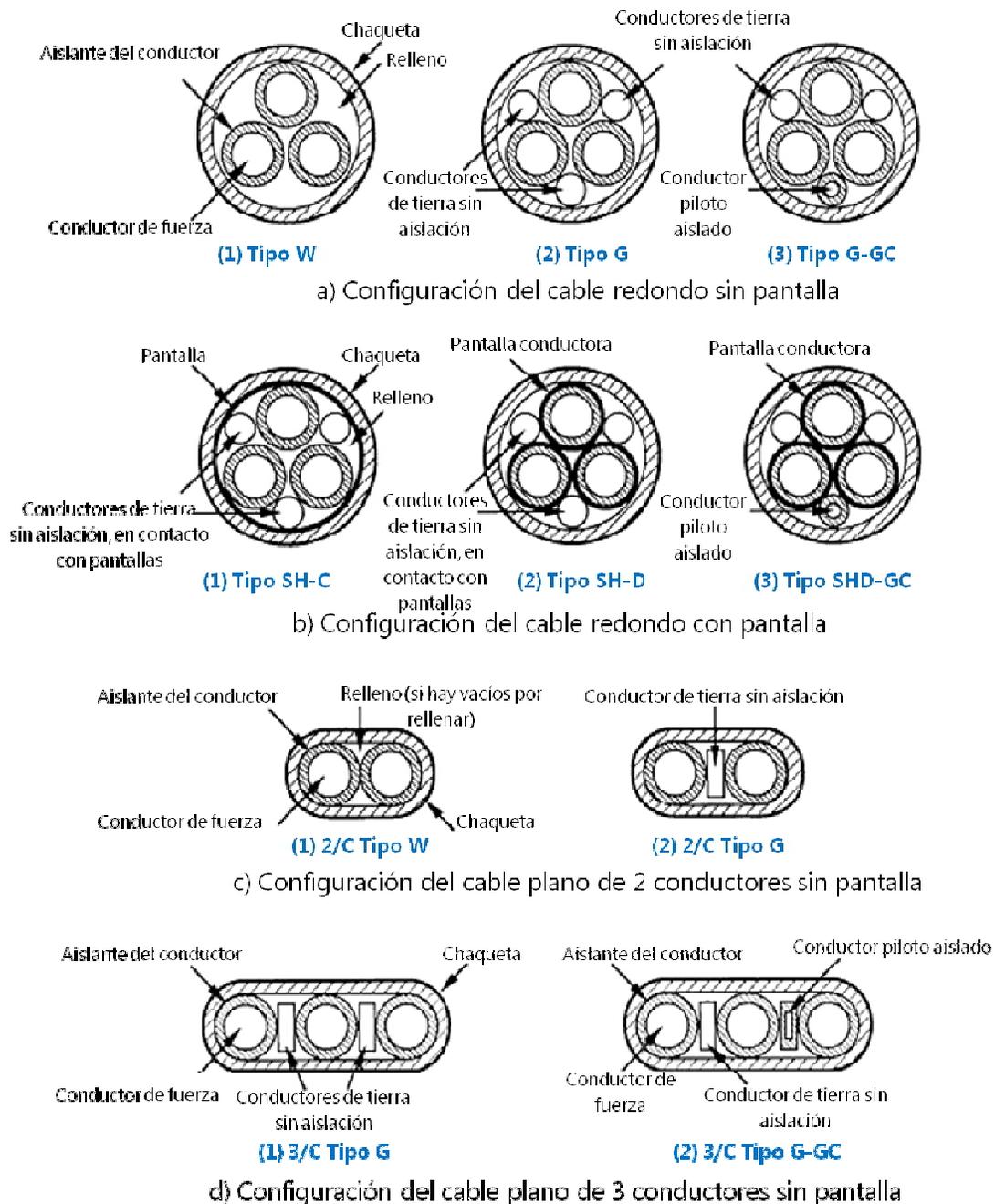


Figura 6.1: Corte transversal de los cables más usados en la minería

Un cable que se usa en un espacio cerrado se puede recalentar, como por ejemplo un cable enrollado en un carrete, ya sea con fines de almacenamiento o para aumentar la movilidad de la minería de la máquina. La capacidad de corriente del cable se debe reducir en estos casos, donde la intensidad y factor de reducción de potencia se encuentran en la Norma Chilena de Electricidad de Baja Tensión [45].

Los compuestos más comunes de aislamiento son el neopreno butadieno, estireno (SBR), etileno-propileno (EPR) y polietileno reticulado (XLPE). El espesor de un material de aislamiento

determina la tensión nominal del cable, y las clasificaciones más comunes en minería son 600 V, 2 kV, 5 kV, 8 kV, 15 kV y 25 kV.

El objetivo principal de la chaqueta del cable es brindar protección mecánica a los componentes internos y mantener el conjunto en la configuración de diseño. Los materiales comunes son chaqueta de neopreno, nitrilo butadieno / cloruro de polivinilo (NBR / PVC) y polietileno clorosulfonado (CSP, también llamado Hypalon). Los cables blindados se utilizan en algunas aplicaciones de perforación, donde la chaqueta es cubierta metálicamente proporcionándole protección adicional a los conductores y el aislamiento.

Las configuraciones de cable plano se utilizan en la maquinaria minera que incorpora carretes (por ejemplo, vehículos de transporte), mientras que los cables redondos son típicos en todos los equipos de explotación minera. La forma plana permite una mayor duración en los carretes de cable y es menos susceptible a daños que los redondos. Las máquinas de corriente continua emplea los tipos W o G, donde el tipo G tiene un conductor a tierra. Las máquinas de minería de baja tensión frecuentemente utilizan la armadura de tipo G o configuración tipo G-CG. Los conductores de puesta a tierra se colocan en los espacios libres entre los conductores de poder del tipo G, y una tierra de verificación que sustituye a uno de los conductores de puesta a tierra en el tipo G-GC.

Existen dos configuraciones básicas de los cables blindados: SH-D y C-SH. Las pantallas del cable SH-D rodean a cada conductor aislado, en el cable SH-C, una pantalla encierra todos los conductores de alimentación y los conductores de tierra. El blindaje del tipo SH-D es preferido para los conductores de puesta a tierra porque están en contacto íntimo con las pantallas. La configuración de cable blindado SHD-GC, también se usa extensivamente para los cables de arrastre de media tensión y alta tensión. Los cables fijos que suelen ser los alimentadores de la mina son del tipo MP-GC. Aunque similares en la sección transversal los cables SHD-GC y MP-GC son menos flexibles, pero tienen una mayor resistencia a la tracción, y se pueden usar diferentes materiales de pantalla. Los cables alimentadores de las minas también están diseñados para uso en pozos, instalaciones aéreas, conductos, y directamente enterrados.

Los cables alimentadores entregan energía a muchas cargas, y son comúnmente de gran longitud, por lo que la caída de tensión se convierte en una preocupación principal. Una de las condiciones es que la tensión debe estar dentro del rango de operación de la máquina en los terminales. La tolerancia permitida de tensión en los motores de la máquina por lo general es de $\pm 10\%$ del voltaje nominal. Mantener la tensión adecuada es uno de los problemas más difíciles en la minería, y es a menudo el principal obstáculo en la expansión de la mina desde el punto de entrega de potencia a la operación. Para un estudio a fondo de tensión de una mina, todas las impedancias y todas las cargas en el sistema de alimentación deben ser conocidas.

Además de la sección del cable, adecuada en términos de capacidad de corriente, y la caída de tensión, otros factores pueden afectar en el tamaño del conductor, tales como carga de

tracción, peso, y su capacidad de corriente de cortocircuito. Una limitación importante del cable es el peso, ya que el cable no puede ser demasiado pesado para que el personal minero puedan manejarlo físicamente sin problemas.

6.2. Cables de Arrastre en minas subterráneas

La búsqueda continua para mejorar la productividad en la industria de la minería se ha traducido en una tendencia constante hacia un equipo más grande de extracción. Los requisitos de potencia de estas máquinas subterráneas de gran capacidad han aumentado, y en muchos casos, han llegado al punto en que utilizar la tensión de 1000 V se ha convertido inadecuada por las siguientes razones:

- Excesiva corriente trifásicas y de fallas entre líneas.
- Gran tamaño de los cables.
- Reducción del torque del motor debido a la caída de tensión excesiva.
- Dificultad en el mantenimiento de la configuración de disparo instantánea máxima permitida por las normas (MSHA).

A causa de estas limitaciones, en E.E.U.U. en 1985 se permitió experimentalmente utilizar voltajes mayores a 1000 V en minas de tajos largos o *longwall* particulares, trabajando con sistemas de 2400 V o 4160 V, en que se debía garantizar el mismo grado de protección conferida por la norma vigente. A mediados de la década de 1990 la industria minera subterránea en general alcanzó los límites operacionales y los sistemas de alta tensión ya habían demostrado su seguridad, confiabilidad, y alta productividad. Como resultado la MSHA presentó su propuesta de norma para las máquinas de minería de alto voltaje subterránea.

En este capítulo se definen tres niveles de tensión para los sistemas de potencia de la minería: baja, media y alta tensión. La baja tensión son los voltajes menores a 660 V, la media tensión es el rango entre 661 V a 1000 V, y alta tensión de sobre los 1000 V.

Esta norma reduce los límites de corrientes de falla a tierra, baja el valor del pickup en la configuración de los relés de falla a tierra, y propone precauciones especiales con respecto a la manipulación de los cables de arrastre, en comparación con los mismos cables de baja y media tensión. La razón para los estrictos requisitos es proporcionar una protección adicional contra descargas para los trabajadores, debido a que la tensión es mayor.

En este capítulo se explicará la razón del aumento de las precauciones para sistemas de alta tensión en minas subterráneas, en comparación con los actuales sistemas de baja y media tensión. Los sistemas de alta tensión existentes son de 2400 V y 4160 V y se analizará el caso de 2400 V solamente.

6.3. Análisis de seguridad de los cables

Se determinará la efectividad de los cables de arrastre mineros utilizados en baja, media y alta tensión en cuanto a la protección de los trabajadores frente a una descarga eléctrica. Un cable de arrastre consiste básicamente en conductores de energía, conductores de tierra, un conductor de verificación de tierra, pantalla, aislamiento, cintas, relleno, y una chaqueta. Sin embargo, los cables de baja tensión (<660 V) no están obligados a usar pantalla. Las regulaciones permiten el uso de pantallas de SHC en los cables de media tensión (661 V - 1000 V), donde solamente una pantalla conductora rodea todos los conductores, pero el blindaje SHD, que rodea el aislamiento de cada conductor de alimentación por separado, se usa normalmente. Los cables de alta tensión están obligados a tener el blindaje SHD. Además de las consideraciones de aislamiento eléctrico, el diseño final de los cables debe adaptarse a las tensiones físicas que se encuentran en el ambiente minero, las cuales incluyen la tensión, flexión, abrasión y aplastamiento. Por lo tanto, la construcción del cable debe ser muy robusta para soportar condiciones severas de operación.

6.3.1. Cable de baja tensión

Un cable de arrastre típico utilizado en baja tensión (380 V o 600 V) es 4/0-AWG 2 kV de tipo G-GC, que se muestra en la Figura 6.2. Los conductores 4/0 de alimentación (cable de cobre estañado en capas comprimidas) se disponen en una forma simétrica. Una cinta blanca de mylar (tereftalato de polietileno) rodea cada conductor de alimentación y actúa como un separador entre el conductor y su aislamiento. El material aislante de cada conductor es de un mínimo promedio de 2 mm de caucho etileno-propileno, que es de color rojo, blanco o negro para la identificación de la fase. El relleno (*filler*) de caucho se utiliza para llenar el vacío en el intersticio central. Dos conductores de puesta a tierra calibre 2 AWG, cubiertos con cinta de mylar verde, se ubican en dos intersticios de los conductores de fase aislados. Un conductor de 8 AWG de verificación de tierra, aislado con 1,1 mm de polipropileno, se encuentra en el tercer intersticio. (Cabe señalar que los cables de G+GC, donde el conductor de verificación de tierra se encuentra en el intersticio del centro, se pueden utilizar en todos los niveles de tensión.) Una chaqueta interna de aproximadamente 1,5 mm de polietileno clorado negro de trabajo pesado (HD) y una cubierta exterior de aproximadamente 3,7 mm de polietileno clorado negro de trabajo extra pesado (EHD) rodean el conjunto de todo el cable. El filamento de polipropileno, que se encuentra entre las chaquetas de interior y exterior, se utiliza como refuerzo.

Cable tipo G-GC de 2 kV 4/0 AWG

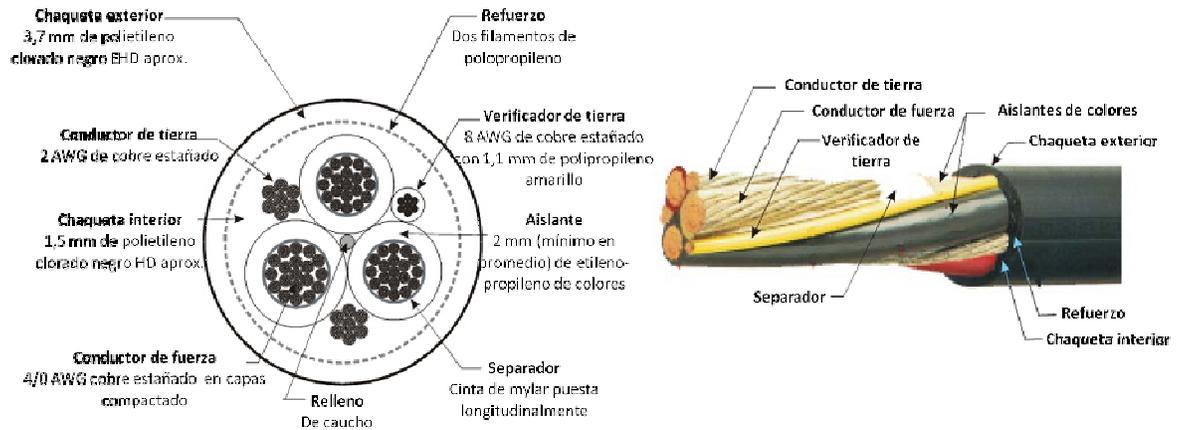


Figura 6.2: Cable de arrastre típico para bajo voltaje

6.3.2. Cable de Media Tensión

La Figura 6.3 muestra la disposición típica de un cable de arrastre 2/0-AWG 2 kV de tipo G-GC utilizado para media tensión (1040 V). El aumento de tensión permite que los conductores de poder sean de menor tamaño tanto los de fase (2/0 AWG) y de tierra (3 AWG). La construcción es muy similar a la del cable de baja tensión con una excepción importante: la pantalla trenzada (*braided shield*). Al igual que el cable de baja tensión, cada conductor de fase se cubre con una capa de cinta de mylar, seguida de 2 mm de caucho etileno-propileno. El aislamiento se envuelve con la cinta de goma reforzada con tela, aplicada helicoidalmente y superpuesta. Sin embargo, a diferencia del cable de baja tensión, un blindaje trenzado de cobre y nylon rodea la cinta de tela. El blindaje proporciona un mínimo de 60% de cobertura de cobre. El blindaje de las tres fases está íntimamente en contacto con el conductor de puesta a tierra en toda la longitud del cable. El tamaño y la ubicación del conductor de verificación de tierra es el mismo que para el cable de baja tensión. Las chaquetas de interior y exterior son construidas de polietileno clorado negro de trabajo extra pesado (EHD) con un espesor de 1,8 y 3,4 mm respectivamente. Al igual que con el cable de bajo voltaje, el filamento de polipropileno se utiliza como refuerzo entre las dos chaquetas.

- El interior y exterior de las chaquetas de polietileno clorado EHD tienen distintos colores: verde y naranja respectivamente. Esta característica mejora la capacidad del trabajador para identificar visualmente un revestimiento exterior dañado.
- El espesor combinado de las chaquetas de interior y exterior es de 5,6 mm para el cable de alta tensión, comparados con los 5,2 mm para el cable de media tensión.

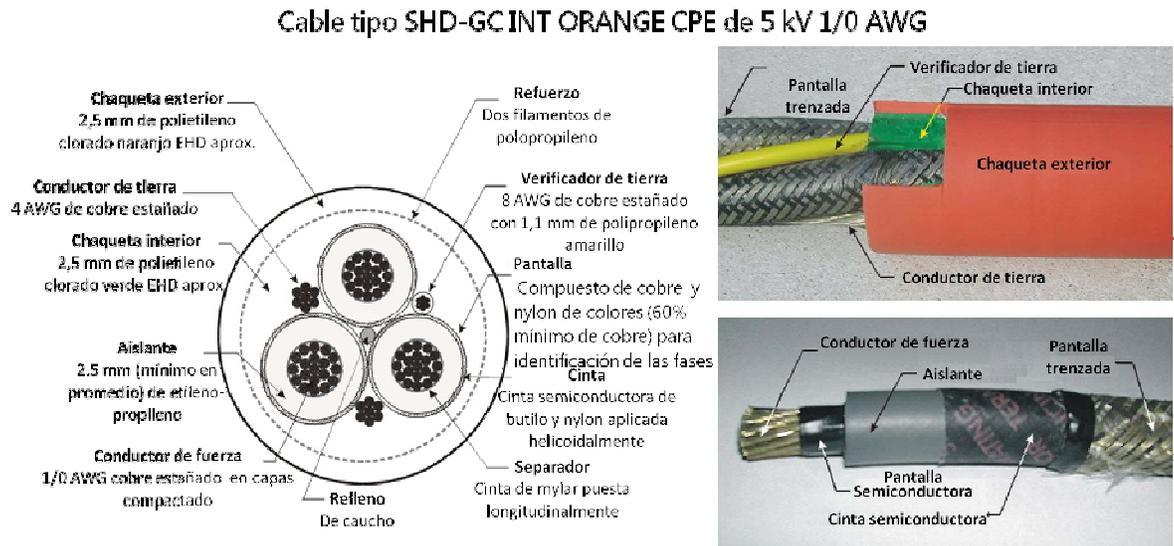


Figura 6.4: Cable de arrastre típico para alto voltaje

6.3.4. Circuito Modelo

La Figura 6.5 muestra un modelo genérico de un circuito de un sistema minero para la realización de análisis cuantitativos de seguridad para cualquier voltaje del sistema. El modelo consiste en el secundario del transformador trifásico de potencia con sus impedancias Z_t asociadas a cada fase, al lado de la resistencia de neutro a tierra RNG, y las impedancias de los cables de arrastre Z_L . La NGR está conectada entre el punto neutro de la conexión estrella del secundario del transformador y la tierra. El cable se modela como una impedancia Z_L (resistencia y reactancia inductiva) en serie para cada fase y una reactancia shunt capacitiva X_C entre cada conductor de línea y tierra. La reactancia shunt capacitiva se debe a la capacidad inherente del sistema entre los conductores de fase y tierra. La resistencia de R_f se utiliza para modelar la resistencia de falla de una línea de falla de tierra. A continuación se analizará el efecto de la tensión del sistema en los valores de la NGR y la reactancia capacitiva X_C .

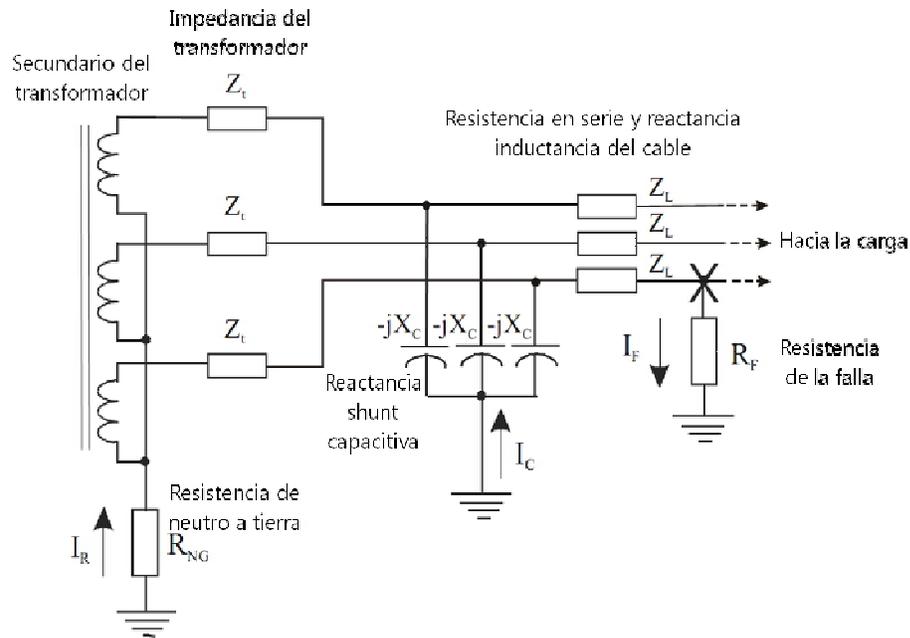


Figura 6.5: Circuito trifásico genérico que modela los riesgos eléctricos de un sistema minero

6.3.4.1. Resistencia de neutro a tierra

La resistencia de neutro a tierra R_{NG} limita la máxima corriente de falla. Así, el valor óhmico de la NGR se basa en el límite máximo de corriente por falla a tierra requerida por las regulaciones y normativas. La corriente de falla es la suma fasorial de las corrientes que retornan al transformador a través de esta resistencia y las provenientes de la capacitancia del sistema dada por $X_C/3$. En los sistemas de baja y media tensión, los valores para la NGR son relativamente pequeños ya que el efecto de la capacitancia del sistema es menor, comparado con sistemas de alta tensión, y puede despreciarse. Esto es particularmente cierto en las bajas tensiones, ya que los cables blindados no son necesarios. Como resultado, la siguiente fórmula se utiliza tradicionalmente para determinar el valor de la NGR:

$$R_{NG} = \frac{V_{FF}}{\sqrt{3} I_{ft(max)}} \quad (6.1)$$

La ecuación 6.1 supone que la resistencia de falla de R_F es nula, que se traduce en una corriente de falla máxima (falla sólida). Para tensiones baja y media, los reglamentos federales de E.E.U.U. requieren que la máxima corriente de falla a tierra se limitará a 25 A. Sin embargo, a lo largo de los años, la práctica común ha sido estandarizada para 15 A. Por lo tanto, los valores óhmicos de las NGR en baja y media tensión se calculan de la siguiente manera:

- Sistemas de 480 V:

$$R_{NG} = \frac{480}{\frac{\sqrt{3}}{15}} = 18,5 \, \Omega \quad (6.2)$$

- Sistemas de 600 V:

$$R_{NG} = \frac{600}{\frac{\sqrt{3}}{15}} = 23,1 \, \Omega \quad (6.3)$$

- Sistemas de 1040 V:

$$R_{NG} = \frac{1040}{\frac{\sqrt{3}}{15}} = 40 \, \Omega \quad (6.4)$$

Para un sistema de 2400 V, la regulación propuesta establece que la máxima corriente de falla a tierra se limita a 0,5 A. Por lo tanto, sobre la base de la ecuación (6.1), el valor de la resistencia de puesta a tierra se calcula de la siguiente manera:

$$R_{NG} = \frac{2400}{\frac{\sqrt{3}}{0,5}} = 2770 \, \Omega \quad (6.5)$$

6.3.4.2. Capacitancia del sistema

En el cable de SHD, una pantalla de cobre y nylon trenzada conectada a tierra rodea el aislamiento de cada conductor de fase. Esta disposición física da como resultado la presencia de una capacitancia de línea a tierra distribuida a lo largo de toda la longitud del cable. La capacitancia es esencialmente causada por conductores paralelos (el conductor de fase y la pantalla de cobre a tierra), separadas por un dieléctrico (el aislamiento alrededor de cada conductor) por toda la longitud del cable, como se muestra en la Figura 6.6.

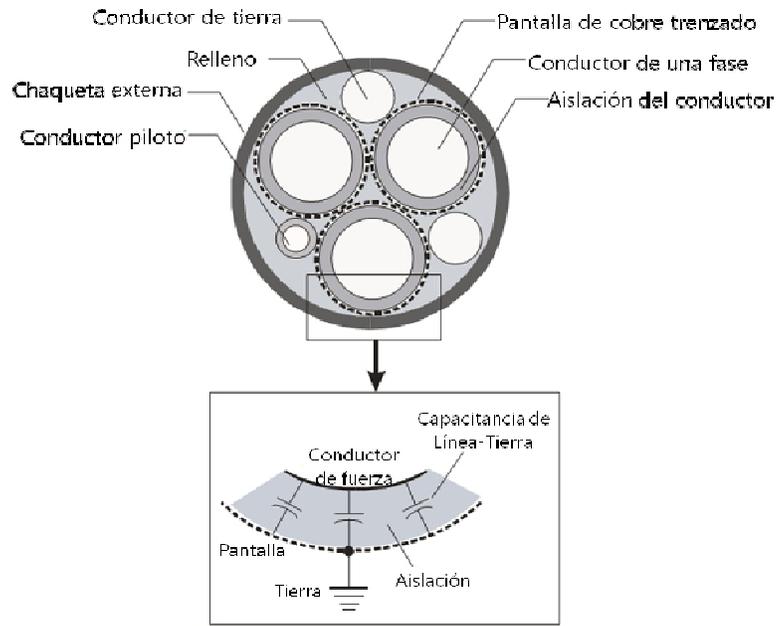


Figura 6.6: Sección transversal de un cable SHD que ilustra la capacitancia shunt

Debido a los bajos valores óhmicos de la NGR en los sistemas de baja y media tensión, los efectos de la capacitancia del sistema pueden ser despreciados en el cálculo de las corrientes de falla a tierra. Las capacitancias en la Figura 6.4 pueden ser removidas en la realización de análisis cuantitativos de los sistemas de baja y media tensión, lo que resulta en un circuito más simple. Sin embargo, para un sistema con una tensión de 2400 V, el valor de la reactancia capacitiva es comparable con el valor óhmico de la NGR, por lo tanto, la capacitancia del sistema debe tenerse en cuenta para los análisis precisos.

6.3.5. Análisis de Peligros

En la referencia [33] se estudian tres escenarios de riesgo de descarga eléctrica, donde se analiza la respuesta del sistema en cada nivel de tensión para determinar la seguridad del cable. Los tres escenarios son:

- **Escenario 1:** Un objeto metálico, como un clavo o una estaca, perfora un cable pasando a través las chaquetas y el aislamiento de un conductor de fase. Ver Figura 6.7.
- **Escenario 2:** Las chaquetas y el aislamiento de un cable presentan una ruptura en que el agua y la suciedad pueden penetrar a uno de los conductores de la energía. Ver Figura 6.8.
- **Escenario 3:** Un cable está dañado hasta el punto de que un conductor energizado está expuesto. Ver Figura 6.9.

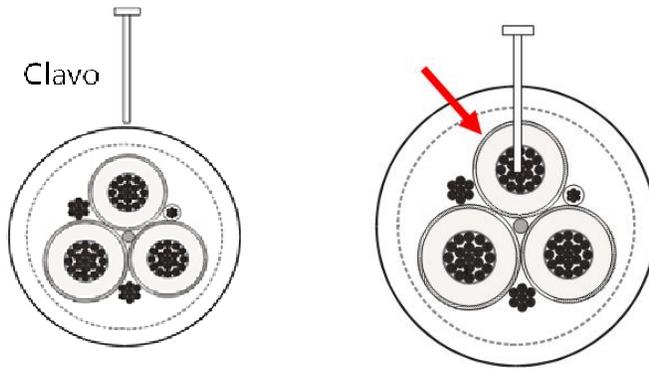


Figura 6.7: Escenario 1

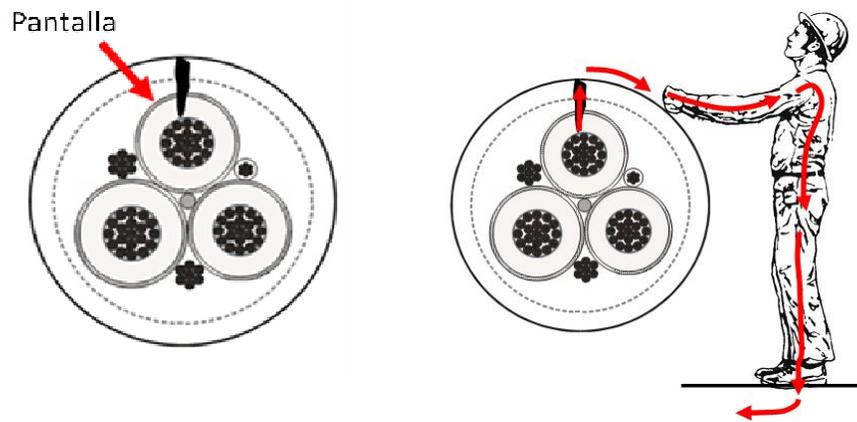


Figura 6.8: Escenario 2

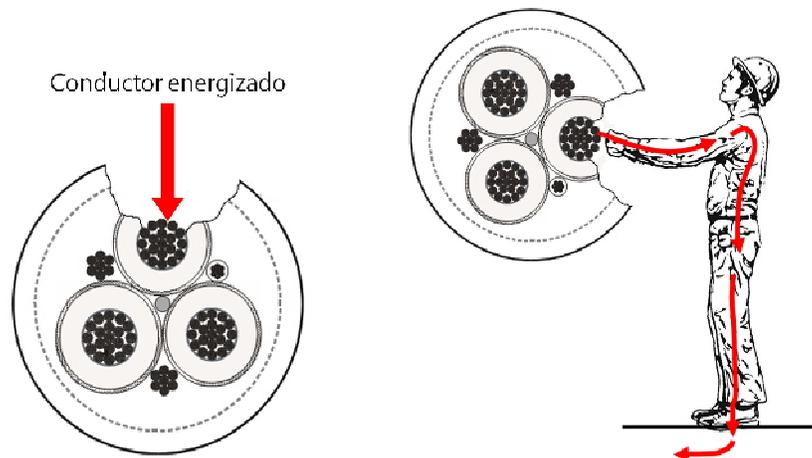


Figura 6.9: Escenario 3

El análisis del escenario 1 revela que la construcción del cable utilizado para 2400 V proporciona el más alto grado de protección. La falta de una pantalla conductora a tierra de los cables de baja tensión se traduce en la ausencia de un camino de tierra, que no permite la activación del relé de falla a tierra. El objeto metálico eleva la tensión de línea a tierra, lo que puede pasar inadvertida y presentan un serio peligro de descarga por un período indefinido. La pantalla a tierra de los cables de media tensión reduce significativamente este riesgo al proporcionar una vía de retorno para la corriente de falla a tierra para que el relé de falla a tierra dispare cuando su pickup configurado a 6 A sea superado. Sin embargo, el cable de media tensión utiliza un trenzado de protección de cobre y nylon, que proporciona una cobertura mínima de cobre de 60%. Por lo tanto, si el objeto metálico tiene un diámetro lo suficientemente pequeño, puede ser capaz de penetrar a través de la parte abierta o de nylon de la pantalla sin tocar la parte de cobre. Si esto ocurriera, el riesgo de una descarga eléctrica que existiría sería similar al caso de baja tensión, salvo que la tensión de Fase-Tierra sería mayor. Con el cable de 2400 V, este peligro de descarga esencialmente sería eliminado. Además de la pantalla de nylon y cobre, el aislamiento de cada conductor de fase se envuelve con la cinta semiconductor. Como resultado, se produce una cobertura conductora del 100%. Por lo tanto, cualquier objeto metálico que penetra en un conductor de energía daría lugar a una falla a tierra que dispararía al interruptor automático en el centro de poder.

El análisis del escenario 2 también muestra que la construcción del cable utilizado para los sistemas de 2400 V ofrece el más alto grado de protección. En un ambiente húmedo, la penetración del agua puede crear una ruta de fuga de corriente del conductor de energía de una fase hasta la superficie externa de la chaqueta del cable. Con el cable de baja tensión, este riesgo puede pasar desapercibido por un período indefinido, y es posible que un trabajador reciba una descarga si se pone en contacto con la chaqueta del cable mojada a pocos metros de la ruptura. Con el sistema de media tensión, la pantalla trenzada de nylon y cobre rodea cada fase individual y proporciona un camino a tierra para que fluya la falla a tierra. Sin embargo, debido a la configuración del pickup a 6 A del relé de falla a tierra, la resistencia de la trayectoria de la corriente de fuga debe ser extremadamente baja ($65,5 \Omega$) para que el disparo ocurra. Con el sistema 2400 V, la probabilidad de este riesgo de descarga se reduce drásticamente a causa de que la configuración del pickup de 0,125 A, requerido por las regulaciones propuestas, es muy baja. Incluso con una resistencia de la trayectoria de la corriente de fuga de $8,0 \text{ k}\Omega$, el relé de falla a tierra se activará y desenergizará el cable defectuoso.

El análisis del escenario 3 muestra que la construcción del cable utilizado para el sistema de 2400 V disminuye el riesgo de exposición a un conductor de energía desnudo debido a roturas. El espesor combinado de las chaquetas de interior y exterior del cable de alta tensión incrementado en un 7,3% en comparación con los cables de baja y media tensión, mientras que el espesor de aislamiento se incrementa en un 37,5%. Además, los cables de alta tensión tienen 0.4 mm de un compuesto semiconductor extruido alrededor de cada conductor de la energía, añadiendo otra capa de protección. También debe tenerse en cuenta el requerimiento de que los colores por separado para las chaquetas de interior (verde) y externa (naranja) del cable de

alta tensión aumentan la posibilidad de detectar visualmente una chaqueta dañada en un cable antes de que se produzca un contacto accidental.

6.4. Análisis de descarga

Una fuente de voltaje suele ser la causa de una descarga eléctrica. Sin embargo, una descarga se puede cuantificar en términos de corriente. Para comprender mejor por qué la corriente se utiliza para definir la gravedad de una descarga eléctrica, se considera que una fuente de voltaje está en contacto con una de las extremidades de una persona. Con una fuente de voltaje, la cantidad de corriente a través del cuerpo de la víctima depende de la resistencia del cuerpo, y la ley de Ohm ($I = V/R$) determina la magnitud de la corriente. Por lo tanto, la corriente que circula por el cuerpo puede variar drásticamente de un voltaje determinado, dependiendo de las condiciones físicas que afectan a la resistencia del cuerpo en el momento de la descarga.

El circuito de la Figura 6.5 se utiliza para determinar la corriente del cuerpo (I_F) para una resistencia del cuerpo determinada (R_F) a diferentes niveles de tensión. Los diferentes escenarios entre las protecciones de falla a tierra de alta, media y baja tensión se estudian en la siguiente sección. Finalmente se calculan las corrientes del cuerpo se comparan los niveles de tensión diferentes.

6.4.1. Protección de falla a tierra

El relé de secuencia cero, también llamado relé de flujo equilibrado, es el método principal de protección por falla a tierra utilizado en todos los niveles de tensión, a pesar de que los relés utilizados para alta tensión son más sensibles y sofisticados. Como se muestra en la Figura 6.10, el circuito consta de un solo transformador de corriente de tipo ventana (TC) y un relé de falla a tierra. Los tres conductores de línea pasan a través del núcleo del TC, formando la bobina primaria. Por lo tanto, la corriente primaria es la suma fasorial de las tres corrientes de línea. En condiciones normales, las corrientes de un sistema minero fluyen y retornan a través del TC, lo que resulta en una condición de equilibrio, y las tres corrientes de línea suman cero. Sin embargo, si se produce una falla a tierra, la corriente de falla a tierra volverá a través del conductor de tierra, afuera del núcleo del TC. Esto da como resultado una situación de desequilibrio y las corrientes de línea ya no suman cero. Como consecuencia de esto, una corriente resultante es inducida en el secundario del TC que activa el relé de falla a tierra para disparar el interruptor si el ajuste del pickup del relé es superado.

En los sistemas de baja y media tensión, las regulaciones exigen que la protección por falla a tierra sea instantánea (sin retardo intencional), con un pickup del relé de falla a tierra fijado en

predicción de la fibrilación ventricular en la Figura 6.11. Los relés de falla a tierra, para todos los voltajes, son de tiempos definidos. El tiempo de operación para este tipo de relés es independiente de la cantidad de accionamientos y es relativamente constante para cualquier corriente que supere el ajuste de pickup. El tiempo total de despeje es la suma de los tiempos de operación del relé de falla a tierra, el relé de mínima tensión (*undervoltage release*) o el disparo en derivación, y el interruptor. Una vez que se inicia el contacto de separación, un interruptor encapsulado (molded case), que se utiliza para tensiones de baja y media, por lo general despeja la falla con uno o dos ciclos, mientras que un interruptor de vacío, utilizado para la tensión alta, normalmente despeja al primer cruce de la corriente por cero. Por lo tanto, un valor conservador para el tiempo de operación de ambos tipos de interruptores es de 2 ciclos o 0,033 s (considerando la frecuencia de 60 Hz de la norma americana). Si los tiempos de operación para el relé de mínima tensión y para el relé de falla a tierra son 0,05 s, entonces el tiempo de despeje de falla total sería de 0,133 s. Un tiempo adicional de 0,050 s hay que añadir al tiempo de despeje para el sistema de 2400 V ya que se debe tener en cuenta el tiempo de retardo permitido por las regulaciones. Las curvas características de despeje total se muestran en la Figura 6.11. Se observa que el sistema no está diseñado para proteger contra la fibrilación ventricular, sin embargo, la mayor sensibilidad del sistema de 2400 V es evidente. De hecho, el ajuste del pickup de baja y media tensión es 48 veces superior que el pickup del sistema de 2400 V.

Cabe destacar que la predicción de la fibrilación ventricular sólo se utiliza como referencia para ilustrar la gravedad de una descarga eléctrica en contacto directo en los diferentes niveles de tensión y que ninguno de los sistemas de protección, independientemente de la tensión, se han diseñado para proteger contra la fibrilación ventricular. Puesto que la predicción se basa en estudios de investigación realizados en animales, no debe ser aceptada como un medio definitivo para determinar si existe o no una corriente letal.

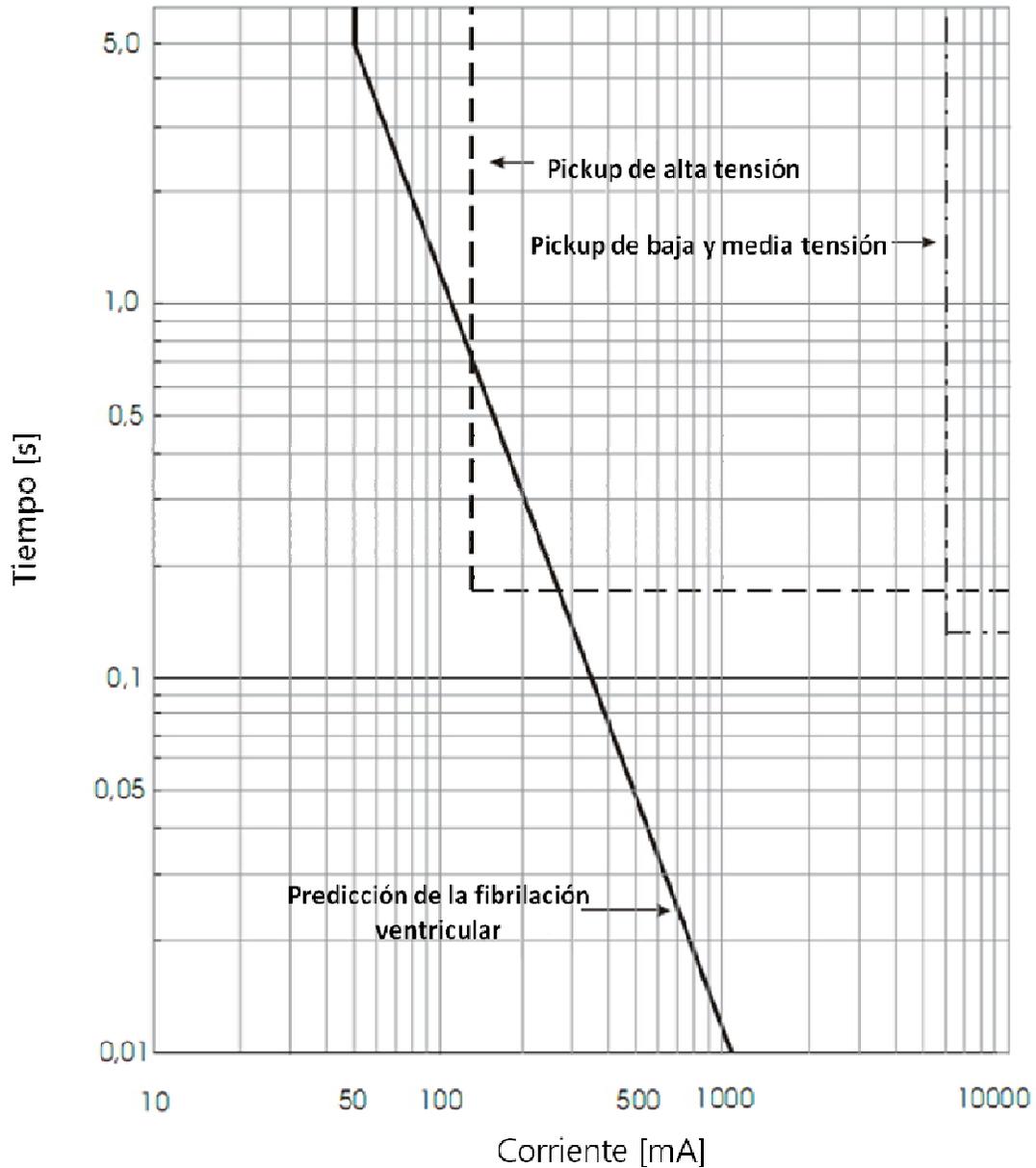


Figura 6.11: Curvas características del tiempo de despeje de una falla para diferentes tensiones

6.4.3. Análisis de las corrientes por el cuerpo

Las corrientes por el cuerpo para las resistencias de 500 Ω , 650 Ω y 1000 Ω se resumen en la Tabla 6.1, donde se consideran distintos niveles de voltaje y se evalúa si el relé de protección de falla a tierra dispara [35].

Voltaje V	Resistencia por el cuerpo = 500 Ω		Resistencia por el cuerpo = 650 Ω		Resistencia por el cuerpo = 1000 Ω	
	Corriente por el cuerpo mA	Disparo del Relé	Corriente por el cuerpo mA	Disparo del Relé	Corriente por el cuerpo mA	Disparo del Relé
480	534	NO	415	NO	272	NO
600	662	NO	515	NO	339	NO
1040	1112	NO	870	NO	577	NO
2400	424	SI	405	SI	368	SI

Tabla 6.1: Resumen del análisis de las corrientes por el cuerpo

Como se observa el sistema de 2400 V es el que presenta mayor seguridad para el personal en todos los casos, pues presenta bajas corrientes y el relé de protección de falla a tierra dispara en los tres casos.

CAPÍTULO 7

Conclusiones

En esta memoria se describen metodologías técnicas y recomendaciones presentadas por normas de puestas a tierra en sistemas eléctricos mineros nacionales e internacionales, que indican los criterios a seguir, límites a cumplir y equipos a utilizar. Los aspectos de estas normas a considerar son el acoplamiento entre puestas a tierra en una mina, el diseño apropiado de una resistencia de neutro a tierra, equipos de protección relacionados con estas resistencias, y seguridad de los cables de arrastre subterráneos. Estos cuatro aspectos corresponden a los capítulos 3, 4, 5 y 6 de esta memoria, y sus respectivas conclusiones son:

En el capítulo 3, se determinó que si bien en una mina se pueda cumplir con la norma de distancia mínima entre dos puestas a tierra, existen ciertos mecanismos que favorecen el acoplamiento que trata de evitar tal distancia. También se discutió la ineficacia de algunos métodos para reducir el acoplamiento. Luego se da la recomendación de interconectar dos puestas a tierra si el acoplamiento de voltaje medido supera al 33%, excluyendo el caso entre tierra de seguridad y se servicio, y se entrega un método para calcular aproximadamente las variables eléctricas involucradas en una falla.

En el capítulo 4, se proporciona un método aproximado para determinar el valor óhmico de una NGR, el valor máximo de corriente de falla, la corriente capacitiva que fluye en las fases sanas durante una falla a tierra, y el ajuste del pickup de las protecciones. Estos valores consideran el efecto capacitivo producido por los cables mineros. Adicionalmente se utiliza este método para dos casos: en una mina de superficie y una mina de tajos largos (subterránea).

En el capítulo 5, se indican las consideraciones especiales para las protecciones en el caso de un sistema con resistencia de neutro a tierra. También se destacan las precauciones de un monitor de conductor de tierra, de modo que se asegure que el sistema de resistencia a tierra

opere. Después se explica la razón del uso de un monitor de resistencia a tierra, las precauciones que se debe tener, y la correcta implementación de este equipo.

En el capítulo 6, se analiza tres tipos de cables de arrastre subterráneo: el primero para tensiones menores a 1000 Vac, el segundo para 1040 Vac, y el tercero para 2400 Vac. Dentro del análisis se consideró su construcción, seguridad cuando presentan daños mecánicos y están en contacto con el personal, y la seguridad del sistema de protecciones frente a una falla, para estos tres rangos de tensiones. A pesar de que hay mayor riesgo si mayor es la tensión, el resultado obtenido es que los cables de arrastre de mayor tensión otorgan mayor seguridad tanto para el personal como para equipos.

Las normas estudiadas en esta memoria corresponden a la norma canadiense CSA M421, la estadounidense 30 CFR de la MSHA, el decreto supremo N°132 del Ministerio de Minería de Chile, y la norma chilena NCH Elec. 4/2003. La normativa chilena entrega criterios generales y presenta menos exigencias a las puestas a tierra en comparación con las normas norteamericanas, por lo que el trabajo se enfocó en estas. Ambas normas exigen la inclusión en sistemas eléctricos mineros puestas a tierra con NGR, resaltando que la norma canadiense es más exigente respecto a el monitoreo de las NGR. Adicionalmente se determinó que los límites de corriente para las NGR actuales en el futuro, debido al crecimiento de los sistemas eléctricos en la minería, sean mayores que los límites de corriente de la definición de una NGR de alta resistencia, por lo que se esperan modificaciones futuras a los reglamentos actuales.

Se propone como trabajo futuro los siguientes ítems:

- Analizar el sistema de puesta a tierra de una mina en particular, donde se justifique mediante simulaciones y cálculos aproximados, el valor óhmico de la resistencia de neutro a tierra y el ajuste de las protecciones, considerando el efecto de los cables de arrastre.
- Comparar las normas eléctricas en sistemas mineros canadienses y estadounidenses, con el fin de encontrar las diferencia entre ellas y cual confiere mayor seguridad, a fin de proponer una normativa nacional.
- Diseñar un monitor continuo de NGR enfocándose específicamente en el circuito lógico y procesamiento de los datos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] AL-HAJRI, M. "Neutral Ground Resistor Monitoring Schemes". International Symposium on Electrical Insulation, 2004. Conference Record of the 2004 IEEE. 2004
- [2] ANGELINI, F. Y SHIPP, D. "Characteristics of Different Power Systems Neutral Grounding Techniques: Fact & Fiction". Pulp and Paper Industry Technical Conference, 1990, Conference Record of 1990 Annual.1990.
- [3] ANSI e IEEE N°32. "IEEE Standard Requirements, Terminology, and Test Procedure for Neutral Grounding Devices". Institute of Electrical and Electronics Engineers. 1972.
- [4] BENDER. "Electrical safety in mines". [en línea]. <<http://www.benderrelay.com>>
- [5] BOWYER, J. y CHANEY, T. "Mine Grounding, Factors That Prohibit a Universal Grounding Solution". Industry Applications Conference, 1996. Thirty-First IAS Annual Meeting, IAS '96., Conference Record of the 1996 IEEE. 1996.
- [6] CAWLEY, J. "Electrical Accidents in the Mining Industry, 1990-1999". Vol. 2. IEEE Transactions on Industry Applications. pp .1361-1368. 2003.
- [7] CHAN, L., SU, S., WANG, Y. y ZENG, X. "Ground-Fault Feeder Detection With Fault-Current and Fault-Resistance Measurement in Mine Power Systems". IEEE Transactions on Industry Applications. pp. 424-429. 2008.
- [8] COMISIÓN CHILENA DEL COBRE, DIRECCIÓN DE ESTUDIOS. "Coeficientes unitarios de consumo de energía de la minería del cobre 1995-2006". Chile. [en línea]. <http://www.minmineria.cl/574/articles-5740_recurso_1.pdf>. 2007.
- [9] COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA. "Balance Energético Nacional 2008". Chile. [en línea]. <http://www.cne.cl/cnewww/opencms/06_Estadisticas/Balances_Energ.html>. 2008.

- [10] COOLEY, W., HILL, H. "Coupling of Mine Grounds to Surface Grounds". IEEE Transactions on Industry Applications. pp. 360-364. 1986.
- [11] COOLEY, W., HILL, H. "Mine Power-System Grounding Research". IEEE Transactions on Industry Applications. pp. 846-852. 1988.
- [12] CRAWFORD, K., SAVOSTIANIK, M., SELKIRK, D. "The dangers of grounding resistor failure". Industry Applications Magazine, IEEE. pp. 53-58. 2008.
- [13] CRAWFORD, K., SAVOSTIANIK, M., SELKIRK, D. "Why neutral-grounding resistors need continuous monitoring". Petroleum and Chemical Industry Technical Conference, 2008. PCIC 2008. 55th IEEE. pp. 1-7. 2008.
- [14] DROBNJAK, G., IHARA, S., LABOS, W., SKLIUTAS, J. "A Possible Mechanism for Neutral Grounding Resistor Failures". Vol. 2. Power Engineering Society General Meeting, 2005. IEEE. pp. 1149-1154. 2005.
- [15] DUDIAK, J. y PAULSON, G. "Ground-Fault Protection and Ground-Conductor Monitoring for Portable Mine-Power Cables". Starco E. Littelfuse Startco Published Papers. 1995.
- [16] FEDERAL PIONEER. "Ground fault protection on undergrounded and high resistance grounded systems". Toronto, Canadá. 1991.
- [17] GLENNEY, J. y SALKIRK, D. "The Importance of the Neutral-Grounding Resistor". Starco. [en línea]. <<http://www.starco.ca>>. 2005.
- [18] HARTMAN, H. "SME Mining Engineering Handbook". 2 ed. Vol. 1. Colorado, E.E.U.U. pp. 1198-1214. 1992.
- [19] HELFRICH, W. "MSHA metal/nonmetal electrical grounding requirements". IEEE Cement Industry Technical Conference. 1981.
- [20] HELFRICH, W. y REYNOLDS, R. "Safety grounding - a performance approach". Institute of Electronic and Electrical Engineers (IEEE) 1985 Mining Industry Technical Conference. 1985.
- [21] HOU, Y., LI, N. y ZHAO, J. "Safety Measurement of Capacitive Current for Coal Mine Distribution Network". International Conference on Electrical Machines and Systems, 2008. ICEMS 2008. Pp. 4354-4356. 2008.

- [22] IEEE N°142. "IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems". Institute of Electrical and Electronics Engineers. 2007.
- [23] IEEE N°80. "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding". Institute of Electrical and Electronics Engineers. 2000.
- [24] INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICAS, SUBDEPARTAMENTO DE ESTADÍSTICAS SECTORIALES. "Síntesis Metodológica Índice de producción minera". Chile. [en línea]. <http://www.ine.cl/canales/chile_estadistico/estadisticas_economicas/mineria/metodologia/metodo/metodologiamineria05.pdf>. 2006.
- [25] IZADFAR, H., FARSAD, M., ANDAVARI, D., SHOKRI, S. "Design and Calculation of 66kV Neutral Grounding Resistor for Main Transformers in Bandar Imam Petrochemical Complex (BIPC) Power Station Located in South West of IRAN". Vol. 3. Proceedings of the Eighth International Conference on Electrical Machines and Systems, 2005. ICEMS 2005. pp. 2349-2353. 2005.
- [26] KOHLER, J., NOVAK, T. y SOTILLE, J. "The Effects of Cable Capacitance on Longwall Power Systems". IEEE Transactions on Industry Applications. pp. 1406-1412. 2004.
- [27] KOHLER, J., NOVAK, T. y SOTILLE, J. "Detrimental Effects of Capacitance on High-Resistance-Grounded Mine Distribution Systems". IEEE Transactions on Industry Applications. pp. 1333-1339. 2006.
- [28] KOHLER, J., ROTITHOR, H., TRUTT, F. "A Coordination-Free Ground-Fault Relay For AC Mine Distribution Systems". Vol. 2. IEEE Transactions on Industry Applications. pp. 1267-1271. 1989.
- [29] MINE SAFETY AND HEALTH ADMINISTRATION, [en línea] <<http://www.msha.gov>>.
- [30] MINISTERIO DE MINERÍA. "Decreto N°132: Reglamento de seguridad minera". Santiago, Chile. 2004.
- [31] MORALES OSORIO, N. "Mallas de tierra". 1 ed. Santiago, Chile. Procobre. [en línea]. <<http://www.procobre.org/procobre/documentos.html>>. 1999.
- [32] MORALES OSORIO, N. "Sistemas de puestas a tierra". 1 ed. Santiago, Chile. Procobre. [en línea]. <<http://www.procobre.org/procobre/documentos.html>>. 1999.

- [33] MORALES OSORIO, N. "Puesta a tierra". Santiago, Chile. Oficina de Publicaciones Docentes, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Chile. 2003.
- [34] MORALES OSORIO, N. "Apuntes EL67H: Puesta a Tierra de Instalaciones Eléctricas y Electrónicas". Santiago, Chile. 2010.
- [35] NOVAK, T. "Analysis of Very-High Resistance Grounding in High-Voltage Longwall Power Systems". Vol. 3. Industry Applications Conference, 1998. Thirty-Third IAS Annual Meeting. The 1998 IEEE. pp. 2175-2183. 1998.
- [36] NOVAK, T. "The Effects of Very-High Resistance Grounding on the Selectivity of Ground-Fault Relaying in High-Voltage Longwall Power Systems". IEEE Transactions on Industry Applications. pp. 398-406. 2001.
- [37] NOVAK, T. "Safety analysis of trailing cables used on high voltage continuous miners". Virginia, E.E.U.U. pp. 1341-1347. 2004.
- [38] NOVAK, T. y SOTILLE, J. 2007. "Best Practices for Implementing High-Resistance Grounding in Mine Power Systems". Industry Applications Conference, 2007. 42nd IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2007 IEEE. 2007.
- [39] ORTUONDO, P. "Manual para el proyecto y análisis de puestas a tierra". Santiago, Chile. 1997.
- [40] OWEN, O. "Power system grounding. III. Large portable machines. Industry Applications Magazine", IEEE. pp. 59-62. 1996.
- [41] PAULSON, G. "Monitoring Neutral-Grounding Resistors - An Update". Starco E. Littelfuse Startco Published Papers. 2003.
- [42] RIFAAT, R. "Considerations and Improvements of Configuration and Protection of a 72 kV Mining Resistance Neutral Grounded System". Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, 2008. ICPS 2008. IEEE/IAS. 2008.
- [43] SELKIRK, D. "Ground-Fault Detection, Charging Current and Neutral-Grounding Resistor Selection". Starco E. Littelfuse Startco Published Papers. 2008.

- [44] SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGÍA Y MINERÍA. "Guía metodológica de seguridad para proyectos de electrificación de minas, plantas y fundiciones". Chile. Departamento de Seguridad Minera. 2008.
- [45] SUPERINTENDENCIA DE ELECTRICIDAD Y COMBUSTIBLES. "NCH4 Elec. 4: Instalaciones de Consumo en Baja Tensión". Santiago, Chile. 2003.
- [46] VILLARUBIA, M." Seguridad eléctrica: efectos de la corriente eléctrica sobre el cuerpo humano". [en línea]. <<http://www.energuia.com>>. 2000.
- [47] WISHTIBEEV, A. "About duration operate of resistor for neutral grounding". Vol. 2. The 7th Korea-Russia International Symposium on Science and Technology, 2003. Proceedings KORUS 2003. pp. 282-286. 2003.

A. EXTRACTO DE NORMAS INTERNACIONALES SOBRE RESISTENCIAS DE NEUTRO A TIERRA

US Regulations – NEC 2005 – Article 250

Grounding and Bonding 250.188 (D) Ground-Fault Detection and Relaying.

Ground-fault detection and relaying shall be provided to automatically de-energize any high-voltage system component that has developed a ground fault. The continuity of the equipment grounding conductor shall be continuously monitored so as to de-energize automatically the high-voltage circuit to the portable or mobile equipment upon loss of continuity of the equipment grounding conductor.

US Regulations - 30 CFR Section 18.47 – Gassy Mines or Tunnels

Electric motor-driven mine equipment and accessories

30 CFR 18.47 Voltage Limitation

(2) A continuously monitored, failsafe grounding system is provided that will maintain the frame of the equipment and the frames of all accessory equipment at ground potential. Also, the equipment, including its controls and portable (trailing) cable, will be deenergized automatically upon the occurrence of an incipient ground fault. The ground-fault-tripping current shall be limited by grounding resistor(s) to that necessary for dependable relaying. The maximum ground-fault-tripping current shall not exceed 25 amperes.

US Regulations - 30 CFR Section 56 – Testing grounding systems

Part 56--Safety and health standards surface metal and nonmetal mines

30 CFR 56.12028

Testing grounding systems.

Continuity and resistance of grounding systems shall be tested immediately after installation, repair, and modification; and annually thereafter. A record of the resistance measured during the most recent tests shall be made available on a request by the Secretary or his duly authorized representative.

US Regulations - 30 CFR Section 57

Part 57--Safety and health standards underground metal and nonmetal mines

30 CFR 57.12028

Testing grounding systems.

Continuity and resistance of grounding systems shall be tested immediately after installation, repair, and modification; and annually thereafter. A record of the resistance measured during the most recent tests shall be made available on a request by the Secretary or his duly authorized representative.

US Regulations - 30 CFR Section 75

Mandatory safety standards--underground coal mines

30 CFR 75.801 – Grounding Resistors

The grounding resistor, where required, shall be of the proper ohmic value to limit the voltage drop in the grounding circuit external to the resistor to not more than 100 volts under fault conditions. The grounding resistor shall be rated for maximum fault current continuously and insulated from ground for a voltage equal to the phase-to-phase voltage of the system.

US Regulations - 30 CFR Section 75

Mandatory safety standards, surface coal mines and surface work areas of underground coal mines

30 CFR 77.801 – Grounding Resistors

The grounding resistor, where required, shall be of the proper ohmic value to limit the voltage drop in the grounding circuit external to the resistor to not more than 100 volts under fault conditions. The grounding resistor shall be rated for maximum fault current continuously and insulated from ground for a voltage equal to the phase-to-phase voltage of the system.

US Regulations - 30 CFR Section 75

Mandatory safety standards--underground coal mines

30 CFR 75.814(3) – Electrical Protection

3) Ground-fault currents must be limited by a neutral grounding resistor to not more than:

- i. 6.5 amperes when the nominal voltage of the power circuit is 2,400 volts or less; or
- ii. 3.75 amperes when the nominal voltage of the power circuit exceeds 2,400 volts.

4) High-voltage circuits extending from the section power center must be provided with:

- i. Ground-fault protection set to cause deenergization at not more than 40 percent of the rating of the neutral grounding resistor

- ii. A backup ground-fault detection device to cause deenergization when a ground fault occurs with the neutral grounding resistor open; and

- iii. Thermal protection for the grounding resistor that will deenergize the longwall power center if the resistor is subjected to a sustained ground fault. The thermal protection must operate at either 50 percent of the maximum temperature rise of the grounding resistor, or 150 deg. C (302 deg. F), whichever is less, and must open the ground-wire monitor circuit for the high-voltage circuit supplying the section power center. The thermal protection must not be dependent upon control power and may consist of a current transformer and overcurrent relay.

US Regulations - 30 CFR Section 75

Mandatory safety standards--underground coal mines

30 CFR 75.1719-2 – Lighting fixtures; requirements.

(2) Alternating current circuits supplying power to stationary lighting fixtures shall contain conductors energized at voltages not greater than 70 volts to ground. Alternating current circuits, energized at 100 volts or more and used to supply power to stationary lighting fixtures, shall originate at a transformer having a center or neutral tap grounded to earth through a proper resistor, which shall be designed to limit fault current to not more than 5 amperes. A grounding circuit in accordance with §75.701-4 shall originate at the grounded terminal of the grounding resistor and extend along with the power conductors and serve as a grounding conductor for the frames of all equipment receiving power from the circuit.

Commonwealth of Pennsylvania -Department of Environmental Protection

Mine Power Substation

The area containing electrical switchgear (circuit breakers, fuses, switches, and/or transformers), used for the purpose of controlling power from the surface power system to the underground mine power transmission.

I. Alternating current installations shall include A through M.

- G. Secondary or mine feeder circuit breaker with:
 - 4. Automatic tripping of circuit breakers by protective relays and shall provide as a minimum tripping by:
 - f. Ground fault-current limiting resistor protection and monitoring by current and potential transformer relaying.

Load Center

13. Main breaker tripping devices, which must include:

- a. Overload and short circuit protection
- b. Ground fault by current protector.
- c. Ground fault by potential protector in the event of an open ground resistor.

- d. Continuous monitoring of the ground resistor is acceptable in lieu of potential protector.
- e. Time delay tripping for coordination of tripping is allowed.

Canadian Regulations – C22.1-06 10-1102.3

10-1102 Use

(1) – Should read “Neutral grounding devices shall be permitted to be used only on systems where all neutral conductors are insulated to the nominal system voltage.”

(3) Where line-to-neutral loads are served, provision shall be made to automatically de-energize the system on the occurrence of

- a) a ground fault;
- b) a grounded neutral on the load side of the neutral grounding device; or
- c) a lack of continuity of the conductor connecting the neutral grounding device from the neutral point through the neutral grounding device to the system grounding electrode.

Canadian Regulations – CSA M421-00 Section 3.5.5

CSA M421-00 – Use of Electricity in Mines

General – Protection and Control – Ground-Fault Protection

Where ground-fault protection is used, the supply shall be

- a) Grounded through a neutral-grounding device that limits ground-fault voltage to 100 V or less; and
- b) de-energized in less than 1 s if ground-fault current exceeds 20% of the prospective ground-fault current

Canadian Regulations – CSA M421-00 Section 3.6.2

General – Grounding – Neutral-Grounding Devices

A neutral-grounding device shall be

- a) Continuously rated, except when ground-fault tripping is provided:
- b) Monitored so as to de-energize the supply in less than 60s if the neutral-grounding device opens; and
- c) Connected as close as practical to the supply neutral.

Canadian Regulations – CSA M421-00 Section 4.5.1

Surface Mines and Quarries – High-Voltage Power Distribution to Movable Equipment – Ground-Potential Rise

A circuit supplying movable equipment shall be grounded through a neutral-grounding device that limits ground potential rise at the movable equipment to 100 V or less.

Canadian Regulations – CSA M421-00 Section 4.7.3.4.1

Surface Mines and Quarries –Movable Electrical Equipment – Wiring Methods – On Board AC-Supply Circuits – Resistance Grounding

Where on-board, three-phase power transformers larger than 20 kVA and operating at voltages in excess of 300 V are used, the following requirements shall apply:

- a) Except as permitted by Item (g), either a direct or derived neutral shall be grounded through a resistor at the power source to limit the prospective ground-fault current to 25 A or less.

Canadian Regulations – CSA M421-00 Section 4.7.3.4.1

Surface Mines and Quarries –Movable Electrical Equipment –Wiring Methods – On Board AC-Supply Circuits – Resistance Grounding

Where on-board, three-phase power transformers larger than 20 kVA and operating at voltages in excess of 300 V are used, the following requirements shall apply:

- a) Except as permitted by Item (g), either a direct or derived neutral shall be grounded through a resistor at the power source to limit the prospective ground-fault current to 25 A or less.

Canadian Regulations – CSA M421-00 Section 6.9.6

Underground Coal Mines –Wiring Methods for non-intrinsically-safe Wiring – AC Supply to Mobile Electrical Equipment

Mobile electrical equipment operating at voltages in excess of 150 V shall be supplied by a system wherein

- a) the neutral is grounded through a neutral-grounding device that limits ground-fault voltage at the mobile equipment to 50 V or less;
- b) ground-fault protection is provided; and
- c) ground-conductor monitoring is employed.

Canadian Regulations – CSA M421-00 Section 6.9.6

Underground Coal Mines – Grounding – Grounding of Alternating –Current Systems

Systems operating at voltages-to-ground in excess of 150 V shall be

- a) grounded through a neutral resistance; and
- b) provided with ground fault protection.

B. CARACTERÍSTICAS DE TÉCNICAS DE PUESTAS A TIERRA

	Ungrounded	Solid grounding	Reactance grounding		Ground-fault neutralizer	Resistance grounding	
			Low value reactor	High value reactor		Low resistance	High resistance
Current for phase-to-ground fault in percent of three-phase fault current	Less than 1%	Varies, may be 100% or greater	Usually designed to produce 25% to 100%	5% to 25%	Nearly zero fault current	20% and downward to 100 A to 1000 A	Less than 1% but not less than system charging current, $3I_{c0}$
Transient over-voltages	Very high	Not excessive	Not excessive	Not excessive	Not excessive	Not excessive	Not excessive
Surge arresters	Ungrounded-neutral type	Grounded-neutral type	Grounded-neutral type if current 60% or greater	Ungrounded-neutral type	Ungrounded-neutral type	Ungrounded-neutral type	Ungrounded-neutral type
Remarks	Not recommended due to overvoltages and non-segregation of fault	Generally used on systems (1) 600 V and below and (2) over 15 kV		Not used due to excessive overvoltages	Best suited for application in most medium-voltage industrial and commercial systems that are isolated from their electric utility system by transformers. ^a	Generally used on systems of 2.4 kV to 15 kV particularly where large rotating machines are connected.	Used on systems 600 V and below where service continuity is desired. ^a

^aCaution should be applied in using this form of grounding with industrial generation (see IEEE Std 367™). Best suited for application in most medium-voltage industrial and commercial systems that are isolated from their electric utility system by transformers. Ideal for use on medium-voltage generators. Also occasionally found on mission-critical 2.4 kV or 4.16 kV industrial or commercial distribution systems.

C. EXTRACTO DE NORMAS ELÉCTRICAS CHILENAS DE SEGURIDAD MINERA

REGLAMENTO DE SEGURIDAD MINERA

DECRETO SUPREMO N° 132

MINISTERIO DE MINERÍA

Publicado en el Diario Oficial el 07 de febrero de 2004

Fijase como texto refundido, sistematizado y coordinado del Decreto Supremo N° 72, de 1985, del Ministerio de Minería, que establece el Reglamento de Seguridad Minera

El presente reglamento tiene como objetivo establecer el marco regulatorio general al que deben someterse las faenas de la Industria Extractiva Minera Nacional para:

a) Proteger la vida e integridad física de las personas que se desempeñan en dicha Industria y de aquellas que bajo circunstancias específicas y definidas están ligadas a ella.

b) Proteger las instalaciones e infraestructura que hacen posible las operaciones mineras, y por ende, la continuidad de sus procesos.

Título III

Explotación de Minas Subterráneas

CAPÍTULO DÉCIMO

Sistemas Eléctricos

Artículo 217

Todos los equipos eléctricos que se necesite introducir en la mina deben ser aprobados por la Superintendencia de Electricidad y Combustibles.

Artículo 221

No podrán emplearse tensiones mayores a seiscientos (600) volts. en máquinas portátiles que vayan a usarse en sectores inmediatos a los frentes de trabajo o en los frentes mismos, o en galerías que sirvan de tránsito a las personas.

Las tensiones superiores a seiscientos (600) volts solo se usarán para la transmisión de energía al interior de la mina, o para la alimentación de transformadores, motores estacionarios o aparatos en los cuales los enrollamientos que reciben dicha tensión sean fijos.

Artículo 222

Los alimentadores de tensión superior a seiscientos (600) volts deben ser del tipo "armado", con cubierta metálica protectora. Esta armadura deberá conectarse a tierra. Los cables armados podrán instalarse bajo tierra o suspenderse en los costados de las galerías, en soportes diseñados para tal efecto.

Se aceptarán cables alimentadores de tensión superior a seiscientos (600) volts., del tipo flexible, que lleven una malla metálica protectora concéntrica en cada fase. Dicha malla deberá conectarse a tierra.

Artículo 223

En cada nivel electrificado deberá tenderse un cable de tierra, conectado eléctricamente al cable de tierra general de la faena minera.

Las subestaciones (transformadores) y centros de distribución de energía del nivel deberán conectarse a este cable de tierra del nivel, configurando la red o malla de tierra de éste.

Toda maquinaria fija, línea férrea (ferrocarril no electrificado), cañerías de aire y de agua instaladas en el nivel, las estructuras metálicas y artefactos metálicos, deberán ir conectados eléctricamente al cable de tierra.

Artículo 224

Las carcasas de los motores, de los generadores, de los transformadores y de los equipos de maniobras y las estructuras y bases en que estén montadas, deberán conectarse eléctricamente a la malla de tierra del nivel.

La línea de tierra del nivel deberá ser eléctricamente independiente del retorno usado, donde exista tracción eléctrica.

Artículo 227

Las subestaciones subterráneas deberán ser construidas de materiales incombustibles y estar provistas de elementos apropiados para extinción de incendios.

Artículo 228

No deben instalarse, en minas subterráneas, transformadores con devanados sumergidos en aceites u otros líquidos aislantes cuya combustión genere humos o gases tóxicos. Instalaciones especiales, en cámaras herméticas y/o aisladas, podrán ser específicamente aprobadas y autorizadas por el Servicio

Artículo 229

El voltaje nominal en circuito de trole reglamentado en esta parte (ferrocarriles eléctricos subterráneos), no podrá exceder los trescientos (300) volts. Sistemas con voltajes superiores a trescientos (300) volts deben ser autorizados por el Servicio.

Artículo 233

En las galerías de tracción con Ferrocarril eléctrico subterráneo se desviará el agua procedente del techo, evitando que caiga sobre los hilos de contacto o los alimentadores. La misma medida deberá tomarse cuando existan redes eléctricas en la galería, evitando el mojado de los cables e instalaciones.

Artículo 236

Cuando se emplee electricidad para la señalización, la tensión no deberá exceder de doscientos veinte (220) volts en cualquier circuito donde haya riesgos de contacto con personas.

Los dispositivos de contacto que se empleen en la señalización deberán construirse en forma que se evite el cierre accidental del circuito.

Los conductores de las instalaciones telefónicas y de señalización deberán estar protegidos contra cualquier contacto con otras canalizaciones y aparatos, y contra todo efecto de inducción.

Título IV

Explotación de Minas a Rajo Abierto

CAPÍTULO QUINTO

Servicios Eléctricos

Artículo 263

Al inicio de cada turno y cada vez que sea necesario su manipulación, el personal que utiliza tendidos eléctricos deberá revisar el estado de cables, conexiones e interruptores. Cualquier desperfecto detectado debe ser comunicado de inmediato al supervisor. Se debe suspender la operación del equipo o instalación dañada, cuando aquella represente un alto riesgo a personas o equipos.

Título V

Explotación Minería del Carbón

CAPÍTULO SEXTO

Electricidad

Artículo 307

No debe instalarse ningún aparato eléctrico, si no cumple con la "condición eléctrica intrínsecamente segura" en lugares cuya atmósfera pueda alcanzar un contenido de grisú superior a dos por ciento (2%).

Todo aparato eléctrico debe instalarse en un lugar donde exista circulación de aire fresco.

El sistema de alumbrado eléctrico en el interior de una mina de carbón, debe ser protegido para evitar que eventuales cortocircuitos y otros contactos imprevistos generen calor y originen riesgo en un ambiente en que el gas metano se encuentre sobre los límites permisibles.

Título VIII

Construcción de Proyectos y Obras Civiles en la

Industria Extractiva Minera

Artículo 420

Los enchufes o clavijas de conexión no deben retirarse de las tomas de corriente tirando del cable flexible, sino tomándolos del mismo enchufe o clavija.

Artículo 424

Las líneas y “mallas de tierra” deberán inspeccionarse a lo menos una (1) vez al año, revisando conductores, conexiones y efectuando las mediciones eléctricas correspondientes de cuyos resultados se deberá llevar un registro.

Artículo 425

En los transformadores deben tomarse precauciones para impedir en el circuito de baja tensión toda sobretensión que pueda producirse a consecuencia de una derivación o inducción del circuito de alta tensión.

Para tal efecto, se puede aplicar uno o varios de los siguientes procedimientos:

- a) La puesta a tierra permanente de un punto del circuito de baja tensión.
- b) La puesta a tierra automática del punto neutro del circuito de baja tensión, mediante un dispositivo adecuado.
- c) La puesta a tierra de un cuerpo metálico intercalado entre los bobinados primario y secundario de los transformadores.
- d) La interrupción automática de la alimentación del transformador en caso de elevarse la tensión en el circuito de baja tensión; y
- e) Cualquier otro medio apropiado, aprobado por el Director.

Artículo 428

Se deberán adoptar las medidas para evitar todo contacto accidental de personas con elementos energizados de una instalación o equipo cuya tensión sea superior a cincuenta (50) volts. Se deben aplicar medidas tales como:

- a) Disponer en las instalaciones de espacios necesarios para ejecutar las tareas.
- b) Los terminales de conductores, deberán poseer sus sistemas de aislación y protección aprobados.
- c) En las instalaciones de toda faena minera, los sistemas eléctricos, deberán diseñarse e instalarse de tal forma de evitar todo contacto de cables energizados con tendidos de cañerías, rieles u otros elementos metálicos, como asimismo con eventuales focos de agua.

d) La instalación de cables para los sistemas de comunicación o tendidos de otra naturaleza, deberán diseñarse e instalarse de tal forma que no exista posibilidad alguna de que estos entren en contacto con cables eléctricos energizados o que puedan recibir algún tipo de inducción de corriente.

Artículo 429

Se deberá instalar en superficie equipos de interrupción general automática para desenergizar todas las instalaciones, tanto del interior como del exterior de la mina. Tales dispositivos deben ser accesibles, pero lo suficientemente mantenidos y resguardados para asegurar su óptimo funcionamiento, y su operación sólo por personal autorizado.

Artículo 430

Los terminales de un conductor, que presenten riesgo de contacto accidental para personas o instalaciones, deberán protegerse con aislación equivalente, manteniendo la resistencia de aislamiento del conductor, a lo menos.

Los terminales de un conductor expuestos a originar fallas en el circuito por contaminación del medio ambiente, deben ser protegidos con aislación apropiada, resistente al contaminante. La aislación de los terminales debe ser adecuada a la tensión máxima a que éstos estén conectados.

Artículo 431

Toda instalación y equipo eléctrico en funcionamiento en una faena debe contar con los sistemas de protección que, en caso de sobrecarga, fallas a tierra, cortocircuitos, sobrecalentamiento u otra anomalía, actúen eficientemente, desenergizando los circuitos.

Dichos sistemas que deben ser regularmente conservados, responderán a especificaciones y diseños aprobados por la normativa legal y a normas técnicas reconocidas para ello.

Artículo 434

Se deberá proveer de "malla de tierra" individual a:

a) Subestaciones que operen con tensiones superiores a seiscientos (600) volts. En subestaciones móviles, la malla de tierra podrá ser reemplazada por barras metálicas enterradas.

b) Los centros de distribución o maniobras y equipos que operen con tensiones superiores a seiscientos (600) volts.

c) Los almacenes de explosivos e instalaciones anexas. Estas mallas de tierra deberán estar conectadas eléctricamente al cable de tierra general de la faena minera.

d) Contenedores de instalación de faenas y/o campamentos, y a las instalaciones de combustibles.

Artículo 435

Se debe además conectar a tierra, en los aparatos o instalaciones con tensión superior a cincuenta (50) volts, lo siguiente:

a) Las armaduras y las cubiertas metálicas exteriores de los cables.

b) Las piezas metálicas exteriores que formen parte de un aparato eléctrico y que no se encuentren normalmente en tensión.

c) Las piezas metálicas que se encuentren en la proximidad de los conductores en tensión.

d) Las estructuras metálicas en que se instalen los dispositivos de control.

e) Los equipos de comunicación o transmisión de datos deben contar con mallas de tierra exclusivas y unirse a la tierra general.

Artículo 436

Se usará neutro aislado de tierra cuando se comprueben riesgos de que las corrientes de neutro puedan inducir tensiones en áreas en que se emplea disparo eléctrico.

Artículo 438

En los conductores de tierra no debe colocarse ningún cuchillo, fusible, interruptor u otro mecanismo que pudiera interrumpir el enlace a tierra, excepto cuando se realicen las revisiones periódicas.

La revisión de las condiciones eléctricas y mecánicas de los cables a tierra, de sus conexiones y remates se hará anualmente.

Artículo 440

No se deberá usar ningún tipo de fusible abierto. Sólo se permitirá el uso de fusibles encapsulados.

Artículo 445

Los generadores deben ser protegidos, por lo menos, con dispositivos de sobrecorriente.

A su vez, los transformadores deben ser protegidos, por lo menos, con dispositivos de sobrecorriente, tanto en el lado de alta tensión como en el de baja tensión.

Artículo 446

Los motores deben ser protegidos con dispositivos de sobrecorriente y bajo voltaje, que impidan su involuntaria reenergización después de una interrupción de corriente. En los motores fraccionales, cuya reenergización involuntaria no origine riesgos, podrá omitirse la protección de bajo voltaje.

Artículo 448

Las operaciones de reparación, conexión o desconexión, o cualquier intervención que se efectúe en los cables portátiles, como los utilizados en perforadoras, palas y equipos de levante, deben hacerse con la energía desconectada y los sistemas de bloqueo colocados.

Artículo 450

Deberá proveerse con pisos aislantes a ambos lados de cada tablero principal que contenga partes energizadas expuestas y accesibles. Estos pisos deberán ser de tamaño tal que imposibiliten alcanzar la parte energizada a cualquier persona que esté situada fuera del piso aislante.

Artículo 451

El acceso a las áreas posteriores de los tableros descubiertos deberá ser restringido por barreras sólidas o puertas, ubicadas de tal manera que impidan el ingreso a personal no autorizado. Las entradas a estas áreas permanecerán siempre cerradas con llave, excepto cuando se realicen trabajos en el tablero.

Artículo 454

Los transformadores de distribución instalados en superficie deben montarse sobre postes, a una altura mínima de cuatro metros cincuenta centímetros (4,50 m.) desde el suelo. Si lo anterior fuere impracticable, los transformadores serán protegidos por una defensa de un metro ochenta centímetros (1,80 m.) de alto, la que se mantendrá cerrada a fin de evitar el ingreso de personas no autorizadas. Con todo, el libre ingreso será permitido cuando se trate de

subestaciones unitarias totalmente cerradas, en todo caso éstas deben protegerse de posibles daños producidos por vehículos o maquinarias en movimiento.

Artículo 455

Las estaciones de transformadores deben estar equipadas con los dispositivos necesarios para efectuar rápidas y seguras maniobras de desconexión o conexión.

Artículo 456

Todos los transformadores deben estar equipados con fusibles u otros dispositivos de desconexión automática, tanto en el circuito primario como en el secundario.

Artículo 457

Las instalaciones de transformadores con devanados sumergidos en líquidos aislantes, deben regirse por las normas establecidas por la Superintendencia de Electricidad y Combustibles, además de las establecidas en este Reglamento.

Artículo 463

Todo conductor debe poseer adecuada protección eléctrica y mecánica para que:

- a) Su aislación soporte la máxima tensión de operación, sin originar fugas ni cortocircuitos;
- b) Sus cubiertas protectoras soporten los esfuerzos mecánicos a que pueda estar sometido el conductor, sin dañar ni deformar la aislamiento, y
- c) Toda cubierta metálica de conductores debe ser eléctricamente continua.

Artículo 474

Los circuitos principales de trole se deben proteger con interruptores automáticos, que se desconecten por sobrecarga o cortocircuito.

En toda derivación del circuito de trole deberá instalarse un interruptor seccionador que permita desenergizar dicha rama cuando se desee intervenir en ella. Los interruptores deben:

- a) Ser perfectamente visibles.
- b) Poderse bloquear en la posición de apertura mediante una llave especial o candado.

c) Tener un mecanismo que indique si están en posición abierta o cerrada.

NCH Elec. 4/2003

ELECTRICIDAD INSTALACIONES DE CONSUMO EN BAJA TENSIÓN

OBJETIVO

1.1.- Esta Norma tiene por objeto fijar las condiciones mínimas de seguridad que debencumplir las instalaciones eléctricas de consumo en Baja Tensión, con el fin de salvaguardar a las personas que las operan o hacen uso de ellas y preservar el medio ambiente en que han sido construidas.

1.2.- Esta Norma contiene esencialmente exigencias de seguridad. Su cumplimiento, junto a un adecuado mantenimiento, garantiza una instalación básicamente libre de riesgos; sin embargo, no garantiza necesariamente la eficiencia, buen servicio, flexibilidad y facilidad de ampliación de las instalaciones, condiciones éstas inherentes a un estudio acabado de cada proceso o ambiente particular y a un adecuado proyecto.

Temas relacionados

9.- Medidas de Protección contra Tensiones Peligrosas

10.- Puestas a Tierra

9.0.2.- Se entenderá que queda sometido a una tensión por contacto directo, cuando toca con alguna parte de su cuerpo una parte del circuito o sistema que en condiciones normales esta energizada.

9.0.3.- Se entenderá que queda sometido a una tensión por contacto indirecto, cuando toca con alguna parte de su cuerpo una parte metálica de un equipo eléctrico que en condiciones normales está desenergizada, pero que en condiciones de falla se energiza.

9.0.4.- Se protegerá al operador o usuario de una instalación o equipo eléctrico contra los contactos directos, utilizando alguna de las medidas prescritas en 9.1 o mediante combinación de ellas.

9.0.5.- Se protegerá al operador o usuario de una instalación o equipo eléctrico contra los contactos indirectos, limitando al mínimo el tiempo de la falla, haciendo que el valor del voltaje con respecto a tierra que se alcance en la parte fallada sea igual o inferior al valor de seguridad, o bien, haciendo que la corriente que pueda circular a través del cuerpo del operador, en caso de falla, no exceda de un cierto valor de seguridad predeterminado.

El cumplimiento de estas condiciones se logrará aplicando alguna de las medidas contenidas en 9.2 o en la sección 10.

9.0.6.2.- El valor de resistencia del cuerpo humano se considera igual a 2.000Ω , para los efectos de aplicación de esta Norma.

9.0.6.3.- Para los efectos de aplicación de esta Norma, se considerarán como máximos valores de tensión a los cuales puede quedar sometido el cuerpo humano sin ningún riesgo, 50 V en lugares secos y 24 V en lugares húmedos o mojados en general y en salas de operaciones quirúrgicas en particular.

MEDIDAS DE PROTECCION CONTRA CONTACTOS DIRECTOS

9.1.1.- Se considerará suficiente protección contra los contactos directos con partes energizadas que funcionen a más de 50 V, la adopción de una o más de las medidas siguientes:

9.1.1.1.- Colocación de la parte energizada fuera de la zona alcanzable por una persona, definida en 9.0.6.1.

9.1.1.2.- Colocando las partes activas en bóvedas, salas o recintos similares, accesibles únicamente a personal calificado.

9.1.1.3.- Separando las partes energizadas mediante rejas, tabiques o disposiciones similares, de modo que ninguna persona pueda entrar en contacto accidental con ellas y que sólo personal calificado tenga acceso a la zona así delimitada.

9.1.1.4.- Recubriendo las partes energizadas con aislantes apropiados, capaces de conservar sus propiedades a través del tiempo y que limiten las corrientes de fuga a valores no superiores a 1 miliampere. Las pinturas, barnices, lacas y productos similares no se considerarán como una aislación satisfactoria para estos fines.

9.2.- MEDIDAS DE PROTECCION CONTRA CONTACTOS INDIRECTOS

9.2.2.3.- El valor mínimo de resistencia de aislación será de 300.000Ω para instalaciones con tensiones de servicio de hasta 220 V. Para tensiones superiores se aceptará una resistencia de aislación de 1.000Ω por volt de tensión de servicio para toda la instalación, si su extensión no

excede de 100 m. Las instalaciones de extensión superior a 100 m se separarán en tramos no superiores a dicho valor, cada uno de los cuales deberá cumplir con el valor de resistencia de aislación prescrito.

9.2.3.- Asumiendo que aún en una instalación en condiciones óptimas, ante una situación de falla, una parte metálica del equipo puede quedar energizada, y además de la verificación y cumplimiento de lo prescrito en 9.2.2, se deberán tomar medidas complementarias para protección contra tensiones de contacto peligrosas. Estas medidas se clasificarán en dos grupos: los sistemas de protección clase A y los sistemas de protección clase B.

9.2.4.- En los sistemas de protección clase A, se trata de tomar medidas destinadas a suprimir el riesgo haciendo que los contactos no sean peligrosos, o bien impidiendo los contactos simultáneos entre las masas y los elementos conductores entre los cuales puedan aparecer tensiones peligrosas. Dentro de esta clase encontraremos los siguientes sistemas de protección:

- Empleo de transformadores de aislación.
- Empleo de tensiones extra bajas.
- Empleo de aislación de protección o doble aislación.
- Conexiones equipotenciales.

9.2.5.- En los sistemas de protección clase B se exige la puesta a tierra o puesta a neutro de las carcasas metálicas, asociando ésta a un dispositivo de corte automático que produzca la desconexión de la parte de la instalación fallada; dentro de esta clase encontramos los siguientes sistemas:

- Puesta a tierra de protección y dispositivo de corte automático operado por corriente de falla.
- Neutralización y dispositivo de corte automático operado por corriente de falla

9.2.6.- Sistemas de protección clase A. La aplicación de estas medidas, por sus características, serán posibles en casos muy restringidos y sólo para ciertos equipos o partes de la instalación.

9.2.6.1.- Empleo de transformadores de aislación: Este sistema consiste en alimentar el o los circuitos que se desea proteger a través de un transformador, generalmente de razón 1/1, cuyo secundario este aislado de tierra. Se deberán cumplir las condiciones siguientes:

- Su construcción será de tipo doble aislación.
- El circuito secundario no tendrá ningún punto común con el circuito primario ni con ningún otro circuito distinto.
- No se emplearán conductores ni contactos de tierra de protección en los circuitos conectados al secundario.
- Las carcasas de los equipos conectados al secundario no estarán conectados a tierra ni a la carcasa de otros equipos conectados a otros circuitos, pero la carcasa de todos los equipos conectados al circuito secundario y que pueden tocarse simultáneamente, estarán interconectados mediante un conductor de protección.
- El límite de tensión y de potencia para transformadores de aislamiento monofásicos será de 220 V y 10 KVA; para otros transformadores de aislación estos valores límites serán de 380 V y 18 KVA, respectivamente.

• En trabajos que se efectúen dentro de recipientes metálicos, tales como estanques, calderas, etc., los transformadores de aislación deben instalarse fuera de estos recipientes.

Este tipo de protección es aconsejable de usar en instalaciones que se efectúen en o sobre calderas, andamiajes metálicos, cascos navales y, en general, donde las condiciones de trabajo sean extremadamente peligrosas por tratarse de locales o ubicaciones muy conductoras. El empleo de este sistema de protección hará innecesaria la adopción de medidas adicionales.

9.2.6.2.- Empleo de tensiones extra bajas: En este sistema se empleará como tensión de servicio un valor de 42 V ó 24 V, de acuerdo a lo prescrito en 9.0.6.3. Su aplicación requiere del cumplimiento de las siguientes condiciones:

- La tensión extra baja será proporcionada por transformadores, generadores o baterías cuyas características sean las adecuadas para este tipo de trabajo.
- El circuito no será puesto a tierra ni se conectará con circuitos de tensión más elevada, ya sea directamente o mediante conductores de protección.
- No se podrá efectuar una transformación de media o alta tensión a tensión extra baja.

El empleo de este sistema de protección es recomendable en instalaciones erigidas en recintos o lugares muy conductoras y hará innecesaria la adopción de otras medidas adicionales de protección

9.2.6.3.- Empleo de aislación de protección o doble aislación: Este sistema consiste en recubrir todas las partes accesibles de carcasas metálicas con un material aislante apropiado, que cumpla lo prescrito en 9.1.1.4 ó utilizar carcasas aislantes que cumplan iguales condiciones.

9.2.6.4.- Conexiones equipotenciales: Este sistema consiste en unir todas las partes metálicas de la canalización y las masas de los equipos eléctricos entre sí y con los elementos conductores ajenos a la instalación que sean accesibles simultáneamente, para evitar que puedan aparecer tensiones peligrosas entre ellos.

Esta medida puede, además, comprender la puesta a tierra de la unión equipotencial para evitar que aparezcan tensiones peligrosas entre la unión y el piso.

En las condiciones indicadas, deben insertarse partes aislantes en los elementos conductores unidos a la conexión equipotencial, por ejemplo, coplas o uniones aislantes en sistemas de cañerías, a fin de evitar la transferencia de tensiones a puntos alejados de la conexión.

Las puertas y ventanas metálicas o los marcos metálicos que estén colocados en muros no conductores y fuera del contacto de otras estructuras metálicas no necesitan conectarse a la conexión equipotencial.

El empleo de este sistema de protección es recomendable en lugares mojados, debiendo asociarse a uno de los sistemas de protección clase B.

9.2.7.- Sistemas de protección clase B. Son aquellos que se indican a continuación; en ellos, las puestas a tierra deberán cumplir lo prescrito en la sección 10.

9.2.7.1.- Dispositivos automáticos de corte por corriente de falla asociados con una puesta a tierra de protección. Este sistema consiste en la conexión a una tierra de protección de todas las carcasas metálicas de los equipos y la protección de los circuitos mediante un dispositivo de corte automático sensible a las corrientes de falla, el cual desconectará la instalación o el equipo fallado; Ver hoja de norma N° 13. La aplicación de este sistema requiere del cumplimiento de las siguientes condiciones:

a) En instalaciones con neutro a tierra:

- La corriente de falla deberá ser de una magnitud tal que asegure la operación del dispositivo de protección en un tiempo no superior a 5 segundos.

- Una masa cualquiera no puede permanecer a un potencial que exceda el valor de seguridad prescrito en 9.0.6.3, en relación con una toma de tierra.

- Todas las masas de una instalación deben estar conectadas a la misma toma de tierra.

b) En instalaciones con neutro flotante o conectado a tierra a través de una impedancia

Se cumplirán las mismas condiciones de a); en donde no se pueda cumplir la primera condición, deberán cumplirse las siguientes otras condiciones:

- Deberá existir un dispositivo automático de señalización que muestre cuando se haya presentado una primera falla de aislación en la instalación.

- En caso de fallas simultáneas que afecten la aislación de fases distintas o de una fase y neutro, la separación de la parte fallada de la instalación debe asegurarse mediante dispositivos de corte automático que interrumpan todos los conductores de alimentación, incluso el neutro

9.2.7.2.- Como dispositivos de corte automático para la aplicación de las medidas contenidas en 9.2.7.1 se podrán emplear fusibles o disyuntores, siempre que sus características de operación sean adecuadas. El empleo de estos dispositivos exigirá que la impedancia de falla tenga un valor extremadamente bajo y el valor de la resistencia de la tierra de protección debe ser tal que no permita la aparición de tensiones que excedan los valores de seguridad. En general, esto sólo será posible de obtener cuando el terreno sea buen conductor y cuando en la red exista un gran número de puestas a tierra de servicio. Ver sección 10.

En instalaciones en que la impedancia de falla y la puesta a tierra de protección tengan valores tales que no permitan el cumplimiento de las prescripciones de 9.2.7.1, se deberán utilizar los protectores diferenciales como dispositivos asociados a los de corte automático.

9.2.7.3.- Empleo de protectores diferenciales. Las condiciones de operación de un protector diferencial se establecen en la definición 4.1.27.4 de la sección Terminología, para una mejor comprensión de su alcance ver hoja de norma N° 13. En los casos en que el diferencial se emplee en instalaciones de uso doméstico o similar en caso de falla deberá interrumpir el suministro eléctrico al circuito protegido, aún en ausencia del conductor neutro. Otras características de este sistema de protección son las siguientes:

- El valor mínimo de corriente de falla diferencial a partir del cual el dispositivo opera determina la sensibilidad del aparato.

- El valor de resistencia de la puesta a tierra a que debe asociarse un protector diferencial se determinará de acuerdo a la sensibilidad de éste y debe cumplir la relación:

$$R = \frac{V_t}{I_t}$$

Siendo I_S el valor de la sensibilidad del diferencial expresado en Amperes, V_S el voltaje de seguridad de acuerdo a 9.0.6.3 y R la resistencia de puesta a tierra de protección.

- De forma similar, se puede emplear estos aparatos cuando se aplica el sistema de neutralización como medio de protección, cumpliendo las prescripciones del párrafo 9.2.7.4.

9.2.7.4.- Neutralización. Este sistema consiste en unir las masas de la instalación al conductor neutro, de forma tal que las fallas francas de aislación se transformen en un cortocircuito Fase-Neutro, provocando la operación de los aparatos de protección del circuito. Ver hoja de norma N° 14.

En la implementación de este sistema se pueden adoptar dos modalidades: la conexión directa de las carcasas al neutro de la instalación, figura 1 de hoja de norma N° 14, o la conexión de las carcasas a un conductor de protección asociado al neutro de la instalación, figura 2 de hoja de norma N° 14. Sin embargo, para los fines de aplicación de esta Norma sólo se considerará aceptable la Neutralización con un conductor de protección asociado al neutro.

Para utilizar este sistema de protección deben cumplirse las siguientes condiciones:

- La red de distribución deberá cumplir lo establecido en 10.1.6.
- Los dispositivos de protección deberán ser disyuntores o fusibles.
- La corriente de falla estimada en el punto será de una magnitud tal que asegure la operación de las protecciones en un tiempo no superior a 5 segundos.
- Todas las carcasas de los equipos deberán estar unidas a un conductor de protección, el que estará unido al neutro de la instalación.
- En caso de instalaciones alimentadas desde una subestación propia, el conductor de protección se conectará directamente al borne de neutro del transformador o al electrodo de tierra de servicio del mismo. En este caso la resistencia de la puesta a tierra de servicio de la subestación deberá tener un valor inferior a 20Ω .
- En caso de instalaciones con empalme en BT el conductor de protección se conectará al neutro en el empalme, debiendo además asociarse el sistema de neutralización a otro sistema de protección contra contactos indirectos que garantice que no existirán tensiones peligrosas ante un eventual corte del neutro de la red de distribución.
- La sección del conductor de protección será igual a la del neutro.
- El conductor de protección será aislado y de iguales características que el neutro

Se recomienda emplear el sistema de neutralización asociado a protectores diferenciales de alta sensibilidad, efectuando la unión entre el neutro y el conductor de protección antes del diferencial.

9.3.- Protección contra sobretensiones en instalaciones y equipos

Se recomienda instalar dispositivos protectores o supresores de sobretensión en circuitos de una instalación de consumo que alimente a consumos constituidos por equipos electrónicos, tales como computadores, máquinas de fax, impresoras, plantas telefónicas, reproductores de audio y vídeo, etc.

10.2.- TIERRA DE PROTECCIÓN

10.2.1.- Toda pieza conductora que pertenezca a la instalación eléctrica o forme parte de un equipo eléctrico y que no sea parte integrante del circuito, podrá conectarse a una puesta a tierra de protección para evitar tensiones de contacto peligrosas.

10.2.2.- La puesta a tierra de protección se diseñará de modo de evitar la permanencia de tensiones de contacto en las piezas conductoras señaladas en 10.2.1, superiores al valor de tensión de seguridad prescrito en 9.0.6.3.

10.2.3.- La protección ofrecida por una tierra se logrará mediante una puesta a tierra individual por cada equipo protegido, o bien, mediante una puesta a tierra común y un conductor de protección al cual se conectarán los equipos protegidos.

D. EQUIPOS DE LA MINERÍA

Se muestran equipos utilizados en la minería tanto de superficie como subterránea. Los valores de estos equipos son referenciales debido a la gran oferta de tamaños y potencias, por lo cual solamente sirven como referencia de magnitud.

Minería de superficie

Dumper

Motor: Diesel

Potencia: 373kW a 746kW

Carga: 40 a 100 toneladas



Figura D.1: Dumper

Dumper Articulado

Motor: Diesel

Potencia bruta: 230kW a 350kW

Potencia neta: 225kW a 338kW

Carga: 20 a 45 toneladas



Figura D.2: Dumper articulado

Pala excavadora

Motor: Eléctrico

Potencia Principal: 2000 kVA a 2500kVA

Potencia Equipos Auxiliares: 325 a 450

Potencia Control y Luces: 45 a 50

Voltajes: 3300V, 5000V, 6000V o 6600V trifásicos a 50Hz de frecuencia

Carga: 50 a 70 toneladas



Figura D.3: Pala excavadora

Cargadora

Motor: Diesel

Potencia: 783kW a 1492kW

Carga: 25 a 45 toneladas



Figura D.4: Cargadora

Bulldozer

Motor: Diesel

Potencia: 138kW a 316kW

Carga: 18 a 45 toneladas



Figura D.5: Bulldozer

Excavadoras de rueda o cadena de cangilones

Motor: Diesel

Potencia: 315kW a 2x800kW

Capacidad: 1200 a 6500 m³/hora



Figura D.6: Excavadoras de rueda o cadena de cangilones

Dragalina

Motor: diesel

Potencia motor principal: 425kW

Carga: 190 toneladas

Capacidad: 210m³/hora



Figura D.7: Dragalina

Transportador de cinta

Motor: Diesel

Potencia: 4kW a 2x45kW

Carga: 250 a 1000 toneladas/hora



Figura D.8: Transportadores de cinta

Perforadoras para agujeros de dinamitado

Motor: Eléctrico

Potencia: 671kW a 746kW a 50Hz

Capacidad: 80 m³/minuto a 414 kPa



Figura D.9: Perforadoras para agujeros de dinamitado

Minería de superficie

Rozadora

Motor: Diesel

Potencia instalada: 350kW a 520kW

Potencia de corte: 200kW a 350kW

Capacidad: hasta 150 Mpa



Figura D.10: Rozadora

Cargadora

Motor: Diesel

Potencia: 84kW

Capacidad: 3 a 4 toneladas



Figura D.11: Cargadoras

Cucharón

Motor: Diesel

Potencia: 38,8kW a 205kW

Capacidad: 7,3 a 19 toneladas



Figura D.12: Cucharón

Perforadoras jumbo

Motor: Diesel

Potencia: 55kW a 75kW



Figura D.13: Perforadora jumbo

Plataformas elevadoras

Motor: Diesel

Potencia: 96kW

Capacidad: 3 toneladas



Figura D.14: Plataforma elevadora

Rafadora Continua

Motor: Eléctrico

Potencia: 132kW a 2x175kW

Capacidad: 20 a 30 toneladas/minuto



Figura D.15. Rafadora continua

Cinta transportadora

Motor: Diesel

Potencia motor principal: 2500kW a 6000kW

Largo: 3 a 10 kilómetros

Capacidad: 3000 a 4500 toneladas/hora



Figura D.16: Cinta transportadora

Camión subterráneo

Motor: Diesel

Potencia: 157W a 317W

Capacidad: 15,4 a 80 toneladas



Figura D.17: Camión subterráneo