



UNIVERSIDAD  
**DE ATACAMA**

**FACULTAD TECNOLÓGICA**  
**DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍAS DE LA ENERGÍA**

**ANÁLISIS EN SELECCIÓN DE PROTECCIONES Y SISTEMA DE PUESTA A  
TIERRA PARA SALA ELÉCTRICA DE MEDIA TENSION EN PLANTA  
COEMIN**

Proyecto de titulación presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título  
de Ingeniero de Ejecución en Electricidad

Profesor guía: Juan Carlos Madrigal Lobos

Cristopher Antonio Bordones Campillay  
Sebastián Eduardo Ordoñez Vega

Copiapó, Chile 2023

## **DEDICATORIA**

A mi familia, mis queridos abuelos; a mi pareja e hijo, porque con su compañía, cariño y apoyo han contribuido a que este momento llegara

Sebastián Ordoñez

A mi madre, pareja e hijos quienes con sus palabras de aliento no me dejaban decaer para seguir adelante y así lograr ser perseverante en mis estudios.

A mis compañeros quienes sin pedir nada a cambio compartieron sus conocimientos y experiencias.

Cristopher Bordones

## **AGRADECIMIENTOS**

Al finalizar esta etapa de mi vida, marcado por el logro de una meta importante como es la culminación de mis estudios profesionales, quiero manifestar mi agradecimiento a las personas que de una u otra manera han estado junto a mí.

Sr. Manuel Vivanco, jefe del Área de Electricidad en planta COEMIN, quien siempre demostró su apoyo y disposición para orientar, comprender y aclarar dudas y situaciones.

A nuestros profesores de la Universidad de Atacama por su apoyo y enseñanzas.

A mi familia, especialmente a mis abuelos que siempre me han apoyado, demostrando su cariño y abnegación a lo largo de mi vida.

A mis compañeros de trabajo, que solidariamente han estado junto a mí aportando con sus conocimientos y experiencias en este aprendizaje.

Y a mi pareja e hija, hermosas y queridas compañeras de ruta, que durante todos estos años de estudio han soportado con paciencia, mucha paciencia, el que en muchas ocasiones haya sacrificado por mis estudios el tiempo que les debía dedicar.

A todos ellos, mi agradecimiento.

Sebastián Ordoñez

## **AGRADECIMIENTOS**

No fue sencillo culminar con éxito este proyecto gracias a cada uno de ustedes por creer y confiar en mí.

Gracias a Dios por permitirme tener y disfrutar a mi familia, gracias a mi familia por apoyarme en cada decisión y proyecto.

Gracias a mi madre por siempre desear y anhelar lo mejor para mi vida, gracias por apoyarme, ser el ejemplo a seguir y cada una de sus palabras que me guiaron durante mi vida. Gracias a mi pareja quien tuvo que realizar en varias ocasiones el rol de padre y madre con nuestros hijos por yo no estar presente debido a mis estudios y trabajo.

Cristopher Bordones.

## **RESUMEN**

La Planta Cerrillos Coemin S.A. es una empresa minera ubicada en la Región de Atacama, que se dedica especialmente a la producción de cobre. No obstante haberse realizado innovaciones tecnológicas para optimizar su proceso productivo, se han producido reiterados eventos de fallas eléctricas que han originado suspensión de los trabajos y pérdidas importantes para la empresa. Es a partir de esta situación, que ha sido observada por los estudiantes responsables de este informe, quienes trabajan en el área de electricidad, se definió como objetivo general de este trabajo realizar un estudio técnico de un sistema de protección en la etapa de media tensión, que pueda resolver el problema de fallas reiteradas, optimizando el proceso productivo de la planta. En el informe se pueden conocer los resultados de una propuesta de mejoramiento al sistema de protecciones eléctricas, a través, del cálculo de los antecedentes técnicos necesarios para la posterior ejecución de un estudio de coordinación y ajuste de protecciones. Adicionalmente, se entrega el proyecto de diseño de la malla a tierra para la sala eléctrica, realizado bajo las exigencias de la normativa eléctrica chilena actualmente vigente.

## INDICE

CAPÍTULO I	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 La empresa	1
1.1.1 Planta Cerrillos	3
1.1.2 Fundición Hernán Videla Lira	5
1.2 El problema	7
1.2.1 Definición del problema	8
1.2.2 Justificación	9
1.2.3 Relevancia	9
1.3 Objetivo general	10
1.4 Objetivos Específicos	10
1.5 Metodología de Trabajo	10
1.5.1 Tipo y enfoque de investigación	10
1.5.2 Diseño de la Investigación	11
1.6 Resumen de capítulos	12
CAPÍTULO II	13
MARCO TEÓRICO	13
2.1 Antecedentes	13
2.2 Sistema eléctrico de potencia	14
2.2.1 Generación	14
2.2.2 Distribución	15
2.2.3 Cargas en un Sistema Eléctrico de Potencia	16
2.3 Subestaciones	17
2.3.1 Conjunto de Barras	17

2.3.1.1 Barra sencilla (menos confiabilidad y más económica)	17
2.3.1.2 Barra Principal y Barra de Transferencia	18
2.3.1.3 Barra Principal y Barra Auxiliar	18
2.3.1.4 Doble Barra y Barra de Transferencia	18
2.3.1.5 Anillo (mayor confiabilidad y costo)	19
2.3.1.6 Interruptor y Medio	19
2.3.1.7 Doble Interruptor (mayor confiabilidad y costo)	20
2.4 Equipos que conforman una subestación	20
2.4.1 Transformadores	20
2.5 Protecciones	22
2.5.1 Resistencia limitadora de falla a tierra	22
2.5.2 Transformadores de Instrumentos	23
2.5.3 Transformadores de Corriente	23
2.5.4 Transformadores de Potencial	23
2.5.5 Relé Multilin F 35	24
2.5.6 Relé Multilin T 60	25
2.5.7 Relé Multilin SR469	26
2.6 Pliegos técnicos normativos.	27
<b>CAPÍTULO III</b>	<b>28</b>
<b>PROPUESTA TECNICA DE MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN</b>	<b>28</b>
3.1 Antecedentes	28
3.2 Presentación de propuesta	29
3.3 Cálculo de falla de cortocircuito.	30
3.3.1 Transformadores	31

3.3.2	Alimentadores de Media Tensión	31
3.3.3	Motores	31
3.3.4	Sistema de Protecciones Eléctricas	32
3.3.5	Cálculo de Parámetros y Cortocircuitos	33
3.3.6	Cálculo de Parámetros en por unidad	33
3.3.7	Cálculo de parámetros del empalme	33
3.3.8	Cálculo de parámetros del Transformador	34
3.3.9	Cálculo de parámetros de los motores.	35
3.3.10	Cálculo de parámetros del Transformador 2.	36
3.4	Cálculo de cortocircuito trifásico.	38
3.4.1	Fundamentos.	38
3.4.2	Cortocircuito 3 $\phi$ Falla 1.	38
3.4.3	Cortocircuito 3 $\phi$ Falla 2.	40
3.4.4	Cortocircuito 3 $\phi$ Falla 3.	41
3.5	Malla a tierra	43
3.5.1	Equipamiento	43
3.5.2	Medidor de resistencia modelo 6471 de AEMC.	43
3.5.3	Procedimiento para la medición de la resistividad del suelo	44
3.5.4	Caculo de malla a tierra.	44
3.5.4.1	Procedimientos para el diseño de una malla de puesta a tierra	45
3.5.4.2	Área a ocupar para la instalación de la malla	45
3.5.4.3	Cálculo del radio equivalente del área seleccionada para la malla	45
3.5.4.4	Calcular la longitud del conductor requerido.	46
3.5.4.5	Medir la resistividad del terreno.	46
3.5.4.5	Resultados del modelamiento del suelo	47

3.5.4.6 Resistividad y espesores de cada capa	48
3.5.5 Cálculo de $\rho$ equivalente según Burgsdorf-Yakobs.	49
3.6 Cálculo de la corriente de cortocircuito a transformadores.	50
3.6.1 Transformador 1 primario.	51
3.6.2 Transformador 1 secundario.	52
3.6.4 Transformador 2 secundario.	54
3.6.5 Cálculo máximo de falla.	54
3.6.6 Cálculo del calibre del conductor de puesta a tierra	55
4.6.7 Cálculos de la resistencia de la malla de puesta a tierra	57
3.6.8 Cálculo de tensión de contacto y de paso tolerables.	58
3.6.9 Cálculo de la elevación de potencial de tierra “GPR”	60
3.6.10 Cálculo de la tensión de contacto o retícula.	61
3.6.11 Cálculo de tensión de contacto y de paso (factores de corrección).	61
3.7 Instalación de malla a tierra	66
3.8 Instalación de resistor de puesta a tierra de neutro	68
3.8.1 Características del sistema:	68
3.8.2 Características de la resistencia de puesta a tierra	69
3.8.3 Ensayos individuales	69
3.9 Presupuesto del sistema de puesta a tierra	71
3.10 Protecciones de relé Multilin	73
3.10.1 Relé de protección Multilin F 35 (alimentadores).	73
3.10.2 Relé de protección Multilin T 60 (transformadores)	74
3.10.3 Relé de protección Multilin 469 (motores)	75
CAPÍTULO IV	77
CONCLUSIONES	77



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 1.1: Mina Carola.	3
Figura N° 1.2: Planta Cerrillo.	4
Figura N° 1.3: Fundición Hernán Videla Lira	5
Figura N° 1.4: Proceso del cobre.	6
Figura N° 1.5: Calidad del material	7
Figura N° 1.6: Sala Eléctrica	8
Figura N° 2.1: Partes de un generador eléctrico.	15
Figura N° 2.2: Sistema eléctrico de potencia.	16
Figura N° 2.3: Principio de funcionamiento de un transformador monofásico.	21
Figura N° 2.4: Relé de protección Multilin F 35.	24
Figura N° 2.5: Relé de protección Multilin T 60.	25
Figura N° 2.6: Relé de protección Multilin SR469	26
Figura N° 3.1: Sistema de potencia instalación de molino.	30
Figura N° 3.2: Sistema de potencia instalación de molino,	37
Figura N° 3.3: diagrama de impedancias falla 1.	38
Figura N° 3.4: diagrama de impedancias simplificado falla 1.	39
Figura N° 3.5: diagrama de impedancias simplificado falla 2.	40
Figura N° 3.6: diagrama de impedancias simplificado falla 2.	40
Figura N° 3.7: diagrama de impedancias simplificado falla 3.	41
Figura N° 3.8: diagrama de impedancias simplificado falla 3.	42
Figura N° 3.9: Instrumento de medición ground tester.	44
Figura N° 3.10: diseño de malla a tierra.	46
Figura N° 3.11: Modelo de tres capas error de 2,07 %.	48
Figura N° 3.12: factor de asimetría	52
Figura N° 3.13: constante de kf para diferentes tipos de electrodos y temperaturas	56
Figura N° 3.14: soldadura exotérmica.	66
Figura N° 3.15: Registro fotográfico tendido de malla 11m x 11m.	67
Figura N°3.16: Registro fotográfico realizando soldadura exotérmica.	67
Figura N° 3.17: Registro fotográfico mejoramiento del suelo.	68

Figura N° 3.18: Placa de datos resistencia al neutro.

70

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1.1: Etapas del proceso de investigación.	11
Tabla N° 3.1: Pérdidas estimadas por fallas en el mes de noviembre.	29
Tabla N°3.2: Datos de Transformadores	31
Tabla N°3.3: Datos de los Motores	32
Tabla N° 3.4: Datos de los Relé de Protección	32
Tabla N°3.5: Datos del Empalme.	33
Tabla N° 3.6: Equipamiento para mediciones de resistividad en terreno.	43
TABLA N° 3.7: Datos principales del banco de transformadores.	44
Tabla N° 3.8: Mediciones de resistividad de suelo	47
Tabla N° 3.9: Calibre del conductor.	57
Tabla N° 3.10: Presupuesto construcción y montaje de malla a tierra Exem Ltda.	71
Tabla N° 3.11: Presupuesto construcción y montaje de malla a tierra Ingetra Ltda.	72
Tabla N° 3.12: Presupuestos según proveedor.	72
Tabla N° 3.13: Protecciones Relé F35	73
Tabla N° 3.14: Protecciones Relé T60	74
Tabla N° 3.15: Protecciones Relé 469	75

# **CAPÍTULO I**

## **INTRODUCCIÓN**

COEMIN S.A. está desarrollando alternativas de proyecto para aumentar la capacidad de producción de la planta Cerrillos, en donde se está diseñando un proyecto de una nueva planta eléctrica con el objetivo de hacer funcionar un molino de bolas y sus diferentes motores eléctricos, así aumentar la producción anual.

Este consiste en una nueva sala eléctrica con respaldo de dos generadores con la capacidad para hacer funcionar el molino si ocurriera un corte de energía.

La planta Cerrillos ha debido enfrentar constantes eventos de fallas del servicio eléctrico, produciéndose interrupciones del proceso productivo, lo que genera importantes pérdidas económicas para la empresa, a causa de contar con un bajo sistema de protecciones.

### **1.1 La empresa**

El Grupo Carola-Coemin, de capitales chilenos, se dedica a la extracción de minerales y producción de concentrados de cobre, oro y plata, los que se extraen de la Mina Carola y procesan en su Planta Cerrillos, para ser finalmente maquilados en la Fundición Hernán Videla Lira.

Los primeros trabajos de exploración de la actual Mina Carola-Coemin, ubicada en el sector de la comuna de Tierra Amarilla, en la Región de Atacama, se remontan al año 1840, cuando la exploración dejó en evidencia la existencia de un rico yacimiento de mineral de cobre que más adelante se convertiría en la Mina Agustina.

La explotación de la mina se hacía utilizando un pique vertical, a través del cual se descende hasta las galerías o túneles horizontales en cabrias (ascensores).

En los primeros tiempos los pirquineros o mineros extraían el mineral en forma manual, utilizando diversas herramientas de explotación, como barrenos, llaucanas, carretillas, martillos y capachos (grandes bolsos de cuero de vaca, burro, caballo o lobos de mar), en los cuales transportaban alrededor de 50 kg de rocas que llevaban hasta la superficie.

En el año 1865 fue mensurada e inscrita en el Conservador de Minas de Copiapó con el nombre de “Agustina”, con una superficie de 5 hectáreas. Posteriormente, en 1956, se forma la sociedad “Compañía Minera Agustina”; entre esa fecha y 1978 todo el mineral extraído en la mina era vendido a ENAMI. A partir de la década de los años 80 se comenzó a entregar el mineral en la Planta Cerrillos, propiedad de la Compañía Exploradora y Explotadora Minera Chileno Rumana, COEMIN S.A.

En 1988 esta compañía es adquirida por la familia de don Jonás Gómez Gallo y pasa a llamarse “Sociedad Contractual Minera Carola”. A partir de esa fecha la compañía ha modernizado y tecnificado sus procesos de extracción de cobre, siendo uno de los avances más importantes el reemplazo del pique tradicional por una rampa que permite mayor rapidez en el traslado del producto, por lo que el proceso de extracción aumentó desde 20.000 Ton/Mes a 150.000 Ton/Mes, material que en su totalidad es procesado en la Planta Cerrillos, en donde se convierte en concentrado de cobre y enviado en esa calidad a la Fundición Hernán Videla Lira (Paipote) de ENAMI.

Actualmente la Mina Carola es propiedad de la Sociedad contractual Minera Carola, y corresponde a una faena subterránea ubicada a 21 km al sur este de Copiapó, en el distrito minero Punta del Cobre (comuna de Tierra Amarilla). El recorrido que sigue el cobre desde la mina Carola-Coemin continúa en la Planta Cerrillos para finalizar en la Fundición Hernán Videla Lira.

La Misión de la empresa es crear valor a través del desarrollo, explotación y procesamiento de recursos minerales, preferentemente de cobre, protegiendo y potenciando a las personas y su entorno.

La visión es ser un grupo minero reconocido por la productividad, eficiencia y desarrollo sostenible en la extracción y procesamiento de minerales, por sus altos estándares de seguridad y por su compromiso constante la comunidad y la conservación del medio ambiente.

En la figura N° 1.1 se observa un camión de extracción de mineral en el túnel de mina Carola.



**Figura N° 1.1: Mina Carola.**

Fuente: (Mina Carola, 2018)

### **1.1.1 Planta Cerrillos**

La Planta Cerrillos es propiedad de la Compañía Exploradora y Explotadora Minera Chileno Rumana S.A. (COEMIN) y se encuentra ubicada a 30 km al sur de Copiapó, en la entrada de la Quebrada Cerrillos; en ella se procesan los minerales extraídos en la Mina Carola, obteniendo como producto principal el concentrado de cobre, que es entregado finalmente a la Fundición Hernán Videla Lira (Paipote) de ENAMI.

Esta planta cuenta con una capacidad instalada de 240.000 Ton/mes y actualmente tiene una producción de concentrado de cobre cercano a las 6.500 Ton/mes mediante proceso de flotación convencional.

A fines del año 2017 trabajaban en ella 414 personas, de las cuales el 65 % eran empleos por contrato directo y 35 % a externos como empleados indirectos.

En la figura N° 1.2 se observa la imagen de un trabajador en el área de flotación en planta cerrillo.



**Figura N° 1.2: Planta Cerrillo.**

Fuente: (Grupo minero Carola Coemin).

El mineral que la alimenta proviene de Mina Carola, principalmente compuesto de calcopirita, como mineral de cobre. En la actualidad, la Planta produce mediante un proceso de flotación convencional cerca de 6.500 Ton/mes de concentrado de cobre.

Dentro del proceso de producción se destaca la operación de un espesador de Relaves de última tecnología, que permite depositar relave en pasta en vez de relave convencional, recuperando y reutilizando sobre el 85 % del agua de procesos, además de entregar mayor estabilidad física y química al depósito minero.

Durante el año 2017 La Planta Cerrillos tuvo una dotación total de 414 Trabajadores, de los cuales un 65 % corresponde a empleos directos y un 35 % a externos o empleos indirectos. Además, un 100 % de los trabajadores propios tienen residencia en la Región de Atacama.

### **1.1.2 Fundición Hernán Videla Lira**

La Fundición Hernán Videla Lira es propiedad de ENAMI se encuentra ubicada a 8 kilómetros de la ciudad de Copiapó, cerca de la ciudad de Paipote, por lo que también es conocida como Fundición Paipote.

En la figura N° 1.3 se observa una fotografía del exterior de la Fundición Hernán Videla Lira.

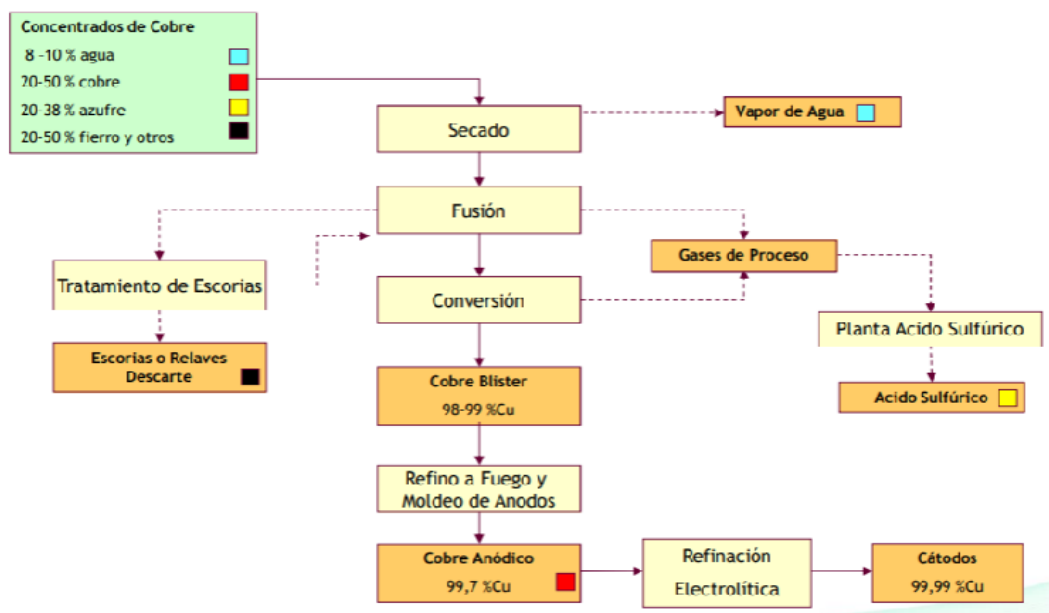


**Figura N° 1.3: Fundición Hernán Videla Lira.**

Fuente: (Herrera, 2018)

En esta fundición se procesa principalmente concentrados de yacimientos de cobre de la Región de Atacama, que se caracterizan por un bajo contenido de impurezas, lo que permite, según Herrera (2018), “la recirculación al proceso de fusión. La totalidad de los polvos generados”.

En la figura N° 1.4 se observan los diferentes procesos a los que se puede someter el concentrado de cobre, para obtener cobre de alta pureza.



**Figura N° 1.4: Proceso del cobre.**

Fuente: herrera 2018

La Planta Cerrillos aparece en los registros de Enami en el tercer lugar de los proveedores de concentrados de cobre de la Fundición Hernán Videla Lira, superado por Punta del Cobre y Ojos del Salado.

De acuerdo al informe de Enami, en la carga habitual proveniente de Mina Carola, tienen un peso autógeno, dado que la suma de Pirita y Calcopirita es cercana al 85 %, por lo que no requiere combustible para su fusión; es decir, tienen un excedente de energía que permite fundir otros productos.

En relación a la calidad del material llegado de la mina Carola a la Fundición, se ubica igualmente en el segundo lugar, superado solamente por la Mina Candelaria, como se puede observar en la figura N° 1.5, del informe de Herrera.

En la figura N° 1.5 se muestra calidad de material de mina Carola.

TIPO	PROVEEDOR	TMSA	PRINCIPALES COMPONENTES MINERALOGICOS, %							COMP. ELEMENTAL, %				
			Calcopirita CuFeS2	Pirita FeS2	Calcosina Cu2S	Covellina CuS	Bornita Cu5FeS4	Silice SiO2	Otros	Cobre Cu	Azufre S	Hierro Fe		
CANDELARIA	PUNTA DEL COBRE	69.996	81,7	12,0	0,2	0,0	0,0	3,1	3,1	28,4	35,0	30,4		
	OJOS DEL SALADO	50.004	84,0	11,3	0,0	0,0	0,0	3,4	1,3	29,1	35,5	30,8		
	ATACAMA KOZAN	27.496	82,2	9,2	0,0	0,0	0,0	3,1	5,5	28,5	33,6	29,3		
CAROLA	CAROLA+ S ANDRES	54.800	70,0	11,3	0,0	0,2	0,0	3,1	15,4	24,4	34,5	28,0		
MATTA	PLANTA MATTA	49.026	66,0	11,0	1,7	0,0	6,0	3,5	11,8	28,0	30,8	25,9		
ENAMI VARIOS	ENAMI VARIOS	45.549	49,5	9,5	3,6	0,0	7,0	2,0	28,4	24,4	24,9	21,0		
LAS LUCES	LAS LUCES	21.600	2,0	2,0	29,0	4,0	8,6	20,0	34,5	32,6	11,2	7,4		
		<b>318.471</b>												
PRECIPITADOS		2.040										65,0	1,0	
MINERALES FD		2.975										12,2	2,4	
		<b>5.015</b>												
		<b>323.486</b>												

**Figura N° 1.5: Calidad del material**

Fuente: (Carola-Coemin, 2018)

## 1.2 El problema

En la Planta Cerrillos de Coemin S.A. se diseñando un proyecto de una nueva sala eléctrica que cuenta con un transformador de 24 KV en el primario y 3,3 KV en el secundario y otro de 3,3 KV en el primario y 4 KV en el secundario, además 2 generadores de 3,3 KV de respaldo, con el objeto de hacer funcionar un molino de bolas y sus diferentes motores eléctricos. Estas instalaciones las realizará el personal eléctrico de la planta.

El problema detectado por los estudiantes responsables de este trabajo, ha motivado esta investigación, que pretende encontrar una solución que permita eliminar o minimizar las pérdidas que actualmente se generan por falta de protecciones. Para ello se ha determinado realizar una investigación de tipo cualitativa, que permita realizar un análisis exhaustivo de la situación para encontrar la solución y proyectar una propuesta que

contribuya a optimizar el proceso productivo entregando cálculos que faciliten una coordinación al sistema de protecciones.

En la figura N° 1.6 se observa la sala eléctrica de área chancado planta cerrillos.



**Figura N° 1.6: Sala Eléctrica.**

Fuente: (Carola-Coemin, 2018).

### **1.2.1 Definición del problema**

El problema detectado radica en que la Planta Cerrillos no cuenta con las protecciones habilitada del relé de protección que se encuentran en la sala eléctrica, ya que estos están solo habilitados para apertura y cierre y por esta causa se podrían dañar equipos de mucho valor.

Debido a esta situación, a menudo se producen interrupciones de la energía por cortocircuitos en diferentes puntos de distribución, lo que conlleva al mismo tiempo dificultades e interrupciones en el proceso productivo.

Como consecuencia se producen deterioros en los equipos afectados por el cortocircuito y pérdidas productivas, lo que aumenta a la vez el costo en reparaciones y reemplazos de equipos involucrados en el proceso, hecho que implica una pérdida económica para la empresa y desgaste de los equipos de trabajo encargados del sistema.

### **1.2.2 Justificación**




El análisis y observación de la situación deja en evidencia que la causa de esta situación es la falta de un sistema efectivo y eficiente de protección que permita detectar, atender y prever oportunamente los cortocircuitos que pueden producirse durante el proceso productivo, ante lo cual se considera la necesidad urgente de implementar un sistema adecuado de protección para los eventos que puedan producirse y que afecten la distribución de energía especialmente en casos de un corto circuito o falla a tierra.

### **1.2.3 Relevancia**

La meta del proyecto es realizar una investigación y análisis de la mejor forma de protección en la etapa de media tensión y diseño de una malla a tierra adecuada para este proyecto, lograr una mayor rapidez de respuesta ante una falla sin poner en riesgos la vida humana ni la de los equipos.

Se considera que la respuesta debe ser automática y rápida, causando una mínima cantidad de desconexión en el sistema de potencia, enfocándose principalmente en las líneas, protección del transformador y malla a tierra. Con la implementación de un proyecto como el que se propone en este informe, facilitaría realizar las coordinaciones mediante software y así se evitarían interrupciones del proceso productivo y el costo económico que significaría para la empresa el reemplazo o reparación de máquinas e implementos afectados por eventuales fallas durante el proceso.

Analizando el problema y posibles alternativas para su solución, se han considerado los métodos para proteger las líneas, el transformador en la etapa de media tensión:




-  Realizar cálculos de cortocircuito.
-  Realizar cálculos de diseño de malla a tierra.
-  Proponer una puesta a tierra del neutro con limitación de la corriente de fallo.

Estos tres métodos sirven para proteger el sistema de distribución de la planta; el análisis de sus características y funcionamiento permitirá seguridad en las personas y continuidad productiva.

### **1.3 Objetivo general**

Desarrollar un estudio técnico de un sistema de protección en la etapa de media tensión de Minera Coemin S. A.

### **1.4 Objetivos Específicos**

-  Recopilar datos técnicos de elementos que conforman el sistema eléctrico.
-  Realizar cálculos de cortocircuito para así facilitar el cálculo de protecciones.
-  Realizar proyecto de diseño de malla a tierra para sala eléctrica.

### **1.5 Metodología de Trabajo**

En el presente trabajo de investigación se utilizó el siguiente procedimiento, en una primera parte se busca diagnosticar los riesgos que trae un deficiente sistema de protecciones ante corto circuitos, para posteriormente dar a conocer los resultados mediante cálculos y normativas.

#### **1.5.1 Tipo y enfoque de investigación**

El trabajo se desarrollará utilizando en una primera etapa metodología de investigación cualitativa en la recopilación de antecedentes documentales en base a información obtenida a través de publicaciones e informes de la empresa y profesionales u organismos especializados en el tema.

## 1.5.2 Diseño de la Investigación

Los pasos contemplados en la investigación una vez determinados el problema, objetivos y enfoque.

Básicamente se realizará una investigación descriptiva, esto quiere decir que recopilaremos y analizaremos información previa al proyecto.

También una investigación de diseño cualitativo, realizando entrevistas a personal antiguo y nuevo de planta COEMIN.

**Tabla N° 1.1: Etapas del proceso de investigación.**

Actividad	Detalle	Método
Análisis de la empresa	-Características de la empresa	Investigación cualitativa, descriptiva
Análisis del problema	-Definición del problema -Mejoras alternativas	Investigación cualitativa, descriptiva
Recopilación de la información	-Antecedentes técnicos sobre aspectos técnicos de equipos, sistemas, distribución y media tensión.	Investigación cualitativa, documental
Análisis de soluciones alternativas	-Cambios necesarios -Estudio de mercado (costos de elementos e implementación) -Proyección de costos involucrados en la propuesta	Enfoque cuantitativo
Elaboración de conclusiones	-Informe final basado en resultados de la investigación	

Fuente: Elaboración propia.

## **1.6 Resumen de capítulos**

En el capítulo II, correspondiente al Marco Teórico, el análisis se enfocará especialmente en definiciones de sistemas de potencia, además de la normativa vigente para este tipo de sistemas, las subestaciones, fallas, equipos de protección y control y puesta a tierra.

En el capítulo III se analiza el Sistema Eléctrico de Media Tensión, su estructura, funciones, redes de distribución, líneas de transmisión, identificación de riesgos y protecciones en media tensión.

En el capítulo IV, Propuesta, se presentan resultados de mediciones de resistividad, del modelismo del suelo, diseño de malla a tierra y presupuesto.

El informe finaliza con el capítulo V, de Conclusiones, en donde se destacan los aspectos más importantes del proyecto.

## CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

### 2.1 Antecedentes

Los sistemas eléctricos se conectan a tierra con el fin de limitar la tensión que pudiera aparecer en ellos, por estar expuestos a descargas atmosféricas, por interconexión en casos de fallas con sistemas de conexiones superiores, o bien, para limitar el potencial máximo con respecto a tierra, producto por la tensión nominal del sistema. Este tipo de conexión se denominará Tierra de Servicio.

En virtud de que los cortocircuitos son la evidencia más contundente de un fallo eléctrico, el cálculo de las intensidades y su distribución en un circuito es de la mayor importancia como punto de partida para determinar cómo conviene proteger a un equipo o conjunto de equipos.

Es un hecho admitido por los Departamentos de Ingeniería y Proyectistas de sistemas de distribución de media y alta tensión, que las resistencias de puesta a tierra presentan una serie indudable de ventajas que han desplazado de forma clara a los sistemas de distribución de neutro aislado y de puesta a tierra a través de reactancias (L) o resistencias (R). La elección concreta de uno de estos modos de puesta a tierra, depende del valor de la tensión, de la extensión de la red y de la naturaleza de los receptores.

Normalmente L es preferible a R cuando U (tensión compuesta de la red) es  $\geq 20$  kV, o el valor de la corriente de defecto a tierra en la puesta a tierra es muy elevado.

## 2.2 Sistema eléctrico de potencia

El sistema eléctrico de potencia es un conjunto de elementos que tiene como fin generar, transformar, transmitir, distribuir y consumir la energía eléctrica de tal forma que se logre la mayor calidad al menor costo posible.

Un sistema eléctrico de potencia consta de plantas generadoras que producen la energía eléctrica consumida por las cargas, una red de transmisión y de distribución para transportar esa energía de las plantas a los puntos de consumo, así como el equipo adicional necesario para lograr que el suministro de energía se realice con las características de continuidad de servicio, regulación de tensión y control de frecuencia requeridas.

### 2.2.1 Generación

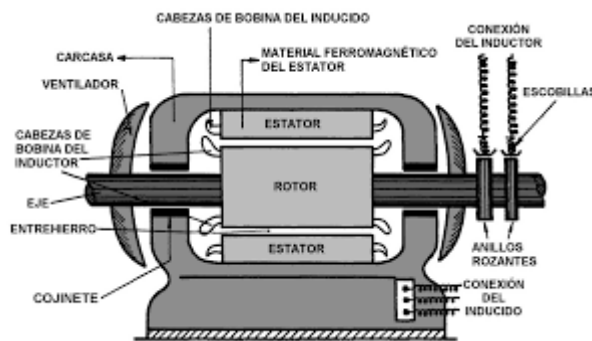
El generador eléctrico es un instrumento rotativo que puede crear energía eléctrica por la alteración de energía mecánica, muchas veces a partir de otros tipos de energías como la eólica, solar, nuclear o hidráulica.

El generador eléctrico está compuesto por los siguientes elementos:

- ✚ Motor: fuente de la fuerza mecánica básica.
- ✚ Regulador de voltaje: cambia de voltaje de corriente alterna a continua.
- ✚ Estator: es la zona fija exterior de la herramienta en la que se ven las bobinas inducidas que generan la corriente eléctrica. El estator se dispone sobre una carcasa metálica que funciona como base o soporte.
- ✚ Sistema de enfriamiento y escape: su función es velar que el generador eléctrico no se caliente demasiado y se usa como canal del exterior.
- ✚ Sistema de combustible: velar que el generador eléctrico no se caliente demasiado y se usa como canal del exterior.

- ✚ Alternador: parte responsable de la generación de la salida eléctrica y de ingreso mecánico en los generadores de electricidad.
- ✚ Sistema de lubricación: a lubricación tiene como función asegurar la fluidez y la permanencia de las actividades del generador de electricidad.
- ✚ Rotor: elemento móvil que rota dentro del estator y que causa el campo magnético inductor que produce el bobinado inducido.

En la figura N° 2.1 se observan los elementos que componen un generador eléctrico.

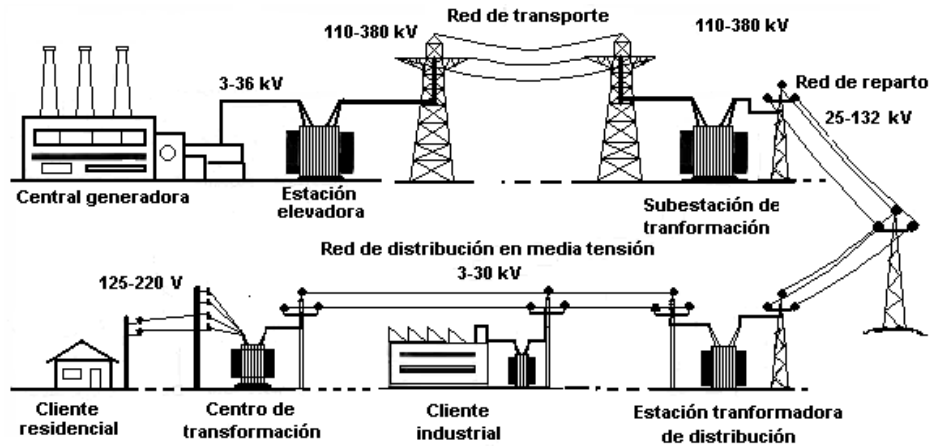


**Figura N° 2.1: Partes de un generador eléctrico.**

### 2.2.2 Distribución

La distribución de la energía eléctrica es la etapa final como parte del sistema eléctrico, en la cual se lleva la energía desde las subestaciones de las centrales eléctricas hasta los hogares, industrias, comercios y oficinas de los usuarios finales, mediante redes de distribución. La energía recorre grandes distancias en su red de transmisión y subtransmisión, y pasa por centros de transformación para pasar de la alta tensión a la baja tensión, para que pueda ser suministrada a los consumidores mediante una compleja y eficiente infraestructura.

En la figura N° 2.2 se observa el proceso de la energía desde que se genera hasta que se entrega al cliente ya sea residencial o industrial.



**Figura N° 2.2: Sistema eléctrico de potencia.**

### 2.2.3 Cargas en un Sistema Eléctrico de Potencia

La carga de un sistema está constituida por un conjunto de cargas individuales de diferentes tipos, industrial, comercial y residencial.

En general, una carga absorbe potencia activa y potencia reactiva; es el caso de las cargas con dispositivos de estado sólido.

Las cargas puramente resistivas absorben únicamente potencia activa. De aquí que las cargas de un sistema eléctrico también se clasifiquen en lineales y no lineales.

El término carga se puede utilizar de distintas maneras dependiendo del objetivo y situación en la cual se utilice, además se le suelen agregar apellidos para determinar específicamente a qué nos referimos. Carga, según la norma eléctrica chilena de baja tensión es todo artefacto, equipo o instalación cuyo mecanismo u operación requiere del consumo de energía eléctrica para su funcionamiento.

## **2.3 Subestaciones**

Una subestación eléctrica es una instalación, o conjunto de dispositivos eléctricos, que forma parte de un sistema eléctrico de potencia. Su principal función es la producción, conversión, regulación y distribución de la energía eléctrica. La subestación debe modificar y establecer los niveles de tensión de una infraestructura eléctrica, para que la energía eléctrica pueda ser transportada y distribuida.

### **2.3.1 Conjunto de Barras**

El conjunto de barras de una subestación es la configuración ordenada de los elementos que lo conforman.

La elección del conjunto de barras de una subestación depende de las características de cada sistema eléctrico y de la función que realiza dicha subestación en el sistema.

Los criterios utilizados en la selección del conjunto de barras más adecuado de una instalación son la continuidad de servicio, flexibilidad de operación, cantidad y costo del equipo eléctrico y facilidad de mantenimiento de los equipos.

Los conjuntos más utilizados en el sistema eléctrico se describen a continuación.

#### **2.3.1.1 Barra sencilla (menos confiabilidad y más económica)**

Es el conjunto más simple desde el punto de vista constructivo, considerando la cantidad de equipo y el área que ocupa, también resulta ser el más económico. No obstante, la confiabilidad de servicio es poca, ya que una falla en la barra principal provoca la salida de operación de la misma.

Asimismo, el mantenimiento a los interruptores se dificulta, ya que es necesario dejar fuera de servicio parte de la subestación.

### **2.3.1.2 Barra Principal y Barra de Transferencia**

Es una variante del conjunto anterior, en el cual se utiliza una barra de transferencia para sustituir, a través de un interruptor, algún interruptor que necesite mantenimiento.

### **2.3.1.3 Barra Principal y Barra Auxiliar**

Este conjunto ofrece una mayor continuidad de servicio, puesto que, en caso de existir una falla en cualquiera de las dos barras, ocasiona la pérdida de los elementos conectados a la barra fallada. Debido a ello, la subestación puede ser operada como dos subestaciones independientes con conjunto de barra simple.

Permite dar mantenimiento a los interruptores sin perder los elementos conectados a él y desenergizar cualquiera de las dos barras sin alterar el funcionamiento de la subestación.

Sin embargo, aumentan las maniobras en el equipo cuando se utiliza el interruptor de amarre como interruptor de transferencia.

La cantidad de equipo requerido es mayor, por tanto, su costo también incrementa.

### **2.3.1.4 Doble Barra y Barra de Transferencia**

Ofrece las mismas ventajas que el conjunto anterior, con la diferencia de que se requieren pocas maniobras para hacer uso del interruptor de transferencia. 14

En este caso, la subestación puede ser operada como dos subestaciones independientes de barra principal y barra de transferencia.

### **2.3.1.5 Anillo (mayor confiabilidad y costo)**

Conjunto que permite continuidad de servicio, ya que evita la salida completa en caso de falla en las barras. Además, ofrece la posibilidad de dar mantenimiento a los interruptores sin que se pierda el suministro de energía.

Cuando un interruptor está en mantenimiento, pueden ocurrir disparos en la protección, debido a que al abrir el anillo se puede incrementar la corriente de carga en los otros interruptores que permanecen en servicio. Esto puede evitarse realizando el mantenimiento en condiciones de baja carga.

Prácticamente requiere el mismo equipo que el conjunto de barra sencilla, por lo que su costo es similar.

Se utiliza en la salida de 23 kV de las subestaciones de distribución, utilizando anillo sencillo o doble en caso de haber más de dos transformadores.

### **2.3.1.6 Interruptor y Medio**

Conjunto que ofrece buena confiabilidad y ventajas para las operaciones de mantenimiento sin tener que interrumpir el servicio. Regularmente las transferencias se hacen a través de los interruptores, lo que permite conservar la protección aun cuando alguno se encuentre en mantenimiento.

Ocurre lo mismo que en el conjunto de anillo, cuando un interruptor está en mantenimiento, ya que al tener algún interruptor fuera de servicio, puede manifestarse un exceso de carga en los restantes y provocar disparos en las protecciones.

Este conjunto se utiliza en subestaciones de 110, 220 y 500 [kV], sobre todo en aquellas de interconexión que forman parte de un sistema en anillo.

### **2.3.1.7 Doble Interruptor (mayor confiabilidad y costo)**

Es la mejor opción en cuanto a confiabilidad se refiere, no obstante, es un conjunto más costoso que los anteriores y por ello se emplea en aquellos casos en que la continuidad es muy importante.

Con un interruptor fuera de servicio, se ocasiona la pérdida de únicamente el elemento disparado.

Las subestaciones con este conjunto pueden ser operadas como dos subestaciones independientes de barra simple.

## **2.4 Equipos que conforman una subestación**

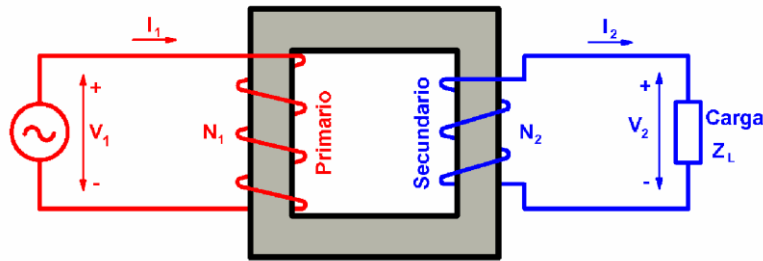
Las subestaciones se conforman de muchos equipos que cumplen una función específica algunos de ellos se nombran a continuación.

### **2.4.1 Transformadores**

Los transformadores son máquinas estáticas con dos devanados<sup>1</sup> de corriente alterna arrollados sobre un núcleo magnético. El devanado por donde entra energía al transformador se denomina primario y el devanado por donde sale energía hacia las cargas que son alimentadas por el transformador se denomina secundario.

El devanado primario tiene  $N_1$  espiras y el secundario tiene  $N_2$  espiras. El circuito magnético de esta máquina lo constituye un núcleo magnético sin entrehierros, el cual no está realizado con hierro macizo sino con chapas de acero al silicio apiladas y aisladas entre sí. De esta manera se reducen las pérdidas magnéticas del transformador.

En la figura N° 2.3 se observa el principio de funcionamiento de un transformador monofásico.



**Figura N° 2.3: Principio de funcionamiento de un transformador monofásico.**

Al conectar una tensión alterna  $V_1$  al primario, circula una corriente por él que genera un flujo alterno en el núcleo magnético. Este flujo magnético, en virtud de la Ley de Faraday, induce en el secundario una fuerza electromotriz (f.e.m.)  $E_2$  que da lugar a una tensión  $V_2$  en bornes de este devanado. De esta manera se consigue transformar una tensión alterna de valor eficaz  $V_1$  en otra de valor eficaz  $V_2$  y de la misma frecuencia. Nótese que esta máquina sólo vale para transformar tensiones alternas, pero no sirve para tensiones continuas.

El devanado de alta tensión (A.T.) es el de mayor tensión y el devanado de baja tensión (B.T.) es el de menor tensión. Un transformador elevador tiene el lado de baja tensión en el primario y el de A.T. en el secundario. Un transformador reductor tiene el lado de alta tensión en el primario y el de B.T. en el secundario.

El transformador es una máquina reversible. Un mismo transformador puede alimentarse por el lado A.T. y funcionar como transformador reductor o alimentarse por el lado de B.T. y actuar como un transformador elevador.

Está formado por tres partes principales:

- ✚ Parte activa: Núcleo, bobinas, cambiador de derivaciones y bastidor.
- ✚ Parte pasiva: Comprende el tanque que aloja la parte activa y se utiliza en transformadores cuya parte activa está sumergida en líquidos.

- ✚ Accesorios: Son todas las partes y dispositivos que ayudan en la operación y facilitan el mantenimiento del mismo.

## **2.5 Protecciones**

Las protecciones de sistemas de potencia se utilizan para evitar la destrucción de equipos o instalaciones por causa de una falla que podría iniciarse de manera simple y después extenderse sin control en forma encadenada. Los sistemas de protección deben aislar la parte donde se ha producido la falla buscando perturbar lo menos posible la red, limitar el daño al equipo fallado, minimizar la posibilidad de un incendio, minimizar el peligro para las personas, minimizar el riesgo de daños de equipos eléctricos adyacentes.

### **2.5.1 Resistencia limitadora de falla a tierra**

Una resistencia limitadora de fallas a tierra aplicada en un sistema eléctrico que alimenta a motores de media tensión tiene como objetivo proteger los devanados del estator contra fallas catastróficas a tierra. La resistencia limitadora se instala en el neutro del transformador que alimenta los motores.

Cuando el sistema se encuentra sólidamente aterrizado en la terminal X0 del transformador, los niveles de falla a tierra son similares a los de las fallas entre fases (varios miles de amperes), con esta esta condición, si se degrada el aislamiento del devanado del estator, la falla a tierra en el mismo puede causar daños considerables al motor (incluso las laminaciones de acero magnético donde están los devanados), la reparación del motor tomará un tiempo directamente proporcional al daño.

Cuando se instala una resistencia limitadora en el neutro del transformador el nivel de falla a tierra se limita al valor que defina el valor de la resistencia en Ohm, el resultado es que el daño provocado por la falla a tierra es el mínimo posible al operar la protección contra falla a tierra.

## **2.5.2 Transformadores de Instrumentos**

Son dispositivos electromagnéticos que reducen a escala las magnitudes de tensión y corriente que se utilizan para la protección y medición de los circuitos de una subestación, ya que los aparatos que realizan estas funciones no están diseñados para soportar grandes tensiones y corrientes.

Existen dos tipos de transformadores de instrumentos: transformadores de corriente y transformadores de potencial.

## **2.5.3 Transformadores de Corriente**

Transforman la corriente, es decir, toman la corriente de la línea y la reducen a un nivel seguro y medible. En un transformador de corriente, en condiciones normales de operación, la corriente del secundario es directamente proporcional a la del primario y está en fase con ella.

Los transformadores de corriente pueden ser de medición, de protección o mixtos.

## **2.5.4 Transformadores de Potencial**

Son de tipo inductivo y tienen como función principal reducir los valores de tensión del sistema a valores suficientemente bajos para alimentar a equipos de protección, control y medición.

En consecuencia, el transformador debe ser muy exacto para que no distorsione los verdaderos valores de tensión.

### 2.5.5 Relé Multilin F 35

El sistema de protección del alimentador F35 proporciona protección, control, monitoreo y medición del alimentador en un paquete integrado, económico y compacto.

El F35 ofrece soluciones rentables y presenta protección de alto rendimiento, opciones de Entradas/Salidas expandibles, monitoreo y medición integrados, comunicaciones de alta velocidad y amplias capacidades de programación y configuración. El F35 se puede configurar para proteger hasta 6 alimentadores o proteger hasta 5 alimentadores cuando se requiere la medición de voltaje de barra colectora.

También proporciona una ejecución rápida y determinista de la lógica programable necesaria para las aplicaciones de automatización de subestaciones. Entre sus principales aplicaciones se encuentran; Protección primaria y control para alimentadores de distribución múltiple, Protección de interconexión de generación distribuida, Esquema de transferencia de barra, Esquemas de enclavamiento y bloqueo de barra, Esquemas de distribución de carga basados en elementos de voltaje y frecuencia. El F35 tiene una amplia gama de elementos de protección que tienen muchos años de experiencia de campo comprobada.

En la figura N° 2.4 se observa un relé de protección Multilin F 35.



**Figura N° 2.4: Relé de protección Multilin F 35.**

Fuente: Planta carola -Coemin

### 2.5.6 Relé Multilin T 60

El T60 relé para protección de transformador es un relé basado en microprocesadores, diseñado para proteger transformadores de potencia trifásico de pequeño, mediano y gran tamaño.

El relé puede ser configurado con un máximo de cuatro entradas trifásicas de corriente y cuatro entradas de corriente de tierra, y puede satisfacer las aplicaciones con transformadores con devanados conectados entre dos interruptores, como en las configuraciones de barra en anillo o de interruptor y medio. El T60 ejecuta compensación de desfase de ángulos y magnitud internamente, eliminando la conexión de transformadores de corriente de compensación externa o de transformadores auxiliares.

El elemento diferencial porcentual es el elemento principal de protección en el T60. El relé también cuenta con la protección diferencial instantánea, voltios por Hertz, falla a tierra restringida y muchos elementos de protección basados en corriente, voltaje y frecuencia. El T60 incluye dieciséis comparadores universales completamente programables o Flex Elements. (Elementos flexibles), los cuales proporcionan flexibilidad adicional ofreciendo al usuario la capacidad de personalizar sus propias funciones de protección las cuales responden a cualquier señal medida o calculada por el relé.

En la figura N° 2.5 se observa un Relé de protección Multilin T 60.



**Figura N° 2.5: Relé de protección Multilin T 60.**

Fuente: Planta carola -Coemin

### 2.5.7 Relé Multilin SR469

El relé de protección de motores 469 está pensado para la protección de motores de media y alta potencia y equipos asociados. Se han integrado la protección de motor, diagnóstico de faltas, medida de potencia y funciones de comunicación en un equipo completo, económico y extraíble.

El fundamento del SR469 es el modelo térmico. Además de los elementos de protección de intensidad, dispone de entradas de RTD para protección de temperatura del estator y los rodamientos. Las entradas de tensión proporcionan los elementos de protección de tensión y potencia. Dispone de entradas de transformadores de intensidad de fase para protección diferencial de fase.

El SR469 detecta el tiempo de aceleración, la intensidad de arranque y capacidad térmica requerida durante el arranque del motor. Si la carga del motor durante el arranque es relativamente constante, estos valores aprendidos pueden usarse para ajustar con precisión la protección de aceleración.

En la figura N° 2.6 se observa un Relé de protección Multilin SR469.



**Figura N° 2.6: Relé de protección Multilin SR469**

Fuente: Planta carola -Coemin

## **2.6 Pliegos técnicos normativos.**

Los pliegos técnicos RIC y RPTD es el reglamento que establece las exigencias mínimas que deben ser consideradas en el diseño, construcción, puesta en servicio, operación, reparación y mantenimiento de toda instalación de consumo de energía eléctrica. Estas disposiciones normativas son aplicables a recintos de distintas envergaduras, desde viviendas hasta instalaciones industriales de gran potencia, abarcando hasta el punto de conexión del cliente final con la red de distribución.

Los pliegos RIC Y RPTD utilizados para el trabajo se nombrarán a continuación:

- ✚ Pliego normativo RPTD N°6 PUESTA A TIERRA
- ✚ Pliego normativo RIC N°6 PUESTA A TIERRA Y ENLACE EQUIPOTENCIAL
- ✚ Pliego normativo RIC N°19 PUESTA EN SERVICIO
- ✚ Pliego normativo RIC N° 13 SUBESTACIONES Y SALAS ELECTRICAS

## **CAPÍTULO III**

### **PROPUESTA TECNICA DE MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN**

En este proyecto se pretende dar solución a las debilidades en relación al sistema de protección en la etapa de media tensión, previo análisis de los componentes que integran un sistema, las condiciones actuales de la empresa y finalizando un análisis económico de la propuesta.

#### **3.1 Antecedentes**

De acuerdo a informaciones recibidas de jefe de turno de la empresa, en el último mes se han producido 8 fallas en el sistema, y cada una de ellas implica una suspensión del proceso productivo durante 1 hora, es decir, 10 horas en el mes, lo que significa para la empresa una pérdida económica importante.

En 1 hora de trabajo se producen 4 toneladas de concentrado, equivalentes a 1 tonelada de fino.

El valor de 1 Kg de fino es de US\$ 6; a partir de los antecedentes, cada falla significa dejar de producir 1.000 kg de fino, por lo que la empresa pierde US\$6.000 (\$5.016.000).

Valor del dólar observado.

Si estos valores se analizan considerando las 8 fallas ocurridas en un mes, significa que la empresa en ese período ha tenido una pérdida económica de US\$ 48.000 (\$40.128.000) solamente por este concepto, como se puede observar el detalle que presenta el tabla N° 3.1. Valor del dólar observado.

En este cálculo no se incorpora el costo de mantención, reparaciones ni reemplazo de equipos dañados producto del fallo.

**Tabla N° 3.1: Pérdidas estimadas por fallas en el mes de noviembre.**

Horas falla	Perdida en producción			Pérdida económica	
	concentrado	Fino	kg/Fino	US\$/kg/Fino	\$ pesos
Hr (1 falla)	4 ton	1 ton	1.000	6.000	\$ 5.016.000
Hr (8 fallas)	32 ton	8 ton	8.000	48.000	\$ 40.128.000

Fuente: Elaboración propia.

Valor Kg Fino: US\$ 6

Valor dólar observado: \$836

### **3.2 Presentación de propuesta**

Como se ha señalado, en la Planta Coemin se ha implementado una sala eléctrica que tiene como función la atención y distribución de la energía eléctrica necesaria para sus operaciones, para lo cual se distribuye esta energía a través de una red que permite alimentar las diferentes máquinas y sistemas que funcionan en la Planta de Molienda.

Cabe destacar que el siguiente trabajo está destinado a la realización de cálculos de corto circuito y diseño de malla a tierra para así facilitar las coordinaciones de protecciones mediante un software.

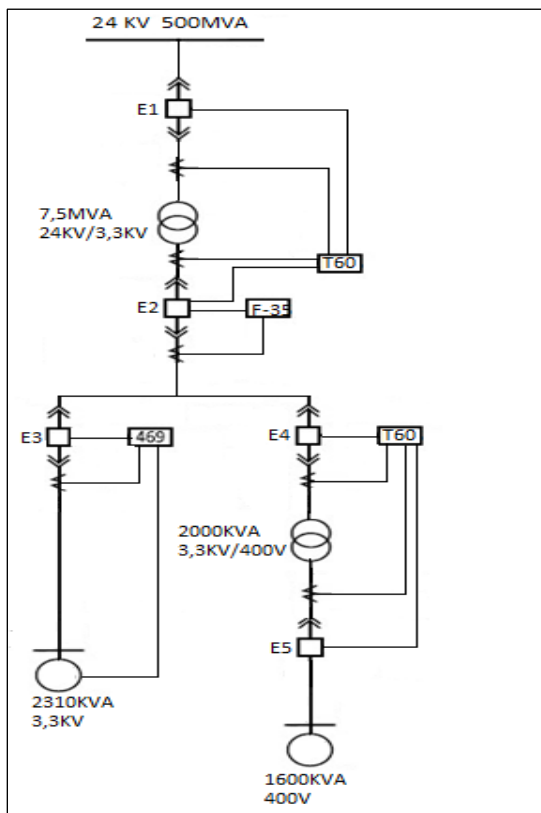
Las observaciones en terreno permiten determinar la importancia de este proyecto, considerando las debilidades existentes en el sistema de protección de los equipos de media tensión instalados en la nueva Planta de Molienda, que han quedado demostradas en las fallas producidas en el sistema en forma reiterada y que han producido pérdidas económicas importantes para la empresa.

La planta cuenta con tres relés de que se encuentran con sus protecciones deshabilitadas, uno de ellos es el de la subestación principal de 23kv y los otros dos son de la sala eléctrica para proteger el motor y transformador.

El alcance del servicio es que se cuente con todos los datos necesario para la construcción y montaje de la malla de tierra, de acuerdo a lo señalado en este proyecto y habilitar las principales protecciones de los relés para así contar con una coordinación que se confianza y seguridad.

### 3.3 Cálculo de falla de cortocircuito.

En la figura N° 3.1 se observa un sistema de potencia de un molino con sus respectivos relés de protección.



**Figura N° 3.1: Sistema de potencia instalación de molino.**

Fuente: elaboración propia.

### 3.3.1 Transformadores

Analizando la red eléctrica se pueda identificar la presencia de dos transformadores, cuyos datos técnicos más relevantes se resumen a la tabla N°4.2.

**Tabla N°3.2: Datos de Transformadores**

Designación	Potencia (MVA)	Tensión (kV)		Impedancia	
		Primario	Secundario	Z	X/R
Transformador 1	7,5	23	3,3	6,03	7,5
Transformador 2	2	3,3	0,4	6,176	5,32

Fuente: elaboración propia.

Cabe destacar que, en la determinación de los parámetros de impedancia de los transformadores, se ha utilizado información de datos solicitados a la empresa.

### 3.3.2 Alimentadores de Media Tensión

Al analizar la instalación eléctrica, es posible identificar un alimentador proveniente de la empresa suministradora de energía.

### 3.3.3 Motores

Al analizar los motores, si bien es posible identificar en la red eléctrica un gran número de motores y dado que el estudio se concentra en evaluar la red de MT, en la tabla N°3.3 se describen solo la característica del motor en 3,3(KV) y un grupo de motores de baja tensión se considerará una carga equivalente y será identificado como motor 2 de 400(V).

**Tabla N°3.3: Datos de los Motores**

Designación	Tipo	Potencia		Tensión	Factor de Potencia	Rend. %	Reactancia Xd" (%)	X/R
		(kVA)	(kW)					
MOLINO 9	Sincrónico	2310	1500	3,3	0,9318	94,6	24,8	2,72
MOTOR 2	Inducción	408	350	4,16	0,9206	93,19	16,7	10

Fuente: elaboración propia.

### 3.3.4 Sistema de Protecciones Eléctricas

Al analizar el sistema de protecciones eléctricas en la red, es posible identificar los transformadores de corriente Al respecto, en la Tabla 4.4.

**Tabla N° 3.4: Datos de los Relé de Protección**

DESCRIPCIÓN	I CARGA (A)	TENSIÓN (KV)	I(A) 20%	T/C FASE	I SEC (TC)	PICK UP	T/C RESIDUAL
IE1	180,4	24	216	250:5	4,32	0,86	50/5
IE2	754,05	3,3	904	900:5	5,02	1,004	50/5
IE3	404,14	3,3	485	500:5	4,85	0,97	50/5
IE4	2886,75	0,4	3464	3500:5	4,9	0,98	50/5
IE5	2309,4	0,4	2771	3000:5	4,6	0,92	50/5
IT1 PRIMARIO	180,4	24	216	250:5	4,32	0,86	50/5
IT1 SECUNDARIO	1312,1	3,3	1574	1500:5	5,24	1,04	50/5
IT2PRIMARIO	349,9	3,3	420	400:5	5,25	1,05	50/5
IT2 SECUNDARIO	2886,75	0,4	3464	3500:5	4,9	0,98	50/5

Fuente: elaboración propia

### 3.3.5 Cálculo de Parámetros y Cortocircuitos

Para poder realizar los cálculos de cortocircuito trifásico de la red eléctrica, es necesario modelar en por unidad el empalme, transformadores, alimentadores y motores eléctricos.

### 3.3.6 Cálculo de Parámetros en por unidad

Para la determinación de los parámetros en por unidad de la red eléctrica en estudio se contempla emplear una potencia base de 10 (MVA).

### 3.3.7 Cálculo de parámetros del empalme

Al considerar la información proporcionada por la planta, los datos de cortocircuito en el punto de empalme, se resumen en la Tabla 3.1.

**Tabla N°3.5: Datos del Empalme.**

Descripción	Tensión (kV)	SCC 3 $\phi$ (MVA)	X/R
Empalme	24	500	5

Fuente: elaboración propia.

Empleando cálculo en por unidad, la impedancia equivalente viene dada por:

$$Z_{eq}(pu) = \sqrt{\frac{S_{base}}{S_{coci\ 3\phi}}} = \frac{10}{500} = 0,02(pu) \quad (3.1)$$

Por otro lado, al considerar la relación X/R se tiene:

$$Z_{eq}(pu) = \sqrt{R_{eq}^2 + X_{eq}^2} \quad (3.2)$$

$$Z_{eq}(pu) = \sqrt{1 + \frac{X^2}{R^2}} = R_{eq}(pu) = \frac{Z_{eq}(pu)}{\sqrt{\left(\frac{X}{R}\right)^2}} \quad (3.3)$$

$$R_{eq}(pu) = \frac{0,02}{\sqrt{1 + (5)^2}} = 0,00392(pu) \quad (3.4)$$

Luego:

$$X_{eq} = R * \left(\frac{X}{R}\right) = 0,00392 * 5 = 0,0196(pu) \quad (3.5)$$

Por lo tanto, la impedancia en por unidad del empalme resulta ser:

$$Z = 0,00392 + j0,0196(pu) \quad (3.6)$$

### 3.3.8 Cálculo de parámetros del Transformador

Considerando los valores de impedancia de los transformadores descritos en la Tabla 2.1, la impedancia en base propia resulta ser:

$$Z_{trafo} = 6,03\% = 0,0603(pu) \quad \frac{X}{R} = 7,5 \quad (3.7)$$

Por otro lado:

$$Z_{eq}(pu) = \sqrt{R_{eq}^2 + X_{eq}^2} = R_{eq} * \sqrt{1 + \frac{X^2}{R^2}} \quad (3.8)$$

Luego:

$$Req(pu) = \frac{Ztrafo 1}{\sqrt{1 + \left(\frac{X}{R}\right)^2}} = \frac{0,0603}{\sqrt{1 + (7,5)^2}} = 0,007969(pu) \quad (3.9)$$

Además:

$$Xeq = R * \left(\frac{X}{R}\right) = 0,007969 * 7,5 = 0,05976(pu) \quad (3.10)$$

Dado que la potencia base empleada es 10 (MVA), al realizar un cambio de base, la impedancia del transformador viene dada por:

$$\begin{aligned} Ztrafo &= (0,007969 + j0,05976) * \frac{10 MVA}{7,5 MVA} \\ &= 0,0106 + j0,07967(pu) \end{aligned} \quad (3.11)$$

### 3.3.9 Cálculo de parámetros de los motores.

Al considerar los parámetros en base propia de los motores descrita en la tabla 2.3, para el motor sincrónico Molino 9 la reactancia y relación X/R es 24,8% y 2,7, respectivamente. Así, la impedancia en base propia viene dada por:

$$Zm1 = 0,08268 + j0,24\Omega \quad (3.12)$$

Al emplear la potencia base de cálculo, la impedancia en por unidad del motor sincrónico es:

$$Zm1 = (0,08268 + j0,24) * \frac{10 MVA}{2,310 MVA} = 0,3579 + j1,0389(pu) \quad (3.13)$$

Para los motores Inducción la reactancia total de ellos y relación X/R es 24,8% y 2,72, respectivamente. Así, la impedancia en base propia viene dada por:

$$Z_{m2} = 0,08557 + j0,248 \Omega \quad (3.14)$$

Al emplear la potencia base de cálculo, la impedancia en pu de los motores de inducción es:

$$Z_{m2} = (0,0855 + j0,248) * \frac{10 \text{ MVA}}{1,6 \text{ MVA}} = 0,5343 + j1,55(\text{pu}) \quad (3.15)$$

### 3.3.10 Cálculo de parámetros del Transformador 2.

Considerando los valores de impedancia de los transformadores descritos en la Tabla 2.1, la impedancia en base propia resulta ser:

$$Z_{trafo} = 6,176\% = 0,06176(\text{pu}) \quad \frac{X}{R} = 5,32456 \quad (3.16)$$

Por otro lado:

$$Z_{eq}(\text{pu}) = \sqrt{Req^2 + Xeq^2} = Req * \sqrt{1 + \frac{X^2}{R^2}} \quad (3.17)$$

Luego:

$$Req(\text{pu}) = \frac{Z_{trafo} 1}{\sqrt{1 + \left(\frac{X}{R}\right)^2}} = \frac{0,06176}{\sqrt{1 + (5,32456)^2}} = 0,1139(\text{pu}) \quad (3.18)$$

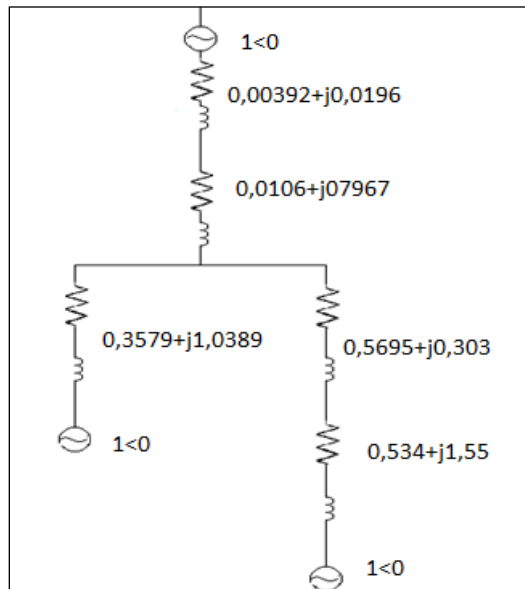
Además:

$$X_{eq} = R * \left(\frac{X}{R}\right) = 0,1139 * 5,32456 = 0,606(pu) \quad (3.19)$$

Dado que la potencia base empleada es 10 (MVA), al realizar un cambio de base, la impedancia del transformador viene dada por:

$$Z_{trafo} = (0,1139 + j0,606) * \frac{10 \text{ MVA}}{2 \text{ MVA}} = 0,5695 + j3,03(pu) \quad (3.20)$$

Realizado el cálculo de parámetros en por unidad, se confecciona el diagrama de impedancia que se presenta en la figura N°4.3 con base de 10MVA



**Figura N° 3.2: Sistema de potencia instalación de molino,**

Fuente: elaboración propia.

### 3.4 Cálculo de cortocircuito trifásico.

#### 3.4.1 Fundamentos.

El cálculo de cortocircuito trifásico, permite conocer las corrientes de falla necesarias para el estudio de protecciones. En tal sentido a considerar magnitudes en por unidad, la corriente de cortocircuito trifásico viene dada por:

$$I_f(pu) = \frac{1}{Z_{th}} \quad (3.21)$$

Así, el cálculo de cortocircuito se reduce a determinar la impedancia de secuencia positiva desde el punto de falla, designado por  $Z_{TH}$ .

#### 3.4.2 Cortocircuito 3 $\phi$ Falla 1.

Dado lo anterior se designarán posibles fallas en puntos más críticos, como se muestra en la figura N°3.3

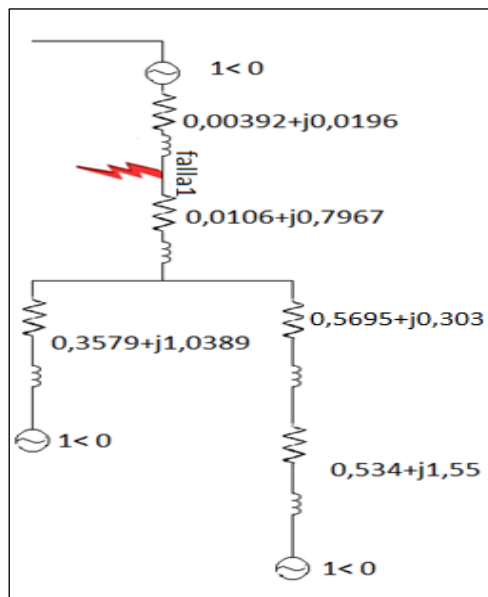
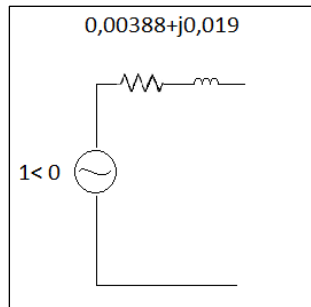


Figura N° 3.3: diagrama de impedancias falla 1.

Fuente: elaboración propia

Con referencia al diagrama de impedancia de la figura N° 4.4 es posible confeccionar una red eléctrica simplificada en la cual se obtiene una impedancia equivalente de  $0,00388+j0,019$  como muestra en la figura N° 4.4



**Figura N° 3.4: diagrama de impedancias simplificado falla 1.**

Fuente: elaboración propia.

Luego la corriente de falla 1 en por unidad resulta ser:

$$I_{falla\ 1} = \frac{1 < 0}{0,00388 + j0,019} = 51,567 < -78\ (pu) \quad (3.22)$$

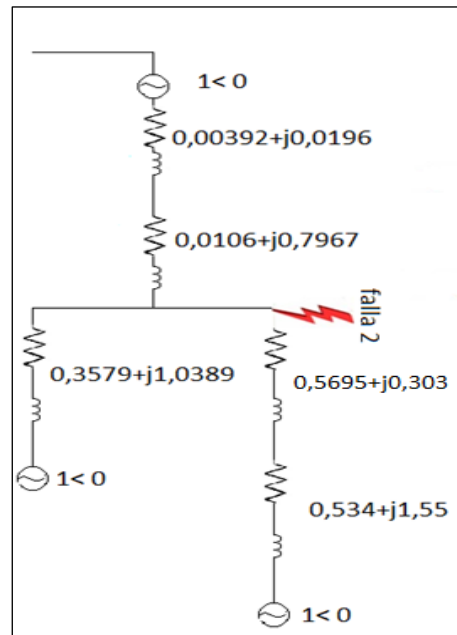
Puesto que la falla 1 se encuentra en la zona de 24 (kV), la corriente base resulta ser 240,56 (A) y por tanto las magnitudes de corriente de falla en Amperes viene dada por;

$$I_{base} = \frac{10\ MVA}{\sqrt{3} * 24KV} = 240,56A \quad (3.23)$$

$$I_{falla1} = I_{base} * I_{falla1}(pu) \quad (3.24)$$

$$I_{falla1} = 240,56A * 51,567(pu) = 12,4KA \quad (3.25)$$

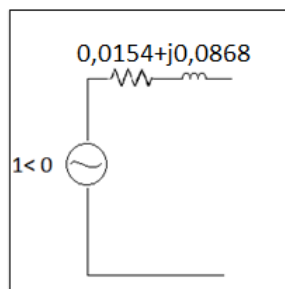
### 3.4.3 Cortocircuito 3 $\phi$ Falla 2.



**Figura N° 3.5: diagrama de impedancias simplificado falla 2.**

Fuente: elaboración propia.

Ahora se confeccionará la red eléctrica simplificada en la cual se obtiene una impedancia equivalente de  $0,0154+j0,0868$  como muestra en la figura N°4.7



**Figura N° 3.6: diagrama de impedancias simplificado falla 2.**

Fuente: elaboración propia.

Luego la corriente de falla 1 en por unidad resulta ser:

$$I_{falla\ 2} = \frac{1 < 0}{0,0154 + j0,0868} = 11,34 < -79\ (pu) \quad (3.26)$$

Puesto que la falla 2 se encuentra en la zona de 3,3 (kV), la corriente base resulta ser 1749,54 (A) y por tanto las magnitudes de corriente de falla en Amperes viene dada por;

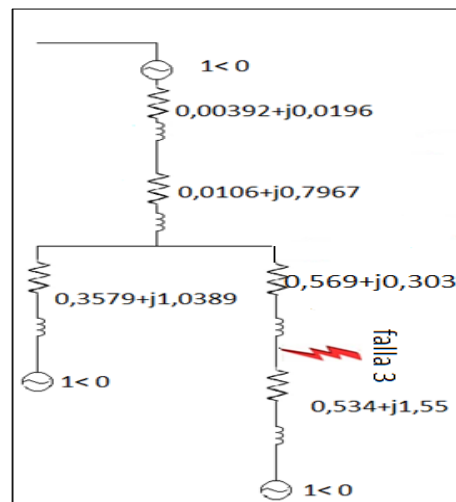
$$I_{base} = \frac{10\ MVA}{\sqrt{3} * 3,3KV} = 1749,54\ A \quad (3.27)$$

$$I_{falla2} = I_{base} * I_{falla1}(pu) \quad (3.28)$$

$$I_{falla2} = 1749,54\ A * 11,34 < -79(pu) = 19,8KA \quad (3.29)$$

### 3.4.4 Cortocircuito 3ø Falla 3.

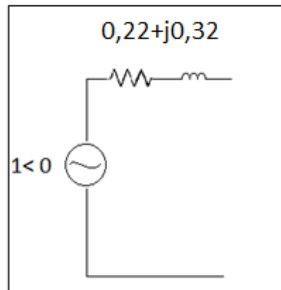
Dado que las protecciones a estudiar son en media tensión, de igual forma se realizarán los cálculos para la zona de 400V.



**Figura N° 3.7: diagrama de impedancias simplificado falla 3.**

Fuente: elaboración propia.

Ahora se confeccionar la red eléctrica simplificada en la cual se obtiene una impedancia equivalente de  $0,22+j0,32$  como muestra en la figura N° 3.8.



**Figura N° 3.8: diagrama de impedancias simplificado falla 3.**

Fuente: elaboración propia.

Luego la corriente de falla 3 en por unidad resulta ser:

$$I_{falla\ 3} = \frac{1 < 0}{0,22 + j0,32} = 2,57 < -55 \quad (3.30)$$

Puesto que la falla 3 se encuentra en la zona de 0,4 (kV), la corriente base resulta ser 14433,7 (A) y por tanto las magnitudes de corriente de falla en Amperes viene dada por;

$$I_{base} = \frac{10\ MVA}{\sqrt{3} * 0,4\ KV} = 14433,7\ A \quad (3.31)$$

$$I_{falla3} = I_{base} * I_{falla1}(pu) \quad (3.32)$$

$$I_{falla3} = 14433,7\ A * 2,57(pu) = 37,17KA \quad (3.33)$$

### 3.5 Malla a tierra

A continuación, se presentan los resultados de las mediciones de resistividad de suelos y el diseño de malla a tierra de protección para equipos a instalar.

#### 3.5.1 Equipamiento

Para realizar las mediciones de resistividad de suelos, se utilizaron los siguientes elementos:

**Tabla N° 3.6: Equipamiento para mediciones de resistividad en terreno.**

CANTIDAD	DESCRIPCIÓN
01	Instrumento de medición marca AEMC
04	Estaca de cobre (electrodo)
01	Cable 50 metros conexión electrodo de corriente
01	Cable 30 metros conexión electrodo de corriente
02	Conectores electrodos de potencial
01	Huinchas plásticas de medir 50 metros
01	martillo

Fuente: elaboración propia.

#### 3.5.2 Medidor de resistencia modelo 6471 de AEMC.

El probador de resistencia de suelo multifunción, modelo 6471, es un instrumento portátil que puede medir la resistencia de suelo usando dos pinzas de corrientes (sin barras auxiliares). Otros métodos de prueba incluidos son: resistencia de suelo (3 polos y 4 polos), acople de suelo, resistencia a puesta a tierra, resistencia selectiva de suelo, resistividad de la tierra (método Wenner o Schlumberger). El modelo 6471 mide de 0.01

a 99.99 k $\Omega$  y se calibra solo, buscando de manera automática el rango de medición óptimo y la corriente de prueba.

En la figura N° 3.9 se observa un instrumento de medición ground tester.



**Figura N° 3.9: Instrumento de medición ground tester.**

### 3.5.3 Procedimiento para la medición de la resistividad del suelo

Para la medición de campo se utilizó el Método de Schlumberger, ya que este método resulta ser menos sensible a las variaciones laterales del terreno que el método de Wenner. De acuerdo a la configuración de Schlumberger, los valores para n se obtuvieron por la siguiente serie mostrados en la tabla número.

### 3.5.4 Caculo de malla a tierra.

**TABLA N° 3.7: Datos principales del banco de transformadores.**

DATOS PRINCIPALES DEL BANCO DE TRANSFORMADORES				
Identificación	Impedancia (z)	Potencia (kVA)	V Primario	V secundario
T1	6,03 %	7500 KVA	24 KV	3,3 KV
T2	6,176 %	2000 KVA	3,3 KV	400 V

Fuente: elaboración propia.

### 3.5.4.1 Procedimientos para el diseño de una malla de puesta a tierra

- ✚ Área a ocupar para la instalación de la malla
- ✚ Cálculo del radio equivalente del área seleccionada para la malla
- ✚ Graficar un rectángulo sobre esta área
- ✚ Calcular la longitud del conductor requerido
- ✚ Medir la resistividad del terreno
- ✚ Cálculo de  $\rho$  equivalente según Burgsdorf-Yakobs
- ✚ Cálculo de la corriente de cortocircuito
- ✚ Cálculo de la corriente irradiada
- ✚ Cálculo del calibre del conductor de puesta a tierra
- ✚ Cálculos de la resistencia de la malla de puesta a tierra
- ✚ Cálculos de resistencia total del sistema
- ✚ Cálculo de tensión de paso y de toque según la IEEE Std 80 - 2000
- ✚ Cálculo de la elevación de potencial de tierra “GPR”

### 3.5.4.2 Área a ocupar para la instalación de la malla

Para la instalación de la malla de puesta a tierra utilizaremos un área de las siguientes dimensiones

$$\text{Largo} = 11\text{mts y Ancho} = 11\text{mts} \quad (3.34)$$

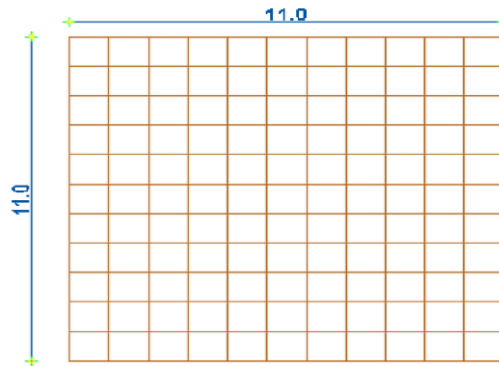
$$A = L * L = 11 * 11 = 121\text{MT}^2 \quad (3.35)$$

### 3.5.4.3 Cálculo del radio equivalente del área seleccionada para la malla

$$A = \pi * r^2 \rightarrow r = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (3.36)$$

$$r = \sqrt{\frac{121M^2}{\pi}} = 6,2 \text{ MT} \quad (3.37)$$

En la figura N° 3.11 se muestra la malla de 11 x 11 la cual se divide en retículas de 1 metro x 1 metro.



**Figura N° 3.10: diseño de malla a tierra.**

Fuente: elaboración propia.

#### **3.5.4.4 Calcular la longitud del conductor requerido.**

Longitud Total (Lt) = 11(12) + 11(12) = 264 MT (Metros necesarios para la malla)

#### **3.5.4.5 Medir la resistividad del terreno.**

Se realizaron 13 tomas de acuerdo al método y a su vez se calculó la resistividad con la fórmula correspondiente al método.


Con lo que al realizar las mediciones obtuvimos la siguiente tabla:

**Tabla N° 3.8: Mediciones de resistividad de suelo**

Lectura	AB/2	$\rho(\Omega\cdot m)$
1	1,5	101
2	2	94,4
3	2,5	93
4	3,5	79
5	4,5	78
6	5,5	64
7	7,5	50
8	10,5	42
9	15,5	40
10	20,5	39
11	30,5	38
12	40	37
13	45	35

Fuente: elaboración propia.

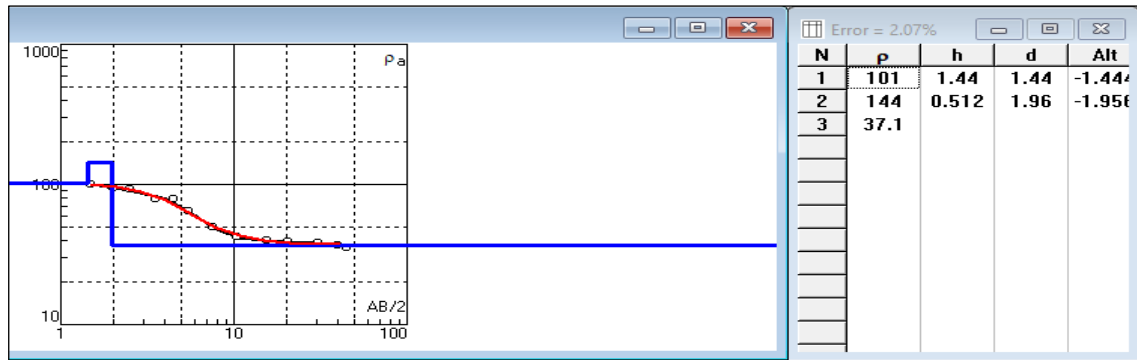
 **AB/2:** es la distancia entre el centro de la medición y los electrodos de corriente.

  **$\rho$ :** es el valor de resistividad (en ohm metro).

#### **3.5.4.5 Resultados del modelamiento del suelo**

Durante la realización de la medida se debe dibujar una curva de resistividad versus separación. Esta curva proporcionará información respecto de la estructura general del terreno en la localidad, identificando lecturas extrañas y ayudando a decidir cuántas medidas se requieren. Si hay grandes fluctuaciones en los valores medidos, es probable que las condiciones del suelo sean variables, la tierra ha sido compuesta o existen tuberías enterradas en el área. En tales casos, las medidas deben tomarse en algunas direcciones transversales a través del sitio. Algunas de estas transversales deben ser en ángulo recto

unas de otras, para permitir la identificación de interferencias de cables eléctricos cercanos.



**Figura N° 3.11: Modelo de tres capas error de 2,07 %.**

Fuente: Elaboración propia






### 3.5.4.6 Resistividad y espesores de cada capa

Las siguientes, medidas son las dadas por el instrumento que son resistividad equivalente de un terreno que es dependiente de las dimensiones y ubicación del electrodo y se modifica si cambia su área o profundidad.

$$\rho_1: 101\Omega\text{m} \quad \rho_2: 144\Omega\text{m} \quad \rho_3: 37.1\Omega\text{m}$$

$$E_1: 1,44\text{m} \quad E_2: 0.512\text{m} \quad E_3: \infty$$

Donde:

-   $\rho_1$  Resistividad capa 1
-   $\rho_2$  Resistividad capa 2
-   $\rho_3$  Resistividad capa 3
-  E1 Espesor capa 1
-  E2 Espesor capa 2

### 3.5.5 Cálculo de $\rho$ equivalente según Burgsdorf-Yakobs.

$$r = \sqrt{\frac{Area}{\pi}} \quad (3.38)$$

$$r = \sqrt{\frac{121}{\pi}} = 6.2 \quad (3.39)$$

$$r_0^2 = r^2 - h^2 \quad (3.40)$$

$$r_0^2 = 6,2^2 - 0,6^2 = 38,08 \quad (3.41)$$

$$q_0^2 = 2r - (r + h) \quad (3.42)$$

$$q_0^2 = 2 * 6,2 - (6,2 + 0,6) = 84,32 \quad (3.43)$$

$$u_n^2 = q^2 + r^2 + hn^2 \quad (3.44)$$

$$u_1^2 = 84,32 + 38,08 + 1,44^2 = 124,4 \quad (3.45)$$

$$u_2^2 = 84,32 + 38,08 + 1,95^2 = 126,2 \quad (3.46)$$

$$v_n^2 = \frac{u_n^2 - \sqrt{(u_1^2)^2 4 * q_0^2 * r_0^2}}{2} \quad (3.47)$$

$$v_1^2 = \frac{124,4 - \sqrt{(124,4)^2 - 4 * 84,32 * 38,08}}{2} = 36,54 \quad (3.48)$$

$$v_2^2 = \frac{126,2 - \sqrt{(126,2)^2 - 4 * 84,32 * 38,08}}{2} = 37,44 \quad (3.49)$$

$$F_n = \sqrt{\left(1 - \frac{v_n^2}{r_0^2}\right)} \quad (3.50)$$

$$F_1 = \sqrt{\left(1 - \frac{36,54}{38,08}\right)} = 0,2 \quad (3.51)$$

$$F_2 = \sqrt{\left(1 - \frac{37,44}{38,08}\right)} = 0,129 \quad (3.52)$$

$$F_3 = \infty$$

$$\rho_{eq} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\rho_1}\right) * [F_1 - F_0] + \left(\frac{1}{\rho_2}\right) * [F_2 - F_1] + \left(\frac{1}{\rho_3}\right) * [F_3 - F_2] + \left(\frac{1}{\rho_n}\right) * [F_n - F_{n-1}]} \quad (3.53)$$

$$\rho_{eq} = \frac{1}{\left(\frac{1}{106}\right) * [0,2 - 0] + \left(\frac{1}{144}\right) * [0,129 - 0,2] + \left(\frac{1}{37,1}\right) * [1 - 0,129]} \quad (3.54)$$

$$\rho_{eq} = 48,48(\Omega - m)$$

### 3.6 Cálculo de la corriente de cortocircuito a transformadores.

Se procede a calcular la corriente de corto circuito de los transformadores lado de conexión delta y estrella, así se comparará con los cálculos de corriente de corto circuito anteriores.

### 3.6.1 Transformador 1 primario.

$$I_{sec} = \frac{KVA * 1000}{\sqrt{3} * V} \quad (3.55)$$

$$I_{sec} = \frac{7500 KV}{\sqrt{3} * 23 KV} = 188,26 A \quad (3.56)$$

La corriente de cortocircuito simétrica máxima (ICC MAX) será:

$$ICC MAX = \frac{I_{sec}}{Z} \quad (3.57)$$

$$ICC MAX = \frac{188,26}{0,0603} = 3122,05 A \quad (3.58)$$

La corriente de cortocircuito asimétrica será:

$$ICCasim = ICCmax * DF \quad (3.59)$$

Df = factor de asimetría (factor que depende de la relación X/R en el punto de falla de acuerdo al capítulo 15 sección 15.10, de la norma IEEE Std 80 – 2000)

Fault duration, $t_f$		Decrement factor, $D_f$			
Seconds	Cycles at 60 Hz	X/R = 10	X/R = 20	X/R = 30	X/R = 40
0.008 33	0.5	1.576	1.648	1.675	1.688
0.05	3	1.232	1.378	1.462	1.515
0.10	6	1.125	1.232	1.316	1.378
0.20	12	1.064	1.125	1.181	1.232
0.30	18	1.043	1.085	1.125	1.163
0.40	24	1.033	1.064	1.095	1.125
0.50	30	1.026	1.052	1.077	1.101
0.75	45	1.018	1.035	1.052	1.068
1.00	60	1.013	1.026	1.039	1.052

**Figura N° 3.12: factor de asimetría**

Fuente: IEEE Std 80–2000

Entonces obtenemos para una relación X/R usaremos 10 y para una falla de tiempo 0,5 segundo.

$$I_{CCasim} = 3122,05 * 1,026 = 3203,22 A \quad (3.60)$$

### 3.6.2 Transformador 1 secundario.

$$I_{sec} = \frac{KVA * 1000}{\sqrt{3} * V} \quad (3.61)$$

$$I_{sec} = \frac{7500 KV}{\sqrt{3} * 3,3 KV} = 1312,15 A \quad (3.62)$$

La corriente de cortocircuito simétrica máxima (ICC max) será:

$$ICC MAX = \frac{Isec}{Z} \quad (3.63)$$

$$ICC MAX = \frac{1312,15}{0,0603} = 21760,36 A \quad (3.64)$$

La corriente de cortocircuito asimétrica será:

$$ICCasim = ICCmax * DF \quad (3.65)$$

$$ICCasim = 21760,36 * 1,026 = 22326,12 A$$

### 3.6.3 Transformador 2 primario.

$$Isec = \frac{KVA * 1000}{\sqrt{3} * V} \quad (3.66)$$

$$Isec = \frac{2000 KV}{\sqrt{3} * 3,3 KV} = 349,9 \quad (3.67)$$

La corriente de cortocircuito simétrica máxima (ICC max) será:

$$ICC MAX = \frac{Isec}{Z} \quad (3.68)$$

$$ICC MAX = \frac{349,9}{0,06176} = 5665,6 A \quad (3.69)$$

La corriente de cortocircuito asimétrica será:

$$ICCasim = ICCmax * DF \quad (3.70)$$

$$ICCasim = 5665,6 * 1,026 = 5812,93 A \quad (3.71)$$

### 3.6.4 Transformador 2 secundario.

Al igual que el cálculo anterior se realizará el resultado de corriente de corto circuito lado de 400V

$$Isec = \frac{KVA * 1000}{\sqrt{3} * V} \quad (3.72)$$

$$Isec = \frac{2000 KV}{\sqrt{3} * 0,4 kV} = 2886,75 A \quad (3.73)$$

La corriente de cortocircuito simétrica máxima (ICC max) será:

$$ICC MAX = \frac{Isec}{Z} \quad (3.74)$$

$$ICC MAX = \frac{2886,75}{0,06176} = 46741,44 A \quad (3.75)$$

La corriente de cortocircuito asimétrica será:

$$ICCasim = ICCmax * DF \quad (3.76)$$

$$ICCasim = 46741,44 * 1,026 = 47956,71 A \quad (3.77)$$

### 3.6.5 Cálculo máximo de falla.

$$Ig = Df * Cp * Sf * Ifalla \quad (3.78)$$

Df = Factor de decremento (tabla N)

Cp = Factor de crecimiento

Sf = Factor de división de corriente

If = corriente de falla

$$I_g = 1,026 * 1,3 * 1 * 19839,78 = 26462,29A \quad (3.79)$$

### 3.6.6 Cálculo del calibre del conductor de puesta a tierra

El cálculo del conductor de puesta a tierra para plantas industriales y subestaciones se puede calcular de la siguiente manera:

$$A_{mm^2} = \frac{I}{\sqrt{\frac{TCAP * 10^{-4}}{t_c \alpha_r \rho_r} \ln \frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}}} \quad (3.80)$$

En donde:

A= área del conductor

I= corriente máxima de falla a tierra en amperes

TCAP= factor de capacidad térmica J/cm<sup>3</sup>/°C

Tm= temperatura máxima de fusión en °C, véase tabla A-2.

Ta= temperatura ambiente en °C

Tc= tiempo de circulación de corriente en segundos

αr= coeficiente térmico de resistividad a la temperatura de referencia

ρr= resistividad del conductor de tierra a la temperatura de referencia

Ko= dato de figura N°3.13

Los datos se pueden obtener de la figura N°3.13 y se utilizara el cable cobre duro, la ecuación queda de la siguiente manera

Description	Material <sup>a</sup> conductivity (% IACS)	$\alpha_r$ factor <sup>a</sup> at 20 °C (1/°C)	$K_0$ at 0 °C (0°C)	Fusing <sup>a</sup> temperature $T_m$ (°C)	Resistivity <sup>a</sup> at 20 °C $\rho_r$ ( $\mu\Omega$ -cm)	Thermal <sup>a</sup> capacity $TCAP$ [ $J/(cm^3 \cdot ^\circ C)$ ]
Copper, annealed soft-drawn	100.0	0.003 93	234	1083	1.72	3.4
Copper, commercial hard-drawn	97.0	0.003 81	242	1084	1.78	3.4
Copper-clad steel wire	40.0	0.003 78	245	1084*	4.40	3.8
Copper-clad steel wire	30.0	0.003 78	245	1084*	5.86	3.8
Copper-clad steel rod	17.0	0.003 78	245	1084*	10.1	3.8
Aluminum-clad steel wire	20.3	0.00360	258	657	8.48	3.561
Steel, 1020	10.8 <sup>b</sup>	0.003 77	245	1510	15.90	3.8
Stainless-clad steel rod <sup>c</sup>	9.8	0.003 77	245	1400*	17.50	4.4
Zinc-coated steel rod	8.6	0.003 20	293	419*	20.10	3.9
Stainless steel, 304	2.4	0.001 30	749	1400	72.00	4.0

Figura N° 3.13: constante de kf para diferentes tipos de electrodos y temperaturas

Fuente: IEEE Std 80–2000

$$A = \frac{I_g}{\sqrt{\frac{3,422 * 10^{-4}}{top * 0.00381 * 1.774} \ln \frac{242 + 1084}{242 + 40}}} \quad (3.81)$$

$$A = \frac{26,46}{\sqrt{\frac{3,422 * 10^{-4}}{0.5 * 0.00381 * 1.774} \ln \frac{242 + 1084}{242 + 40}}} = 67,4mm^2 \quad (3.82)$$

$$diametro = 10,65mm^2$$

De acuerdo al resultado obtenido y según la tabla N°4.11 corresponde a un cable de 10,65 mm<sup>2</sup> calibre 2/0. Con el objetivo de estandarizar el conductor, se seleccionará un conductor calibre 4/0

**Tabla N° 3.9: Calibre del conductor.**

Calibre	Sección en mm.2	Número de Hebras	Diám. Hebras mm.	Diám. Cable mm.	Resist. Eléct. OHM/Km.	Peso Aprox. Kg./Km.	Cap. Corriente A(40° C)
14	2,08	7	0,615	1,84	8,79	18,9	30
12	3,31	7	0,776	2,33	5,52	29,9	35
10	5,26	7	0,978	2,93	3,48	47,7	50
9	6,63	7	1,10	3,30	2,76	60,1	59
8	8,37	7	1,23	3,69	2,18	75,4	70
7	10,5	7	1,38	4,14	1,74	95,2	80
6	13,3	7	1,56	4,68	1,37	121	95
5	16,8	7	1,75	5,25	1,09	152	108
4	21,2	7	1,96	5,88	0,863	192	125
3	26,7	7	2,20	6,60	0,684	242	150
2	33,6	7	2,47	7,41	0,544	304	175
1	42,4	19	1,69	8,45	0,431	387	200
1/0	53,5	19	1,89	9,45	0,342	483	235
2/0	67,4	19	2,13	10,65	0,271	614	275
3/0	85,0	19	2,39	11,95	0,215	773	320
4/0	107	19	2,68	13,40	0,171	972	370
250	127	37	2,09	14,63	0,144	1.151	415
300	152	37	2,29	16,03	0,120	1.382	460
350	177	37	2,47	17,29	0,103	1.608	520
400	203	37	2,64	18,48	0,0901	1.836	560
450	228	37	2,80	19,60	0,0802	2.067	597
500	253	37	2,95	20,65	0,0723	2.293	635
550	279	61	2,41	21,69	0,0655	2.530	673
600	304	61	2,52	22,68	0,0602	2.759	710
650	329	61	2,62	23,58	0,0556	2.983	744
700	355	61	2,72	24,48	0,0515	3.214	780
750	380	61	2,82	25,38	0,0481	3.455	805
800	405	61	2,91	26,19	0,0452	3.679	835
900	456	61	3,09	27,81	0,0401	4.148	865
1000	507	61	3,25	29,25	0,0361	4.589	895
1250	633	91	2,98	32,01	0,0289	5.756	1049
1500	760	91	3,26	35,86	0,0241	6.888	1205
1750	887	127	2,98	38,74	0,0206	8.032	1312
2000	1.013	127	3,19	41,47	0,0181	9.204	1420

Fuente: IEEE Std 80–2000

#### 4.6.7 Cálculos de la resistencia de la malla de puesta a tierra

Los siguientes cálculos se realizaron asumiendo los datos más críticos para la época de verano.

$$R_{malla} = \rho \left[ \frac{1}{LC} + \frac{1}{\sqrt{(20 * A)}} \left( 1 + \frac{1}{1 + h * \sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \quad (3.83)$$

En donde:

R= resistencia de la red de tierra en ohm

$\rho$ = resistividad promedio en  $\Omega$ -m

A= área ocupada por la malla

LC= longitud total del conductor enterrado

$$R_{malla} = 48,48 \left[ \frac{1}{264} + \frac{1}{\sqrt{(20 * 121)}} \left( 1 + \frac{1}{1 + 0,60 * \sqrt{\frac{20}{121}}} \right) \right] \quad (3.84)$$

$$R_{malla} = 1,96\Omega$$

Con este valor de resistencia cumplimos con la norma requerida en el pliego RPTD N°6 de un máximo de 20 ohmios.

### 3.6.8 Calculo de tensión de contacto y de paso tolerables.

Determinamos el voltaje de contacto y de paso para una persona de 50Kg de peso en un tiempo de duración de falla de 0.5 segundos

$$Ep_{50} = \frac{1000 + 6 * C_S * \rho_S}{\sqrt{t_{op}}} * 0,116 \quad (3.85)$$

Donde:

Ep50: Tensión de paso tolerable a un cuerpo de 50 kg,

V.  $\rho_S$ : Resistividad superficial de la gravilla, 3000  $\Omega$ m.

$\rho$ : Resistividad del terreno

tc: Tiempo máximo de duración de la corriente de falla, 0,5 s.

Cs: Factor de reducción

El factor de reducción Cs se calcula mediante la siguiente relación:

$$C_s = 1 - \left( \frac{0,09 * \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right)}{2 * h_s + 0,09} \right) \quad (3.86)$$

Donde:

hs: Espesor de la capa de gravilla de la subestación

ρs: Resistividad superficial de la gravilla

ρ: Resistividad del terreno.

$$C_s = 1 - \left( \frac{0,09 * \left( 1 - \frac{48,48}{3000} \right)}{2 * 0,15 + 0,09} \right) = 0,77 \quad (4.87)$$

Entonces la tensión de paso tolerable será:

$$Ep_{50} = \frac{1000 + 6 * 0,772 * 3000}{\sqrt{0,5}} * 0,116 = 2443,6 V \quad (3.88)$$

Tensión de contacto tolerable se calcula de la siguiente forma:

$$Ep_{50} = \frac{1000 + 1,5 * C_s * \rho_s}{\sqrt{top}} * 0,116 \quad (3.89)$$

$$Ep_{50} = \frac{1000 + 1,5 * 0,772 * 3000}{\sqrt{0,5}} * 0,116 = 733,95 V \quad (3.90)$$

### 3.6.9 Cálculo de la elevación de potencial de tierra “GPR”

Con el fin de brindar (bajo condiciones de falla) una conexión segura a tierra para el voltaje de paso, el gradiente de potencial expresado en volts/metro (GPR) sobre la superficie del suelo no debe exceder los valores de los voltajes de paso y contacto. La elevación del potencial de tierra se determina así:

$$GPR = IG * Rg \quad (3.91)$$

En donde:

$Rg$  = resistencia de la red de tierra

$IG$  = corriente máxima de falla

Luego de seleccionar la máxima corriente de falla, se debe determinar por medio de cálculos, el factor de división de corrientes,  $Sf$ , el cual es el porcentaje de corriente de falla total en la malla.

El valor de  $Sf$  se debe determinar siguiendo cualquiera de los métodos recomendados por la norma ANSI - IEEE Std. 80/2000.

Para efecto de cálculo se trabajará con un valor de 20%

Entonces:

$$IG = Ig * 0,2 \quad (3.92)$$

$$IG = 26462,29 * 0,2 = 5292,458 \text{ A} \quad (3.93)$$

Entonces:

$$GPR = 5292,29 * 1,96 = 10373,2 \text{ V} \quad (3.94)$$

Como el valor del GPR (10373,2 V) es mayor que el valor de la tensión de contacto (733,95 V) entonces se procede a realizar los cálculos de la tensión de retícula.

### 3.6.10 Cálculo de la tensión de contacto o retícula.

La tensión de retícula se calcula de la siguiente forma:

$$E_m = \frac{\rho * K_m * K_i * I_G}{L_M} \quad (3.95)$$

Km: Factor de espaciamento para la tensión de malla.

Ki: Factor de corrección por geometría de la malla.

$\rho$ : Resistividad del terreno.

IG: Máxima corriente de falla que fluye entre la malla de tierra y la tierra alrededor.

LM: Longitud efectiva de conductor de la malla de tierra.

### 3.6.11 Cálculo de tensión de contacto y de paso (factores de corrección).

El factor n se obtiene de la siguiente manera:

$$n = n_a * n_b * n_c * n_d \quad (3.96)$$

Donde:

$$n_a = \frac{2 * \text{largo del conductor}}{\text{perimetro de la malla}} \quad (3.97)$$

(se aplica para todo tipo de malla)

$$n_b = \sqrt{\left( \frac{\text{perimetro malla}}{4 * \sqrt{\text{Area de malla}}} \right)} \quad (3.98)$$

(si la malla es cuadrada el valor es 1)

$$nc = \frac{(\text{largo } x * \text{largo } y) \frac{0,7 * \text{Area de malla}}{\text{largo } x * \text{largo } y}}{\text{Area de malla}} \quad (3.99)$$

(si la malla es cuadrada o rectangular valor 1)

$$nd = \frac{\text{Distancia maxima}}{\sqrt{\text{largo } x^2 * \text{largo } y^2}} \quad (3.100)$$

(si la malla es cuadrada, rectanfular o en L valor 1)

Entonces n se obtendrá de la siguiente manera:

$$na = \frac{2 * 264}{44} = 1 \quad (3.101)$$

$$n = 12 * 1 * 1 * 1 = 12 \quad (3.102)$$

Los factores de irregularidad de la malla  $K_i$  y  $K_{ii}$  se obtienen de la siguiente forma:

$$K_i = 0,644 + 0,148 * n \quad (3.103)$$

$$K_i = 0,644 + 0,148 * 12 = 2,42 \quad (3.104)$$

$$K_{ii} = \frac{1}{(2 * n)^{\frac{2}{n}}} \quad (3.105)$$

$$K_{ii} = \frac{1}{(2 * 12)^{\frac{2}{12}}} = 0,588 \text{ para nuestro caso el valor es } = 1 \quad (3.106)$$

El factor de corrección relacionado con la profundidad de la malla se obtiene:

$$Kh = \sqrt{1 + \frac{h \text{ malla}}{h_0}} \quad (3.107)$$

$$Kh = \sqrt{1 + \frac{0,6}{1}} = 1,26 \quad (3.108)$$

El factor de forma de la malla Km se obtendrá con la ecuación:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[ \ln \left( \frac{D^2}{16 * h * d} + \frac{(D + 2 * h)^2}{8 * D * d} - \frac{h}{4 * d} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} * \ln \left( \frac{8}{\pi(2 * n - 1)} \right) \right] \quad (3.109)$$

Donde:

D: Espaciamiento entre los conductores de la malla.

n: Número de conductores efectivos en paralelo en una malla rectangular o irregular

d: Diámetro del conductor.

h: Profundidad inicial de enterramiento de la malla de puesta a tierra

Kii =factor de irregularidad de la malla

Kh= factor de corrección relacionado con la profundidad de la malla

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[ \ln \left( \frac{1^2}{16 * 0,6 * 10,65 * 10^{-3}} + \frac{(1 + 2 * 0,6)^2}{8 * 1 * 10,65 * 10^{-3}} - \frac{0,6}{4 * 10,65 * 10^{-3}} \right) + \frac{1}{1,26} * \ln \left( \frac{8}{\pi(2 * 12 - 1)} \right) \right] \quad (3.110)$$

$$K_m = 0,35$$

La longitud efectiva de cable y varillas enterradas está dada con la ecuación:

$$L_M = L_C + \left[ 1,55 + 1,22 * \left( \frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] * L_R \quad (3.111)$$

Donde:

Lc: Longitud total de cable

Lr: Longitud de la varilla enterrada,

Lx: Máxima longitud de la malla en el eje X.

Ly: Máxima longitud de la malla en el eje Y.

LR: Longitud total de los electrodos enterradas.

Para mejorar la malla a tierra se le agregar 10 varillas de 2,4mt

$$L_M = 264 + \left[ 1,55 + 1,22 * \left( \frac{2,4}{\sqrt{11^2 + 11^2}} \right) \right] * 24 = 305,71 \quad (3.112)$$

Ahora se procede a calcular voltaje de contacto y paso.

$$E_m = \frac{48,48 * 0,35 * 1 * 5992,458}{305,71} = 332,6 V \quad (3.113)$$

Como la tensión de contacto o retícula, está por debajo del voltaje de contacto tolerable se procede a calcular la tensión de paso.

Para el cálculo del voltaje de paso se utilizará la siguiente ecuación:

$$E_S = \frac{\rho * I_G * K_S * K_i}{0,75 * L_C * 0,85 * L_R} \quad (3.114)$$

Donde:

Es: Tensión de paso.

Ks: Factor de geometría.

Lc: Longitud total de cable de la malla,

LR: Longitud total de los electrodos enterrados,

Ki: Factor de corrección por geometría de la malla,

$\rho$ : Resistividad del terreno,

IG: Máxima corriente de falla que fluye entre la malla de tierra y la tierra alrededor

Para calcular el valor Ks se utiliza la ecuación:

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left( \frac{1}{2 * h} + \frac{1}{D + h} + \frac{1}{D} * (1 - 0,5^{n-2}) \right) \quad (3.115)$$

Donde:

D: Espaciamiento entre los conductores de la malla.

h: Profundidad inicial de enterramiento de la malla de puesta a tierra.

n: Número de conductores efectivos en paralelo.

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left( \frac{1}{2 * 0,6} + \frac{1}{1 + 0,6} + \frac{1}{1} * (1 - 0,5^{12-2}) \right) = 0,78 \quad (3.116)$$

La tensión de paso será:

$$E_s = \frac{48,48 * 5292,458 * 0,78 * 2,42}{0,75 * 264 + 0,85 * 24} = 2217,5 \text{ V} \quad (3.117)$$

Entonces se comparan los resultados:

*Voltaje de contacto tolerable = 733,95 V < voltaje de contacto = 332,6 V*

*Voltaje de paso tolerable = 2443,6 V < voltaje de paso = 2217,5 V*

### **3.7 Instalación de malla a tierra**

Parte del registro fotográfico del trabajo ejecutado, se muestra en las siguientes fotos



**Figura N° 3.14: soldadura exotérmica.**

Fuente: Carola-Coemin

En la figura N°3.14 se muestra el proceso de la soldadura exotérmica es un método de hacer conexiones eléctricas de cobre a cobre o de cobre a acero u otro metal sin requerir ninguna fuente exterior de calor o de energía. En este proceso, se enciende el polvo granular metálico en un molde de alta temperatura.



**Figura N° 3.15: Registro fotográfico tendido de malla 11m x 11m.**

Fuente: Carola-Coemin

En la figura N° 3.15 se puede ver como quedo instalados los electrodos en una superficie plana.

Los materiales y las dimensiones de las puestas a tierra deben seleccionarse de forma tal que resistan a la corrosión y presenten una resistencia mecánica apropiada.



**Figura N°3.16: Registro fotográfico realizando soldadura exotérmica.**

Fuente: Carola-Coemin

En la figura N°3.16 muestra al personal realizando el trabajo de soldadura. El personal que realiza la soldadura debe haber evaluado los riesgos que conllevan a la tarea.

Además de haber realizado toda la documentación requerida para el trabajo para así evitar accidentes durante la actividad.



**Figura N° 3.17: Registro fotográfico mejoramiento del suelo.**





Fuente: Carola-Coemin

En la figura N°3.17 se muestra la aplicación de acondicionador para mejorar el suelo. La sección de cada conductor de protección debe ser capaz de soportar las corrientes de falla calculadas en cada punto de la instalación. La profundidad mínima para las mallas de puesta a tierra nunca deberá ser inferior a 0,5.

### **3.8 Instalación de resistor de puesta a tierra de neutro**

Resistencia al neutro de los transformadores de 3.3 KV, con el objetivo de limitar la corriente de defecto a tierra monofásico.

#### **3.8.1 Características del sistema:**

-  Tensión nominal de la red: 3.3 kV.
-  Frecuencia nominal: 50 Hz.
-  Número de fases: 3.
-  Tratamiento del neutro: Puesta a tierra del neutro del transformador de potencia mediante resistencia limitadora de la corriente de defecto a tierra a un valor máximo de 50 A con 38  $\Omega$ .

### 3.8.2 Características de la resistencia de puesta a tierra

- ✚ La resistencia estará formada por parrillas estampadas de acero inoxidable AISI-304 (Fe-Cr18-Ni10), unidas mediante soldadura por puntos controlada electrónicamente y aisladas entre sí mediante separadores cerámicos.
- ✚ La instalación será de intemperie con grado de protección IP23 al menos.
- ✚ Se alojará en envoltorio metálica de acero inoxidable AISI 304 y pintada, tanto interior como exteriormente. La tortillería exterior será de acero inoxidable.
- ✚ La conexión a tierra se realizará mediante borne adecuado montado en el interior de la envoltorio de la resistencia.
- ✚ A la entrada de la resistencia se instalará un transformador de intensidad de características: 24 kV, 50/5 A, 30 VA, 5P10 e intensidad límite térmica de 80 A (también incluido en el suministro).

El arrollamiento secundario del transformador de intensidad se conectará a una caja de conexiones situada en la exterior de la envoltorio de la resistencia, protegida contra intemperie. Los cables externos entrarán por la parte inferior a dicha caja de conexiones.

### 3.8.3 Ensayos individuales

La resistencia de puesta a tierra se montará completamente de fábrica con todos sus accesorios y allí se someterán a los siguientes ensayos y comprobaciones:

- ✚ Comprobación del estado general, dimensiones y disposición de los diferentes accesorios.
- ✚ Comprobación de la placa característica.
- ✚ Medida del valor óhmico.
- ✚ Medida de aislamiento entre masa y conductor.
- ✚ Ensayo de tensión a frecuencia industrial (38 kV/50 Hz 1 minuto).

En la figura N° 3.18 se observa una placa de datos de resistencia a neutro.



**Figura N° 3.18: Placa de datos resistencia al neutro.**

Una resistencia limitadora de fallas a tierra aplicada en un sistema eléctrico que alimenta a motores de media tensión tiene como objetivo proteger los devanados del estator contra fallas catastróficas a tierra. La resistencia limitadora se instala en el neutro del transformador que alimenta los motores.

Cuando el sistema se encuentra sólidamente aterrizado en la terminal X0 del transformador, los niveles de falla a tierra son similares a los de las fallas entre fases (varios miles de amperes), con esta condición, si se degrada el aislamiento del devanado del estator, la falla a tierra en el mismo puede causar daños considerables al motor (incluso las laminaciones de acero magnético donde están los devanados), la reparación del motor tomará un tiempo directamente proporcional al daño. Cuando se instala una resistencia limitadora en el neutro del transformador el nivel de falla a tierra se limita al valor que defina el valor de la resistencia en Ohm, el resultado es que el daño provocado por la falla a tierra es el mínimo posible al operar la protección contra falla a tierra.

### 3.9 Presupuesto del sistema de puesta a tierra

Se han consultado dos presupuestos de empresas externas para la construcción y montaje de la malla de tierra, Exem Ltda. y Ingetra Ltda. y cuyas propuestas se presentan a continuación:

**Tabla N° 3.10: Presupuesto construcción y montaje de malla a tierra Exem Ltda.**

Ítem	Descripción	Valor Total (US)
1	Mano de obra	2.355
2	Materiales	7.655
3	Equipos	101
4	Otros costos	837
Sub total costos directos		10.948
5	Gastos Generales	855
6	Utilidades	1.204
Subtotal Gastos Generales y utilidades		2.059
Valor Total Neto Propuesta		13.007

Fuente: Exem Ltda.

**Tabla N° 3.11: Presupuesto construcción y montaje de malla a tierra Ingetra Ltda.**

Ítem	Descripción	Valor Total (US)
1	Suministro y montaje de malla a tierra de 28 x 9 regulado a lo largo cada 2 m y a lo ancho de 3 m. Se considera chicoles en cable 2/0 AWG y aplicación de producto químico para mejoramiento de conductividad. Las uniones serán con termofusiones. Incluye medición final puesta a tierra.	8.774
Sub Total costos directos		8.774
Sub total Gastos Generales y utilidades		2.807
Valor Total Neto Propuesta		11.581

Fuente: Ingetra Ltda.

Aportes de COEMIN S.A.: Excavaciones, tapado y compactado

**Tabla N° 3.12: Presupuestos según proveedor.**

Propuesta	Empresa	Costo total (US)
Suministro y montaje malla a tierra sala eléctrica	Exem Ltda.	13.007
Suministro y montaje malla a tierra sala eléctrica	Ingetra Ltda.	11.581

Fuente: Elaboración propia

### 3.10 Protecciones de relé Multilin

En esta sección se muestra la potencialidad que tienen los diferentes relés existentes en el sistema eléctrico de COEMIN y que al activar las funciones de protección adecuadas permiten aumentar la seguridad, confiabilidad y continuidad productiva.

A continuación, se nombran las diferentes protecciones que cuenta cada equipo, y para cuál es su uso.

#### 3.10.1 Relé de protección Multilin F 35 (alimentadores).

Las principales funciones del relé F 35 son: valor controlado y medido de fuga por tierra, de sobretensión, de subtensión, de sobreintensidad, de subintensidad, de potencia, de subfrecuencia.

La tabla N° 3.13 muestra las protecciones disponibles.

**Tabla N° 3.13: Protecciones Relé F35**

27P	Subtensión de fase
27X	Subtensión auxiliar
32N	Direccional de secuencia cero wattmétrica
49	protección contra sobrecarga térmica
50DD	Detector de perturbaciones
50G	Sobrecorriente instantánea de tierra
50N	Sobrecorriente instantánea neutral
50P	Sobrecorriente instantánea de fase
50_2	Sobrecorriente instantánea de secuencia negativa
51G	Sobrecorriente de tiempo de tierra
51N	Sobrecorriente de tiempo neutro
51P	Sobrecorriente de tiempo de fase

51_2	Sobrecorriente de tiempo de secuencia negativa
52	Interruptor de CA
59N	Sobretensión neutral
59P	Sobretensión de fase
59X	Sobretensión auxiliar
79	Autoreconexión
81U	Poca frecuencia

Fuente: elaboración propia.

### 3.10.2 Relé de protección Multilin T 60 (transformadores)

Las funciones principales del relé T60 es controlar la tensión, la corriente, la potencia, y frecuencia.

Las protecciones disponibles se muestran en la tabla N° 3.14

**Tabla N° 3.14: Protecciones Relé T60**

24	Voltios por Hertz
59N	Sobretensión de neutro
27	Mínima tensión
59P	Sobretensión de fase
27X	Mínima tensión auxiliar
59X	Sobretensión auxiliar
50/87	Sobrecorriente diferencial instantáneo
67N	Sobrecorriente direccional de neutro
50G	Sobrecorriente instantáneo de tierra
67P	Sobrecorriente direccional de fase
50N	Sobrecorriente instantáneo de neutro

81O	Sobrefrecuencia
50P	Sobrecorriente instantáneo de fase
81U	Baja frecuencia
51G	Sobrecorriente temporizado de tierra
87G	Falla a tierra restringida
51N	Sobrecorriente temporizado de neutro
87T	Diferencial porcentual de transformador
51P	Sobrecorriente temporizado de fase

Fuente: elaboración propia.

### 3.10.3 Relé de protección Multilin 469 (motores)

La función fundamental de protección del SR469 es el modelo térmico. Consiste en cuatro elementos claves que son la curva de sobrecarga desequilibrio, compensación de motor caliente/fríos y constantes de enfriamiento del motor.

Las protecciones disponibles se muestran en la tabla N° 3.15.

**Tabla N° 3.15: Protecciones Relé 469**

51	Relé temporizado de sobreintensidad de ca
86	Relé de enclavamiento
66	Relé de pasos
50	Relé instantáneo de sobreintensidad y velocidad de aumento de intensidad
37	Relé de mínima intensidad o baja potencia
46	Relé de intensidad para equilibrio o inversión de fases
50G	Relé falla a tierra
51G	Respaldo de falla a tierra

87	Relé de protección diferencia
49	Relé térmico para máquina, aparato o transformador
38	Dispositivo térmico de cojinetes
27	Relés de mínima tensión
59	Relé de sobretensión
47	Relé de tensión para secuencia de fase
81	Relé de frecuencia
55	Relé de factor de potencia
78	Relé de salto de vector o medidor del ángulo de desfase
14	Dispositivo de falta de velocidad
19	Contactos de transición de arranque a marcha normal.
48	Relé de secuencia incompleta

Fuente: elaboración propia.

Cabe señalar, que los equipos de protección antes mencionados sólo tienen activadas las funciones de protección de Sobrecorriente y residual, lo cual, implica una subutilización del recurso.

## **CAPÍTULO IV**

### **CONCLUSIONES**

Mediante el presente trabajo fue posible realizar los cálculos necesarios de cortocircuito y malla a tierra, para mejorar el sistema de protecciones de la Sala Eléctrica en estudio. Para ello, se centró el estudio de corto circuito e instalación de malla a tierra de la planta minera Coemin.

Se realizó el levantamiento de antecedentes técnicos de equipos, máquinas, conductores y barras, para confeccionar los diagramas unilineales necesarios para los cálculos de corrientes de cortocircuito trifásicos y cálculos de cortocircuito en los transformadores. Además, se realizaron los cálculos de mallas a tierra, para la protección de equipos y personas en Sala Eléctrica.

Los resultados obtenidos en los cálculos de fallas de corto circuito, demuestra que la condición más desfavorable está ubicada en el primario del transformador 2, punto 4.4.3 del capítulo IV. Con lo señalado anteriormente se logró calcular el calibre del conductor para realizar el diseño de malla a tierra.

Para la parte de procesamiento de malla a tierra se utilizó el software IPI2WIN para obtener las resistividades y espesores de los estratos teóricos, valores que fueron contrastados por las mediciones de terreno. Las tensiones de paso quedan controladas por el diseño propuesto, dando cumplimiento con los requisitos estipulados en la norma IEEE 80-2000.

Para mejorar la coordinación y selectividad del esquema de protecciones de Planta Coemin, se recomienda, activar las funciones de protección adecuadas en los relés multifunción, para mejorar los tiempos de apertura de cierre ante una condición de perturbación o falla.

Finalmente, se recomienda realizar un Estudio de Coordinación y Ajuste de Protecciones (ETAP), tomando como base los antecedentes técnicos de análisis de cortocircuito proporcionado en este trabajo.

## BIBLIOGRAFÍA

ABB. (2018). Selectividad en Baja Tensión con interruptores automáticos ABB. Barcelona: Brown Bowen S.A.

ABB. (2018). Cuaderno de aplicaciones técnicas N.º 1 Selectividad en baja tensión con interruptores automáticos ABB. Asea Brown Boveri, S.A. Barcelona: Low Voltaje Products.

ABB (2018). Brown Boveri, S.A. Barcelona: Low Voltaje Products.). Cuaderno de aplicaciones técnicas N.º 1 Selectividad en baja tensión con interruptores automáticos ABB.

Carola-Coemin. (2018). Grupo Minero Carola Coemin. Recuperado el 22 de diciembre de 2018.

Enami. Recuperado el 21 de diciembre de 2018, de <http://www.sonami.cl/site/wp-content/uploads/2016/03/01.-Fusion-de-Concentrados-en-Fundicion-Hernan-Videla-Lira.pdf>

Mina Carola. (2018). Grupo Minero Carola-Coemin. Recuperado el 20 de diciembre de 2018, de Grupo Minero Carola-Coemin: <http://carola-coemin.cl/nosotros/15-minera-carola-sus-origenes-y-su-historia>

Ministerio de Energía de Argentina. (2018). Protección Sistemas Eléctricos. Material didáctico, Ministerio de Energía, Buenos Aires. Recuperado el 20 de diciembre de 2018,

Apuntes EL67H: Puesta a Tierra de Instalaciones Eléctricas y Electrónicas”. Santiago. “Power system grounding. III. Large portable machines. Industry Applications Magazine”,. IEEE.

SEC. (2021) nuevos pliegos técnicos ric.

SEC. (2018). Normativa, Superintendencia de Electricidad y Combustible División de Ingeniería de Electricidad, Santiago.

SEC. (2017). Calidad de servicio eléctrico a nivel de distribución.

Superintendencia de Seguridad y Combustible, Santiago.

Personal eléctrico de empresa COEMIN S.A.

Jefe de departamento eléctrico COEMIN S.A. Información del ramo de proyecto eléctrico.

[www.hilkar.com](http://www.hilkar.com)

Libro técnico N°62 Schneider puesta a tierra del neutro a una red industrial.

Catálogo CYS controles y servicios.