



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica

Escuela Profesional de Ingeniería Eléctrica

**Análisis de coordinación de protecciones del sistema
eléctrico del anillo mina Toquepala**

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Electricista

AUTOR

David Brian CÁCERES JIMÉNEZ

ASESOR

Mg. Edy Alberto ROMÁN CCORAHUA

Lima, Perú

2025



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Cáceres, D. (2025). *Análisis de coordinación de protecciones del sistema eléctrico del anillo mina Toquepala*. [Trabajo de suficiencia profesional de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica, Escuela Profesional de Ingeniería Eléctrica]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	David Brian Cáceres Jiménez
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	48349595
URL de ORCID	No Aplica
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Edy Alberto Roman Ccorahua
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	06767696
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-0632-1134
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Teresa Esther Nuñez Zuñiga
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	08006778
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Luis Mark Martínez Ponce
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	08117818
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Celso Ysidro Gerónimo Huamán
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	09191500
Datos de investigación	
Línea de investigación	No Aplica
Grupo de investigación	No Aplica
Agencia de financiamiento	No Aplica

Ubicación geográfica de la investigación	Edificio: Mina Toquepala – Southern Peru Cooper Corporation País: Perú Departamento: Tacna Provincia: Jorge Basadre Distrito: Ilabaya Centro poblado: Toquepala Latitud: -17.238204 Longitud: -70.613871
Año o rango de años en que se realizó la investigación	Enero 2020 – diciembre 2020
URL de disciplinas OCDE	Ingeniería eléctrica, Ingeniería Electrónica https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.02.01



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
(Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA)
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y ELÉCTRICA
Teléfono 619-7000 Anexo 4226
Calle Germán Amezaga 375 – Lima 1 – Perú



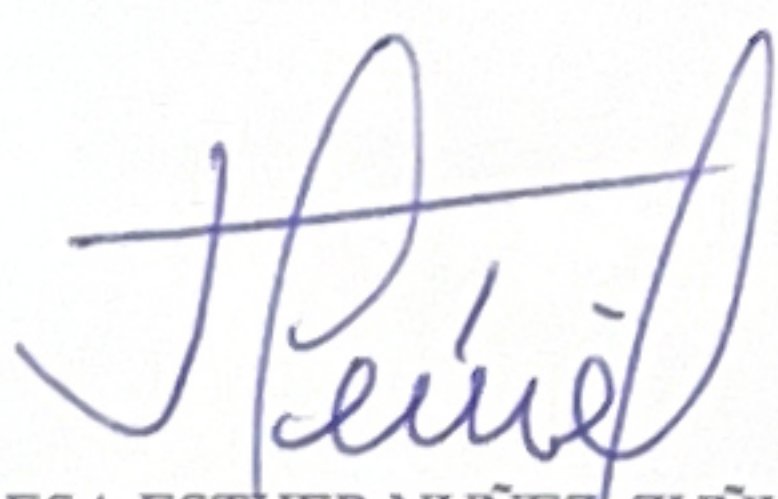
**ACTA DE SUSTENTACIÓN
TRABAJO DE SUFICIENCIA
PROFESIONAL
ACTA N°39/FIEE-CTGT/2025**

Los suscritos Miembros del Jurado, docentes permanentes de las Escuelas Profesionales de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica, reunidos en la fecha 09 de octubre del 2025, como presidente de Jurado la **DRA. TERESA ESTHER NUÑEZ ZUÑIGA**, integrado por el Miembro de Jurado el **DR. LUIS MARK PONCE MARTÍNEZ**, el Miembro de Jurado **DR. CELSO YSIDRO GERÓNIMO HUAMÁN** y Miembro Asesor el **MG. EDY ALBERTO ROMÁN CCORAHUA**.

Después de escuchar la Sustentación Presencial del Trabajo de Suficiencia Profesional del Bachiller **DAVID BRIAN CÁCERES JIMÉNEZ** con código 14190157 que para optar el Título Profesional de Ingeniero Electricista sustentó el Trabajo de Suficiencia Profesional titulado **ANÁLISIS DE COORDINACIÓN DE PROTECCIONES DEL SISTEMA ELÉCTRICO DEL ANILLO MINA TOQUEPALA**.

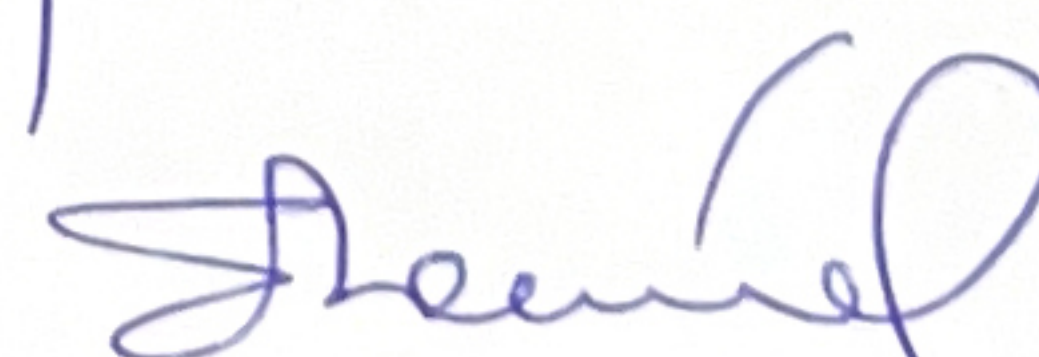
El jurado examinador procedió a formular las preguntas reglamentarias y, luego de una deliberación en privado, decidió otorgarle el calificativo de *A Decisión*.

Ciudad Universitaria, 09 de octubre del 2025


DRA. TERESA ESTHER NUÑEZ ZUÑIGA
Presidente Jurado


DR. LUIS MARK PONCE MARTÍNEZ
Miembro Jurado


DR. CELSO YSIDRO GERÓNIMO HUAMÁN
Miembro Jurado


MG. EDY ALBERTO ROMÁN CCORAHUA
Miembro Asesor



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE
SAN MARCOS
Universidad del Perú, Decana de América

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo , **EDY ALBERTO ROMÁN CCORAHUA** en mi condición de asesor acreditado con el Dictamen N°14/FIEE-CTGT/2025 de Trabajo de Suficiencia Profesional **ANÁLISIS DE COORDINACIÓN DE PROTECCIONES DEL SISTEMA ELÉCTRICO DEL ANILLO MINA TOQUEPALA.**, presentado por el bachiller **DAVID BRIAN CÁCERES JIMÉNEZ**, para optar al título profesional de Ingeniero Electricista. CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el 4% de similitud, nivel PERMITIDO para continuar con los trámites correspondientes y para su publicación en el repositorio institucional.

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del título de Ingeniero Electricista.

Lima, 09 de Octubre del 2025

Firma del Asesor

DNI: 06767696

Nombres y apellidos del asesor:

EDY ALBERTO ROMÁN CCORAHUA

DEDICATORIA

Este trabajo de suficiencia profesional está dedicado, en primer lugar, a Dios, quien siempre me guía por el buen camino. A mis padres, Javier y Zaida, que siempre me brindaron su apoyo incondicional; a mis queridos abuelitos; a mis hermanas, Yulissa y mi Dianita, quien me cuida desde el cielo. Al amor de mi vida, Sheyla, por su compañía y apoyo permanente. A toda mi familia, por sus palabras de aliento. A mis profesores y a mi casa de estudios, la UNMSM, por haberme ayudado a forjar al profesional que soy hoy. Sin su presencia y apoyo incondicional, este logro no habría sido posible. Estoy profundamente agradecido por tenerlos siempre en mi vida.

RESUMEN

Este trabajo tiene como finalidad realizar un análisis de coordinación de protecciones de sobrecorriente del sistema eléctrico de la mina Toquepala a tajo abierto, la cual se encuentra ubicada en el distrito de Ilabaya, provincia de Jorge Basadre, región Tacna.

Este análisis se realiza a raíz de las constantes interrupciones en el sistema eléctrico de la mina Toquepala. Esto se debe a que no se estaban considerando los parámetros eléctricos operacionales del sistema, ni la operatividad eléctrica de las distintas cargas entre palas y perforadoras, lo que conllevaba a una inadecuada coordinación de protecciones. Para ello, se lleva a cabo una serie de pasos, como la recopilación de información de todo el sistema, con el fin de introducirla en un software de simulación que permita determinar el flujo de potencia, el análisis de cortocircuito y, finalmente, el análisis de coordinación de protecciones.

El análisis realizado permite obtener los parámetros adecuados, con lo cual se logra minimizar la cantidad de interrupciones operativas de las cargas eléctricas en la mina Toquepala, asegurando la continuidad de la extracción de minerales, evitando pérdidas millonarias, brindando seguridad al personal que labora en la mina y cumpliendo con los objetivos de producción de la empresa minera.

Palabras clave: Análisis, flujo de carga, cortocircuito, coordinación de protecciones y sobrecorriente.

ABSTRACT

This work aims to carry out an overcurrent protection coordination analysis of the electrical system of the Toquepala open-pit mine, which is located in the district of Ilabaya, province of Jorge Basadre, Tacna region.

This analysis is carried out due to the constant interruptions in the electrical system of the Toquepala mine. This is because the operational electrical parameters of the system were not being considered, nor the electrical operability of the different loads between shovels and drills, which led to inadequate protection coordination. For this, a series of steps are taken, such as the collection of information from the entire system, in order to input it into simulation software that allows the determination of power flow, short-circuit analysis, and, finally, protection coordination analysis.

The analysis carried out makes it possible to obtain adequate parameters, which minimizes the number of operational interruptions of the electrical loads in the Toquepala mine, ensuring the continuity of mineral extraction, avoiding million-dollar losses, providing safety to the personnel working in the mine, and fulfilling the production objectives of the mining company.

Keywords: *Analysis, load flow, short circuit, protection coordination, and overcurrent.*

INDICE GENERAL

RESUMEN	iii
ABSTRACT	iv
INDICE GENERAL	v
LISTA DE TABLAS	viii
CAPITULO I:	1
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO II:	2
INFORMACIÓN DEL LUGAR DONDE SE DESARROLLÓ LA ACTIVIDAD.2	
2.1 Institución – Actividad que desarrolla	2
2.2 Periodo de duración de la actividad.....	2
2.3 Finalidad y objetivos de la entidad.....	2
2.4 Razón social	3
2.5 Dirección postal	3
2.6 Nombre y correo electrónico del profesional a cargo.	3
CAPITULO III:	4
DESCRIPCIÓN DE LA ACTIVIDAD	4
3.1 Organización de la Actividad	4
3.2 Finalidad y Objetivos de la Actividad	5
3.2.1 Finalidad.....	5
3.2.2 Objetivos	5
3.3 Problemática.....	6
3.3.1 Problema General	7
3.3.2 Problemas Específicos	7
3.3.3 Justificación e importancia de la investigación	8

3.4	Metodología.....	10
3.4.1	Bases teóricas.....	12
3.4.2	Marco conceptual.....	12
3.5	Procedimiento.....	15
3.5.1	Recopilación de Información.....	15
3.5.2	Mediciones y eventos.....	20
3.5.3	Elaboración en software de simulación.....	22
3.5.4	Distribución de equipos.....	24
3.5.5	Escenarios de operación.....	25
3.5.6	Análisis de flujo de carga.....	26
3.5.7	Análisis de cortocircuito.....	27
3.5.8	Análisis de Coordinación de Protecciones.....	30
3.6	Resultado de la Actividad.....	42
CAPITULO IV:		44
DISCUSIÓN DE RESULTADOS		44
4.1	Descripción de la implementación.....	44
4.2	Evaluación económica.....	45
CAPITULO V:		48
CONCLUSIONES		48
CAPITULO VI:		50
RECOMENDACIONES.....		50
CAPITULO VII:		51
BIBLIOGRAFÍA		51
ANEXOS.....		55

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: <i>Organigrama del área de Mantenimiento Mina</i>	4
Figura 2: <i>Diagrama resumen de actividades</i>	11
Figura 3: <i>Interconexión de subestaciones SPCC</i>	16
Figura 4: <i>Topología de minera Southern Perú en el año 2020.</i>	17
Figura 5: <i>Medición con analizador FLUKE 435 en switch house N° 24.</i>	20
Figura 6: <i>Introducción de parámetros de transformador.</i>	23
Figura 7: <i>Introducción de parámetros línea 69 kV.</i>	24
Figura 8: <i>Gráfico de coordinación de protecciones en 69Kv – S.E. 07</i>	36
Figura 9: <i>Falla trifásica en barra de entrada de switch house 24.</i>	37
Figura 10: <i>Corriente máx. RMS – Pala 09 P&H 4100XPC – Power Log</i>	39
Figura 11: <i>Fórmulas de tipo de curvas – relé SEL 751.</i>	40
Figura 12: <i>Corriente máxima Pala Nro. 09 – 51P – S.E. 07</i>	41
Figura 13: <i>Falla trifásica en entrada de pala Nro. 09</i>	42
Figura 14: <i>Introducción de ajustes a relé SEL 751</i>	45

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: <i>Cuadro de medidas de corriente – Palas eléctricas.</i>	21
Tabla 2: <i>Cuadro de medidas de corriente – Perforadoras eléctricas.</i>	21
Tabla 3: <i>Distribución de equipos en escenario complejo.</i>	25
Tabla 4: <i>Simulación de fallas trifásicas y bifásicas – Cables de arrastre.</i> ...	28
Tabla 5: <i>Ajuste de referencia – Relé PBT2 – 69kV.</i>	33
Tabla 6: <i>Ajuste de protección de sobrecorriente general.</i>	43
Tabla 7: <i>Inversión monetaria</i>	46

CAPITULO I:

INTRODUCCIÓN

Mantener la continuidad del sistema eléctrico en una empresa minera es de suma importancia y criticidad, ya que cualquier interrupción en la producción podría tener un impacto muy considerable. Esto podría resultar en pérdidas económicas significativas, debido a que los equipos en los que se basa la producción dependen en gran medida de la energía eléctrica. Dichos equipos incluyen palas eléctricas, perforadoras eléctricas, motores eléctricos en cintas transportadoras, molinos, trituradoras primarias y secundarias, equipos de muestreo, sistemas de control, sistemas de iluminación, entre otros. Estas interrupciones en la energía eléctrica pueden ocurrir por diversas razones, como fallas internas operativas como cortocircuitos, sobrecargas, armónicos, flickers o factores externos como descargas atmosféricas que son muy recurrentes en la zona.

Por ende, el presente análisis del sistema, orientado a lograr una coordinación de protecciones adecuada, depende de la recopilación de información y de la realización de pruebas que permitan determinar el comportamiento del sistema en tiempo real. Para ello, se realiza primeramente un análisis de flujo de carga, el cual permite conocer el comportamiento de la red y sus parámetros de soportabilidad ante corrientes de cortocircuito muy elevadas. Luego, se lleva a cabo un análisis de cortocircuito, que ayuda a detectar las corrientes de cortocircuito subtransitorias y, de esta manera, calcular el ajuste correcto para el despeje oportuno de la falla. La realización de ambos análisis permite desarrollar el estudio de coordinación de protecciones de sobrecorriente de tiempo inverso y definido para el sistema eléctrico de la mina Toquepala.

CAPITULO II:

INFORMACIÓN DEL LUGAR DONDE SE DESARROLLÓ LA ACTIVIDAD

2.1 Institución – Actividad que desarrolla

La empresa en la que se desarrolló el presente estudio para el Trabajo de Suficiencia Profesional (TSP) del sistema eléctrico de la mina Toquepala es Southern Perú Copper Corporation, una empresa minera transnacional de origen mexicano, dedicada a la extracción de minerales como cobre, molibdeno, zinc, plomo, carbón y plata en las minas de Toquepala (Tacna) y Cuajone (Moquegua).

2.2 Periodo de duración de la actividad.

El periodo de duración del estudio realizado fue entre febrero del 2020 hasta el mes de diciembre del 2020.

2.3 Finalidad y objetivos de la entidad

El objetivo principal de la empresa Southern Perú es extraer, en grandes cantidades, los recursos minerales ubicados dentro de su concesión minera y comercializarlos a sus clientes internacionales a precios de mercado y generar mayores utilidades. Además, busca cumplir con su responsabilidad social en

la región y con los compromisos ambientales, con el propósito de promover el desarrollo sostenible de la población local y fomentar una cultura de responsabilidad social.

2.4 Razón social

SOUTHERN PERU COPPER CORPORATION, SUCURSAL DEL PERÚ.

2.5 Dirección postal

Av. Caminos del Inca 171 Urb. Chacarilla del Estanque Santiago de Surco
Lima – Perú.

2.6 Nombre y correo electrónico del profesional a cargo.

Francisco Javier Alca Chacón – jefe de Electricidad Palas, perforadoras y Alta Tensión.

Correo: falca@southernperu.com.pe

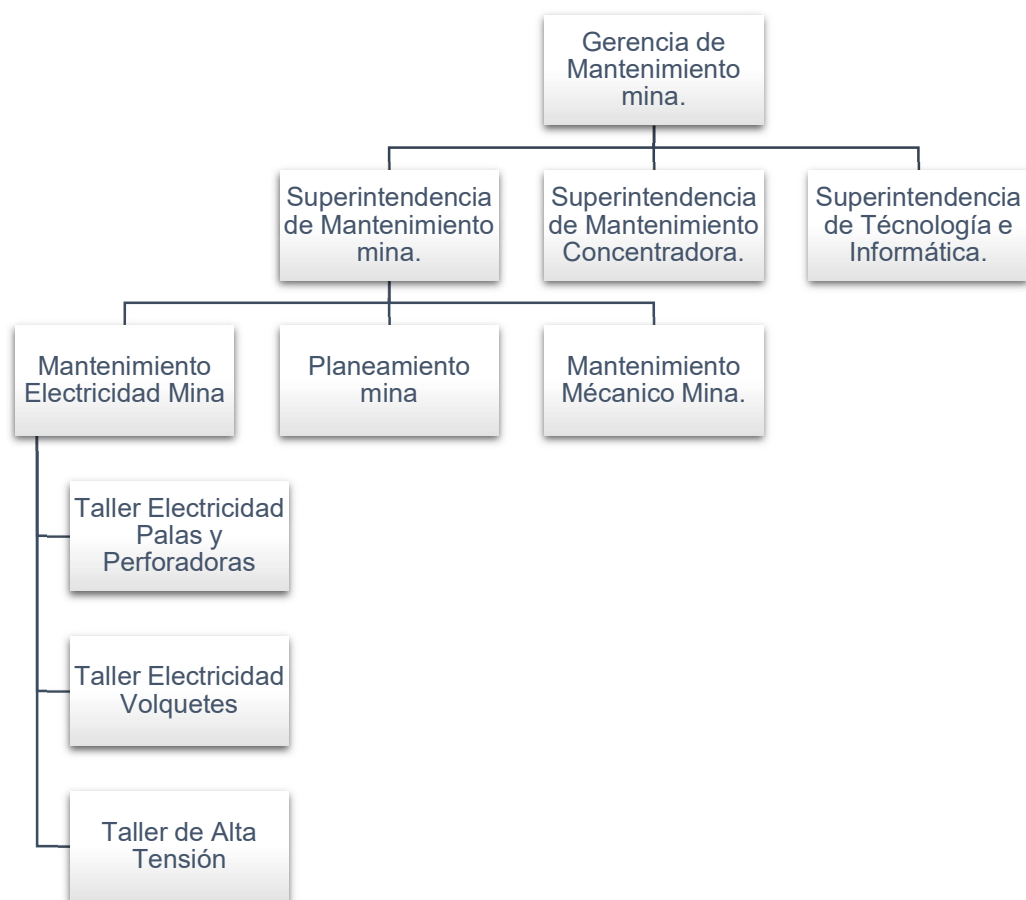
CAPITULO III:

DESCRIPCIÓN DE LA ACTIVIDAD

3.1 Organización de la Actividad

Figura 1:

Organigrama del área de Mantenimiento Mina.



Nota. La figura muestra el organigrama de la gerencia de mantenimiento mina de la empresa Southern Perú, en donde el trabajo elaborado se llevó en el área de Mantenimiento Electricidad Mina.

3.2 Finalidad y Objetivos de la Actividad

3.2.1 Finalidad

Mejorar la eficiencia y continuidad de servicio del sistema eléctrico del anillo Toquepala en los niveles de tensión 69 kV y 7.2 kV.

3.2.2 Objetivos

Objetivo General.

Realizar la coordinación de protecciones del sistema eléctrico de la mina Toquepala, con el propósito de asegurar la continuidad del suministro eléctrico y garantizar una operación segura y confiable del sistema.

Objetivos Específicos.

- Asegurar la continuidad del suministro de energía eléctrica en el anillo Toquepala.
- Reducir pérdidas económicas por la paralización de las palas y perforadoras encargadas de la extracción del mineral.
- Reducir la probabilidad de que los equipos eléctricos en mina sufran daños por un despeje inadecuado en fallas eléctricas.
- Obtener los ajustes en los todos los relés de sobre corriente con la finalidad de garantizar el suministro eléctrico de los equipos.
- Asegurar la seguridad, salud y el bienestar del personal operativo que labora en mina ante una falla de cortocircuito.
- Generar resultados de análisis de coordinación de protecciones en formatos preestablecidos en el software “Digsilent – Power Factory” en caso haya cambios significativos en el sistema eléctrico.

3.3 Problemática

Como mencionamos inicialmente, este trabajo se centra en llevar a cabo una coordinación de protecciones adecuada, debido a que se han producido interrupciones ocasionales en diversas subestaciones eléctricas, causadas por disparos repentinos de interruptores ubicados en subestaciones eléctricas móviles y switch house o también llamadas casetas. Esta situación ha provocado que las máquinas que operan en el tajo de la mina Toquepala ya sean palas o perforadoras que queden inoperativas, lo cual afecta directamente la continuidad de las operaciones.

Por esta razón, resulta fundamental garantizar el suministro eléctrico continuo a todos los equipos que se encuentran operando en mina, teniendo en cuenta que tanto las palas como las perforadoras cumplen un rol importante en la extracción del mineral, y su funcionamiento ininterrumpido asegura una producción adecuada.

El problema de mayor relevancia identificado en este estudio es la necesidad de reducir la probabilidad de accidentes causados por fallas en el sistema de protecciones eléctricas, ya que un cortocircuito mal despejado podría poner en riesgo la vida de un operario o técnico que se encuentre trabajando cerca de los equipos eléctricos. Por otra parte, también estas fallas podrían producir daños en equipos eléctricos críticos del sistema, como palas, perforadoras, transformadores, cables, interruptores, seccionadores, etc. Para evitar estos daños y garantizar una protección apropiada, es significativo contar con información detallada de todo el sistema eléctrico de la mina Toquepala, con el fin de determinar los ajustes requeridos. Además, se debe establecer un programa que sea de utilidad para el área responsable de la coordinación de protecciones eléctricas, como el Taller de Alta Tensión.

3.3.1 Problema General

¿Cómo realizar la coordinación de protecciones del sistema eléctrico de la mina Toquepala, con el propósito de asegurar la continuidad del suministro eléctrico y garantizar una operación segura y confiable del sistema?

3.3.2 Problemas Específicos

- ¿Cómo asegurar la continuidad del suministro de energía eléctrica de las palas y perforadoras eléctricas en el anillo mina Toquepala?
- ¿De qué manera se reduciría los costos operativos en la paralización de palas y perforadoras eléctricas?
- ¿Como reducir la probabilidad de que los componentes eléctricos y equipos en mina sufran daños por corriente de cortocircuito durante fallas de tipo operativo o atmosférico?
- ¿Cómo se obtendrá los parámetros adecuados para la configuración de los relés de sobre corriente?
- ¿De qué manera se asegura la seguridad, salud y el bienestar del personal operativo que labora en mina?
- ¿De qué manera se generan nuevos resultados de análisis de coordinación de protecciones en formatos preestablecidos en el software “Digsilent – Power Factory” en caso haya cambios significativos en el sistema eléctrico?

3.3.3 Justificación e importancia de la investigación

Justificación por Conveniencia:

La importancia en el presente trabajo radica en que ayuda a la empresa minera a tener parámetros más adecuados en coordinación de protecciones de sobrecorriente con el fin de que el suministro eléctrico de las palas y perforadoras no se vea interrumpido de manera continua.

Justificación social:

La continuidad de servicio eléctrico para la extracción de minerales en mina implicaría mayores ingresos para la minera y en consecuencia el porcentaje de utilidades aumentaría hacia los trabajadores que en su mayoría son de la misma región generando una mayor calidad de vida; por otra parte, los impuestos que se darían al gobierno regional y al país serían mucho mayores, los más importantes son el “Canon Minero”, el “Impuesto especial a la minería”, “Regalías” y el “Gravamen especial a las mineras”, etc.; los cuales ayudan a las comunidades de la región y del país a su desarrollo social y económico.

Justificación práctica:

El análisis de coordinación de protecciones de la mina a tajo abierto Toquepala garantiza un correcto funcionamiento del sistema eléctrico, tomando en cuenta aspectos importantes como la confiabilidad, selectividad, simplicidad y velocidad de los ajustes de sobrecorriente de los relés en mina, el cual permite tener un menor número de interrupciones del sistema por fallas de origen operativo o atmosférico, aumentando la productividad en mina y de esa manera salvaguarda la integridad física del personal que labora en mina. También se considera que, para poder realizar la coordinación de protecciones, se llevó a cabo un análisis de flujo de potencia y un análisis de cortocircuito. Ambos estudios permiten obtener soluciones, recomendaciones y consideraciones respecto al régimen operativo, tanto en estado normal como ante fallas en el sistema.

Justificación teórica:

Para el presente análisis del sistema eléctrico de potencia, se busca realizar una correcta coordinación de protecciones, tomando en cuenta un sistema eléctrico altamente variable en cuanto al consumo de energía eléctrica. Este comportamiento de consumo variable de potencia se debe principalmente a las palas eléctricas, como, por ejemplo, la pala de mayor tamaño, P&H 4100XPC, que puede pasar de 10 amperios en estado de reposo a aproximadamente 480 amperios a plena carga en solo unos segundos. Al mismo tiempo, también se considera la corriente de arranque en las perforadoras eléctricas, la cual puede alcanzar hasta siete veces la corriente nominal en arranque directo, lo que origina fluctuaciones en la tensión eléctrica. Como finalidad, el presente análisis busca que la coordinación de protecciones tome en cuenta este tipo de cargas y escenarios en sistemas altamente variables.

Justificación económica:

Para el presente estudio en el sistema eléctrico de la mina Toquepala se tiene la información que la pérdida económica por una pala detenida en el rango de una hora va entre los doce mil dólares (12,000.00 USD) a cincuenta mil dólares (50,000.00 USD). Estos precios dependen en el tamaño de la pala, específicamente la capacidad de carga en metros cúbicos del cucharón de la pala eléctrica, por otra parte, también depende si la pala está en una zona donde haya mayor concentración de mineral. Y para la inversión del presente estudio no fue muy elevada en costo ya que se utilizó más que todo tiempo en horas hombre y el traslado (combustible) en las camionetas de mina hacia las diferentes subestaciones móviles y switch house en el tajo abierto de la mina.

Justificación técnica:

Revisando los procedimientos y recomendaciones en protecciones de sobrecorriente no existe mucha información o referencia para la protección de sobrecorriente en cargas de consumo de potencia eléctrica muy variables que operen en mina. Esto al paso del tiempo se podría estandarizar mediante un

procedimiento, y con ello ayudar otras mineras que cuentan con este sistema eléctrico a establecer un correcto estudio de coordinación de protecciones.

Justificación metodológica:

En el presente trabajo se entrega al área de mantenimiento mina de Toquepala todos los programas utilizados en el presente estudio, con el fin de que al cambiar la topología de la red tanto en las líneas de transmisión, modificación en la posición de las cargas, aumento de cargas, etc., estas puedan ser modificadas y tomadas en cuenta para futuros simulaciones de flujo de carga, análisis de cortocircuito y coordinación de protecciones, para su posteriormente realizar un análisis de sus resultados.

3.4 Metodología

En primer lugar, para llevar a cabo el análisis de coordinación de protecciones del sistema eléctrico de la mina Toquepala, se recopila toda la información disponible, como las mediciones realizadas con analizadores de redes, los cuales deberán estar debidamente calibrados. Estos analizadores se ubicarán en las switch house, específicamente en los tableros de control de baja tensión, con el objetivo de obtener mediciones precisas y reales de todas las palas y perforadoras. También se considerarán los valores registrados por los medidores eléctricos instalados en la switch house y en las subestaciones eléctricas (S.E) móviles.

Además, se utilizan las fichas técnicas de los componentes eléctricos y el levantamiento topográfico realizado en el año 2019, el cual muestra la ubicación y longitud de las líneas aéreas de alta tensión de 69 kV, las líneas aéreas de cobre de 7.2 kV, acometidas, cables de arrastre, subestaciones eléctricas, switch house y la distribución de los equipos en las diferentes fases de la mina, como palas y perforadoras eléctricas. Todos estos parámetros serán introducidos en el software de simulación eléctrica DIgSILENT Power Factory.

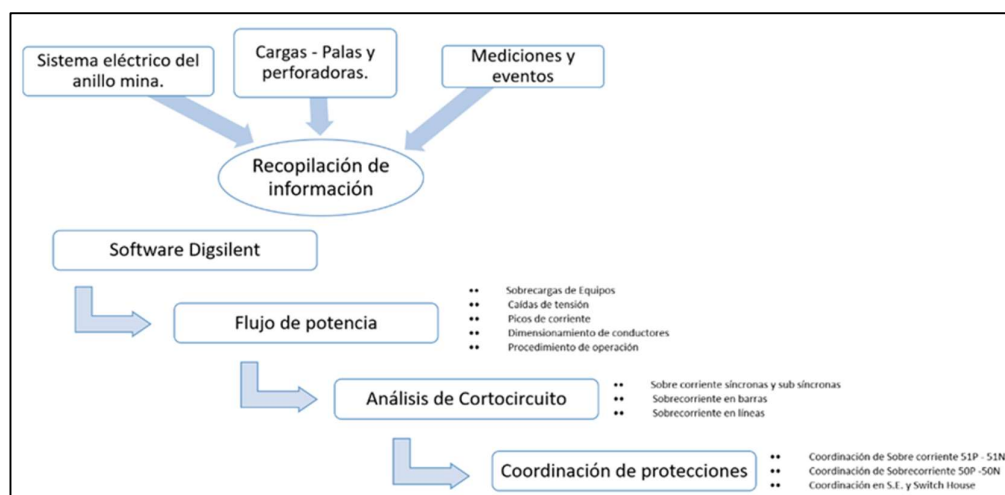
Como segundo paso, una vez obtenidas las mediciones en campo y recopilada toda la información relevante, se procedió a plantear los diferentes escenarios de operación real y condiciones críticas de máxima demanda. El objetivo fue realizar un análisis de flujo de carga utilizando el software DIgSILENT Power Factory, el cual proporciona parámetros como tensión, corriente, frecuencia, sobrecargas, potencia aparente, potencia activa y potencia reactiva. Estos resultados permitirán obtener los valores de corriente máxima de cada pala o perforadora.

Como tercer paso, se realiza el análisis de cortocircuito, el cual permite obtener las corrientes generadas por fallas en el sistema. Para ello, se efectúan simulaciones de cortocircuito trifásico. Una vez obtenidos los resultados de corriente de cortocircuito, se podrán determinar los parámetros para la coordinación de protecciones de sobrecorriente de tiempo definido.

Finalmente, basándonos en los datos obtenidos en los análisis de flujo de carga y de cortocircuito, se lleva a cabo el estudio de coordinación de protecciones de sobrecorriente entre fases para los relés instalados.

Figura 2:

Diagrama resumen de actividades.



Nota. La figura muestra la secuencia de actividades realizadas con el fin de obtener los resultados de coordinación de protecciones.

3.4.1 Bases teóricas

Calderón (2021) llevó a cabo un examen sobre la coordinación de las protecciones de sobrecorriente, con el propósito de analizar la calibración de los relés de sobrecorriente en el anillo mina. Con base en los resultados obtenidos, es necesario instalar un sistema de comunicación GOOSE que funcione de manera complementaria al sistema de protección de sobrecorriente. Esto permite lograr una coordinación adecuada de las protecciones, reduciendo así el tiempo necesario para que los relés de sobrecorriente actúen.

Bernilla (2022) se enfoca en formular un modelo de protección eléctrica en media tensión (13,8-22,3 kV) para la empresa Agrobananas del Perú S.R.L. utilizando el software DigSilent. El objetivo es lograr un sistema eléctrico seguro y eficiente que reduzca la posibilidad de fallas eléctricas, evitando así la desenergización parcial o total del sistema y las interrupciones no programadas, que pueden resultar en pérdidas de producción.

Lazo (2005) tiene como objetivo principal lograr la configuración adecuada de la protección contra sobre corrientes en sistemas de distribución de media tensión. Esto implica asegurar que los equipos de protección trabajen de manera coordinada y puedan responder rápidamente ante posibles fallas. A pesar de enfrentar ciertas limitaciones, los resultados obtenidos fueron satisfactorios en términos de alcanzar los ajustes óptimos deseados.

3.4.2 Marco conceptual

3.4.2.1 Flujo de carga o de potencia. Ei-Hawary (2008) define al flujo de carga o flujo de potencia al movimiento de energía eléctrica en una red eléctrica y su cálculo es fundamental para la operación y planificación de los sistemas eléctricos de potencia.

3.4.2.2 Sobrecarga eléctrica. Von Meier (2006) define la sobrecarga eléctrica como el estado en el que la cantidad de corriente que fluye a través de un circuito excede la capacidad que este puede soportar, lo cual puede ser perjudicial para los equipos eléctricos y peligroso para las personas.

3.4.2.3 Caída de tensión. Von Meier (2006) define a la caída de tensión como una diferencia de voltaje entre dos puntos en un circuito eléctrico debido a la resistencia y la impedancia de los conductores y otros elementos del circuito, y su medición y control es importante para garantizar el suministro adecuado de energía eléctrica a los dispositivos conectados.

3.4.2.4 Cortocircuito. Duncan, Sarma, y Overbye. (2008) define el cortocircuito a una conexión eléctrica de baja impedancia o resistencia entre dos o más conductores de un sistema eléctrico, que resulta en una corriente eléctrica anormalmente alta. El libro también discute las técnicas de análisis de cortocircuitos y las medidas de protección utilizadas para prevenir los efectos dañinos del cortocircuito en el sistema eléctrico.

3.4.2.5 Coordinación de protecciones. Lewis y Domin (2014) define la coordinación de protecciones como la técnica para coordinar el funcionamiento de los dispositivos de protección en un sistema eléctrico, de modo que solo el dispositivo más cercano al punto de falla se dispare. El objetivo de la coordinación de protecciones es asegurar que las fallas en el sistema eléctrico sean detectadas y aisladas lo más rápido posible, para minimizar el daño al equipo y garantizar la seguridad de las personas. Para el presente trabajo, se realiza la coordinación de protecciones de sobrecorriente de tiempo inverso, donde se debe tener en cuenta el tiempo de operación para cualquier corriente de falla, el cual se calcula de la siguiente manera:

$$T_{op} = \left[\frac{A}{\left(\frac{I_{falla}}{I_{pickup}} \right)^B - 1} + D \right] * \left[\frac{Dial}{E} \right]$$

El significado de cada termino es el siguiente:

- Top: Tiempo de operación.
- Ifalla: Corriente de falla.
- Dial: Ajuste de tiempo vertical de relé.
- Ipickup: Corriente de arranque configurado en relé.
- A, B, C, D y E: Constantes de curva.

También se debe tener en cuenta el tiempo real de despeje de falla, el cual es muy importante para la correcta coordinación de protecciones:

$$T_{\text{Despeje}} = T_{\text{Relé}} + T_{\text{Interruptor}}$$

$$T_{\text{interruptor}} = T_{\text{config}} + T_{\text{arco}}$$

El significado de cada termino es el siguiente:

- T_{Despeje} : Tiempo de despeje de falla.
- $T_{\text{Relé}}$: Tiempo de respuesta de relé.
- $T_{\text{Interruptor}}$: Tiempo de respuesta del interruptor.
- T_{config} : Tiempo de configuración de relé.
- T_{arco} : Tiempo de extinción de arco al abrir el interruptor.

3.4.2.6 Corriente de inserción. Blume (2016) define la corriente de inserción como la corriente que fluye en un circuito eléctrico cuando se cierra un disyuntor o se conecta un equipo. Esta corriente puede ser mayor que la corriente nominal del circuito durante un breve período de tiempo, y se conoce como corriente transitoria o corriente de inserción transitoria.

3.4.2.7 Relé de sobrecorriente temporizado. Wright y Christopoulos (2012) define el relé de sobrecorriente temporizado como un dispositivo de protección que se utiliza en sistemas eléctricos para detectar fallas por sobrecorriente y desconectar el circuito afectado después de un período de tiempo determinado.

3.4.2.8 Relé de sobrecorriente instantáneo. Dugan, Mcgranaghan, Santoso y Beaty (2012) define el relé de sobrecorriente instantáneo como un tipo de dispositivo de protección que se utiliza en sistemas eléctricos de potencia para detectar fallas por sobrecorriente y desconectar el circuito afectado de manera inmediata.

3.4.2.9 Corriente nominal. Dueñas (2007) define la corriente nominal como la cantidad de corriente que consumirá una máquina eléctrica.

La corriente de falla se representa de manera general mediante esta fórmula en los sistemas de generación, transmisión y distribución:

$$I_{nom} = \frac{V_{nom}}{\sqrt{3}(Z_{gen.} + Z_{lín} + Z_c)}$$

El significado de cada termino es lo siguiente:

- I_{nom} : Corriente nominal o de carga.
- Z_{gen} : Impedancia de generación.
- $Z_{lín}$: Impedancia de línea.
- Z_c : Impedancia de carga.

3.5 Procedimiento

3.5.1 Recopilación de Información.

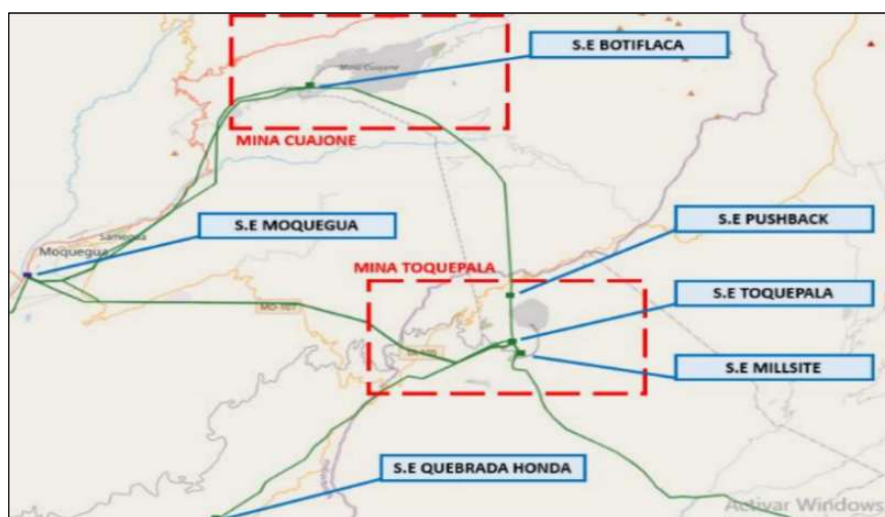
Como primer paso de nuestro trabajo de suficiencia profesional, se recopila toda la información del sistema eléctrico de la mina Toquepala, la información de las cargas eléctricas y, por último, los datos de las mediciones realizadas por los analizadores de redes, así como los eventos registrados por los relés de sobrecorriente.

3.5.1.1 Interconexión De Sistema Eléctrico De Potencia.

Como primer paso se mira una vista general de toda la interconexión en 138 kV de la empresa minera. Tomaremos como punto de partida las S.E. Montalvo en 500 kV y la S.E. Socabaya en 220 kV, las cuales alimentan a la S.E. Moquegua; esta subestación se encarga de transmitir el flujo de potencia a las S.E de Ilo, Cuajone y Toquepala en el nivel de tensión de 138 kV. Para el caso de la mina de Toquepala, esta es alimentada por 2 ternas de 138 kV las cuales alimentan a la S.E. Mill Site y S.E Toquepala.

Figura 3:

Interconexión de subestaciones SPCC.



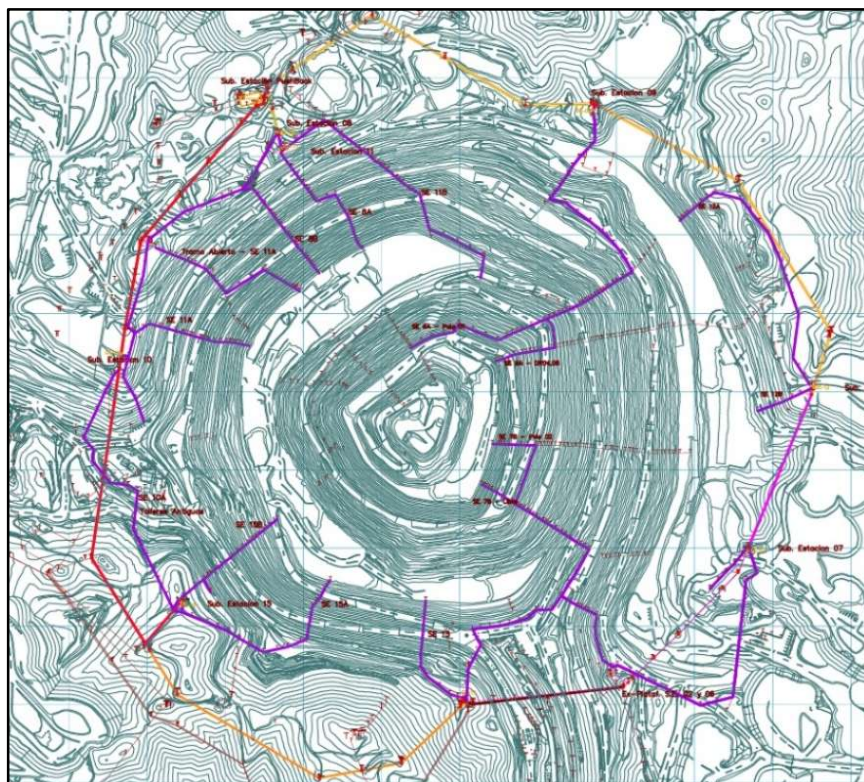
Nota. La figura muestra la interconexión que existe en las subestaciones que están cerca de la mina Toquepala. Esta imagen fue modificada a partir del Mapa Energético Minero de Osinergmin el cual fue tomado de: <https://gisem.osinergmin.gob.pe>

3.5.1.2 Levantamiento topográfico.

Las longitudes de la línea de 69 kV se obtuvieron de un informe topográfico de 2019, realizado por una empresa contratista de Southern Perú, utilizando equipos especializados. Estas medidas son cruciales, ya que influyen en los resultados de los estudios de flujo de carga, cortocircuito y coordinación de protecciones, simulados en el software DIgSILENT Power Factory.

Figura 4:

Topología de minera Southern Perú en el año 2020.



Nota. La figura muestra la interconexión que existe entre las subestaciones móviles de la mina Toquepala. El mapa fue tomado del informe técnico: “Levantamiento topográfico estudio y análisis del sistema eléctrico anillo mina 69kv Toquepala”, proporcionado por el área de Electricidad Mina (comunicación personal, 05 de marzo del 2020).

3.5.1.3 Subestación eléctrica Push Back. La S.E Push Back tiene 2 transformadores de potencia; el primero es de la marca “TRAFO” con una potencia aparente de 37.5 MVA con sistema de refrigeración ONAN y 50 MVA con refrigeración ONAF, el otro transformador fuera de servicio marca “ABB” de 14 MVA que solo entra en operación en situaciones de contingencias, mantenimiento o en caso de compensar la demanda requerida en el tajo. Los niveles de tensión de la subestación son de 138 kV en el lado primario y de 69 kV en el lado secundario.

3.5.1.4 Subestación eléctrica móvil. Las subestaciones eléctricas móviles se encargan de suministrar la energía a todas las cargas importantes en mina; ya sea palas, perforadoras, talleres, etc. Estas subestaciones están repartidas por todo el perímetro del anillo mina de 69 kV. Las S.E móviles están conectadas directamente con el anillo de 69 kV mediante una acometida que contiene un sistema de maniobra y protección como seccionadores y fusibles.

3.5.1.5 Línea aérea de 69 kV. La salida de la S.E. Push Back se divide mediante el “Three Way 01” en 2 brazos (Este y Oeste) que rodean el tajo. Esta línea de 69 kV está compuesta por conductores de aluminio reforzados con acero “ACSR AWG 4/0”. Esta línea de 69 kV, el cual tuvo un estudio topográfico, tiene actualmente una longitud de 11.834 km.

3.5.1.6 Línea aérea de cobre 7.2 kV. Estas líneas están conectadas a los cables de arrastre que salen de las salidas A y B o hasta salida C de las S.E móviles. Las líneas se encargan de transportar la energía eléctrica necesaria a las diferentes fases del tajo donde operan las palas y perforadoras. Las líneas de 7.2 kV tienen 4 conductores de cobre AWG 4/0 en donde el neutro está más cerca al terreno. Estas líneas tienen una longitud variable que va entre los 500 metros las más cortas, hasta los 3 km las cuales bajan a fondo de mina.

3.5.1.7 Cables de arrastre de 7.2 kV. Los cables de arrastre que conectan a las cargas son de calibre AWG 2/0 y las acometidas AWG 4/0. Las acometidas AWG 4/0 interconectan las S.E móviles con las líneas aéreas de cobre; así mismo, estas acometidas interconectan las líneas aéreas de cobre con las switch house. Los cables de arrastre AWG 2/0 transportan la energía eléctrica desde las switch house hasta las palas y perforadoras.

3.5.1.8 Switch house o casetas. Las casetas portátiles o también denominadas “switch house” son las encargadas de brindar suministro de energía eléctrica en 7.2 kV a las palas y perforadoras. Estas casetas también cumplen la función de protección contra sobrecorriente producidos por cortocircuitos de fases o de fases a tierra o descargas atmosféricas; al mismo tiempo, censan el nivel de sobrecorriente mediante relés de SEL Schweitzer 751A. También tienen un sistema de control de maniobras que contienen dos seccionadores trifásicos con puesta a tierra y botellas de vacío en cada salida.

3.5.1.9 Palas eléctricas. Los equipos que más energía eléctrica consumen en el anillo del tajo sin duda alguna son las palas eléctricas. Su función principal es sustraer el mineral o desmonte necesario, una vez realizado el proceso de perforación y voladura en la zona o fase de operación. Estas máquinas eléctricas trabajan con cuatro tipos principales de motores: motores de izaje, motores de ataque, motores de giro y motores de avance. El mayor consumo de energía eléctrica se produce cuando la pala está realizando el proceso de extracción del mineral, ya que en ese momento los motores de izaje, ataque y giro operan simultáneamente. Cabe mencionar, que estas palas cuentan con un banco de condensadores con el fin de compensar la potencia reactiva necesaria para su operación.

3.5.1.10 Perforadoras eléctricas. Las perforadoras son el segundo equipo que más energía eléctrica consume en el tajo. Estas máquinas eléctricas se encargan de perforar el suelo de una sola pasada teniendo una profundidad promedio entre los 19.8 metros a 21.3 metros, esto con el fin de colocar los explosivos de nitrato de amonio (ANFO) para el proceso de voladura. Las perforadoras tienen una corriente de arranque normalmente muy elevada; las mismas, llegan a tener un valor de 8 veces la corriente nominal a la que operan y esto se debe principalmente porque todas realizan un arranque directo de sus motores eléctricos.

3.5.2 Mediciones y eventos

3.5.2.1 Medición de analizador de red. Se realiza las mediciones de frecuencia, tensión y corriente utilizando los analizadores de redes “FLUKE modelo 435 Series II” y “FLUKE modelo 438 Series II”. Como resultado, se obtienen medidas precisas para cada modelo de pala y perforadora que opera en la mina. Estas mediciones se llevan a cabo en la switch house y S.E. móviles. Las lecturas de corriente se toman en el sistema de control y de fuerza, por lo que cada analizador de redes fue debidamente calibrado antes de realizar las mediciones correspondientes.

Figura 5:

Medición con analizador FLUKE 435 en switch house N° 24.



Nota. La figura muestra la medición con el analizador de redes Fluke 435 Series II en la switch house N° 24 en donde está conectada la pala N° 09. La fotografía fue tomada como registro durante las inspecciones dentro del tajo (comunicación personal, 10 de agosto del 2020).

Tabla 1:

Cuadro de medidas de corriente – Palas eléctricas.

REGISTRO DE MEDICIONES DE PALAS ELÉCTRICAS - ANALIZADOR DE REDES.				
ITEM	PALAS ELÉCTRICAS		100% F.D.	$I_{max.}$
	MARCA	MODELO	I_{nom} (A)	(A)
1	BUCYRUS	495 HR	101.00	312.79
2	BUCYRUS	495 BI	103.00	336.00
3	P&H	4100A	157.00	432.00
4	P&H	4100 XPC	152.00	479.40

Nota. La tabla muestra las mediciones de las palas eléctricas en el tajo. Elaborado a partir de la información brindada por los analizadores de red.

Tabla 2:

Cuadro de medidas de corriente – Perforadoras eléctricas.

REGISTRO DE MEDICIONES DE PERFORADORAS ELÉCTRICAS - ANALIZADOR DE REDES.				
ITEM	PERFORADORAS		100% F.D.	$I_{arr.}$
	MARCA	MODELO	I_{nom} (A)	(A)
1	P&H	320 XPC	60.00	504.00
2	P&H	120A	63.00	336.00
3	BUCYRUS	49 RIII	67.00	249.10
4	CAT	MD 6640	69.00	252.00
5	BUCYRUS	49 HR	63.00	276.00

Nota. La tabla muestra las mediciones de las perforadoras eléctricas en el tajo. Elaborado a partir de la información brindada por los analizadores de red.

3.5.2.2 Mediciones de medidores ION 8650. Para el presente proyecto se tiene el registro de mediciones de los medidores instalados en las switch house y S.E móviles, con el fin de estimar la potencia aparente, potencia activa y reactiva, y así contrastarlos con las mediciones realizadas con los analizadores de redes.

3.5.2.3 Reportes de eventos. Se analiza los eventos registrados por los relés de sobrecorriente “SEL Schweitzer 751A y 351A” instalados en las switch house o S.E móviles. Estos eventos se producen por la apertura de los interruptores debido a una sobrecarga de corriente o una falla de cortocircuito entre fases y de fase a tierra. Los mismos eventos ayudan a tomar en cuenta el tiempo de apertura promedio de los interruptores, el tiempo de respuesta de los relés y comprobar si el tiempo de respuesta configurado en el relé funciona de la forma correcta.

3.5.3 *Elaboración en software de simulación*

Como se ha mencionado anteriormente este análisis se realiza en el software "Digsilent - Power Factory " con el fin de detallar y verificar los resultados obtenidos en escenarios reales de operación normal y de contingencias.

Primero, se introducirán los datos recopilados, como parámetros de componentes eléctricos, mediciones de palas y perforadoras, especificaciones técnicas y eventos, para simular el sistema eléctrico en 69 kV y 7.2 kV. El software proporcionará información sobre el estado actual del sistema eléctrico, sus limitaciones técnicas, estabilidad de voltaje, sobrecargas en subestaciones y conductores, soportabilidad ante corrientes de cortocircuito y tiempos de actuación de los relés de sobrecorriente.

3.5.3.1 Introducción de parámetros en software. En base a la información recabada de los transformadores de potencia, líneas aéreas, acometidas, cables de arrastre y sus respectivos datos topográficos.

- Como primer paso se bosqueja el sistema del anillo de 69 kV en la primera ventana “SPCC”; donde se detalla la S.E. Push Back, las líneas aéreas de alta tensión 138 kV y 69 kV y sus respectivas S.E. móviles.
- Se coloca los parámetros de las líneas aéreas, acometidas, cables de arrastre, transformadoras, barras, terminales y cargas. Estos parámetros son la longitud de las líneas y cables, impedancias resistivas, inductivas y capacitivas de secuencia positiva, negativa y cero, susceptancia, ampacidad, tensión nominal, tipo de conexionado, posición de TAPS, impedancia de cortocircuito, frecuencia, potencias, relación de transformación, factor de potencia, etc.
- Luego se procede a introducir los equipos de protección tales como los relés, transformadores de corriente, transformadores de tensión y fusibles en las barras de las switch house, S.E móviles y S.E. Push Back con los modelos SEL 751A y SEL 351A.

Figura 6:

Introducción de parámetros de transformador.

2-Winding Transformer Type - Equipment Type Library\TRAFO 9MVA - 07.TypeTr2

Basic Data	Name	TRAFO 9MVA - 07	OK
Description	Technology	Three Phase Transformer	Cancel
Version	Rated Power	9. MVA	
Load Flow	Nominal Frequency	60. Hz	
Short-Circuit VDE/IEC	Rated Voltage		
Short-Circuit Complete	HV-Side	69. kV	
Short-Circuit ANSI	LV-Side	7.2 kV	
Short-Circuit IEC 61363	Vector Group		
Short-Circuit DC	HV-Side	D	
	LV-Side	YN	
Simulation RMS	Phase Shift	1. *30deg	
Simulation EMT	Name	Dyn1	
Protection	Positive Sequence Impedance		
Power Quality/Harmonics	Short-Circuit Voltage uk	7.2 %	
Reliability	Copper Losses	120. kW	
Hosting Capacity Analysis	Zero Sequence Impedance		
Optimal Power Flow	Short-Circuit Voltage uk0	7.2 %	
	SHC-Voltage (Re(uk0)) uk0r	0. %	

Nota. La figura muestra la introducción de parámetros de los transformadores de las subestaciones eléctricas del anillo mina Toquepala. La figura fue tomada de una de las ventanas del software de simulación Digsilent Power Factory, y elaborado a partir de los datos de la placa del transformador de la subestación eléctrica móvil N°07.

Figura 7:

Introducción de parámetros línea 69 kV.

Nota. La figura muestra la introducción de parámetros del conductor de la línea en 69 kV del anillo mina Toquepala. La figura fue tomada de una de las ventanas del software de simulación Digsilent Power Factory, y elaborado a partir de los datos de la ficha técnica del conductor ACSR 4/0.

3.5.4 Distribución de equipos

La distribución de equipos se realiza en base a criterios de operación, siempre y cuando este permitido en escenarios de operación normal; por ende, se investigó una distribución de equipos real y compleja.

Estos criterios son los siguientes:

- Se instala una sola pala como máximo por terna de cada subestación eléctrica móvil.
- Se instala tres perforadoras como máximo por terna.
- Se instala como máximo una pala y perforadora por terna.
- Se tiene en cuenta la instalación de la pala N°. 09 en una sola terna de la S.E. móvil N°. 07.

- Se instala las cargas de mayor consumo eléctrico en las S.E. móviles más alejados.
- Se instala las cargas de mayor consumo eléctrico en fondo de mina. (Pala N°. 01, Pala N°. 04 y Perforadora N°. 05).

Tabla 3:

Distribución de equipos en escenario complejo.

DISTRIBUCIÓN EQUIPOS – ESCENARIO COMPLEJO.							
S.E. 08	MVA	LADO A	PALA 09	S.E. 08	MVA	LADO A	PALA 04 - F.M
		LADO B	PALA 02 PERFO 01			LADO B	PERFO 05 - F.M PALA 03 PERFO 08
S.E. 10	MVA	LADO A	PALA 05 PERFO 11	S.E. 03	MVA		TALLERES
		LADO B	PERFO 16 PERFO 12 PERFO 07			LADO A	GEOTECNIA 04
S.E. 10	MVA	LADO A	PALA 08 PERFO 04	S.E. 10	MVA	LADO A	PALA 01 - F.M
		LADO C	TALLER MANTTO.			LADO B	PERFO 17
S.E. 15	MVA	LADO A	PALA 07 PERFO 09	S.E. 08	MVA	LADO A	PERFO 18
		LADO B	PALA 06 PERFO 21			LADO B	PERFO 19

Nota. La tabla muestra una distribución de palas y perforadoras, tomando en cuenta la disposición más compleja en el sistema eléctrico. Elaborado a partir de la información brindada por los analizadores de red y de personal en mina. (comunicación personal, 20 de agosto del 2020).

3.5.5 Escenarios de operación.

- **Escenario Nro. 01:** Todas las cargas se toman al 80% de factor de diversidad, tomando la corriente nominal.

- **Escenario Nro. 02:** Todas las cargas se toman al 100% de la corriente nominal, tomando la corriente nominal.
- **Escenario Nro. 03:** Todas las cargas se toman al 80% del factor de diversidad, con excepción de la pala N°. 09 que está a su máxima potencia.
- **Escenario Nro. 04:** Todas las cargas se toman al 100% del factor de diversidad, con excepción de la pala N°. 09 que está a su potencia máxima.
- **Escenario Nro. 05:** Todas las cargas se toman al 80% del factor de diversidad, con excepción de las palas N°. 02 y N°. 09 que están a potencia máxima.
- **Escenario Nro. 06:** Todas las cargas se toman al 100% del factor de diversidad, con excepción de las palas N°. 02 y N°. 09 que están operando a potencia máxima.
- **Escenario Nro. 07:** Todas las cargas se tomarán al 80% del factor de diversidad, con excepción de las palas N°. 02, N°. 05 y N°. 09 que están operando a potencia máxima.
- **Escenario Nro. 08:** Todas las cargas se toman al 100% del factor de diversidad, con excepción de las palas N°. 02, N°. 05 y N°. 09 que estarán operando en su máxima potencia máxima.
- **Escenario Nro. 09:** Todas las cargas se toman al 80% del factor de diversidad, con excepción de las palas N°. 02 y N°. 05 que están operando en su potencia máxima y la perforadora 16 en estado de arranque.
- **Escenario Nro. 10:** Todas las cargas se toman al 100% del factor de diversidad, con excepción de las palas N°. 02 y N°. 05 que están operando en su potencia máxima y la perforadora 16 en proceso de arranque.

3.5.6 Análisis de flujo de carga

Después de ingresar correctamente los parámetros eléctricos en el software de simulación, y considerando una nueva y más compleja distribución de

equipos que refleja la topología real de la red existente, así como la definición de diez escenarios de operación, se procede a realizar la simulación del flujo de carga para todos los escenarios en el sistema.

Estas simulaciones nos permiten analizar el comportamiento del sistema eléctrico en situaciones críticas, considerando los picos de corriente máxima de las palas eléctricas y las corrientes de arranque de las perforadoras.

Para ello, uno se centra en los escenarios más complejos, con el objetivo de identificar las corrientes máximas de operación en el sistema y determinar los parámetros de la protección contra sobrecorriente inversa.

En esta sección, se analizarán el escenario N.º 02 y el escenario N.º. 08, ya que representan los eventos más críticos del sistema con un 100% de factor de diversidad y añadido a ello se considera tres palas operando a su máxima corriente de operación registrada.

A continuación, se presentarán los valores eléctricos clave derivados de la simulación de los 10 escenarios de funcionamiento propuestos, los cuales fueron generados utilizando el software DlgSILENT Power Factory. Estos valores incluyen la magnitud de la potencia aparente (S), la potencia activa (P), la tensión (V) y la corriente (I).

3.5.7 Análisis de cortocircuito.

El siguiente paso para poder realizar nuestra coordinación de protecciones de sobrecorriente se realizará el análisis de cortocircuito en el software de simulación. Para ello seguiremos los siguientes pasos antes de que se realice el presente análisis:

- La simulación de cortocircuito se realizó utilizando los parámetros eléctricos de la S.E Millsite, que cuenta con una potencia de cortocircuito de 3,086 MVA_{sc}, una corriente de cortocircuito de 12.86 kA y una relación X/R de 7.52.

- Para este análisis, se asumió que el flujo de potencia se origina en la S.E Millsite, continúa hacia la S.E Push Back y, posteriormente, hacia la S.E Botiflaca. Esta dirección de flujo fue verificada mediante los archivos en formato “pdf” proporcionados por el COES.
- El transformador “PBT2” de la S.E. Push Back estará en servicio durante todas las simulaciones de cortocircuito trifásicas francas.
- El transformador “PBT1” no se toma en cuenta ya que este solo entra en servicio para labores de mantenimiento del transformador “PBT2”.
- Para esta simulación de cortocircuito se usa el método “completo”, ya que se considera los parámetros de las cargas y de la topología existente.
- Para realizar los ajustes de sobrecorriente instantáneo se toma en cuenta el menor valor registrados por los relés de las switch house, S.E. móviles y S.E. Push Back.

A continuación, se realizan simulaciones de fallas de cortocircuito en los cables de arrastre y en las líneas aéreas de 7.2 kV, con el objetivo de determinar las corrientes de cortocircuito detectadas por los relés de sobrecorriente, y así establecer la corriente de arranque para los ajustes de tiempo definido 50P.

Tabla 4:

Simulación de fallas trifásicas y bifásicas – Cables de arrastre.

ANÁLISIS DE CORTOCIRCUITO - CABLES DE ARRASTRE 7.2 kV - ANILLO TOQUEPALA

CABLES / FALLA 3F	CASETA - SWITCH-HOUSE	S.E.	LONG. mts.	FALLA EN BARRA DE CARGA				
				TRIFÁS ICA	RELE- CASET A	RELÉ S.E A/B	RELÉ CENTR AL	RELÉ PBT2
				IKSS KA	IKSS KA	IKSS KA	IKSS KA	IKSS KA
CABLE PALA 09	07A/CASETA 24	S.E. 07 - A	900	4.3080	3.3290	3.3290	3.0460	0.4060
CABLE PALA 02	07A/CASETA 07B	S.E. 07 - B	1200	4.0050	3.0350	2.8560	2.6880	0.3800
CABLE PERFO 01	07B/CASETA 07B	S.E. 07 - B	900	3.9770	3.5680	3.1410	2.9420	0.3990
CABLE PERFO 18	08B/CASETA 10	S.E. 08 - A	600	3.5950	3.1860	3.1860	3.0840	0.4160
CABLE PERFO 19	08B/CASETA 16	S.E. 08 - B	1200	2.9090	2.5010	2.5010	2.4280	0.3710
CABLE PALA 04	09A/CASETA 17	S.E. 09 - A	1500	2.6860	1.8000	1.6270	1.5810	0.2950

CABLE PERFO 05	09B/CASETA 17	S.E. 09 - A	1200	2.4670	2.0900	1.6630	1.6370	0.2990
CABLE PALA 03	09A/CASETA 09B	S.E. 09 - B	1800	2.7820	2.1710	2.0230	2.0010	0.3260
CABLE PERFO 08	09B/CASETA 09B	S.E. 09 - B	1200	3.0580	2.6640	2.4020	2.3350	0.3490
CABLE PALA 01	11A/CASETA 08	S.E. 11 - A	1200	2.8610	1.9260	1.9260	1.8940	0.3290
CABLE PERFO 17	11B/CASETA 08B	S.E. 11 - B	1200	2.5780	2.2020	2.2020	2.1430	0.3470
CABLE PALA 05	12A1/CASETA 07	S.E. 12 - A	600	3.5770	2.9590	2.7200	2.5080	0.3630
CABLE PERFO 11	12A2/CASETA 04	S.E. 12 - A	1200	2.8400	2.4750	2.1700	2.0380	0.3310
CABLE PERFO 16	12B1/CASETA 11	S.E. 12 - B	600	4.8190	4.4460	4.0010	3.7220	0.4530
CABLE PERFO 12	12B2/CASETA 09	S.E. 12 - B	1200	3.7270	3.2940	2.9960	2.8250	0.3890
CABLE PERFO 07	12B2/CASETA 09	S.E. 12 - B	300	5.7960	5.3950	4.8360	4.4670	0.5080
CABLE PALA 08	13A1/CASETA 20	S.E. 13 - A	600	4.2370	3.6080	3.3590	3.4160	0.4290
CABLE PERFO 04	13A1/CASETA 20	S.E. 13 - A	1200	3.2740	2.8750	2.5900	2.6580	0.3760
CABLE PALA 07	15A1/CASETA 18	S.E. 15 - A	900	3.4670	2.8260	2.6020	2.4290	0.3590
CABLE PERFO 09	15A2/CASETA 02	S.E. 15 - A	1500	2.7860	2.3780	2.1110	1.9980	0.3300
CABLE PALA 06	15B1/CASETA 23	S.E. 15 - B	1200	3.4730	2.8300	2.6680	2.4910	0.3640
CABLE PERFO 21	15B2/CASETA 22	S.E. 15 - B	2100	2.5500	2.1700	1.9900	1.8960	0.3240

ANÁLISIS DE CORTOCIRCUITO – CONDUCTORES AÉREOS 7.2 kV - ANILLO TOQUEPALA

LT. 7A	-	S.E. 07	600	6.2030	-	5.3430	4.7690	0.5300
LT. 7B	-	S.E. 07	600	6.4580	-	5.2520	4.830	0.5370
L.T. 8A	-	S.E. 08	996	4.5990	-	4.2060	4.0540	0.483
L.T. 8B	-	S.E. 08	1086	4.4250	-	4.0470	3.8960	0.4710
L.T. 9A	-	S.E. 09	2620	3.5310	-	2.4520	2.3370	0.3440
L.T. 9B	-	S.E. 09	1086	4.9750	-	4.0890	3.8270	0.4520
L.T 10A	-	S.E. 10	946	2.1570	-	2.1590	2.1590	0.3490
L.T. 10B	-	S.E. 10	2244	1.7340	-	1.7410	1.7410	0.3220
L.T. 11A	-	S.E. 11	2244	3.5260	-	2.7320	2.6630	0.3800
L.T. 11B	-	S.E. 11	1642	3.6870	-	3.3360	3.1760	0.4180
L.T. 12A	-	S.E. 12	1478	3.6190	-	3.6190	3.2800	0.4170
L.T. 12B	-	S.E. 12	333	6.3650	-	6.3650	5.8330	0.6080
L.T. 13A	-	S.E. 13	712	5.6080	-	4.6460	4.6850	0.5180
L.T. 13C	-	S.E. 13	4000	1.8200	-	1.8200	1.7450	0.3090
L.T. 15A	-	S.E. 15	1201	3.9050	-	3.9050	3.5740	0.4370
L.T. 15B	-	S.E. 15	757	4.7570	-	4.7570	4.3260	0.4920

Nota. La tabla muestra los resultados del análisis de cortocircuito en el sistema eléctrico de la mina Toquepala. Elaborado a partir de la información brindada de la simulación en el software Digisilent Power Factory. Elaboración propia.

3.5.8 Análisis de Coordinación de Protecciones.

El análisis de coordinación de protecciones de sobrecorriente de fases se realiza en la red de distribución de en los niveles de tensión de 7.2 kV y 69 kV. Se analiza la “51P” para sobrecorriente de tipo inverso entre fases y “50P” para sobrecorriente de tipo instantáneo entre fases. En el contexto del presente estudio de coordinación de protecciones, es esencial tener en consideración los siguientes aspectos:

- Los relés SEL Schweitzer 351A y 751A deben ser configurados con parámetros apropiados que garanticen una respuesta precisa de sus interruptores de potencia en caso de posibles fallas o contingencias.
- Se toma en cuenta las normas y criterios técnico de las cargas, los cuales nos ayudarán a tener un correcto ajuste de los relés de sobrecorriente.
- Se busca la selectividad, velocidad, confiabilidad y simplicidad del sistema eléctrico de media tensión en 7.2 kV del anillo mina.
- Se realiza la coordinación de protecciones en los relés de sobrecorriente ubicados en las casetas y S.E móviles.
- Se toma en cuenta las condiciones operativas de la red para mínima y máxima demanda, realizados en los escenarios del flujo de carga.
- Se evalúa el sistema para los diferentes tipos de fallas trifásicas simuladas en el análisis de cortocircuito con el método completo.
- Para las características técnicas de los equipos del sistema de protección eléctrica; se tiene en cuenta, la relación de transformación y curva de saturación de los transformadores de corriente y de tensión.
- Se toma en cuenta la información de velocidad de respuesta del relé y de los interruptores de potencia, con el fin de obtener un valor cercano a lo real en el tiempo de despeje de falla.
- Se establece una curva de referencia o comúnmente llamada techo; y para este caso, se utiliza el ajuste del relé de la salida del transformador “PBT2” de la S.E Push Back.

- Para la función de selectividad, se considera el tiempo de coordinación entre las curvas de tiempo definido y tiempo inverso. En el caso de las curvas de corriente definida e inversa, se establece una separación mínima de 150 ms.
- El tiempo de operación de los relés SEL 751A y 351A se estima en 2 ms, dato obtenido de las fichas técnicas.
- El tiempo de despeje de tiempo instantáneo debe estar por encima de la corriente “Inrush” de los transformadores de las S.E móviles.
- Se considera las curvas de daños térmicos de los equipos, tales como transformadores, motores de palas y motores de perforadoras y conductores eléctricos.
- Se añade un retardo de 20 ms entre los tiempos instantáneos ajustados entre la caseta y una terna de la S.E móvil, y para garantizar la selectividad.
- Las curvas de sobrecorriente de tiempo inverso y definido presentan una coordinación adecuada para garantizar la selectividad ante fallas por cortocircuito o fenómenos atmosféricos.

3.5.8.1 Consideraciones para la coordinación de tiempo inverso 51P.

- Los relés ubicados en las “switch house” deben estar en la capacidad de detectar una falla en el sistema eléctrico de las palas eléctricas por sobrecarga, como, por ejemplo, la pérdida de un banco de capacitores en las palas P&H 4100A.
- El valor de ajuste de corriente de arranque “pickup” de cada carga, ya sea pala o perforadora depende del tiempo que tomé la corriente máxima en las palas y perforadoras eléctricas.
- Se establece una corriente pickup del 120% al 130% de la corriente máxima registrada en el analizador de redes.
- Se debe recordar que el consumo de las palas eléctricas es muy variable; ya que, en los movimientos de izaje y ataque de la pala llega a sus corrientes máximas de operación.

- Se debe tener en cuenta que, si durante la operación de la pala eléctrica, esta se encuentra con rocas extremadamente densas, los motores eléctricos de las palas eléctricas pueden llegar a picos altos de corriente, por el hecho de aumentar el torque en sus motores principales de izaje y ataque.
- Se debe tener en cuenta que la corriente consumida aumenta cuando la caída de tensión es demasiada alta, ya que las palas y perforadoras buscan compensar la potencia requerida en sus motores eléctricos principales.
- Las perforadoras que trabajan en mina son de arranque directo, por lo que la corriente de arranque tendrá un aproximado de ocho veces la corriente nominal de operación de la perforadora.
- Se realiza un ajuste para cada modelo de pala o perforadora en base a las mediciones realizadas por los analizadores de redes.
- El tipo de curva seleccionado será la “Muy Inversa”, recomendada para equipos de distribución en media tensión y de utilización. Asimismo, se considerará la curva “Extremadamente Inversa”, debido a su adecuada adaptación a la curva del fusible existente.
- Se utiliza las constantes de las fórmulas de tiempo de despeje de falla por cada valor de corriente del manual de fabricación de los relés SEL 751A y 351A.

3.5.8.2 Consideraciones para la coordinación de tiempo definido 50P.

- Para definir el ajuste de tiempo definido 50P de las S.E móviles o switch house, se debe considerar una falla trifásica ubicada en el punto más alejado del relé que la detectará
- Debido a los criterios de coordinación de protecciones del “Comité de Operación Económica del Sistema (COES)”. La corriente de arranque se calcula tomando entre el 80% y 90% de la corriente de falla trifásica subtransitoria censada por el relé.
- Se recuerda que las corrientes de cortocircuito se calcularán mediante el software de simulación, utilizando el método completo.

3.5.8.3 Coordinación de protecciones para la pala N°. 09.

Como ejemplo de nuestro estudio de coordinación de protecciones se toma a la S.E. móvil N°. 07 la cual ha sido seleccionada por ser la de mayor distancia a la S.E. Push Back y la que tiene una de las cargas más representativas como es la pala N.º 09.

Para realizar nuestra coordinación de protecciones, se comienza con el ajuste de referencia. Este ajuste corresponde al configurado en el relé ubicado en el lado de 69 kV del transformador de potencia “PBT2” de la S.E Push Back.

Tabla 5:

Ajuste de referencia – Relé PBT2 – 69kV.

AJUSTE DE RELÉ PBT2 - S.E. PUSHBACK					
FABRICANTE	MODELO	C.T.	FUNCIÓN	TRIP	CURVA
SEL - Schweitzer	351A	500-5	Overcurrent.	Phase	U3-U.S. Very Inverse
FUNCION 51			FUNCION 50		
PICKUP	Prim. (AMP)	TIME DIAL	PICKUP	Prim (AMP)	TIME DIAL
4.37	437.00	1.16	25.80	2580.00	-

Nota. La tabla muestra los ajustes de referencia del relé del transformador PBT2 de la S.E Push Back. Elaborado a partir de la información brindada por personal en mina. (comunicación personal, 05 de Julio del 2020).

Sobrecorriente tiempo inverso 51P – Relé S.E 07 - 69 kV

Para calcular el ajuste del relé correspondiente a la S.E. 07 en el lado de 69 kV, se ha considerado la corriente nominal del transformador de dicha subestación. Se calcula la corriente nominal del transformador con los datos obtenidos de placa:

- $S_n = 9 \text{ MVA}$.
- $V_n = 69 \text{ Kv}$.

$$S_n = \sqrt{3} * V_{n_{69KV}} * I_{n_{69KV}}$$

$$9 \times 10^6 \text{va} = \sqrt{3} * 69 \times 10^3 \text{v} * I_n$$

$$75.306 \text{A} = I_n$$

Para calcular la corriente de arranque de sobrecorriente en tiempo inverso, también conocido como pickup, se considera el 130% de la corriente nominal del transformador previamente determinada.

$$I_{\text{pickup}} = (130\%) \times I_n$$

$$I_{\text{pickup}} = (130\%) \times 75.306 \text{A}$$

$$I_{\text{pickup}} = 97.8978 \text{ A}$$

Sobrecorriente tiempo definido 50P – Relé S.E 07 - 69 kV

La medición registrada por el relé central de la S.E. N.º 07 fue de 3.3 kA, valor obtenido al simular una falla trifásica en los bornes del transformador, en el lado de alta tensión de 69 kV. Para garantizar un adecuado despeje de falla, se aplicará el criterio de coordinación recomendado por el “COES”, el cual establece que el valor de referencia debe calcularse tomando el 80 % de la corriente de cortocircuito trifásica subtransitoria.

$$I_{\text{pickup}} = (80\%) \times I_{cc_{3\phi}}$$

$$I_{\text{pickup}} = (80\%) \times 3300.209 \text{A}$$

$$I_{\text{pickup}} = 2640.16 \text{ A}$$

Sobrecorriente tiempo inverso 51P – Relé S.E 07 – 7.2 kV

Para calcular el ajuste del relé correspondiente a la S.E. N.º 07 en el lado de 7.2 kV, se ha considerado la corriente nominal del transformador de dicha subestación. Se calcula la corriente nominal del transformador con los datos obtenidos de placa:

- $S_n = 9 \text{ MVA}$.
- $V_n = 7.2 \text{ kV}$.

$$S_n = \sqrt{3} * V_{n_{69 \text{ KV}}} * I_{n_{69 \text{ KV}}}$$

$$9 \times 10^6 \text{ VA} = \sqrt{3} * 7.2 \times 10^3 \text{ V} * I_n$$

$$721.687 \text{ A} = I_n$$

Para calcular el tiempo de ajuste del relé en sobrecorriente de tiempo inverso, también conocido como pickup, se considera el 130% de la corriente nominal del transformador previamente determinada.

$$I_{\text{pickup}} = (130\%) \times I_n$$

$$I_{\text{pickup}} = (130\%) \times 721.68 \text{ A}$$

$$I_{\text{pickup}} = 938.19 \text{ A}$$

Sobrecorriente tiempo definido 50P – Relé S.E 07 – 7.2 Kv:

La medición registrada por el relé central de la S.E. N.º 07 fue de 7.842 kA, valor obtenido al simular una falla trifásica en los bornes del transformador, en el lado de media tensión de 7.2 kV. Para asegurar un correcto despeje de falla, se aplica el criterio de coordinación recomendado por el “COES”, según el cual dicho valor será multiplicado por el 80 % de la corriente de cortocircuito trifásica transitoria.

$$I_{\text{pickup}} = (80\%) \times I_{cc_{3\phi}}$$

$$I_{\text{pickup}} = (80\%) \times 7842 \text{ A}$$

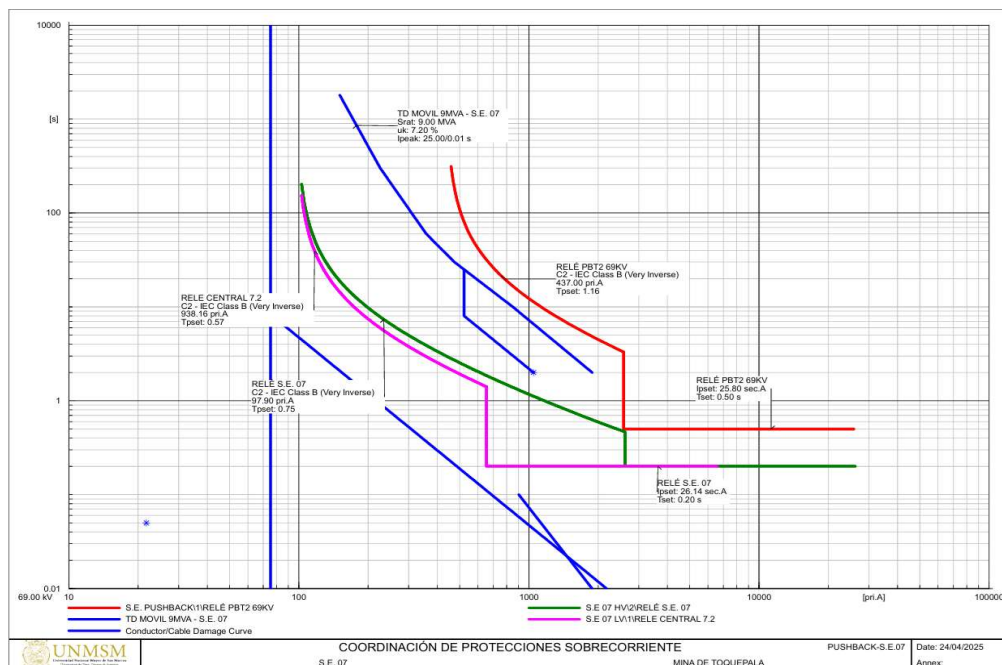
$$I_{\text{pickup}} = 6273.6 \text{ A}$$

La coordinación entre el relé central de 69 kV y el relé central de 7.2 kV tendrá prácticamente la misma separación, ya que ambos actúan de forma

complementaria en caso de que uno de ellos quede fuera de servicio o no opere de manera correcta.

Figura 8:

Gráfico de coordinación de protecciones en 69Kv – S.E. 07



Nota. La figura muestra la gráfica de coordinación de protecciones de sobrecorriente en 69 kV de la S.E 07. La figura fue obtenida del software de simulación Digsilent Power Factory, y elaborada a partir de toda la información recabada previamente. Elaboración propia.

Sobrecorriente tiempo inverso 51P – relé salida A - 7.2 Kv:

Para realizar el ajuste del relé en la salida “A” en el lado de 7.2 kV de la subestación eléctrica N.º 07, se toma como referencia la corriente nominal de los cables conductores, cuyas corrientes nominales son las siguientes:

- $I_{\text{CONDUCTOR DESNUDO 7.2 KV}} = 398 \text{ A.}$
- $I_{\text{CABLE ARRASTRE 4.0 7.2 KV}} = 327 \text{ A.}$

Para calcular el tiempo de ajuste del relé en sobrecorriente de tiempo inverso, también conocido como pickup, se considera el 130 % de la corriente nominal del cable de arrastre, ya que este presenta el menor valor de corriente nominal y, por lo tanto, debe ser protegido ante posibles sobrecargas

$$I_{pickup} = (130\%) \times I_{n_{conductor}}$$

$$I_{pickup} = (130\%) \times 327A$$

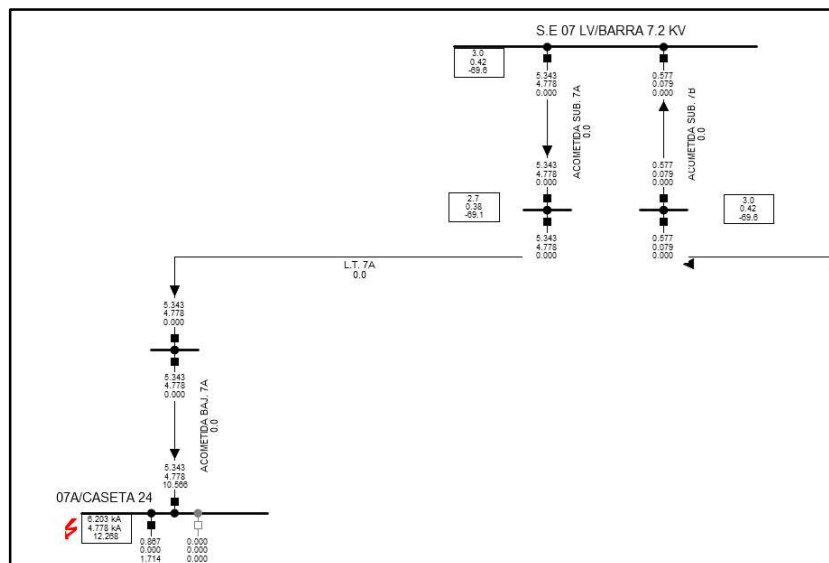
$$I_{pickup} = 425.1 A$$

Sobrecorriente tiempo definido 50P – relé salida A - 7.2 Kv:

El resultado de la corriente de cortocircuito fue de 5.343 kA, dicho valor se obtiene al simular una falla trifásica en la barra de salida de 7.2 kV del transformador de la S.E. N.º 07.

Figura 9:

Falla trifásica en barra de entrada de switch house N.º 24.



Nota. La figura muestra la simulación de cortocircuito trifásico franco en los bornes de entrada de la caseta N.º 24. La figura fue obtenida del software de simulación Digsilent Power Factory. Elaboración propia.

$$I_{pickup} = (80\%) \times I_{cc3\phi}$$

$$I_{pickup} = (80\%) \times 5343A$$

$$I_{pickup} = 4807.8 A$$

Sobrecorriente tiempo inverso 51P – relé switch house N° 24 - 7.2 Kv – Pala N.º 09.

Para realizar el ajuste del relé en la switch house N.º 24 (salida A), la cual suministra energía eléctrica a la pala N.º 09, se toma en consideración la corriente nominal del conductor del cable de arrastre tipo 2/0, así como la corriente nominal de la pala N.º 09 - P&H 4100 XPC.

Donde:

- $Sn_{PALA\ 09} = 1.8MVA$
- $Vn_{PALA\ 09} = 7.2 KV$

$$1.89 \times 10^6 va = \sqrt{3} * 7.2 \times 10^3 v * I_n$$

$$151.55 A = I_n$$

Para calcular el tiempo de ajuste del relé en sobrecorriente de tiempo inverso, también conocido como pickup, se considera el 120% de la corriente nominal de la pala N.º 09 debido a que es la carga la cual debe ser correctamente protegida en caso de fallas.

$$I_{pickup} = (120\%) \times I_n$$

$$I_{pickup} = (120\%) \times 151.55A$$

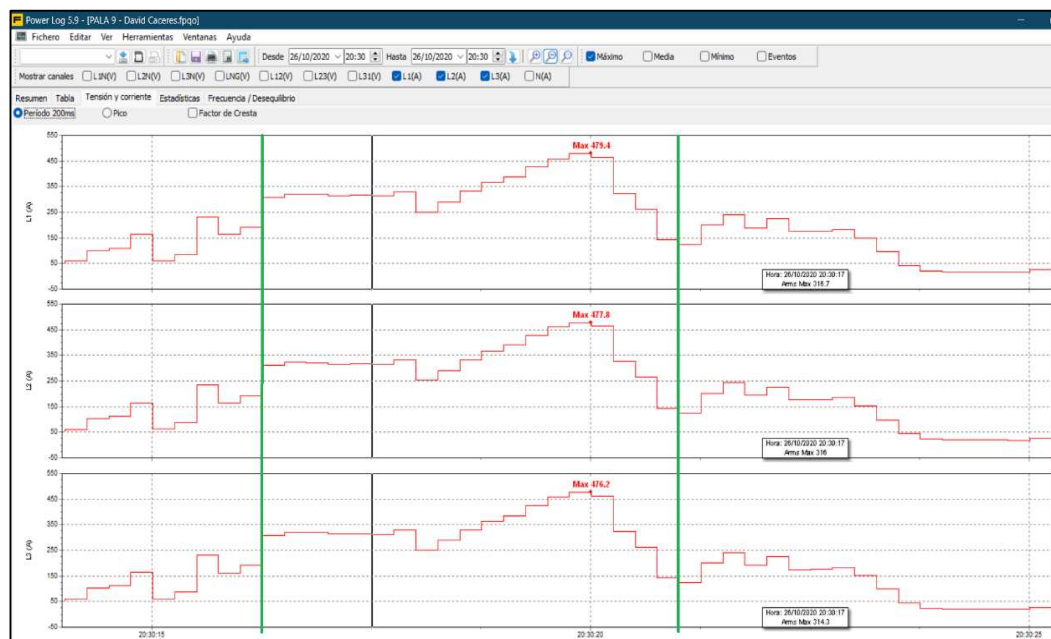
$$I_{pickup} = 182.4 A$$

Para un análisis adecuado de coordinación de protecciones, se considera el tiempo de despeje de falla cuando la pala N.º 09 alcanza su corriente pico

máxima de operación, cuya duración fue medida en un periodo mínimo de 250 milisegundos, según las capacidades del analizador de redes empleado.

Figura 10:

Corriente máxima RMS – Pala 09 P&H 4100XPC – Software Power Log.



Nota. La figura muestra la gráfica de lectura de corriente de la pala N.º 09 P&H 4100 XPC. La figura fue obtenida del software Power Log de los analizadores de redes Fluke 435 y 438. Elaboración propia.

- Se toma 19 periodos de 250 milisegundos para la corriente máxima de la pala N.º 09 P&H 4100XPC.
- Desde el periodo “T-10” hasta el periodo “T-15” la corriente va creciendo constantemente hasta llegar al valor máximo de 479.4 amperios en la fase A, este lapso dura 1.25 seg.

Se calcula teóricamente el tiempo de despeje de falla para una corriente máxima de 479.4 amperios a la cual llegó la pala N.º. 09. Para ello se utiliza la fórmula anteriormente mencionada, con las constantes sacadas del manual del relé SEL 751A.

Figura 11:

Fórmulas de tipo de curvas – relé SEL 751.

Curve Type	Operating Time	Reset Time	Figure
C1 (Standard Inverse)	$t_p = TD \cdot \left(\frac{0.14}{M^{0.02} - 1} \right)$	$t_r = TD \cdot \left(\frac{13.5}{1 - M} \right)$	Figure 4.15
C2 (Very Inverse)	$t_p = TD \cdot \left(\frac{13.5}{M - 1} \right)$	$t_r = TD \cdot \left(\frac{47.3}{1 - M} \right)$	Figure 4.16
C3 (Extremely Inverse)	$t_p = TD \cdot \left(\frac{80}{M^2 - 1} \right)$	$t_r = TD \cdot \left(\frac{80}{1 - M} \right)$	Figure 4.17
C4 (Long-Time Inverse)	$t_p = TD \cdot \left(\frac{120}{M - 1} \right)$	$t_r = TD \cdot \left(\frac{120}{1 - M} \right)$	Figure 4.18
C5 (Short-Time Inverse)	$t_p = TD \cdot \left(\frac{0.05}{M^{0.04} - 1} \right)$	$t_r = TD \cdot \left(\frac{4.85}{1 - M} \right)$	Figure 4.19
where: t_p = operating time in seconds (see Note on page 4.22) t_r = electromechanical induction—disk emulation reset time in seconds (if you select electromechanical reset setting) TD = time-dial setting M = applied multiples of pickup current [for operating time (t_p), $M > 1$; for reset time (t_r), $M \leq 1$]			

Nota. La figura muestra las fórmulas para el cálculo de tiempo de operación de todos los tipos de curvas definidos en el relé 751A. La imagen fue tomada del manual “SEL 751A” proporcionado por el área de Electricidad Mina (comunicación personal, 05 de marzo del 2020).

Para la curva C2 (Very Inverse), las constantes son: A: 13.5, B: 1, D: 0, E: 1.

$$\text{Top} = \left[\frac{A}{\left(\frac{I_{falla}}{I_{pickup}} \right)^B - 1} + D \right] * \left(\frac{\text{Dial}}{E} \right)$$

$$\text{Top} = \left[\frac{13.5}{\left(\frac{479.4}{182.4} \right)^1 - 1} \right] * \left(\frac{1.5}{1} \right)$$

$$\text{Top} = [8.2913] * \left(\frac{1.5}{1} \right)$$

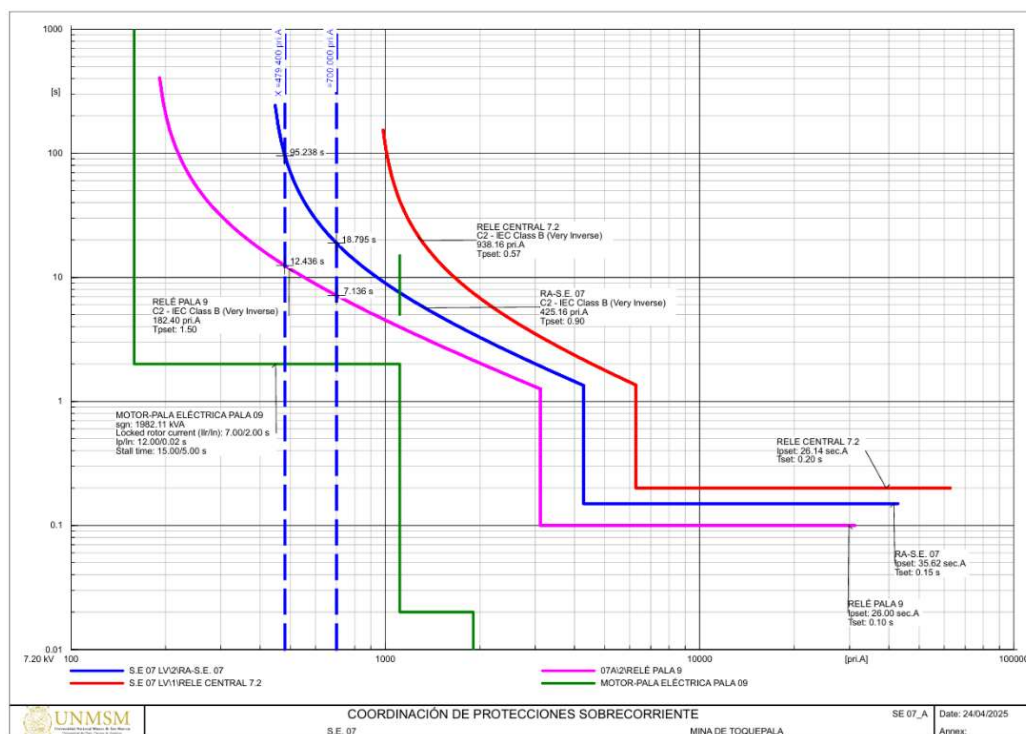
$$\text{Top} = 12.43 \text{ seg}$$

A continuación, se presenta la gráfica obtenida en el programa DIgSILENT Power Factory, en la cual se observa un tiempo de operación de 12.43

segundos para una corriente de 479.4 amperios, y un tiempo de 7.13 segundos correspondiente a una corriente de 700 amperios registrada por la pala N.º 09.

Figura 12:

Corriente máxima Pala Nro. 09 – 51P – S.E. 07



Nota. La figura muestra la gráfica de coordinación de protecciones de sobrecorriente en 7.2 kV de la S.E. 07. La figura fue obtenida del software de simulación Digsilent Power Factory, y elaborada a partir de toda la información recabada previamente. Elaboración propia.

Sobrecorriente tiempo definido 50P – relé switch house N.º 24 - 7.2 kV – Pala N.º 09.

El resultado de la corriente de cortocircuito es de 3.329kA, dicho valor se obtuvo al realizar una falla trifásica en los bornes de llegada de la pala N.º 09 por lo que dicho valor será multiplicado por el 80% del valor de la corriente de cortocircuito trifásica transitoria.

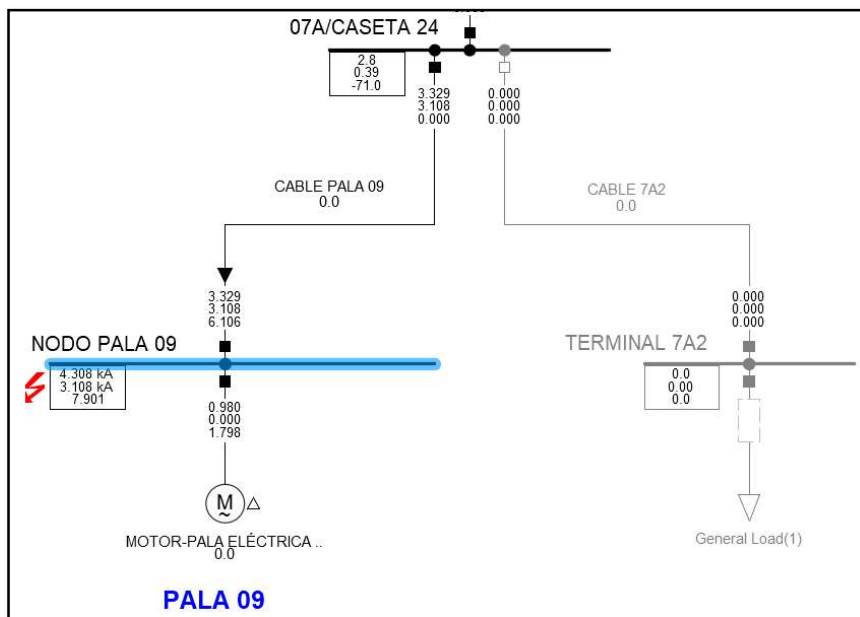
$$I_{pickup} = (80\%) \times I_{cc3\phi}$$

$$I_{pickup} = (80\%) \times 3329A$$

$$I_{pickup} = 2663.2 A$$

Figura 13:

Falla trifásica en entrada de pala Nro. 09



Nota. La figura muestra la simulación de cortocircuito trifásico franco en los bornes de entrada de la pala N.º09. La figura fue obtenida del software de simulación Digsilent Power Factory. Elaboración propia.

3.6 RESULTADO DE LA ACTIVIDAD

Teniendo todos los datos y consideraciones necesarias para realizar nuestros ajustes de coordinación de protecciones, tanto para sobrecorriente de tiempo inverso e instantáneo, se procederá a mostrar nuestra propuesta de ajustes que serán introducidos a los relés de sobrecorriente de todas las Switch House y subestaciones eléctricas móviles.

Tabla 6:

Ajuste de protección de sobrecorriente general.

AJUSTES PROTECCIÓN GENERAL DE SOBRECORRIENTE

CARGAS ELÉCTRICAS				RELÉ DE PROTECCIÓN				FUNCIÓN 51P SOBRECORRIENTE INVERSO				FUNCIÓN 50P SOBRECORRIENTE INSTANTÁNEO			
ITEM	PALA O PERFORADOR A ELÉCTRICA	Modelo	SWITCH HOUSE	MARCA	MODELO	C.T.	FUNCIÓN	TRIP	Pickup Primario (A)	Pickup Secundario (A)	TIME DIAL	CURVA	Pickup Primario (A)	Pickup Secundario (A)	Tiempo de actuación (ms)
1	Pala	P&H 4100XPC	24	SEL	751	600/5	Overcurrent	Phase	1.520	182.40	1.5	C2-IEC CLASS B (Very Inverse)	22.20	2664.00	50
2	Pala	P&H 4100A	07B	SEL	751	600/5	Overcurrent	Phase	1.520	182.40	1.5	C2-IEC CLASS B (Very Inverse)	22.20	2664.00	50
4	Pala	BUCYRUS 495BI	09B,06	SEL	751	600/5	Overcurrent	Phase	1.020	122.40	1	C2-IEC CLASS C (Extremely Inverse)	14.46	1735.00	40
5	Pala	BUCYRUS 495HR	07, 20,23, 18	SEL	751	600/5	Overcurrent	Phase	1.010	121.20	1	C3 - IEC CLASE C (EXTREMELY INVERSE)	19.73	2367.20	40
5	Perforadora	P&H 320XPC	16, 08, 04, 11, 22	SEL	751	600/5	Overcurrent	Phase	0.900	72.00	1.5	C3 - IEC CLASE C (EXTREMELY INVERSE)	24.26	1940.80	30
6	Perforadora	BUCYRUS 49HR	09B, 09, 02	SEL	751	600/5	Overcurrent	Phase	0.630	75.60	1.3	C3 - IEC CLASE C (EXTREMELY INVERSE)	35.97	4800.00	30
7	Perforadora	BUCYRUS 49RIII	17, 20	SEL	751	600/5	Overcurrent	Phase	0.620	74.40	1	C3 - IEC CLASE C (EXTREMELY INVERSE)	19.16	2299.20	30
8	Perforadora	MD 6640	10, 09	SEL	751	600/5	Overcurrent	Phase	0.630	75.60	1.5	C3 - IEC CLASE C (EXTREMELY INVERSE)	20.58	2469.60	30
9	Perforadora	P&H 120A	07B	SEL	751	600/5	Overcurrent	Phase	0.630	75.60	1.3	C2-IEC CLASS B (Very Inverse)	23.78	2853.60	50
ITEM	RELÉ	SALIDA	UBICACIÓN	MARCA	MODELO	C.T.	FUNCIÓN	TRIP	Pickup Primario (A)	Pickup Secundario (A)	TIME DIAL	CURVA	Pickup Primario (A)	Pickup Secundario (A)	Tiempo de actuación (ms)
1	RELÉ PBT2 69KV	SALIDA A	PBT2	SEL	351S	500/5	Overcurrent	Phase	4.370	437.00	1.16	C2 - IEC CLASE B (VERY INVERSE)	29.80	2980.00	500
2	RA-S.E.07	SALIDA A	S.E 07	SEL	351S	600/5	Overcurrent	Phase	3.543	425.16	0.9	C2 - IEC CLASE B (VERY INVERSE)	35.62	4274.40	200
3	RB-S.E.07	SALIDA B	S.E 07	SEL	351S	600/5	Overcurrent	Phase	3.543	425.16	0.9	C2 - IEC CLASE B (VERY INVERSE)	35.00	4200.00	200
4	R.CENTRAL 7.2	CENTRAL	LADO 7.2 KV	SEL	351S	1200/5	Overcurrent	Phase	3.900	936.00	0.85	C2 - IEC CLASE B (VERY INVERSE)	26.14	6273.60	350
5	R.CENTRAL 69	CENTRAL	LADO 69KV	SEL	351S	500/5	Overcurrent	Phase	0.980	98.00	1	C2 - IEC CLASE B (VERY INVERSE)	26.40	2640.20	350
6	RA-S.E.08	SALIDA A	S.E 08	SEL	351S	600/5	Overcurrent	Phase	3.540	424.80	0.34	C3 - IEC CLASE C (EXTREMELY INVERSE)	28.02	3362.40	150
7	RB-S.E.08	SALIDA B	S.E 08	SEL	351S	600/5	Overcurrent	Phase	3.540	424.80	0.34	C3 - IEC CLASE C (EXTREMELY INVERSE)	26.97	3362.40	150
8	R.CENTRAL 7.2	CENTRAL	LADO 7.2 KV	SEL	351S	1200/5	Overcurrent	Phase	3.880	931.20	0.14	C3 - IEC CLASE C (EXTREMELY INVERSE)	-	-	-
9	RA-S.E.09	SALIDA A	S.E 09	SEL	351S	600/5	Overcurrent	Phase	3.540	424.80	0.45	C3 - IEC CLASE C (EXTREMELY INVERSE)	16.35	1962.00	150
10	RB-S.E.09	SALIDA B	S.E 09	SEL	351S	600/5	Overcurrent	Phase	3.540	424.80	0.45	C3 - IEC CLASE C (EXTREMELY INVERSE)	27.26	3271.20	150
11	R.CENTRAL 7.2	CENTRAL	LADO 7.2 KV	SEL	351S	1200/5	Overcurrent	Phase	3.880	931.20	0.15	C3 - IEC CLASE C (EXTREMELY INVERSE)	-	-	-
12	RA-S.E.10 69KV	SALIDA A	GEOTECNICA TALLERES	SEL	351S	600/5	Overcurrent	Phase	2.347	281.64	0.18	C3 - IEC CLASE C (EXTREMELY INVERSE)	-	-	-
14	RA-S.E.11	SALIDA A	S.E 11	SEL	351S	600/5	Overcurrent	Phase	3.540	424.80	0.45	C3 - IEC CLASE C (EXTREMELY INVERSE)	18.20	2184.00	150
15	RB-S.E.11	SALIDA B	S.E 11	SEL	351S	600/5	Overcurrent	Phase	3.540	424.80	0.45	C3 - IEC CLASE C (EXTREMELY INVERSE)	22.24	26.68	150
16	R.CENTRAL 7.2	CENTRAL	LADO 7.2 KV	SEL	351S	1200/5	Overcurrent	Phase	3.880	931.20	0.15	C3 - IEC CLASE C (EXTREMELY INVERSE)	-	-	-
17	RA-S.E.12	SALIDA A	S.E 12	SEL	351S	600/5	Overcurrent	Phase	3.540	424.80	0.45	C3 - IEC CLASE C (EXTREMELY INVERSE)	23.52	2822.30	150
18	RB-S.E.12	SALIDA B	S.E 12	SEL	351S	600/5	Overcurrent	Phase	3.540	424.80	0.35	C3 - IEC CLASE C (EXTREMELY INVERSE)	40.00	4800.00	120
19	R-S.E.12	CENTRAL	LADO 7.2 KV	SEL	351S	1200/5	Overcurrent	Phase	3.880	931.20	0.15	C3 - IEC CLASE C (EXTREMELY INVERSE)	-	-	-
20	RA-S.E.13	SALIDA A	S.E 13	SEL	351S	600/5	Overcurrent	Phase	3.540	424.80	0.35	C3 - IEC CLASE C (EXTREMELY INVERSE)	30.98	3716.00	150
21	R-S.E.13	CENTRAL	LADO 7.2 KV	SEL	351S	1200/5	Overcurrent	Phase	3.880	931.20	0.15	C3 - IEC CLASE C (EXTREMELY INVERSE)	-	-	-
22	RA-S.E.15	SALIDA A	S.E 15	SEL	351S	600/5	Overcurrent	Phase	3.540	424.80	1	C2 - IEC CLASE B (VERY INVERSE)	25.35	3042.00	150
23	RB-S.E.15	SALIDA B	S.E 15	SEL	351S	600/5	Overcurrent	Phase	3.540	424.80	1	C2 - IEC CLASE B (VERY INVERSE)	30.76	3691.00	150
24	R-S.E.15	CENTRAL	LADO 7.2 KV	SEL	351S	1200/1	Overcurrent	Phase	3.900	936.00	0.85	C2 - IEC CLASE B (VERY INVERSE)	23.64	5673.00	350
25	R.CENTRAL 69	CENTRAL	LADO 69KV	SEL	351S	500/5	Overcurrent	Phase	0.980	98.00	1	C2 - IEC CLASE B (VERY INVERSE)	26.52	2652.00	350

Nota. La tabla muestra los ajustes de protección de sobrecorriente de todos los equipos, subestaciones que se encuentran operando en la mina Toquepala. Elaborado a partir de la información los resultados obtenidos del software Digsilent Power Factory. Elaboración propia.

CAPITULO IV: DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 DESCRIPCIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN

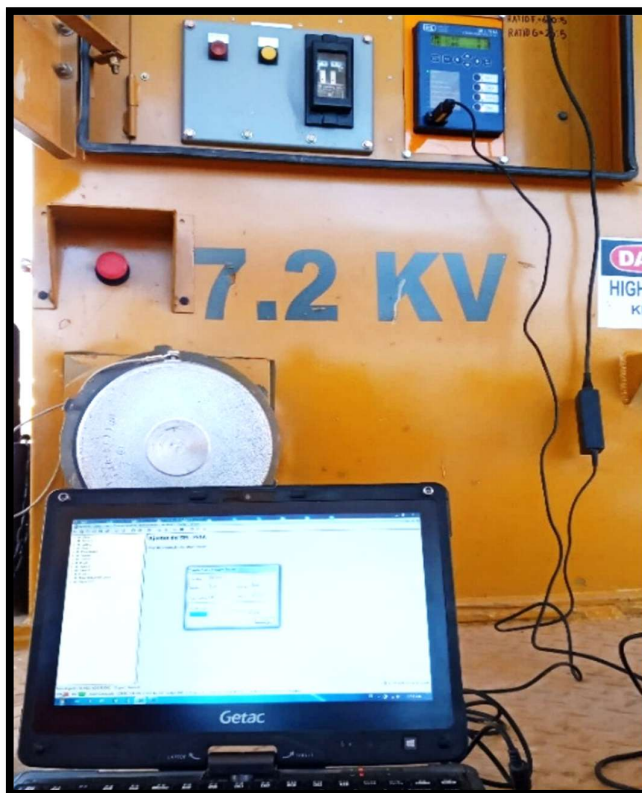
Durante la implementación del presente trabajo, se desarrolla un sistema efectivo para la configuración adecuada de los relés de sobrecorriente, considerando las características eléctricas específicas de cada carga en el tajo, ya sea una pala o una perforadora eléctrica. Esta implementación permite reducir la probabilidad de paradas inesperadas de estos equipos críticos que operan en mina, causadas por configuraciones inadecuadas de protección.

Como paso final del presente análisis, se introdujeron los ajustes del relé simulado en la switch house N.º 24, la cual alimenta eléctricamente a la pala N.º 09. Para ello, se utiliza el software específico del relé SEL 751 “acSELerator QuickSet”, el cual permite cargar todos los ajustes previamente simulados y verificar su operatividad. Este proceso garantiza que la pala funcione de manera correcta y continua, asegurando una adecuada protección y un desempeño eficiente del equipo en campo.

Cabe mencionar que el ajuste de coordinación de protecciones en los demás equipos se realiza de manera paulatina, debido a la limitada disponibilidad para detener su operación. Para ello, fue necesario presentar una programación al área de Electricidad Mina, la cual fue registrada en el sistema SAP, con el objetivo de efectuar los cambios de ajustes en todos los relés de forma programada y así no interrumpir el proceso operativo de las cargas que se encuentran en funcionamiento dentro de la mina.

Figura 14:

Introducción de ajustes a relé SEL 751



Nota. La figura muestra la introducción de los parámetros de ajuste en la switch house N° 24 en donde está conectada la pala N° 09. La fotografía fue tomada como registro durante las inspecciones en el taller de alta tensión (comunicación personal, 10 de diciembre del 2020).

4.2 EVALUACIÓN ECONÓMICA

Se presenta la evaluación económica, en la cual se procede a detallar la inversión realizada durante el período en que se desarrolló el presente trabajo. Para ello, se incluye a continuación un cuadro que muestra los gastos incurridos durante la ejecución del análisis, tales como servicios de mano de obra, insumos, suministro de equipos de medición, software de simulación y equipos de protección personal.

Tabla 7:*Inversión monetaria*

INVERSIÓN MONETARIA							
ITEM	DESCRIPCIÓN	CANT.	UNIDAD	MONTO UNITARIO		TOTAL	
1	SERVICIOS – MANO DE OBRA						
1.1	Ingeniero Electricista	10	MES	S/	6,000.00	S/	60,000.00
1.2	Becario	10	MES	S/	1800.00	S/	18000.00
1.3	Técnico Electricista 2	5	MES	S/	4,500.00	S/	22,500.00
1.4	Técnico Electricista 3	3	MES	S/	4,500.00	S/	13,500.00
2	INSUMOS						
2.1	Combustible	150	GL	S/	17.00	S/	2,550.00
2.2	Alimentación	300	DIAS	S/	60.00	S/	18,000.00
3	EQUIPOS						
3.1	Suministros de Analizador de Redes Fluke 435 - Series II	1	UND	S/	19,000.00	S/	19,000.00
3.2	Suministro de Analizador de Redes Fluke 438 - Series II	1	UND	S/	35,500.00	S/	35,500.00
3.3	Suministro de Movilidad - Alquiler	4	DIAS	S/	200.00	S/	800.00
3.4	Suministro de Laptop	1	UND	S/	3,500.00	S/	3,500.00
3.5	Suministro Intercomunicador – radio.	4	UND	S/	500.00	S/	2,000.00
3.6	Suministro Multímetro - Fluke	1	UND	S/	1,200.00	S/	1,200.00
3.7	Suministro Pinza Amperimétrica - Fluke	1	UND	S/	1,800.00	S/	1,800.00
3.8	Alquiler Omicron CPC100 Sibano (maleta de prueba) - alquiler	5	DÍA	S/	2,500.00	S/	12,500.00
4	EPPS – EQUIPOS DE PROTECCIÓN PERSONAL						
4.1	Guantes Dieléctricos	2	UND	S/	90.00	S/	180.00
4.2	Zapatos Dieléctricos	4	UND	S/	800.00	S/	3,200.00
4.3	Chaleco Reflectivo	4	UND	S/	80.00	S/	320.00
4.4	Casco - MSA	4	UND	S/	60.00	S/	240.00
4.5	Barbiquejo	4	UND	S/	10.00	S/	40.00
4.6	Orejeras - MSA	4	UND	S/	129.00	S/	516.00
4.7	Lentes de protección	4	UND	S/	35.00	S/	140.00
4.8	Mascarillas KN95	15	CAJA	S/	80.00	S/	1,200.00
4.9	Respirador	4	UND	S/	125.00	S/	500.00
TOTAL, DE INVERSIÓN							S/ 217 186.00

Nota. La tabla muestra el detalle de todos los costos que permitieron la realización del presente trabajo. Elaborado a partir de la información brindada por personal en mina. (comunicación personal, 15 de diciembre del 2020).

Para llevar a cabo una evaluación económica adecuada en el presente trabajo, se procede a estandarizar la pérdida económica generada por una hora de paralización de una pala o perforadora eléctrica en operación. Cabe destacar que la pérdida asociada a la paralización de una pala eléctrica es considerablemente mayor que la correspondiente a una perforadora; por ello, en el presente análisis se toma como referencia las pérdidas ocasionadas por la interrupción operativa de una pala eléctrica. Estas pérdidas económicas fluctúan entre S/ 45,600.00 y S/ 190,000.00, según las siguientes condiciones:

- a) El tamaño del cucharón influye en la cantidad de mineral que puede extraer en una hora de operación.
- b) La zona donde está operando la pala eléctrica influye en el costo de producción, ya que en las distintas fases de operación (zonas) el nivel de concentrado de cobre puede ser de mayor o menor cantidad.
- c) El tipo de pala eléctrica influye en la velocidad de la extracción del mineral.
- d) El gasto de mano de obra del personal de taller de alta tensión y de operaciones, dependerá de que tan lejos este la subestación eléctrica o switch house del taller.
- e) El estado mecánico y eléctrico influye en la velocidad de extracción de mineral.

Se considerará el peor escenario de pérdida económica generado por la paralización de una pala eléctrica, tomando como referencia la pala N.º 09 P&H 4100 XPC. Esta unidad, equipada con el cucharón de mayor tamaño, se encontraría operando en la fase N.º 01, ubicada en el fondo de mina, donde se halla el concentrado de cobre de mayor pureza. En dicho contexto, la pérdida económica aproximada ascendería a S/ 190,000.00.

Como conclusión, al realizar un adecuado estudio de coordinación de protecciones, es posible recuperar la inversión realizada en el presente estudio en un lapso aproximado de una hora y media de operación continua, evitando la paralización de la mencionada pala eléctrica.

CAPITULO V: CONCLUSIONES

1. Se concluye que para asegurar la continuidad del suministro de energía eléctrica para las palas y perforadoras se realiza el ajuste de coordinaciones de protecciones de sobrecorriente entre el 120% al 130% del valor de corriente nominal de cada carga en mina para la coordinación de tiempo inverso y el 80% al 90% de la corriente subtransitoria de una falla de cortocircuito trifásica, para el ajuste de coordinación de protecciones de tiempo definido, el cual nos permite obtener los ajustes correctos para la configuración de los relés de sobrecorriente.
2. Los costos operativos se redujeron de manera significativa al haberse asegurado la continuidad del suministro eléctrico para las palas y perforadoras en operación. Por ejemplo, la pérdida asociada a la interrupción del suministro eléctrico de la pala N.º 09 puede alcanzar hasta S/ 190,000.00. Mediante un correcto ajuste de las protecciones, se logra minimizar la frecuencia de dichas interrupciones. Cabe resaltar que la inversión para poder realizar el presente trabajo fue de S/ 217,186.00.
3. Los equipos y componentes eléctricos reducirán su vulnerabilidad frente a daños ocasionados por corrientes de cortocircuito, ya sean de origen operativo o atmosférico, gracias a la acción rápida y eficiente de los relés de sobrecorriente instalados en las switch house y S.E. móviles. Estos relés están diseñados para actuar oportunamente, evitando que las corrientes excedan los niveles de tolerancia permitidos por cada equipo. Un ejemplo de ello es la falla por cortocircuito trifásico registrada en los bornes del transformador de 7.2 kV de la S.E. N.º 07, cuyo valor alcanza los 7,842 amperios. La protección de tiempo instantáneo del relé fue configurada con un tiempo de actuación de 250 milisegundos, lo cual evitó que se produjera

un daño térmico en el transformador, el cual se habría presentado aproximadamente a los 3.77 segundos.

4. Los parámetros o ajustes de los relés de sobrecorriente fueron determinados a partir del análisis previo de flujo de carga y del estudio de cortocircuito. Por ejemplo, en el caso de la pala N.º 09, se toma como referencia el 120 % de su corriente nominal, equivalente a 151.55 amperios, obteniéndose así una corriente de arranque de 182.4 amperios para la coordinación por tiempo inverso. Asimismo, se considera el 80 % de la corriente de cortocircuito trifásica en los bornes de dicha pala, lo que arrojó una corriente de arranque de 2,663.2 amperios. Los valores correspondientes al time dial, el tipo de curva y la distancia entre curvas fueron también determinados como parte del presente trabajo.
5. Uno de los principales resultados de este estudio fue la reducción del riesgo de accidentes eléctricos para el personal minero, gracias a una coordinación efectiva de las protecciones, la cual permite una detección oportuna y una rápida solución de las fallas. Como ejemplo, los ajustes implementados en la pala N.º 09 presentan tiempos de actuación desde los 100 milisegundos, lo que permite un despeje rápido de la falla y reduce considerablemente los riesgos para el personal que labora en mina. Este avance contribuye de manera significativa al bienestar y la seguridad del personal operativo en la mina
6. Una vez finalizada la simulación, la empresa minera dispuso de formatos preestablecidos con tablas y gráficos dinámicos que facilitaron la obtención de los ajustes de coordinación de protecciones ante posibles modificaciones en la topología de la red eléctrica. Esto resulta especialmente útil, considerando que las palas y perforadoras suelen cambiar de ubicación con frecuencia, y que los trabajos de mantenimiento en las switch house pueden alterar los ajustes predeterminados en cada caseta.

CAPITULO VI: RECOMENDACIONES

1. Para garantizar el correcto funcionamiento del sistema de protección eléctrica del anillo mina Toquepala a lo largo del tiempo, se recomienda realizar una simulación de coordinación de protecciones en el software Digsilent PowerFactory cada vez que se presenten cambios significativos en la topología de la red o se incorporen nuevos equipos al sistema.
2. Para asegurar el correcto funcionamiento del sistema de protección eléctrica del anillo mina Toquepala a lo largo del tiempo, se recomienda realizar un mantenimiento periódico a todos sus componentes, tales como transformadores de distribución, transformadores de tensión y corriente, interruptores, relés, fusibles, entre otros.
3. Es recomendable implementar protocolos de supervisión continua de los niveles de corriente en los elementos eléctricos de vital importancia. Esto permite identificar cualquier desviación anómala y activar eficientemente los relés de sobrecorriente, con el objetivo de evitar posibles daños en los equipos y, a su vez, salvaguardar la integridad del personal involucrado.
4. Es fundamental brindar una formación técnica adecuada al personal del taller de Alta Tensión del área de Mantenimiento Mina, encargado de operar y mantener el sistema de protección eléctrica. De este modo, se asegurará una comprensión plena de la importancia de los relés de sobrecorriente, así como del uso correcto y seguro de estos dispositivos.

CAPITULO VII:

BIBLIOGRAFÍA

ANTHONY SAÚL CALDERÓN SANTANA. (2021). Análisis de calibración de los relés para mejorar el sistema de protección de configuración en anillo de la mina. Tesis de Grado en Ingeniería eléctrica. Universidad Nacional del Centro del Perú. Perú.
<https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/6914?show=full>

JEYSER ANTONY BERNILLA REYES. (2022). Modelamiento de un sistema de protección eléctrica en media tensión 13,8 – 22,9 kv para la empresa Agrobananas del Perú s.r.l. aplicando el software Digsilent. Tesis de Grado en Ingeniería mecánica eléctrica. Universidad Pedro Ruiz Gallo. Perú. <https://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/11015>

JULIO ADOLFO LAZO MORÓN. (2005). Coordinación de protección contra sobrecorriente en sistemas de distribución de media tensión. Tesis de grado en ingeniería mecánica eléctrica. Universidad de Piura. Perú.
<chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://pirhua.udep.edu.pe/backend/api/core/bitstreams/fb175a54-e7a6-459e-902f-fbb62315727b/content>

MOHAMED E. EI-HAWARY. (2008). Introduction to Electric Power Systems. United States Of America. Mohamed E. EI-Hawary, Series Editor (IEEE PRESS, Jhon Wiley y Sons Inc. publication. <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://content.e-bookshelf.de/media/reading/L-572358-383931e2fc.pdf>

ALEXANDRA VON MEIER. (2006). Electric Power Systems: A Conceptual Introduction. United States Of America, (IEEE PRESS, Jhon Wiley y Sons Inc. publication),
[https://gacbe.ac.in/images/E%20books/Electric%20Power%20Systems%20-%20A%20Conceptual%20Introduction%20-%20A.%20von%20Meier%20\(Wiley,%202006\).pdf](https://gacbe.ac.in/images/E%20books/Electric%20Power%20Systems%20-%20A%20Conceptual%20Introduction%20-%20A.%20von%20Meier%20(Wiley,%202006).pdf)

J. DUNCAN GLOVER, MULUKUTLA S. SARMA, Y THOMAS J. OVERBYE. (2008). Power System Analysis and Design. United States Of America. FIFTH EDITION, SI. [//elcom-team.com/Subjects/%D9%86%D8%AD%D9%84%D9%8A%D9%84%20%D8%A7%D9%86%D8%B7%D9%85%D8%A9%20%D8%A7%D9%84%D9%82%D9%88%D9%89/power-system-analysis-book%20\(5th-ed\).pdf](http://elcom-team.com/Subjects/%D9%86%D8%AD%D9%84%D9%8A%D9%84%20%D8%A7%D9%86%D8%B7%D9%85%D8%A9%20%D8%A7%D9%84%D9%82%D9%88%D9%89/power-system-analysis-book%20(5th-ed).pdf)

J. LEWIS BLACKBURN Y THOMAS J. DOMIN. (2014) Protective Relaying: Principles and Applications.
<https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/b16518/protective-relaying-lewis-blackburn-thomas-domin>

STEVEN W. BLUME. (2016, 26 de noviembre). Electric Power System Basics for the Nonelectrical Professional.
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781119180227>

A. WRIGHT, C. CHRISTOPOULOS. (2012). Electrical Power System Protection. Springer Science & Business Media.
https://books.google.com.pe/books/about/Electrical_Power_System_Protection.html?id=gHDdBwAAQBAJ&redir_esc=y

ROGER C. DUGAN, MARK F. MCGRANAGHAN, SURYA SANTOSO Y H. WAYNE BEATY. (2012). Electrical Power Systems Quality. McGraw Hill Professional.

https://books.google.com.pe/books/about/Electrical_Power_Systems_Quality_Third_E.html?id=h1iBVtbSel0C&redir_esc=y

LEMA CHILQUINGA, F. A., & VISCARRA CALERO, D. J. (2017, enero). Modelamiento de relés genéricos de sobrecorriente y de distancia utilizando lenguaje de simulación DigSILENT – DSL en el programa computacional Power Factory. Tesis de grado de ingeniería eléctrica. Escuela Politécnica Nacional.
<https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/16994?mode=full>

CARLOS J. ZAPATA. (2003). Coordinación de relés de sobrecorriente en sistemas radiales utilizando programación lineal. Escuela de Tecnología Eléctrica Universidad Tecnológica de Pereira.
<https://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/7399/4413>

PIMIENTA DUEÑAS, A.M. (2007). Conceptos Básicos De Máquinas Eléctricas. El Cid Editor. <https://elibro.net/es/lc/unapec/titulos/34441>

COMITÉ DE COOPERACIÓN ECONÓMICA DEL SISTEMA INTERCONECTADO – COES SINAC. (2018). Criterios de ajuste y coordinación de los sistemas de protección del SEIN.
<https://www.coes.org.pe/Portal/Operacion/Estudios/OperacionSEIN#>

SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, INC. (2002). SEL-351-0, -1, -2, -3, -4; Directional Overcurrent Relay Reclosing Relay Fault Locator, Instruction Manual. <https://selinc.com/products/351A/>

SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, INC. (2017). SEL-751 Relay, Feeder Protection Relay, Instruction Manual.
<https://selinc.com/products/351A/>

CAROLINA ESPINOZA, KATEREEN ROCHA, JUAN VALDEZ. (2013, 26 de junio). Informe “Bucyrus 49HR” Perforadora Eléctrica Para Pozos De

Tronadura. Universidad Tecnológica De Chile Instituto Profesional
Centro De Formación Técnica Calama.
<https://es.scribd.com/doc/175998620/bucyrus-49HR-Reparado-2>

KOMATSU, Komatsu Mining Corp. Group, P&H. (2018). 4100XPC AC-90
Especificaciones generales de la pala eléctrica de minería.
<https://www.komatsulatioamerica.com/colombia/productos/ph-4100xpc-ac-90/>

KOMATSU, Komatsu Mining Corp. Group, P&H, JOYGLOBAL INC. (2012).
320XPC Rotary Blasthole Drill Product Overview. <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://cdn.cranemarket.com/specifications/joy-global-p-h-drilling-rigs-spec-b593d4.pdf>

BUCYRUS INTERNATIONAL, INC. (2009). BUCYRUS 495HR Pala para
minería, manual de mantención y operación.
<https://www.maquinariaspesadas.org/blog/2335-manual-pala-electrica-495hr-bucyrus-operacion-mantenimiento-servicio>

ELECTROINTEGRA S.A.C. (2019). Levantamiento topográfico estudio y
análisis del sistema eléctrico anillo mina 69kv Toquepala

CABLES DE ENERGÍA Y DE TELECOMUNICACIONES S.A. - CENTELSA.
(2017, noviembre). Manual del electricista.
<https://es.slideshare.net/slideshow/manualdelelectrico2017ok/246488433>

ANEXOS

Anexo A: Mediciones de parámetros eléctricos de palas y perforadoras.

Figura A1:

Medición de corriente de pala N° 01 - P&H 4100A.

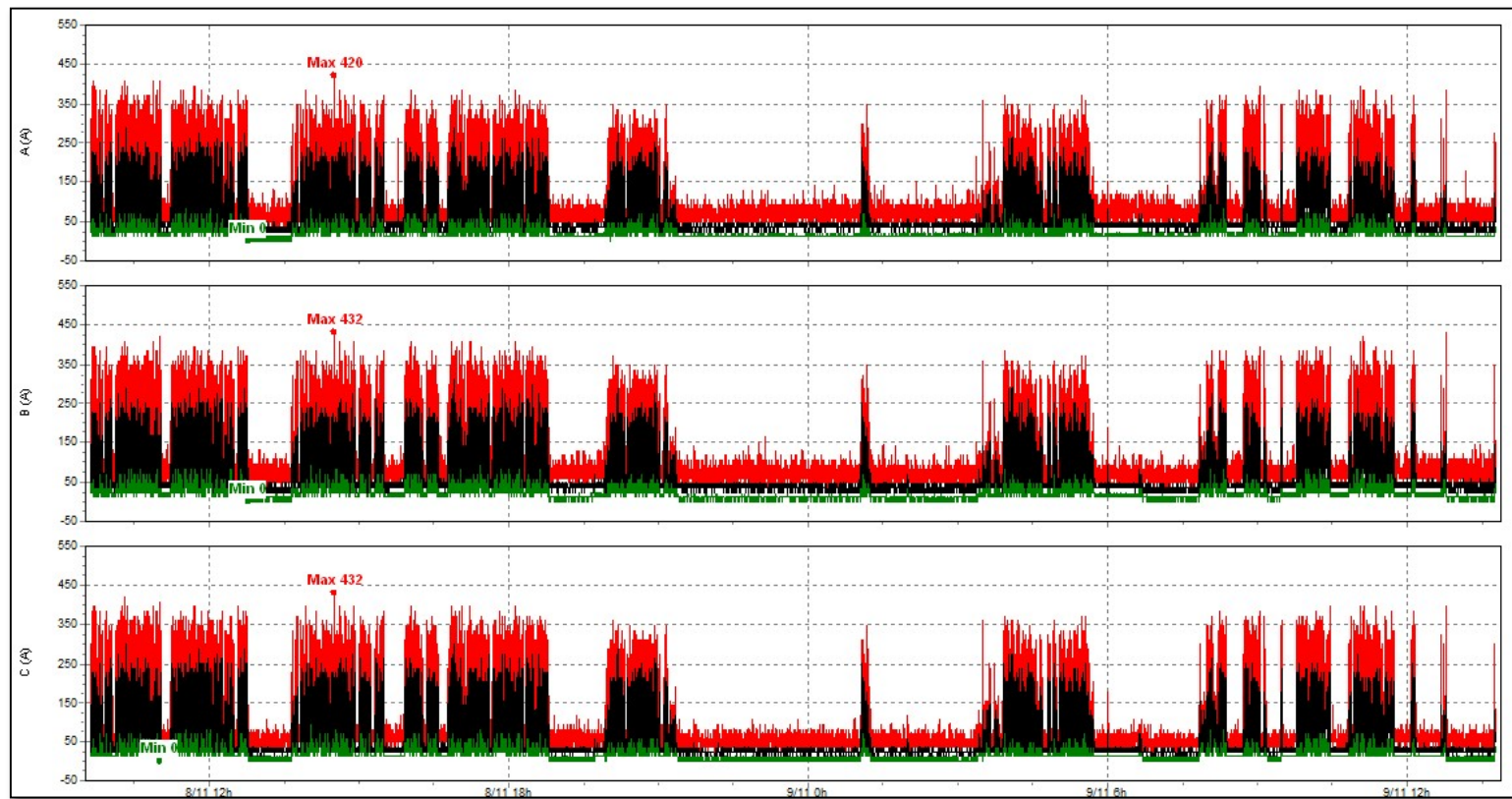


Figura A2:

Medición de corriente de pala N° 03 - BUCYRUS 495 BI.

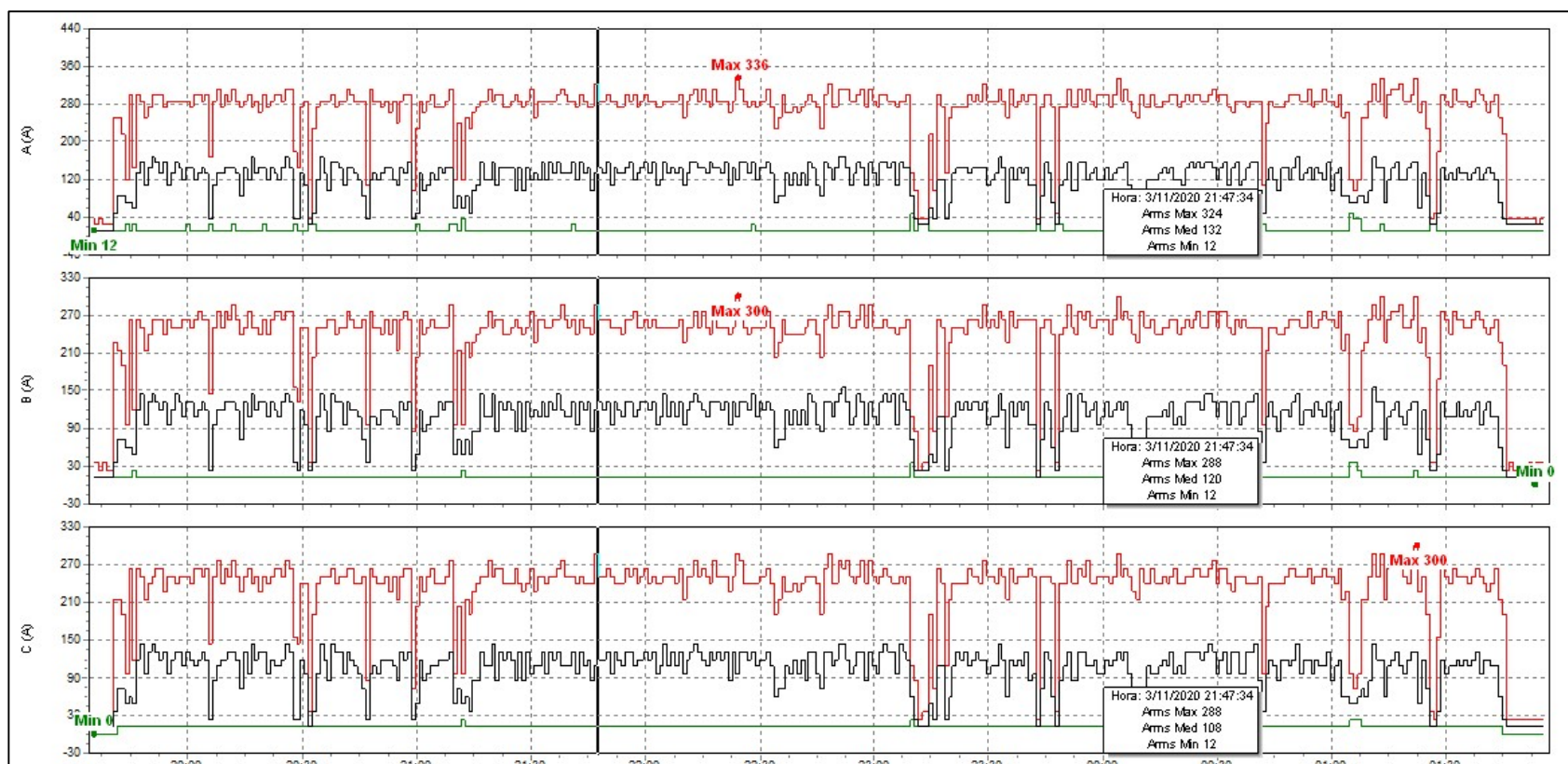


Figura A3:

Medición de corriente de pala N° 05 - BUCYRUS 495 HR.

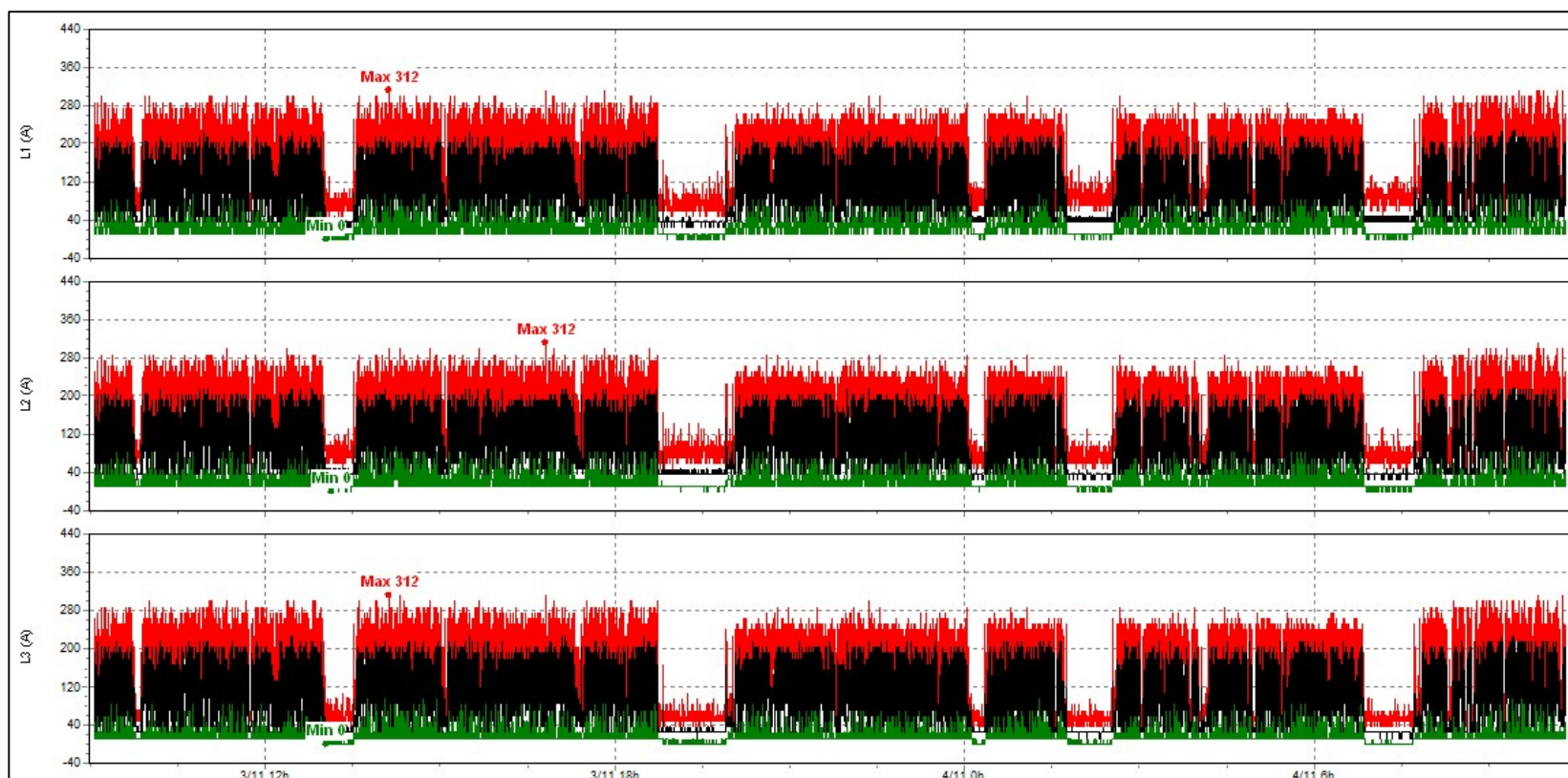


Figura A4:

Medición de corriente de pala N° 09 - P&H 4100XPC.

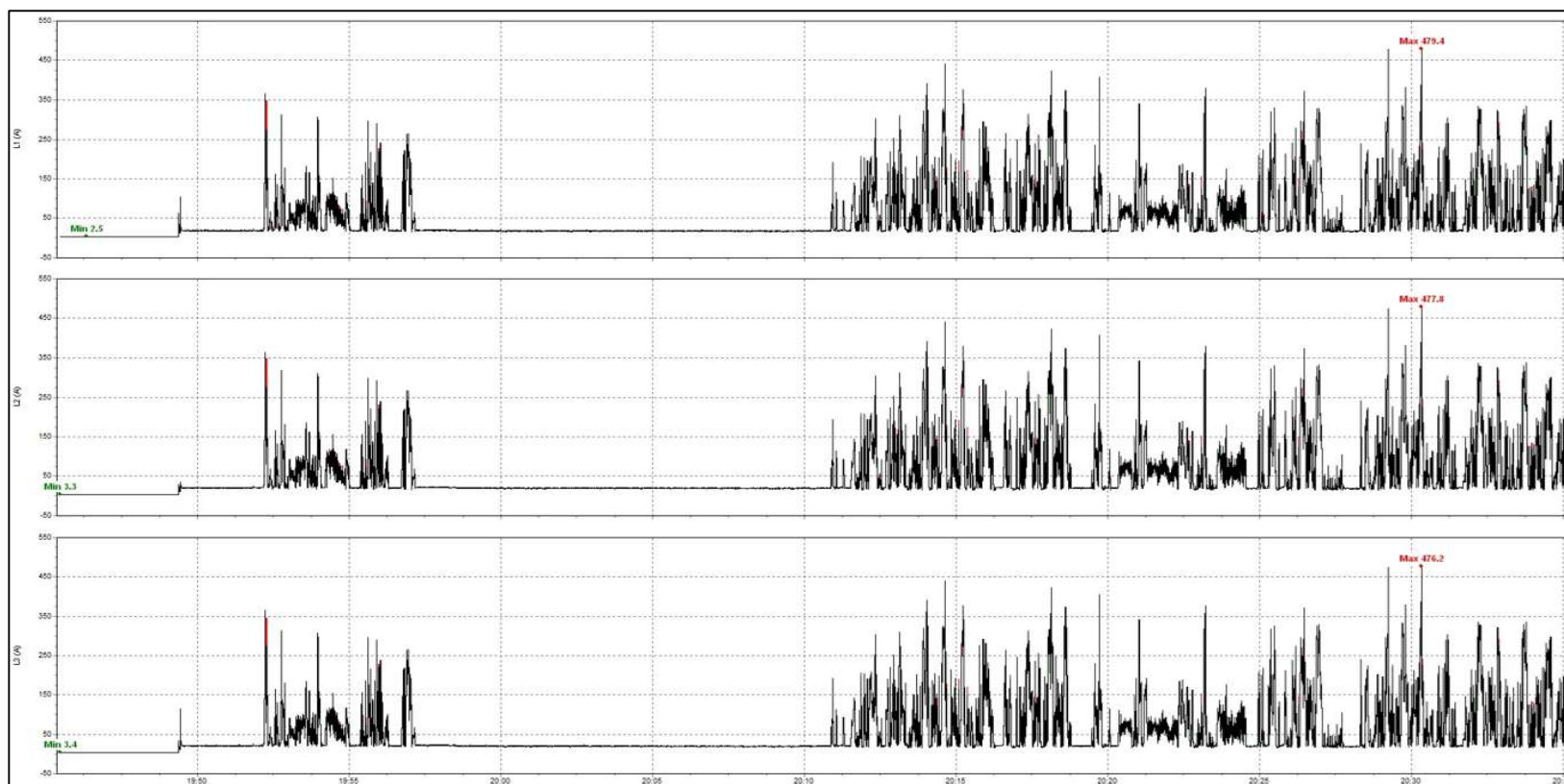


Figura A5:

Medición de corriente perforadora N°01 - P&H 120A.

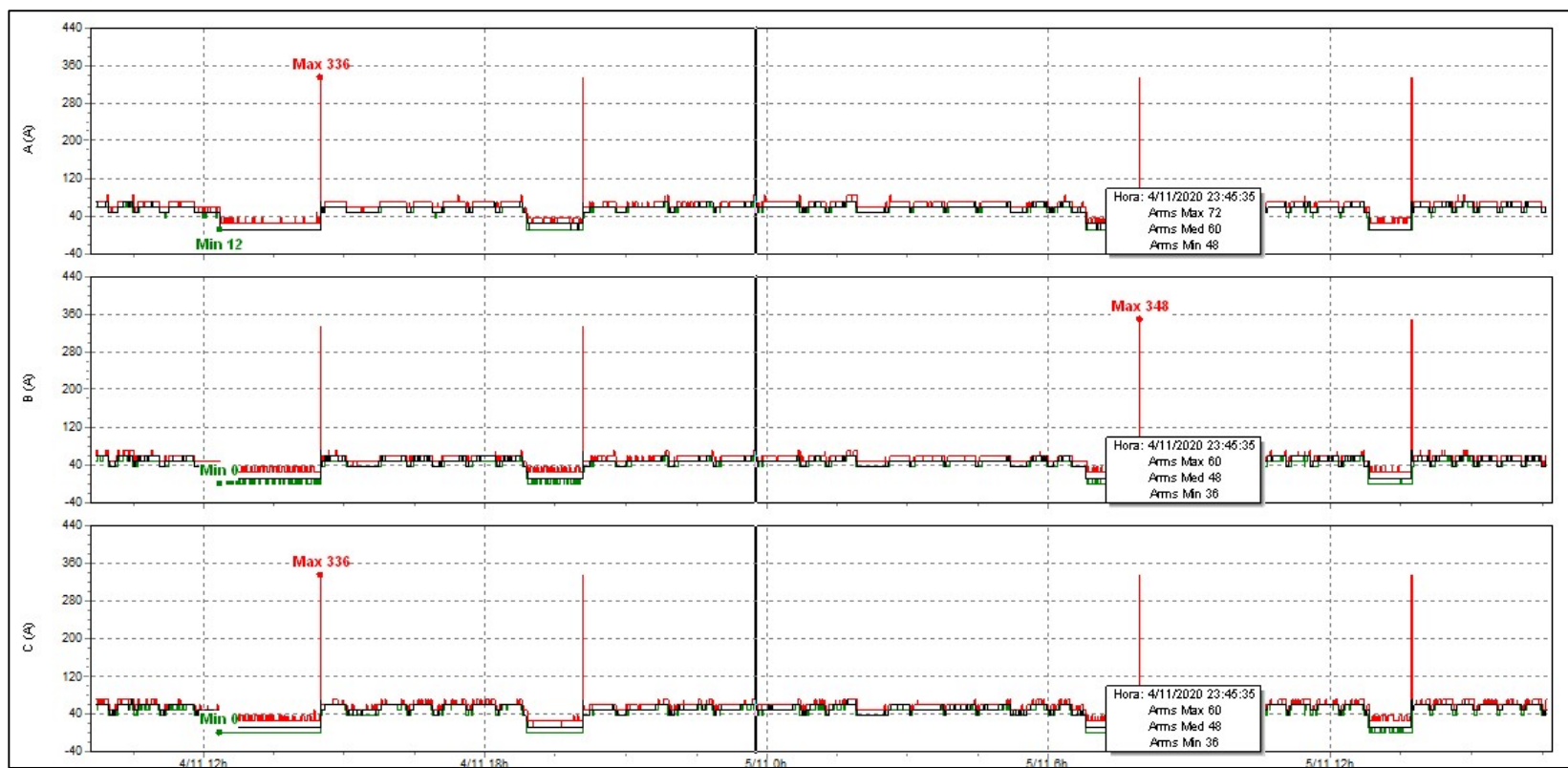


Figura A6:

Medición de corriente Perforadora N° 04 - BUCYRUS 49III.

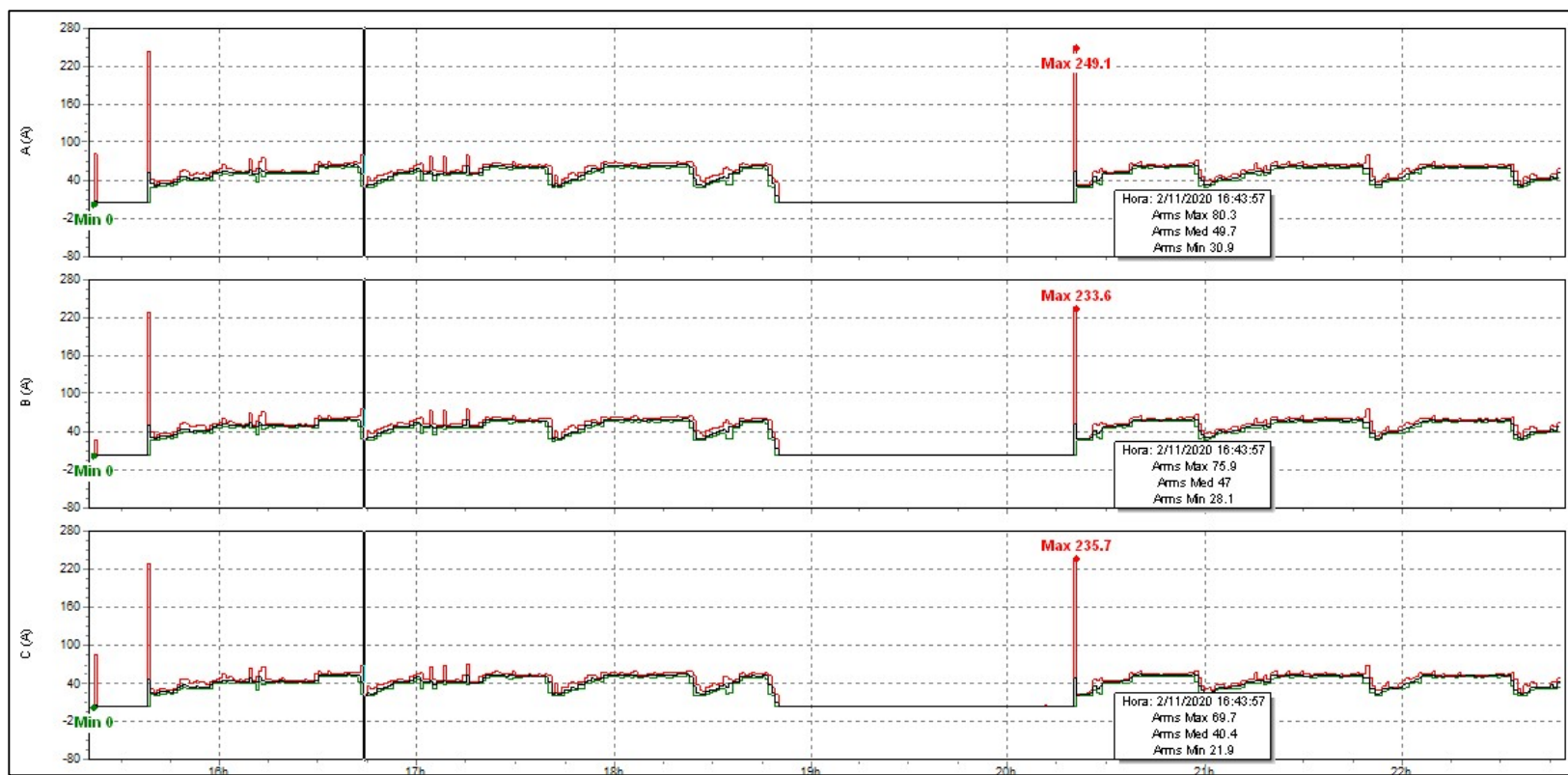


Figura A7:

Medición de corriente Perforadora N° 08 - BUCYRUS 49HR.

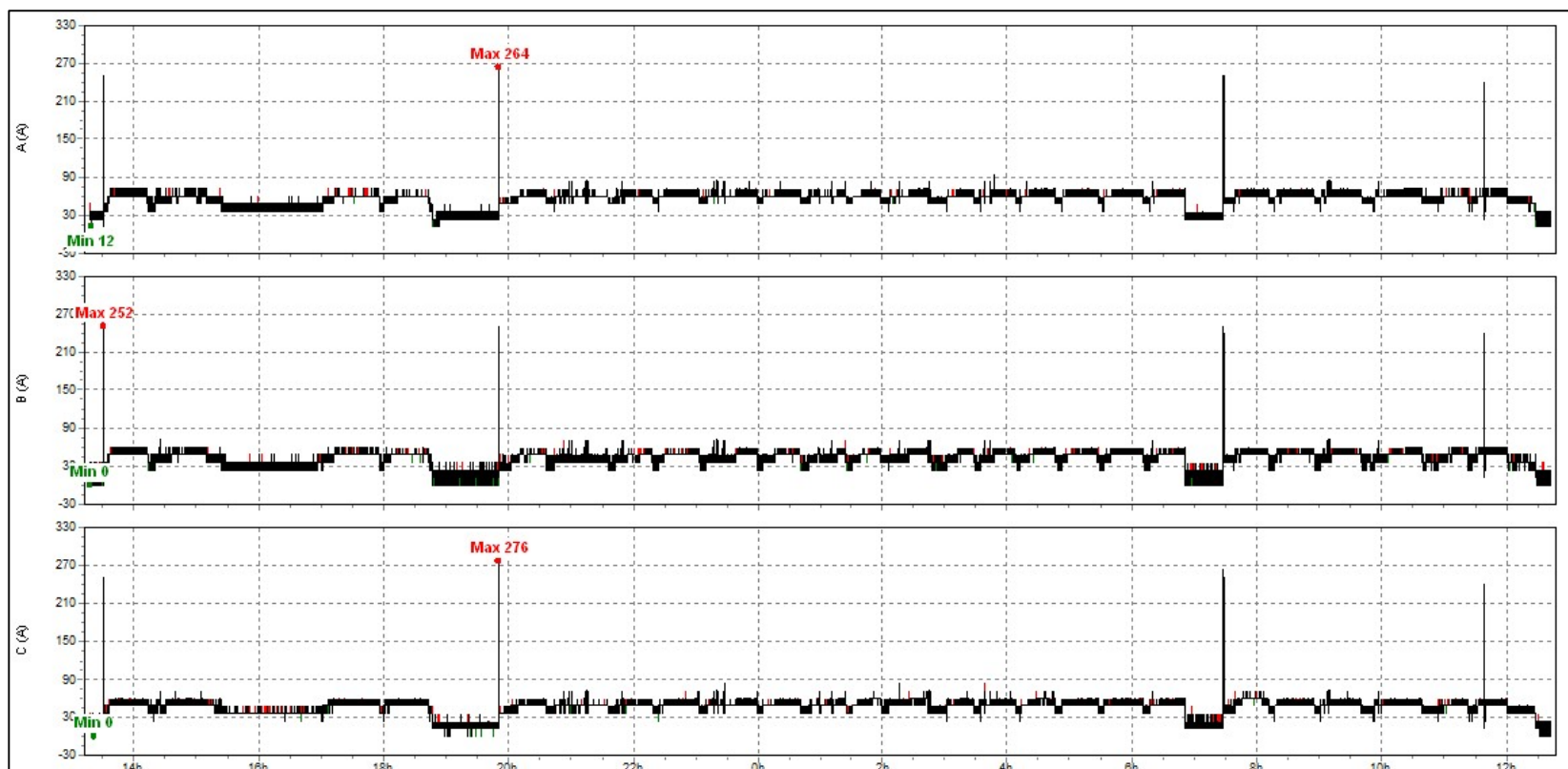


Figura A8:

Medición de corriente perforadora N° 11 - P&H 320XPC.

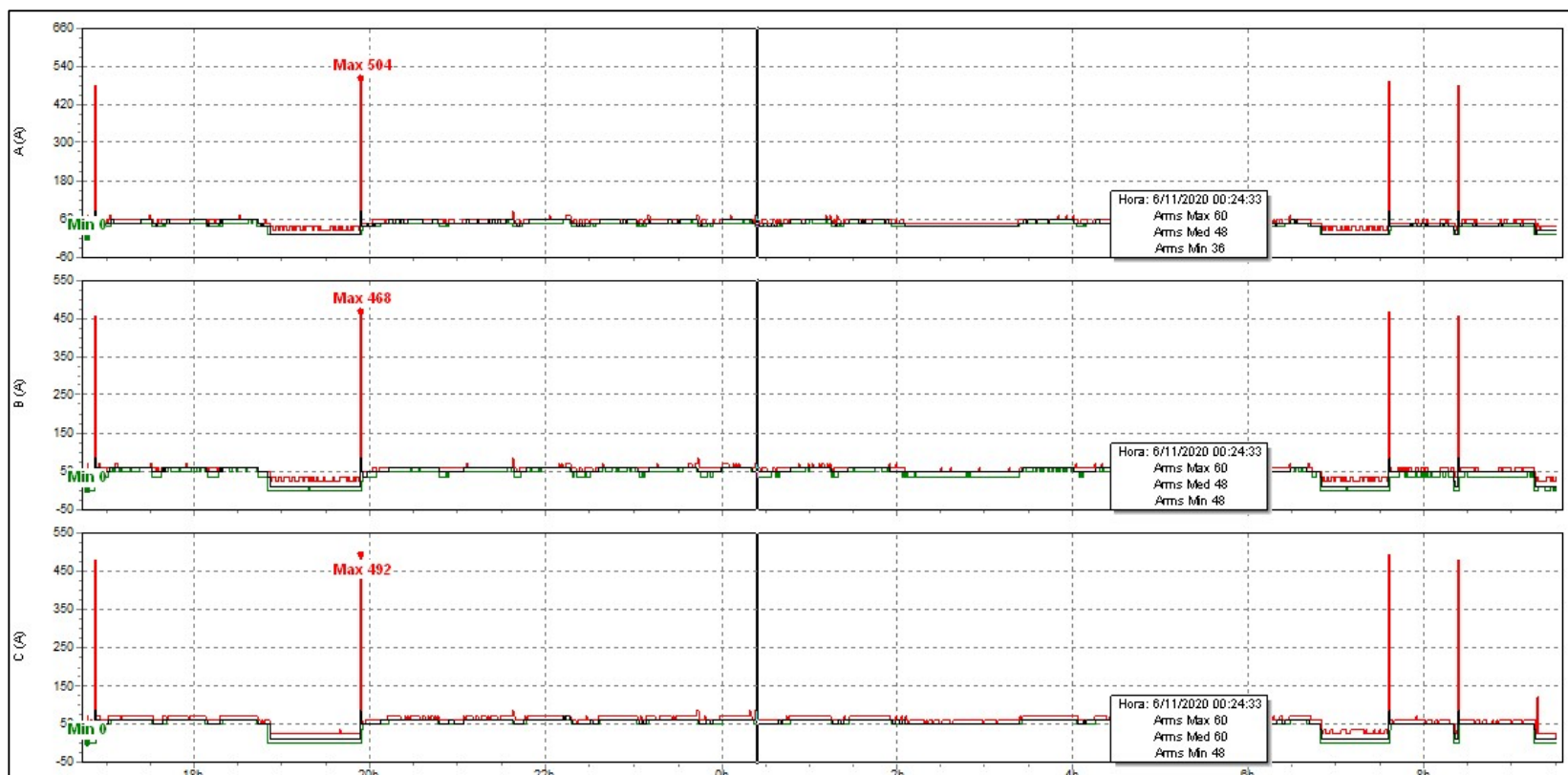
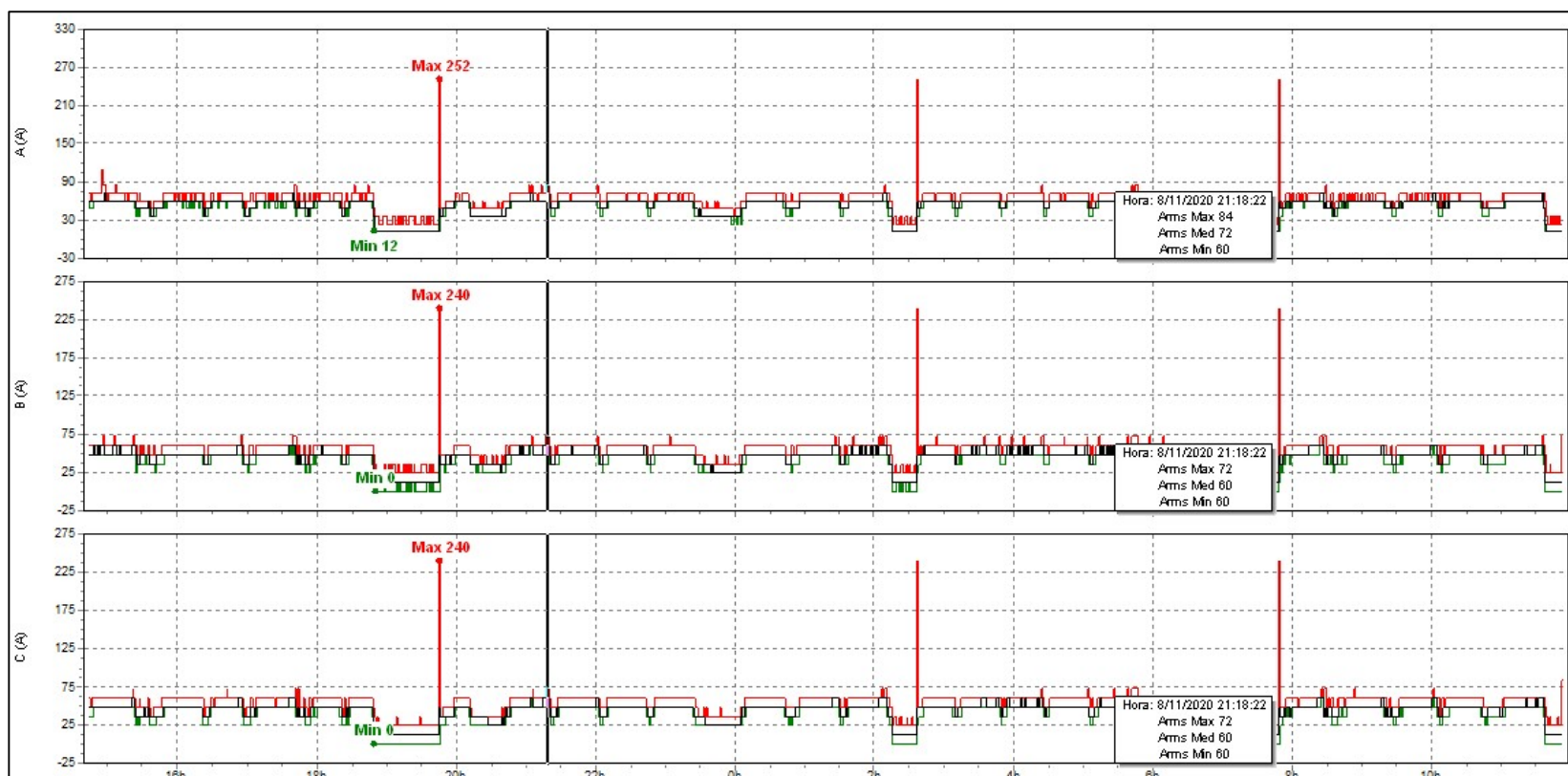


Figura A9:

Medición de corriente perforadora N° 18 - CAT MD6640.



Anexo B: Diagramas unifilares y flujos de carga de sistema eléctrico mina Toquepala.

Figura B1:

Análisis de flujo de carga – Anillo mina 69 Kv.

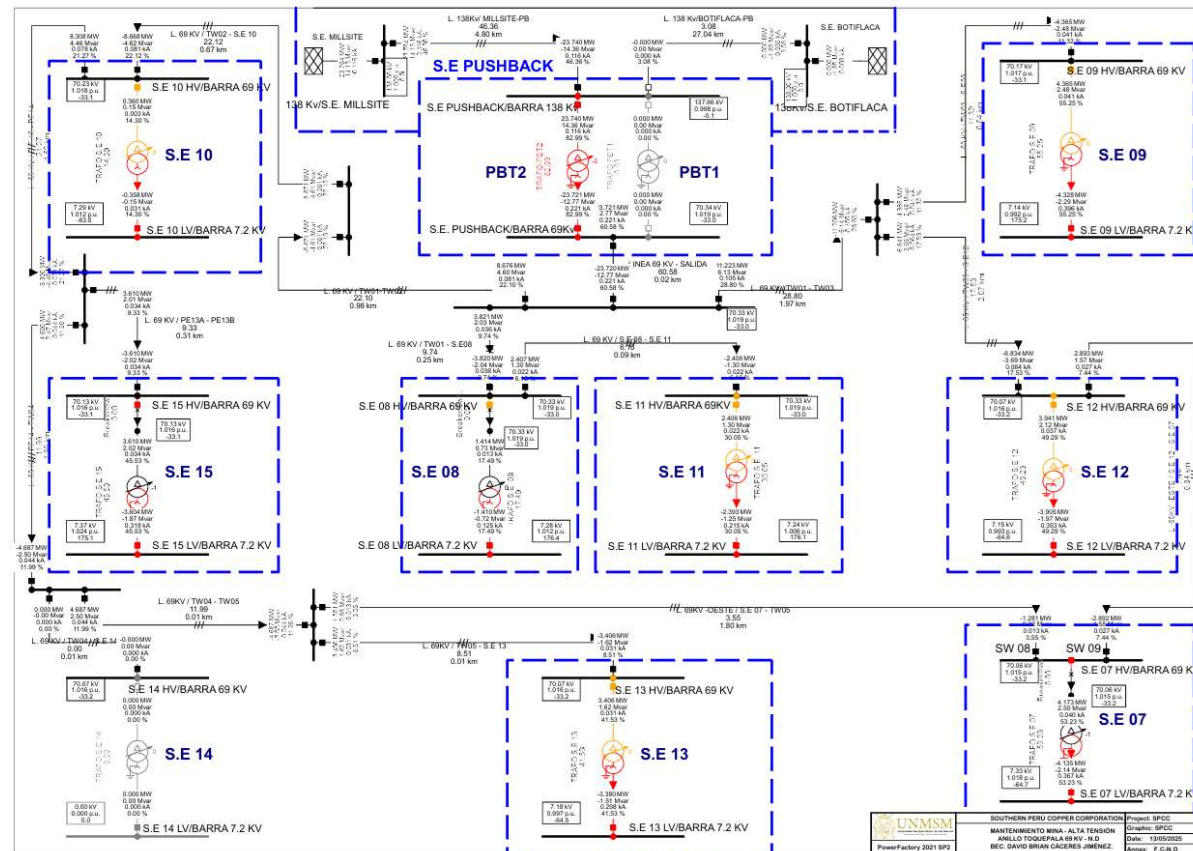


Figura B2:

Análisis de flujo de carga – S.E 07.

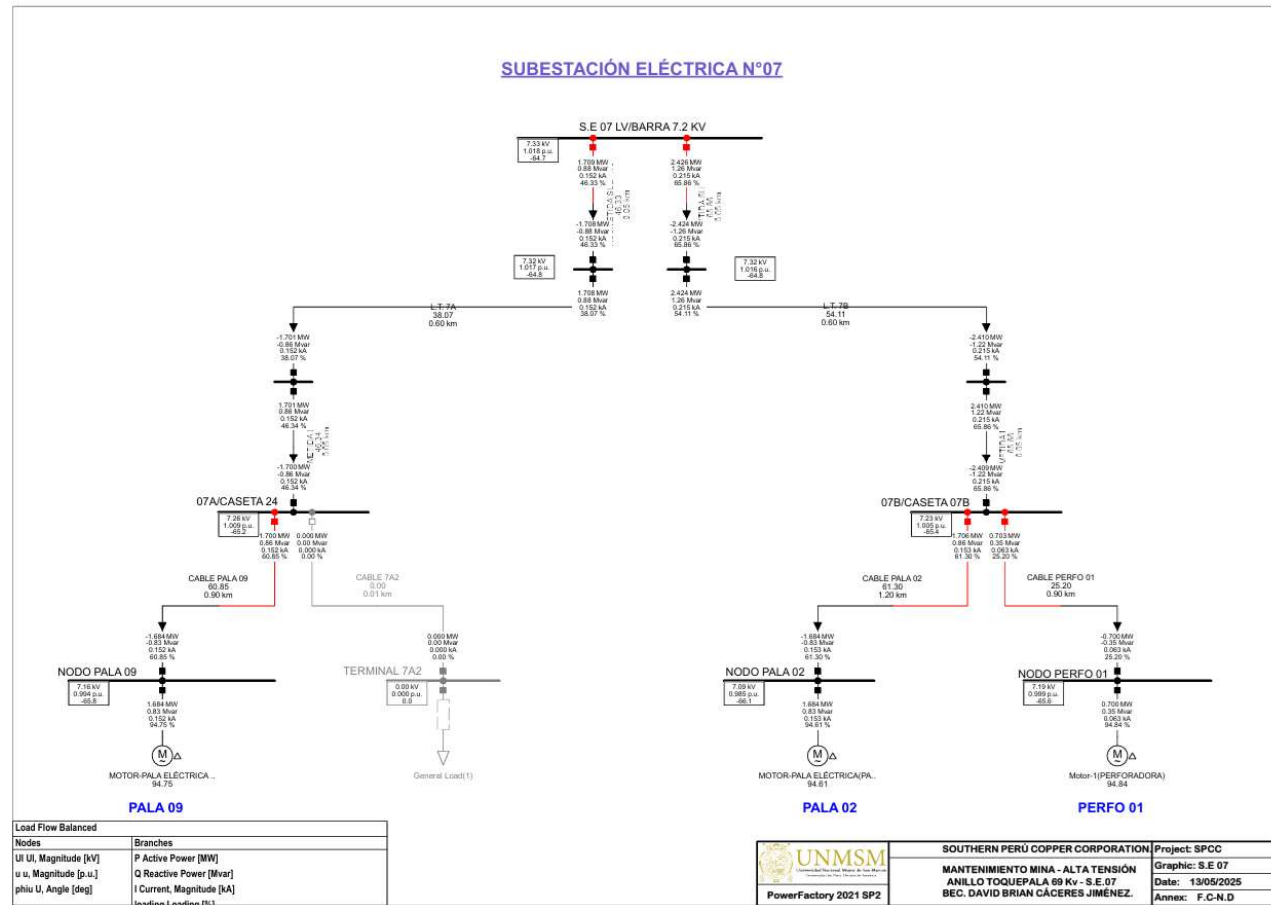


Figura B3:

Análisis de flujo de carga – S.E 08.

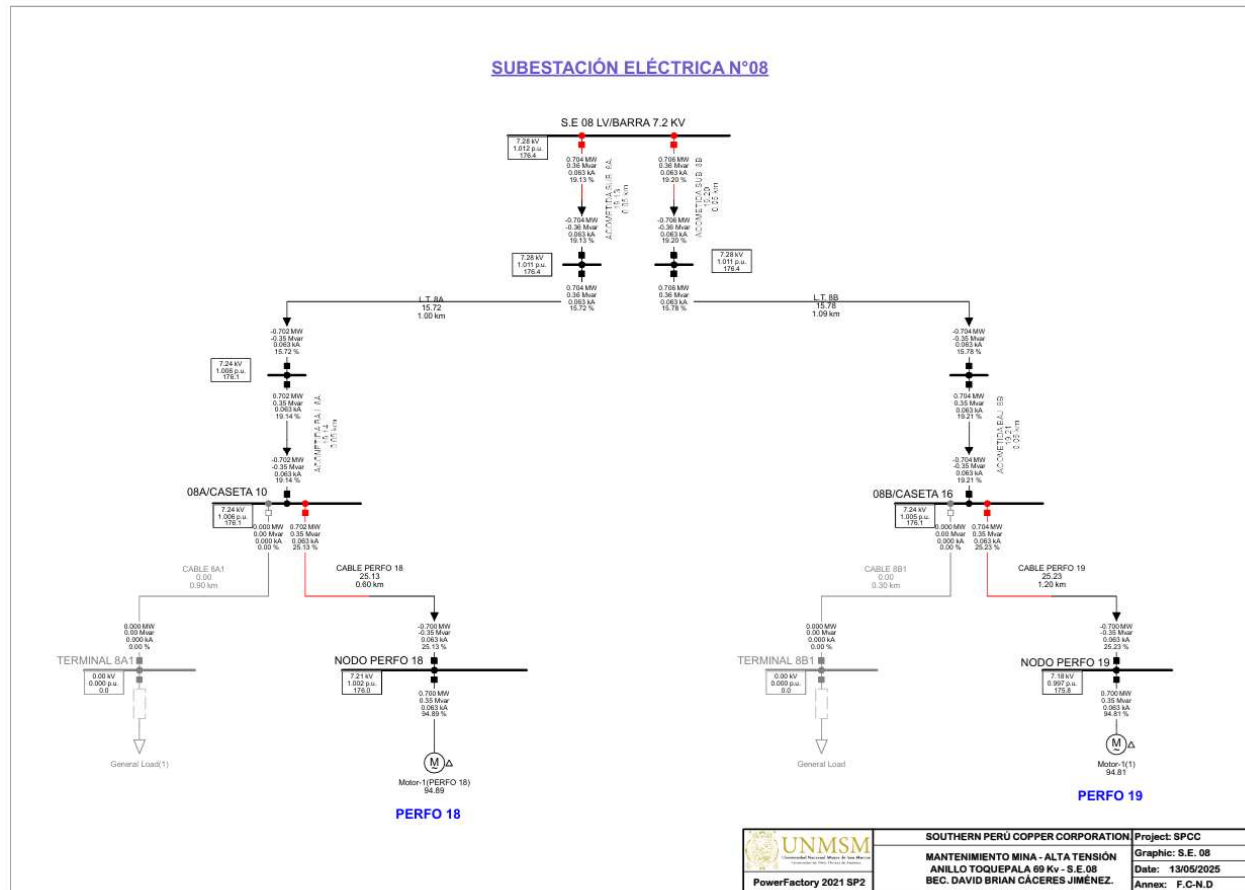


Figura B4:

Análisis de flujo de carga – S.E 09.

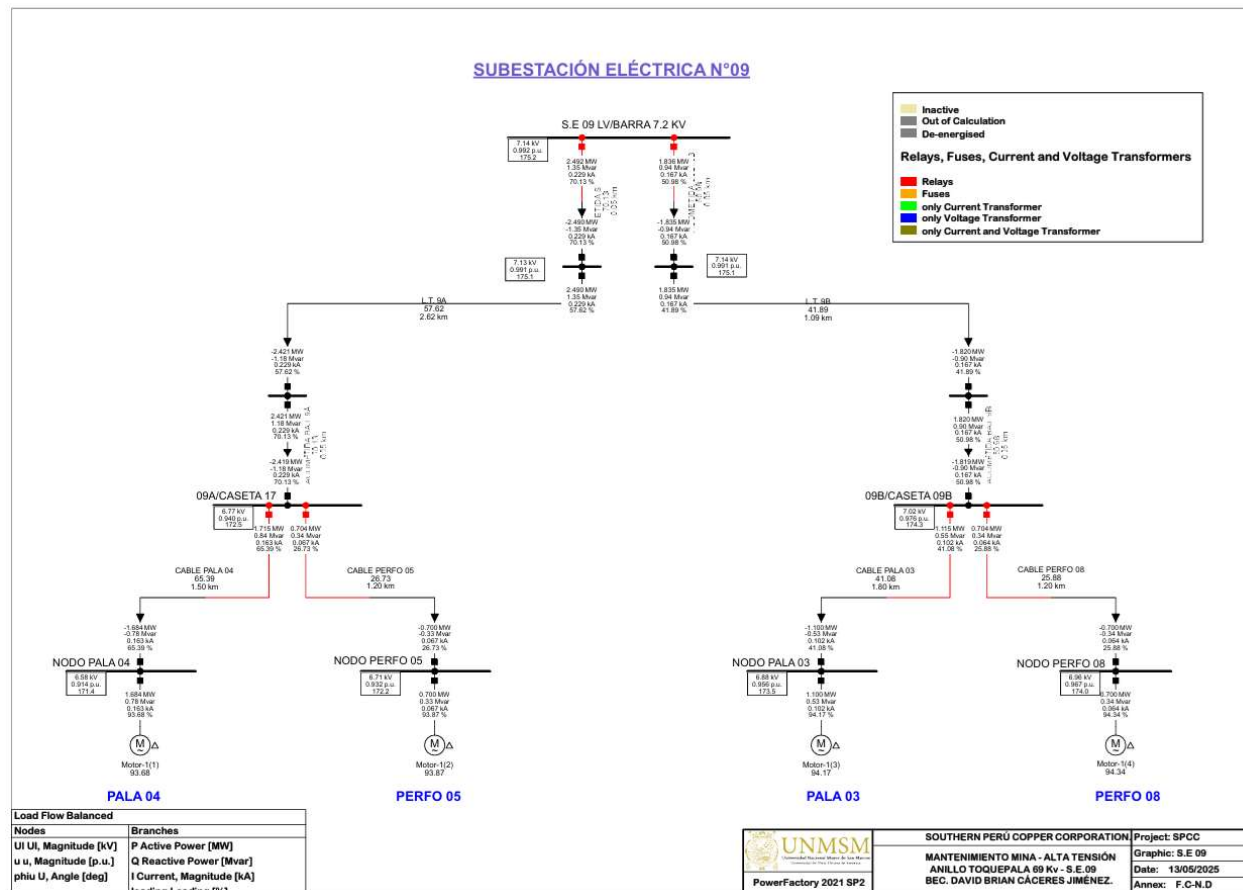


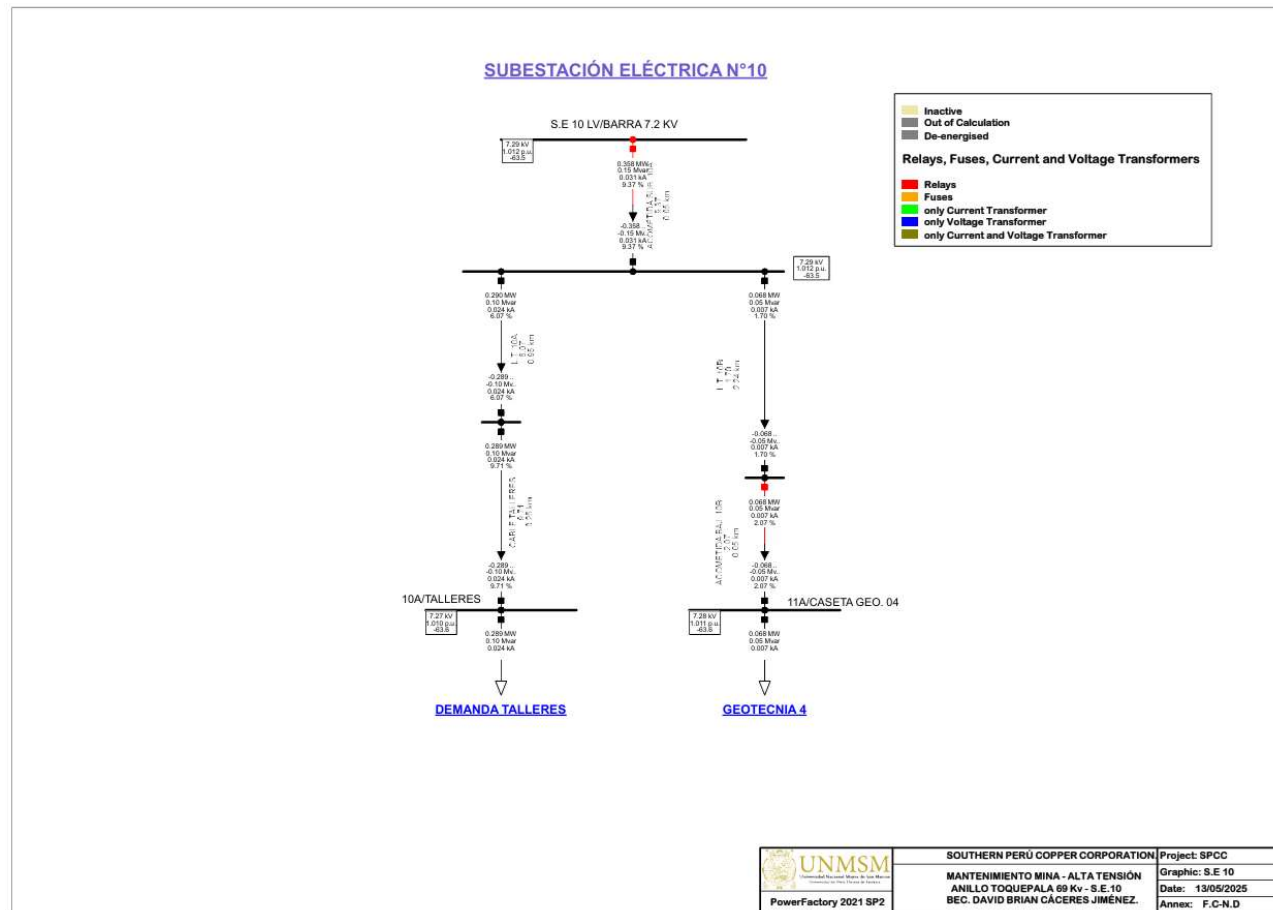
Figura B5:*Análisis de flujo de carga – S.E 10.*

Figura B6:

Análisis de flujo de carga – S.E 11.

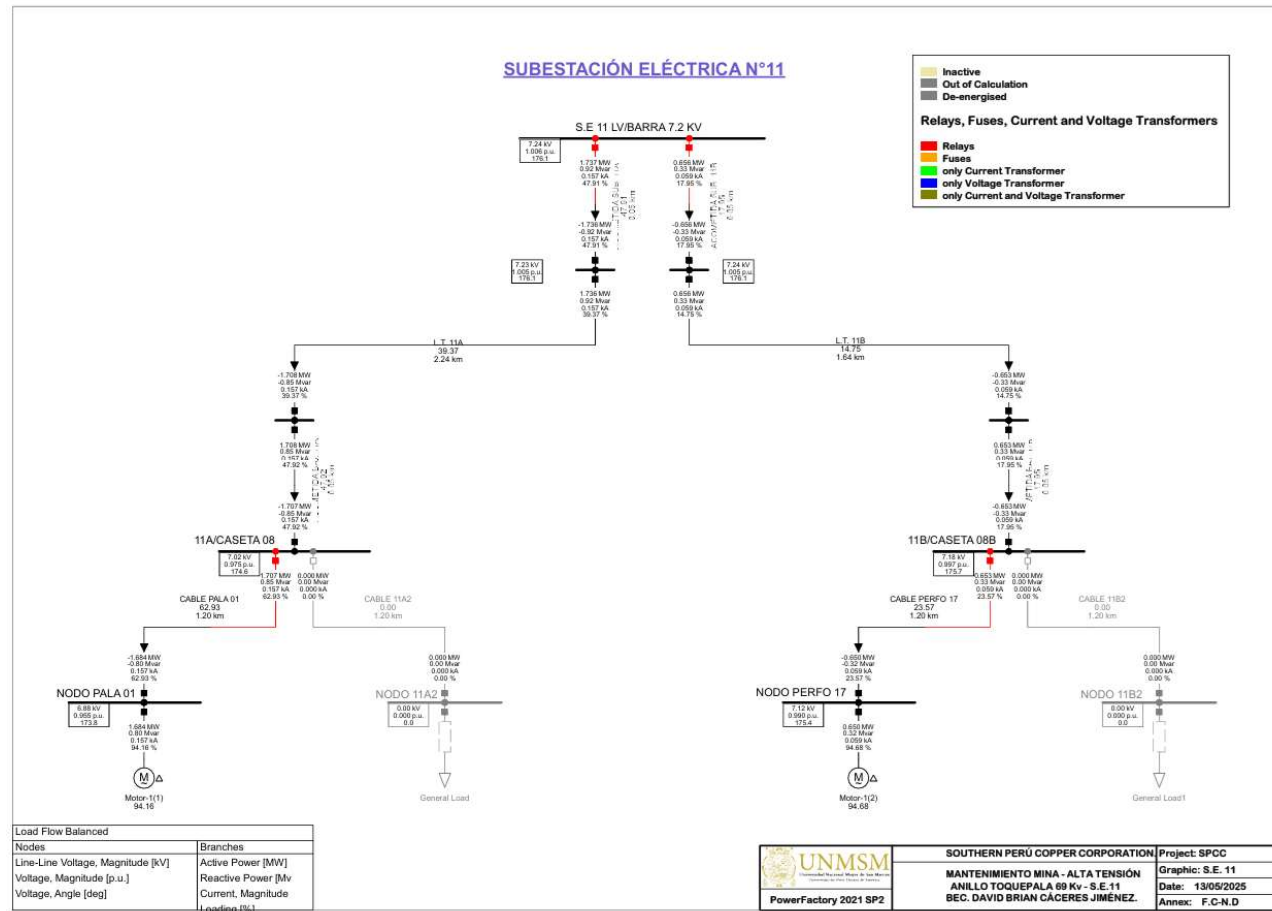


Figura B7:

Análisis de flujo de carga – S.E 12.

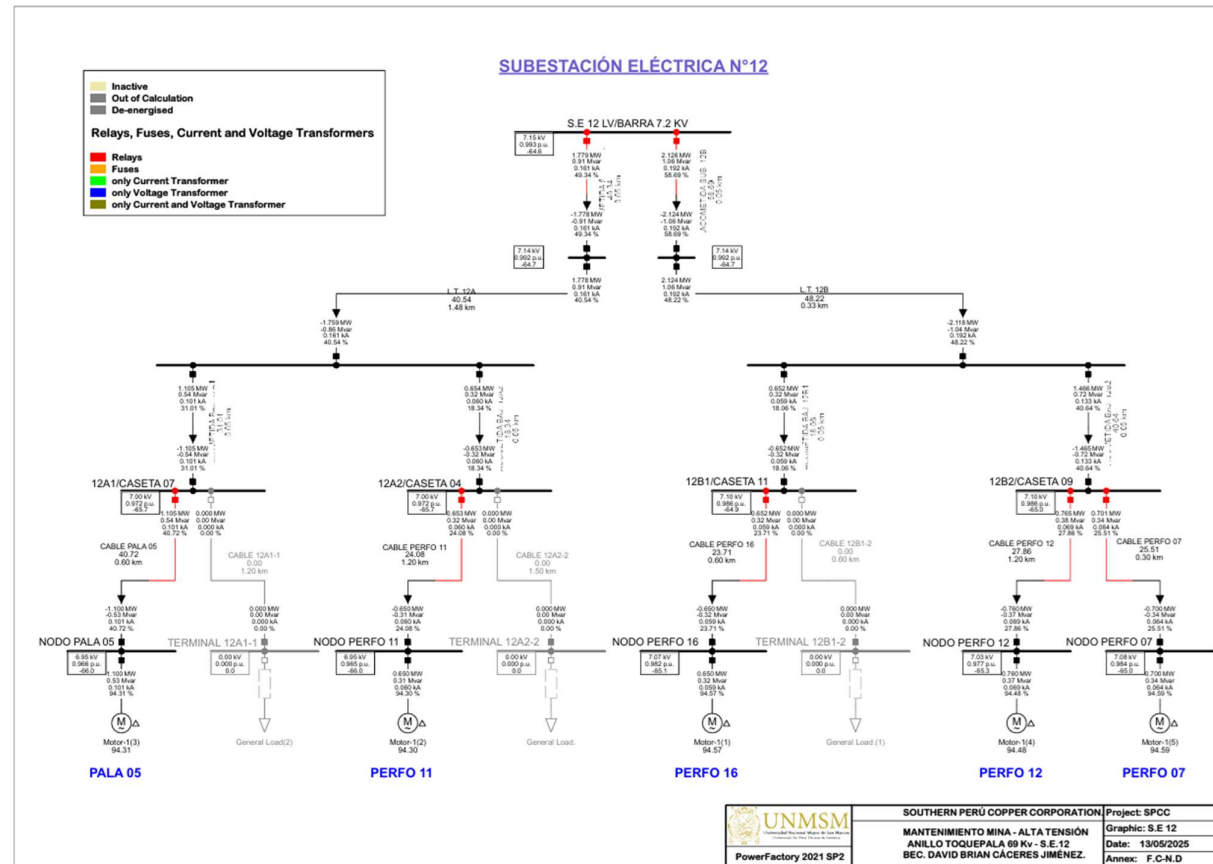


Figura B8:

Análisis de flujo de carga – S.E 13.

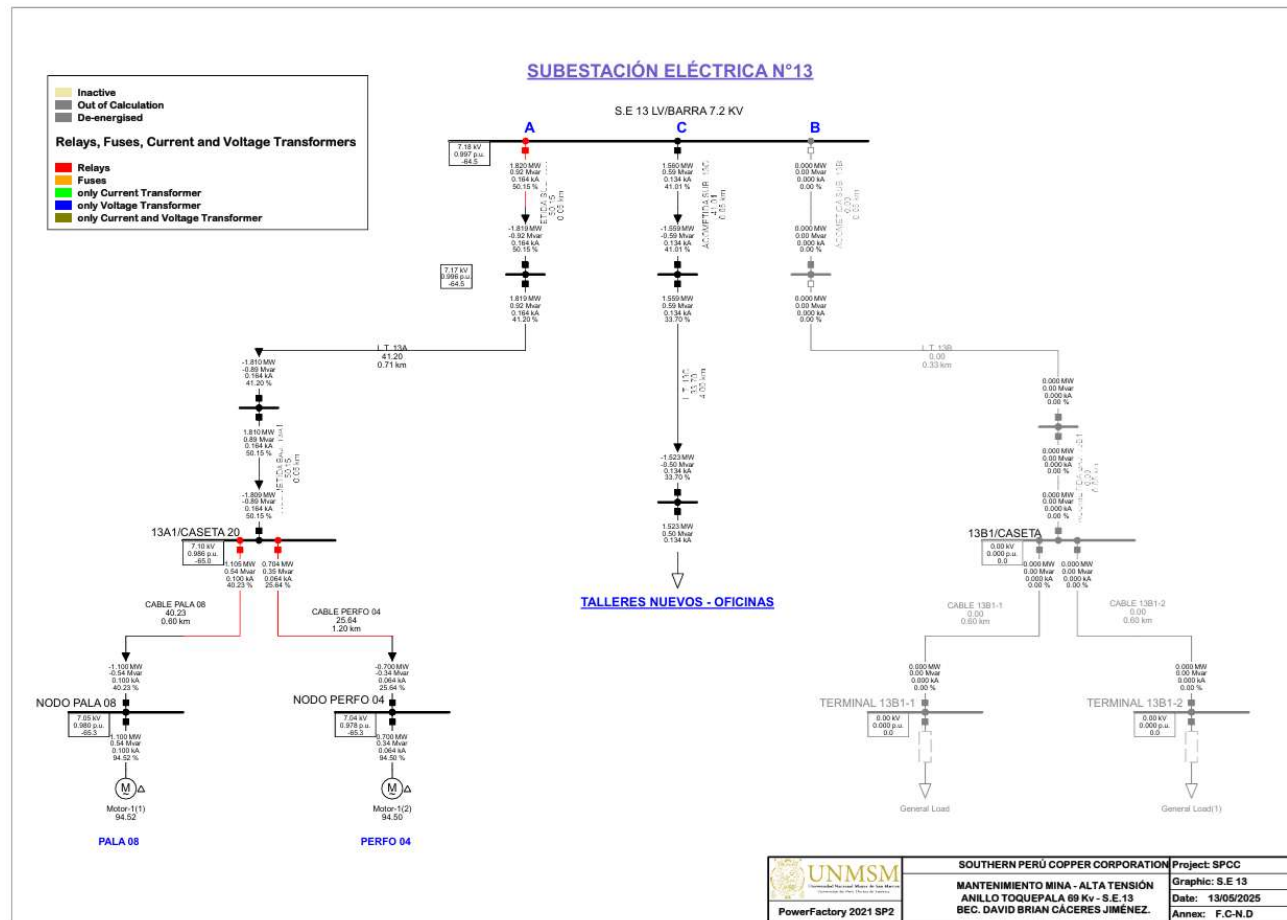


Figura B9:

Análisis de flujo de carga – S.E 15.

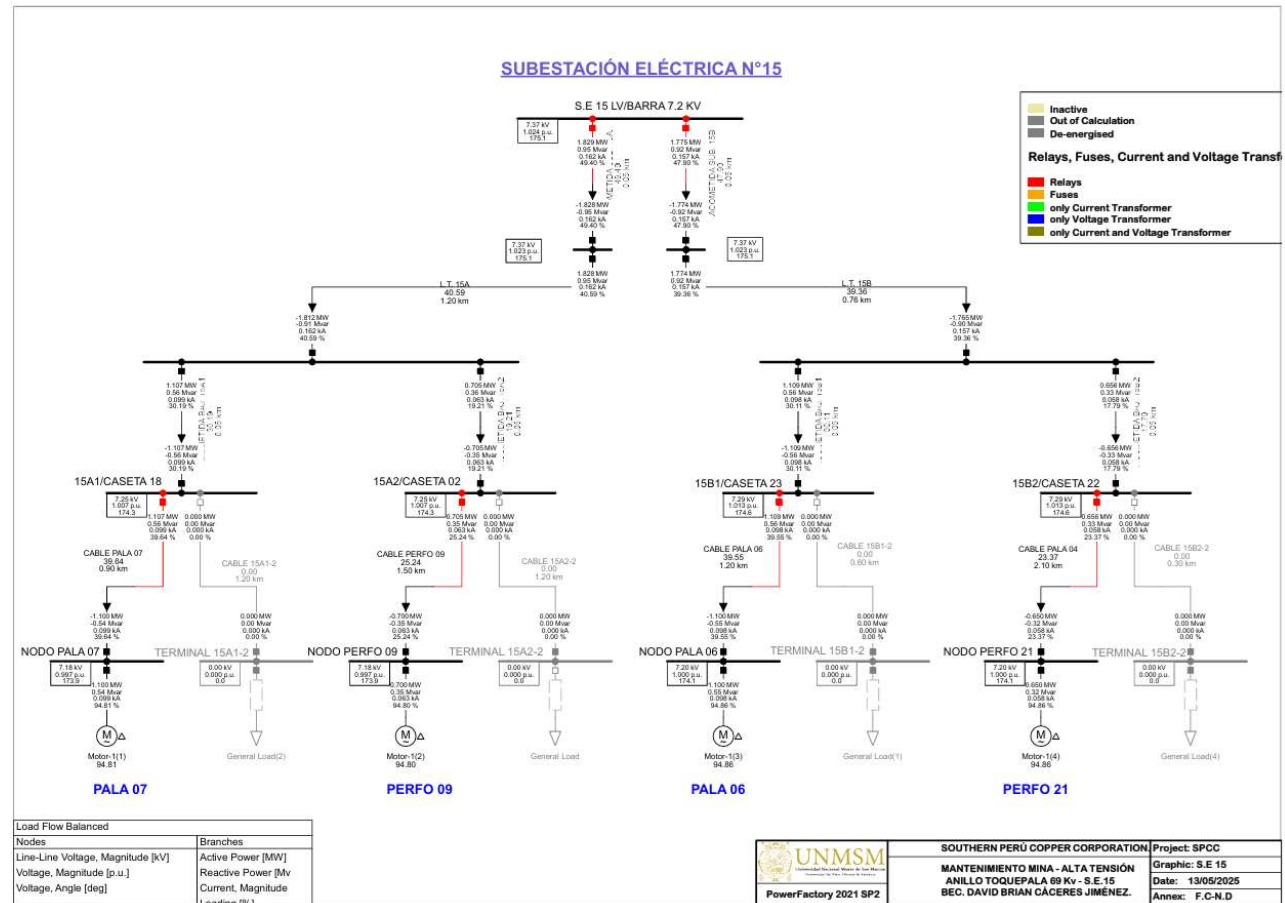


Tabla B1:

Escenarios de operación 01 – Flujo de carga.

CARGAS	EQUIPO	S.E.	80% F.D - In DE EQUIPOS.			100% F.D - In DE EQUIPOS.			80% F.D - PALA 09 - MAXIMO NOMINAL.			100% F.D - PALA 09 - POTENCIA PICO.			80% F.D - PALA 02 y 09 - POTENCIA MÁXIMA.		
			Escenario 01			Escenario 02			Escenario 03			Escenario 04			Escenario 05		
			S (Mva)	V (volt)	I (Amp)	S (Mva)	V (volt)	I (Amp)	S (Mva)	V (volt)	I (Amp)	S (Mva)	V (volt)	I (Amp)	S (Mva)	V (volt)	I (Amp)
PALA 01	P&H 4100A	S.E. 11	1.56	5504.00	125.60	1.95	6880.00	11	1.56	5504.00	125.60	1.95	6880.00	157.000	1.35	1.08	5270.40
PALA 02	P&H 4100A	S.E. 07	1.52	5672.00	122.40	1.90	7090.00	153.000	1.52	5672.00	122.40	1.90	7090.00	153.000	2.78	2.78	4763.48
PALA 03	BUCYRUS 495 BI	S.E. 09	1.02	5504.00	81.60	1.28	6880.00	102.000	1.02	5504.00	81.60	1.28	6880.00	102.000	0.10	0.83	4749.30
PALA 04	P&H 4100A	S.E. 09	1.62	5264.00	130.40	2.03	6580.00	163.000	1.62	5264.00	130.40	2.03	6580.00	163.000	4.19	5673.87	426.812
PALA 05	BUCYRUS 495 HR	S.E. 12	1.01	5560.00	80.80	1.26	6950.00	101.000	1.01	5560.00	80.80	1.26	6950.00	101.000	1.04	0.83	5297.64
PALA 06	BUCYRUS 495 HR	S.E. 15	0.98	5760.00	78.40	1.23	7200.00	98.000	0.98	5760.00	78.40	1.23	7200.00	98.000	1.04	0.83	5429.68
PALA 07	BUCYRUS 495 HR	S.E. 15	0.98	5744.00	79.20	1.23	7180.00	99.000	0.98	5744.00	79.20	1.23	7180.00	99.000	1.04	0.83	5403.65
PALA 08	BUCYRUS 495 HR	S.E. 13	1.00	5640.00	80.00	1.25	7050.00	100.000	1.00	5640.00	80.00	1.25	7050.00	100.000	0.83	0.83	5326.14
PALA 09	P&H 4100 XPC	S.E. 07	1.51	5728.00	121.60	1.89	7160.00	152.000	4.608	6721.52	395.808	5.978	6348.23	543.722	4.608	6656.17	399.693
PERFO 01	P&H 120A	S.E. 07	0.62	5752.00	50.40	0.78	7190.00	63.000	0.62	5752.00	50.40	0.78	7190.00	63.000	0.62	5752.00	50.40
PERFO 04	BUCYRUS 49III	S.E. 13	0.64	5632.00	51.20	0.80	7040.00	64.000	0.64	5632.00	51.20	0.80	7040.00	64.000	0.64	5632.00	51.20
PERFO 05	BUCYRUS 49III	S.E. 09	0.66	5368.00	53.60	0.83	6710.00	67.000	0.66	5368.00	53.60	0.83	6710.00	67.000	0.66	5368.00	53.60
PERFO 07	BUCYRUS 49HR	S.E. 12	0.63	5664.00	51.20	0.79	7080.00	64.000	0.63	5664.00	51.20	0.79	7080.00	64.000	0.63	5664.00	51.20
PERFO 08	BUCYRUS 49HR	S.E. 09	0.64	5568.00	51.20	0.80	6960.00	64.000	0.64	5568.00	51.20	0.80	6960.00	64.000	0.64	5568.00	51.20
PERFO 09	BUCYRUS 49HR	S.E. 15	0.62	5744.00	50.40	0.78	7180.00	63.000	0.62	5744.00	50.40	0.78	7180.00	63.000	0.62	5744.00	50.40
PERFO 11	P&H 320 XPC	S.E. 12	0.60	5560.00	48.00	0.75	6950.00	60.000	0.60	5560.00	48.00	0.75	6950.00	60.000	0.60	5560.00	48.00
PERFO 12	CAT MD 6640	S.E. 12	0.70	5624.00	55.20	0.87	7030.00	69.000	0.70	5624.00	55.20	0.87	7030.00	69.000	0.70	5624.00	55.20
PERFO 16	P&H 320 XPC	S.E. 12	0.59	5656.00	47.20	0.74	7070.00	59.000	0.59	5656.00	47.20	0.74	7070.00	59.000	0.59	5656.00	47.20
PERFO 17	P&H 320 XPC	S.E. 11	0.58	5696.00	47.20	0.73	7120.00	59.000	0.58	5696.00	47.20	0.73	7120.00	59.000	0.58	5696.00	47.20
PERFO 18	CAT MD 6640	S.E. 08	0.62	5768.00	50.40	0.78	7210.00	63.000	0.62	5768.00	50.40	0.78	7210.00	63.000	0.62	5768.00	50.40
PERFO 19	P&H 320 XPC	S.E. 08	0.62	5744.00	50.40	0.78	7180.00	63.000	0.62	5744.00	50.40	0.78	7180.00	63.000	0.62	5744.00	50.40
PERFO 21	P&H 320 XPC	S.E. 15	0.58	5760.00	46.40	0.73	7200.00	58.000	0.58	5760.00	46.40	0.73	7200.00	58.000	0.58	5760.00	46.40
TALLERES GEOTECNIA 4	-	S.E. 10	0.24	5816.00	19.20	0.30	7270.00	24.000	0.24	5816.00	19.20	0.30	7270.00	24.000	0.24	5816.00	19.20
TALLERES OF.	-	S.E. 10	0.06	5824.00	5.60	0.08	7280.00	7.000	0.06	5824.00	5.60	0.08	7280.00	7.000	0.06	5824.00	5.60
		S.E. 13	1.34	5.73	107.20	1.67	7.16	134.000	1.34	5.73	107.20	1.67	7.16	134.000	1.34	5.73	107.20

Tabla B2:

Escenarios de operación 02 – Flujo de carga.

CARGAS	EQUIPO	S.E.	100% F.D - PALA 02 y 09 POTENCIA PICO.			80% F.D - PALA 02, 05 Y 09 POTENCIA MÁXIMA.			100% F.D - PALA 02, 05 y 09 POTENCIA PICO			80% F.D - PALA 02, 05 POTENCIA MÁXIMA - PERFO 16 ARRANQUE.			80% F.D - PALA 02, 05 Y 09 PICO MAXIMO - PERFO 11 ARRANQUE - PERFO 21 POTENCIA PICO		
			Escenario 06			Escenario 07			Escenario 08			Escenario 09			Escenario 10		
			S(Mva)	V(volt)	I (Amp)	S(Mva)	V(volt)	I (Amp)	S(Mva)	V(volt)	I (Amp)	S(Mva)	V(volt)	I (Amp)	S(Mva)	V(volt)	I (Amp)
PALA 01	P&H 4100A	S.E 11	1.95	6880.00	157.000	1.56	5504.00	125.60	1.95	6880.00	157.000	1.56	5504.00	125.60	1.95	6880.00	157.000
PALA 02	P&H 4100A	S.E 07	1.90	7090.00	153.000	1.52	5672.00	122.40	1.90	7090.00	153.000	1.52	5672.00	122.40	1.90	7090.00	153.000
PALA 03	BUCYRUS 495 BI	S.E 09	1.28	6880.00	102.000	1.02	5504.00	81.60	1.28	6880.00	102.000	1.02	5504.00	81.60	1.28	6880.00	102.000
PALA 04	P&H 4100A	S.E 09	5.39	4620.53	673.13	4.208	5608.19	433.204	5.39	4512.44	689.21	4.208	5542.10	438.370	5.39	4373.21	711.24
PALA 05	BUCYRUS 495 HR	S.E 12	1.26	6950.00	101.000	1.01	5560.00	80.80	1.26	6950.00	101.000	1.01	5560.00	80.80	1.26	6950.00	101.000
PALA 06	BUCYRUS 495 HR	S.E 15	1.23	7200.00	98.000	0.98	5760.00	78.40	1.23	7200.00	98.000	0.98	5760.00	78.40	1.23	7200.00	98.000
PALA 07	BUCYRUS 495 HR	S.E 15	1.23	7180.00	99.000	0.98	5744.00	79.20	1.23	7180.00	99.000	0.98	5744.00	79.20	1.23	7180.00	99.000
PALA 08	BUCYRUS 495 HR	S.E 13	1.25	7050.00	100.000	3.715	6609.88	324.493	3.901	6404.82	351.626	1.00	5640.00	80.00	1.25	7050.00	100.000
PALA 09	P&H 4100 XPC	S.E 07	5.978	6215.36	555.347	4.608	6603.77	402.865	5.978	6152.23	561.046	4.608	6546.62	406.382	5.978	6078.59	567.842
PERFO 01	P&H 120A	S.E 07	0.78	7190.00	63.000	0.62	5752.00	50.40	0.78	7190.00	63.000	0.62	5752.00	50.40	0.78	7190.00	63.000
PERFO 04	BUCYRUS 49III	S.E 13	0.80	7040.00	64.000	0.64	5632.00	51.20	0.80	7040.00	64.000	0.64	5632.00	51.20	0.80	7040.00	64.000
PERFO 05	BUCYRUS 49III	S.E 09	0.83	6710.00	67.000	0.66	5368.00	53.60	0.83	6710.00	67.000	0.66	5368.00	53.60	0.83	6710.00	67.000
PERFO 07	BUCYRUS 49HR	S.E 12	0.79	7080.00	64.000	0.63	5664.00	51.20	0.79	7080.00	64.000	0.63	5664.00	51.20	0.79	7080.00	64.000
PERFO 08	BUCYRUS 49HR	S.E 09	0.80	6960.00	64.000	0.64	5568.00	51.20	0.80	6960.00	64.000	0.64	5568.00	51.20	0.80	6960.00	64.000
PERFO 09	BUCYRUS 49HR	S.E 15	0.78	7180.00	63.000	0.62	5744.00	50.40	0.78	7180.00	63.000	0.62	5744.00	50.40	0.78	7180.00	63.000
PERFO 11	P&H 320 XPC	S.E 12	0.75	6950.00	60.000	0.60	5560.00	48.00	0.75	6950.00	60.000	0.60	5560.00	48.00	0.75	6950.00	60.000
PERFO 12	CAT MD 6640	S.E 12	0.87	7030.00	69.000	0.70	5624.00	55.20	0.87	7030.00	69.000	0.70	5624.00	55.20	0.87	7030.00	69.000
PERFO 16	P&H 320 XPC	S.E 12	0.74	7070.00	59.000	0.59	5656.00	47.20	0.74	7070.00	59.000	6.285	6320.80	574.104	6.285	6086.13	596.241
PERFO 17	P&H 320 XPC	S.E 11	0.73	7120.00	59.000	0.58	5696.00	47.20	0.73	7120.00	59.000	0.58	5696.00	47.20	0.73	7120.00	59.000
PERFO 18	CAT MD 6640	S.E 08	0.78	7210.00	63.000	0.62	5768.00	50.40	0.78	7210.00	63.000	0.62	5768.00	50.40	0.78	7210.00	63.000
PERFO 19	P&H 320 XPC	S.E 08	0.78	7180.00	63.000	0.62	5744.00	50.40	0.78	7180.00	63.000	0.62	5744.00	50.40	0.78	7180.00	63.000
PERFO 21	P&H 320 XPC	S.E 15	0.73	7200.00	58.000	0.58	5760.00	46.40	0.73	7200.00	58.000	0.58	5760.00	46.40	0.73	7200.00	58.000
TALLERES	-	S.E 10	0.30	7270.00	24.000	0.24	5816.00	19.20	0.30	7270.00	24.000	0.24	5816.00	19.20	0.30	7270.00	24.000
GEOTECNIA 4	-	S.E 10	0.08	7280.00	7.000	0.06	5824.00	5.60	0.08	7280.00	7.000	0.06	5824.00	5.60	0.08	7280.00	7.000
TALLERES OF.	-	S.E 13	1.67	7.16	134.000	1.34	5.73	107.20	1.67	7.16	134.000	1.34	5.73	107.20	1.67	7.16	134.000

Anexo C: Análisis de cortocircuito.

Figura C1:

Análisis de cortocircuito en barras – Anillo de 69 k V.

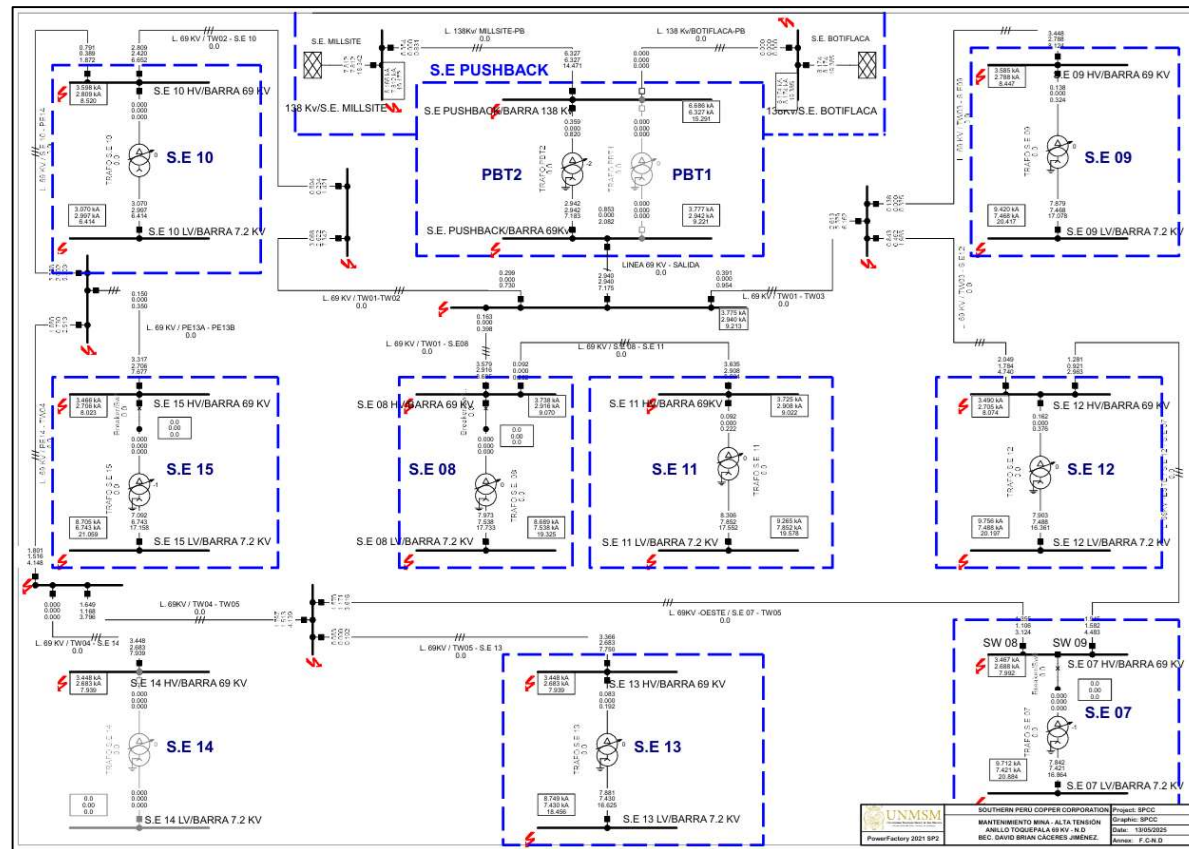


Figura C2:

Análisis de cortocircuito en barras – S.E 07.

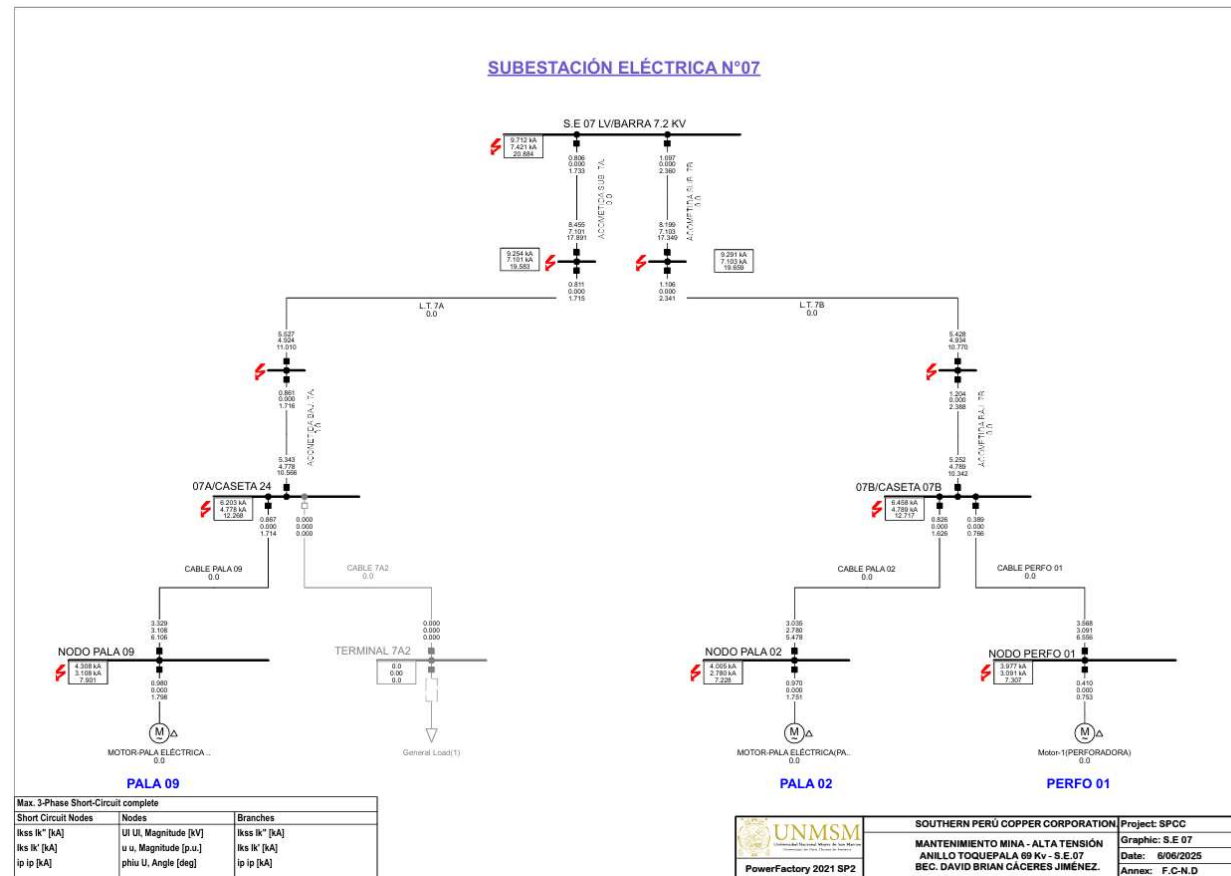


Figura C3:

Análisis de cortocircuito en barras – S.E 08.

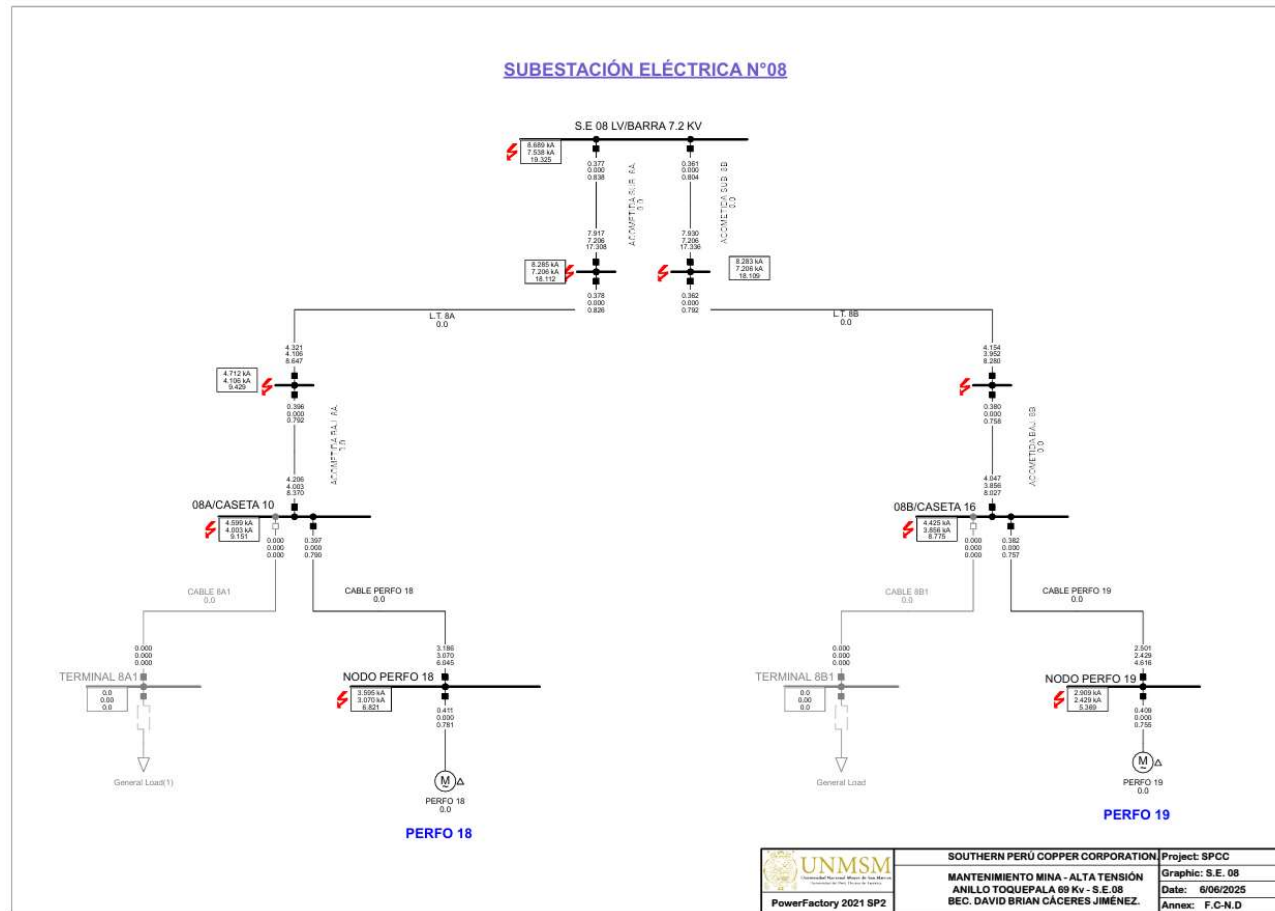


Figura C4:

Análisis de cortocircuito en barras – S.E 09.

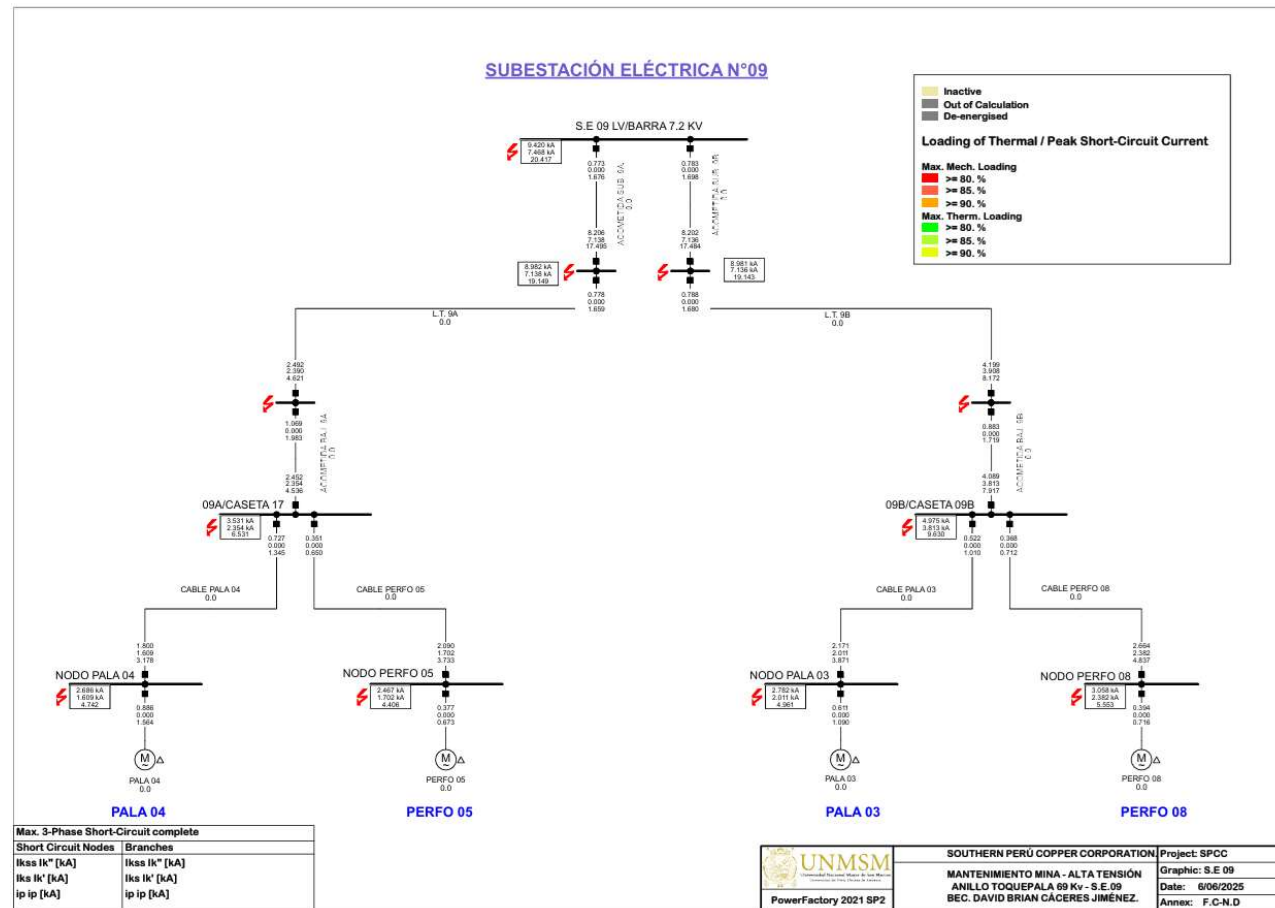


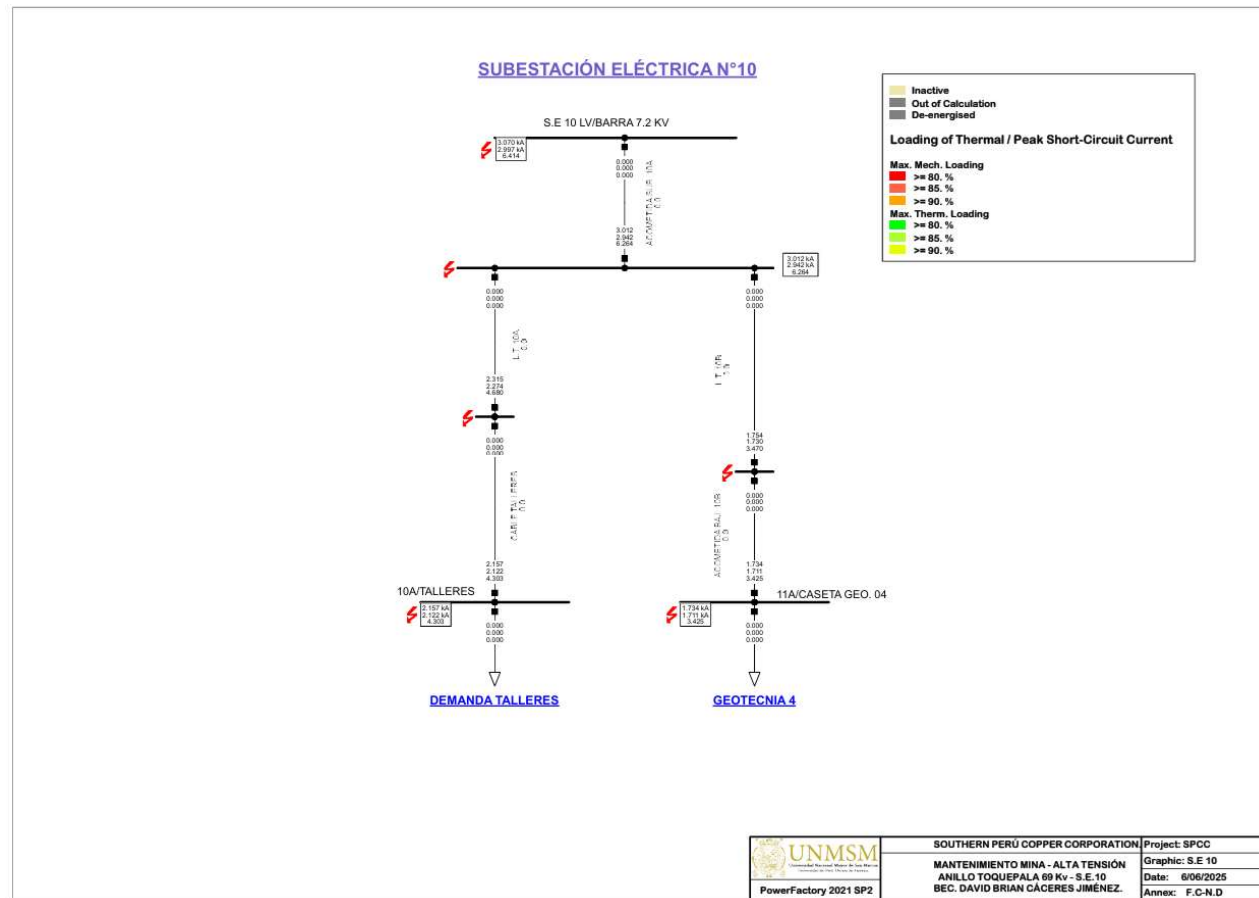
Figura C5:*Análisis de cortocircuito en barras – S.E 10.*

Figura C6:

Análisis de cortocircuito en barras – S.E 11.

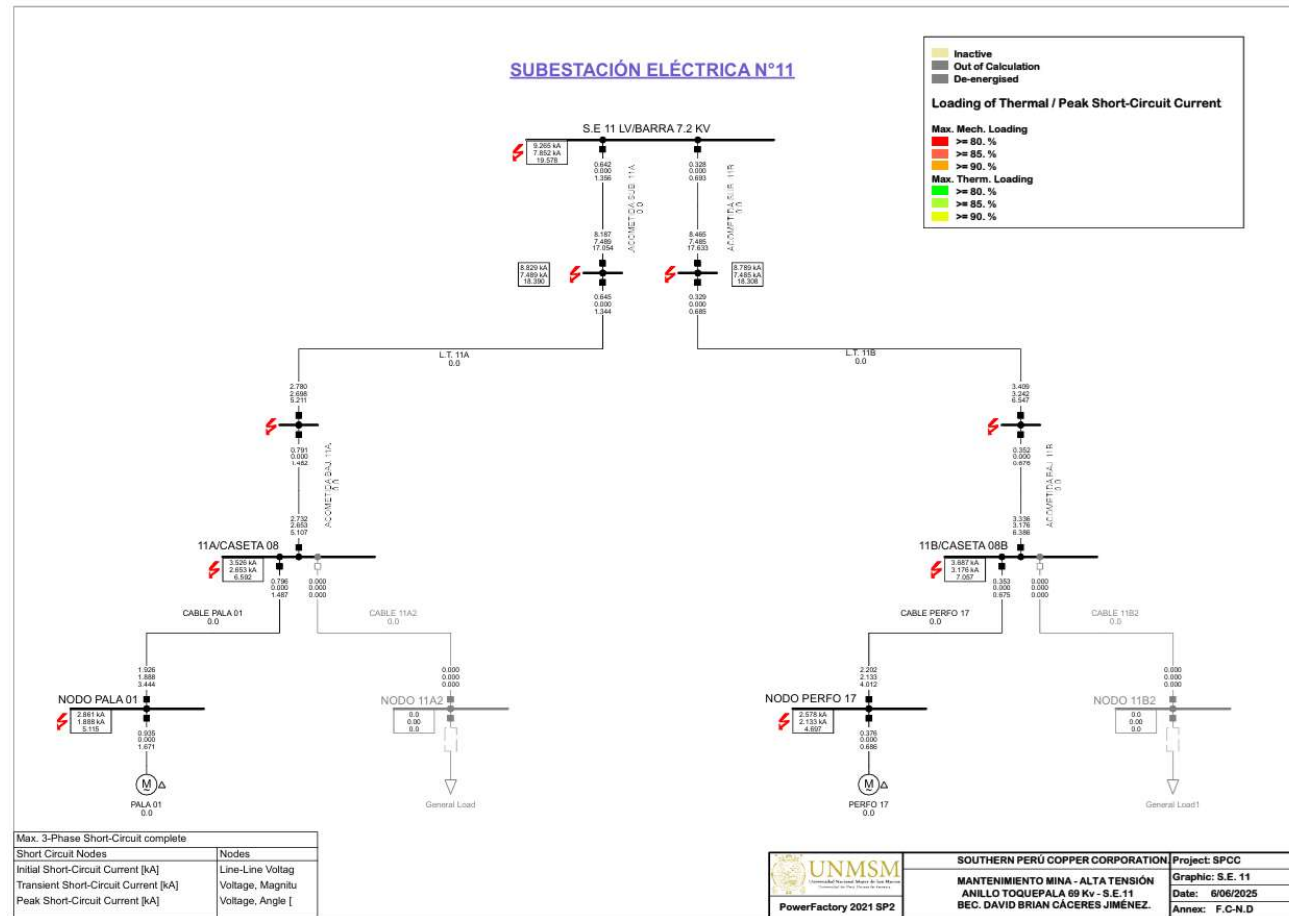


Figura C7:

Análisis de cortocircuito en barras – S.E 12.

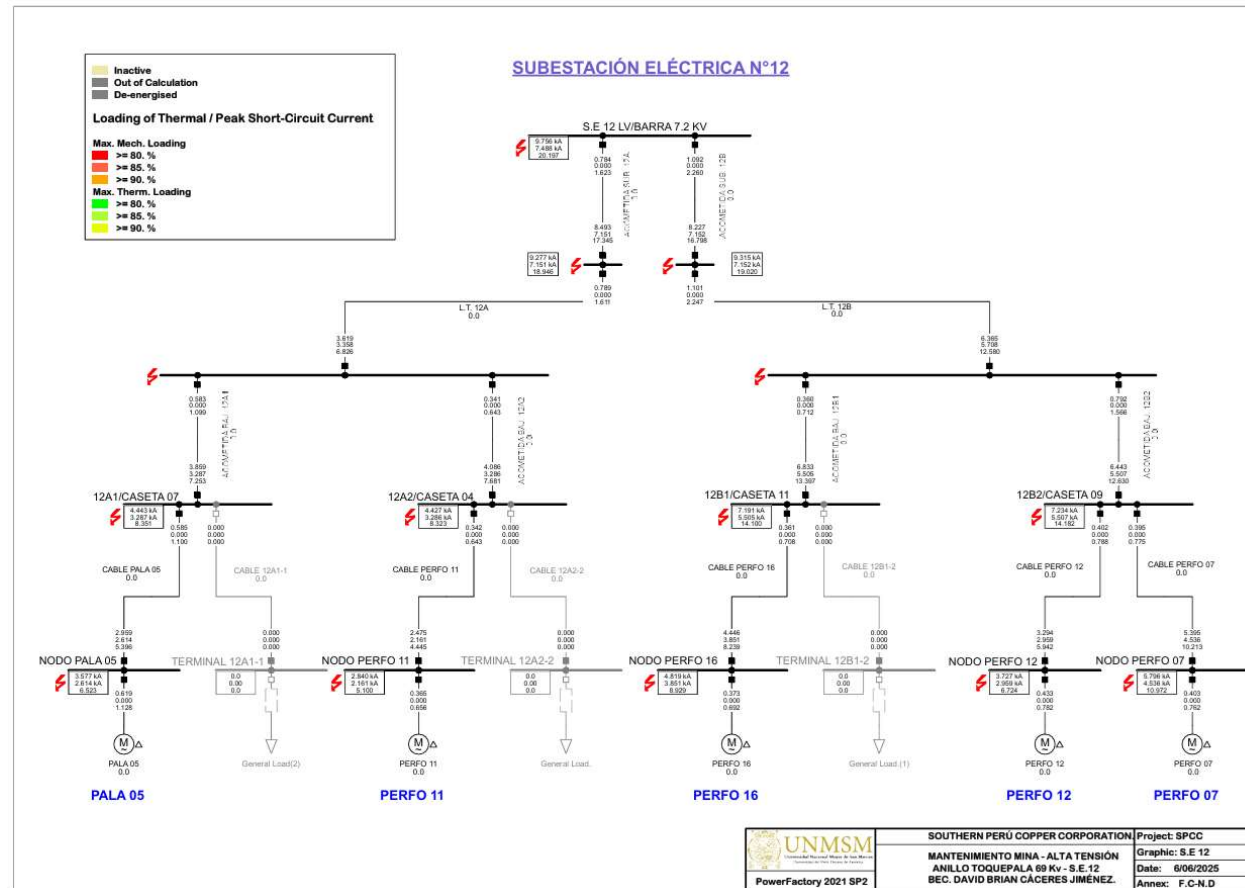


Figura C8:

Análisis de cortocircuito en barras – S.E 13.

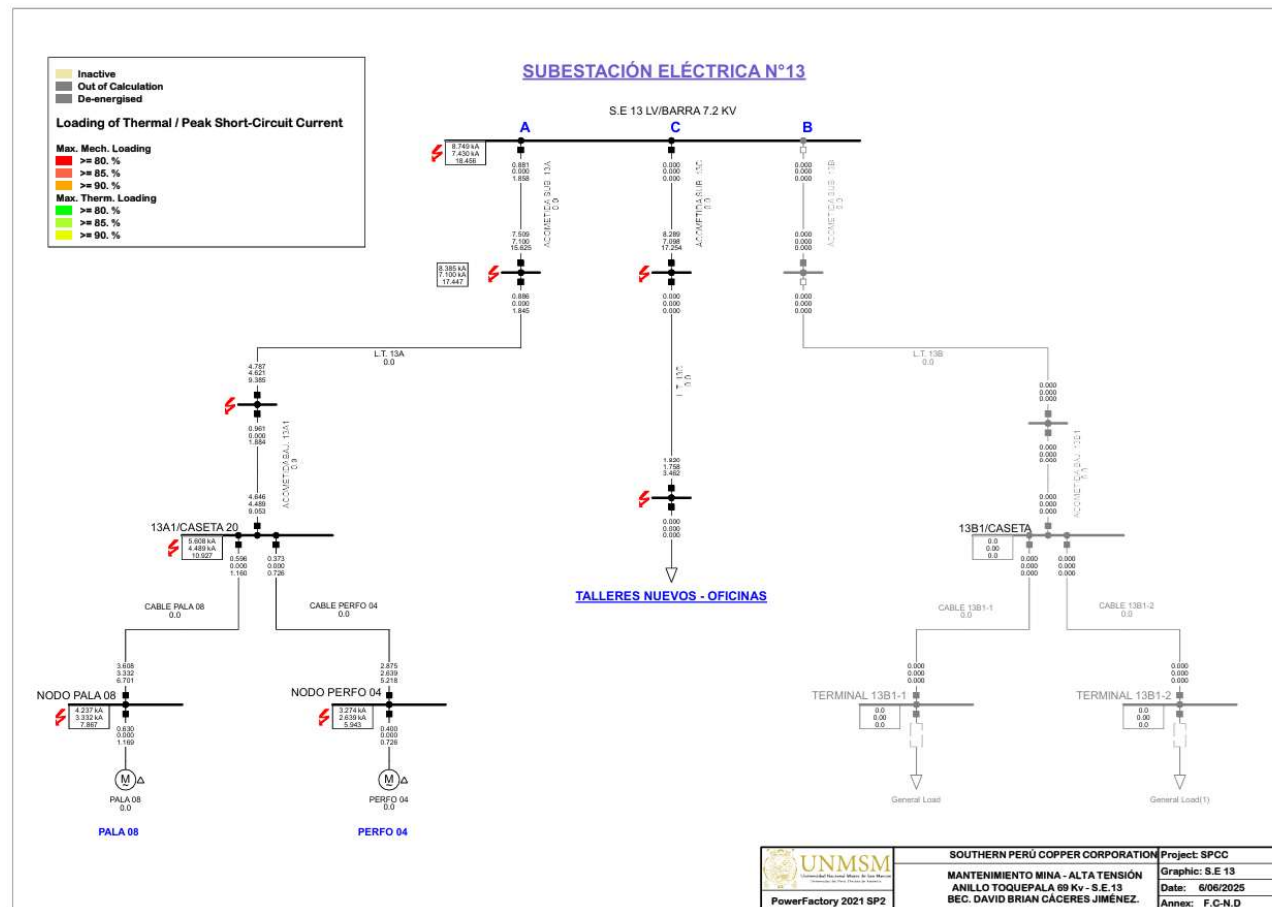
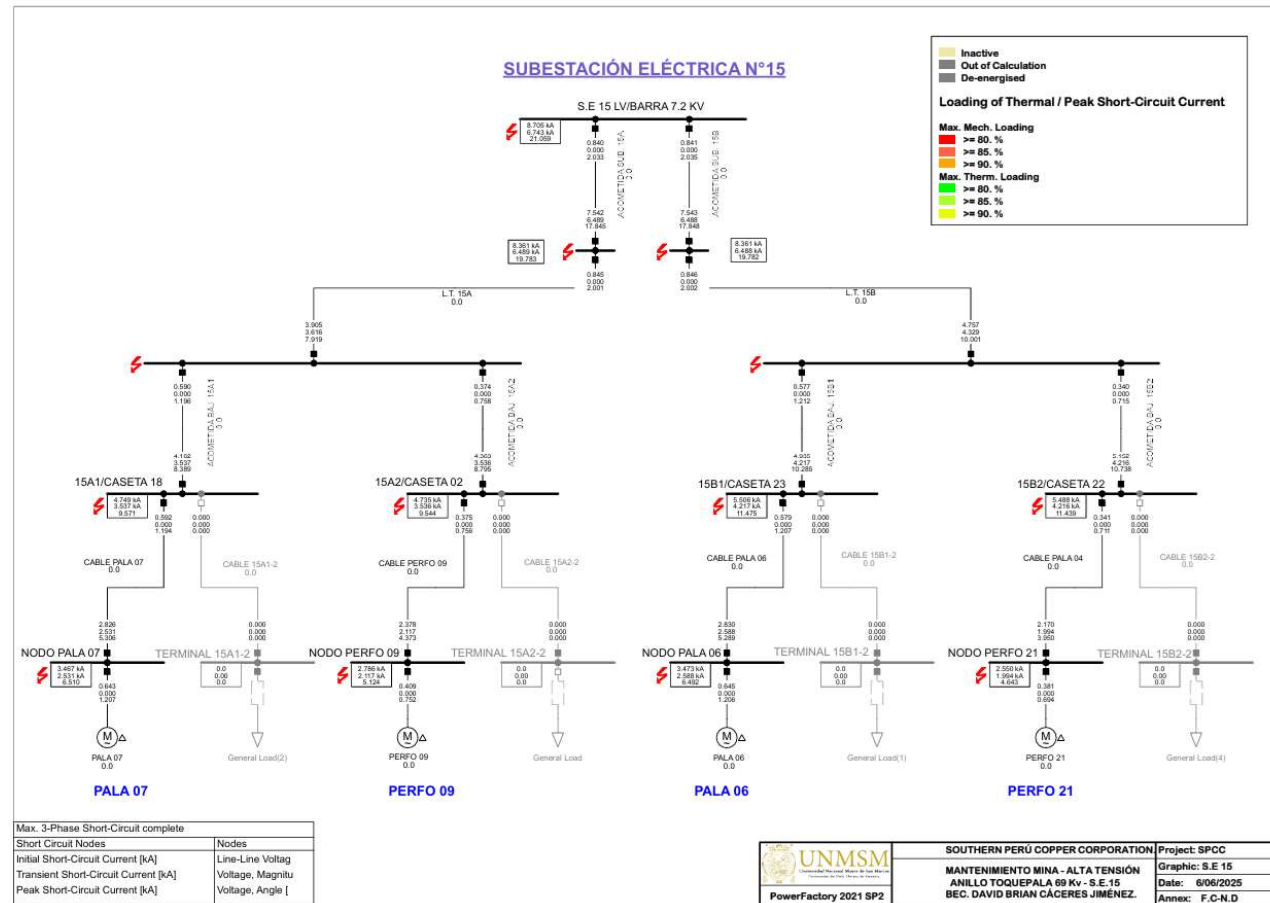


Figura C9:

Análisis de cortocircuito en barras – S.E 15.



Anexo D: Análisis de coordinación de protecciones de sobrecorriente.

Figura D1:

Coordinación de protecciones – S.E. 07 - 69 k V.

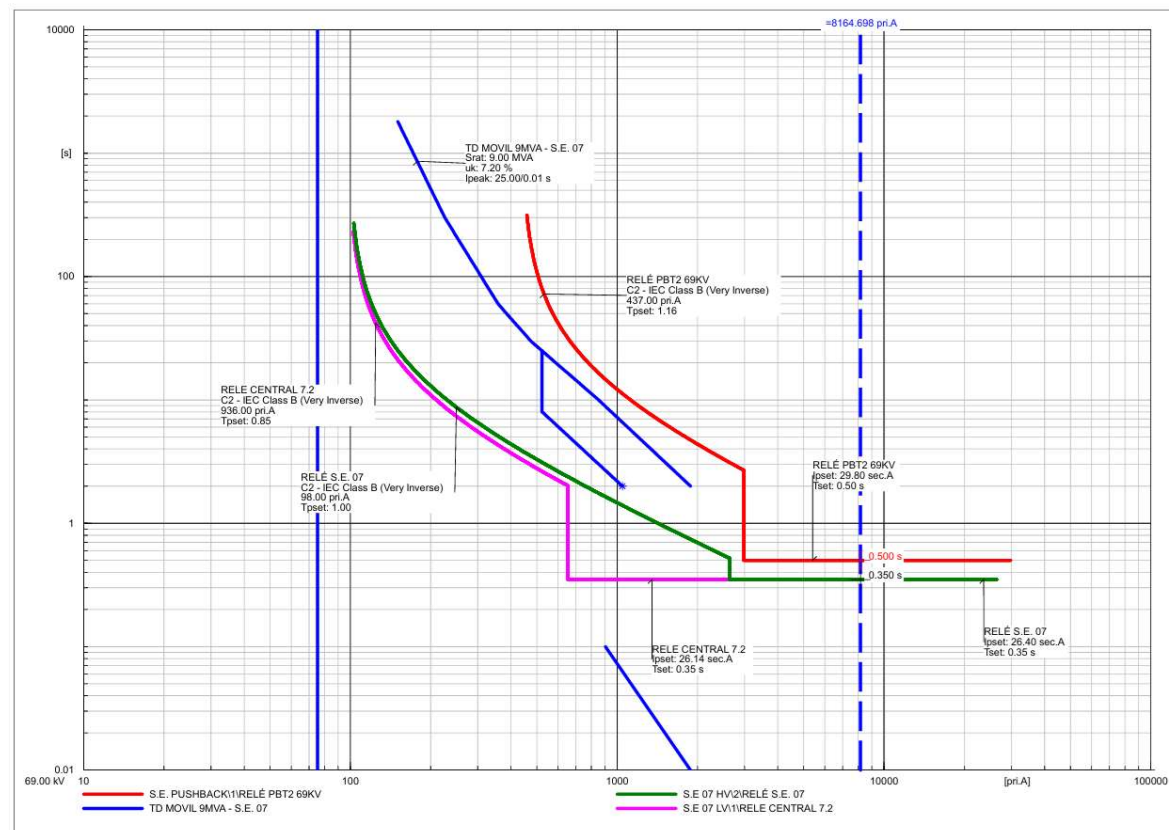


Figura D2:

Coordinación de protecciones – Pala N°. 09 - S.E. 07 – 7.2 k V.

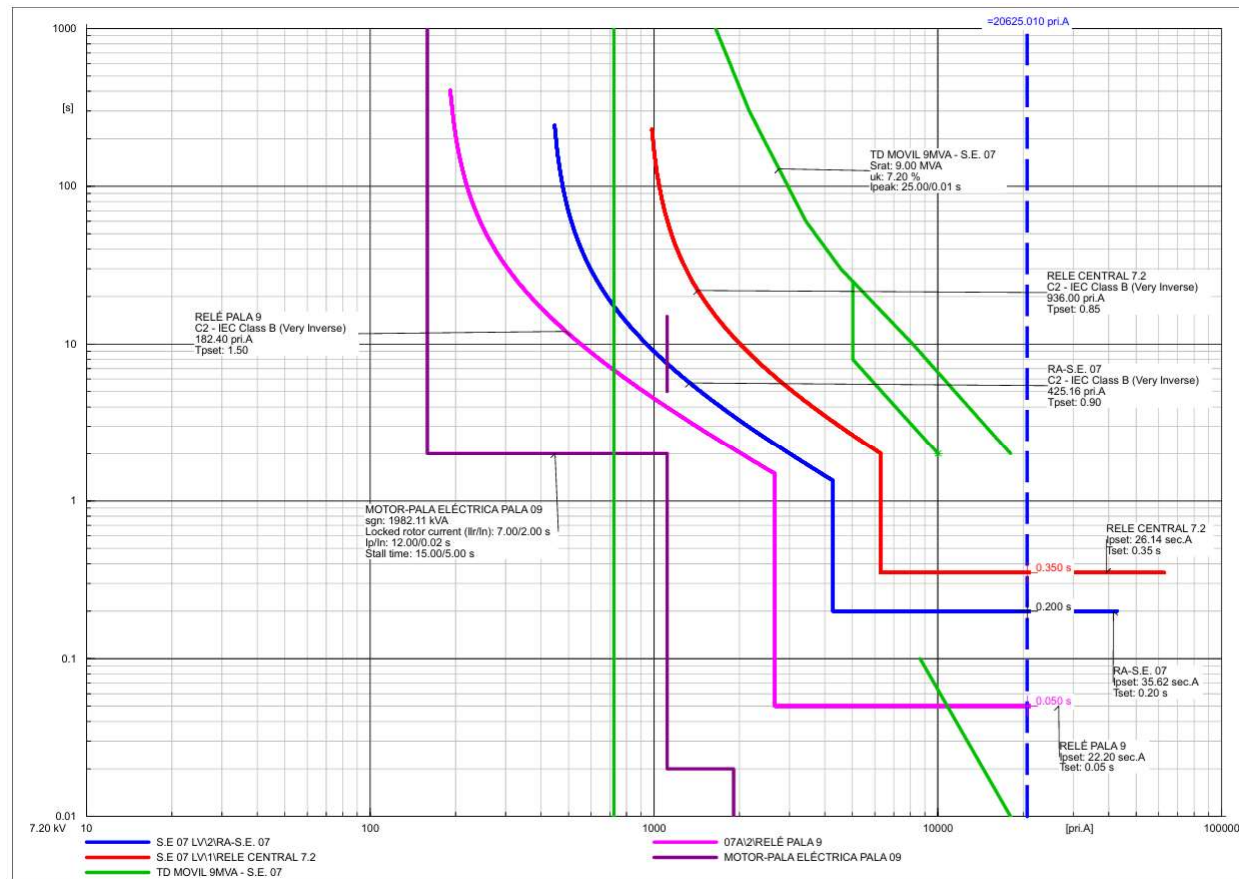


Figura D3:

Coordinación de protecciones – Perforadora N°. 01 - S.E. 07 – 7.2 k V.

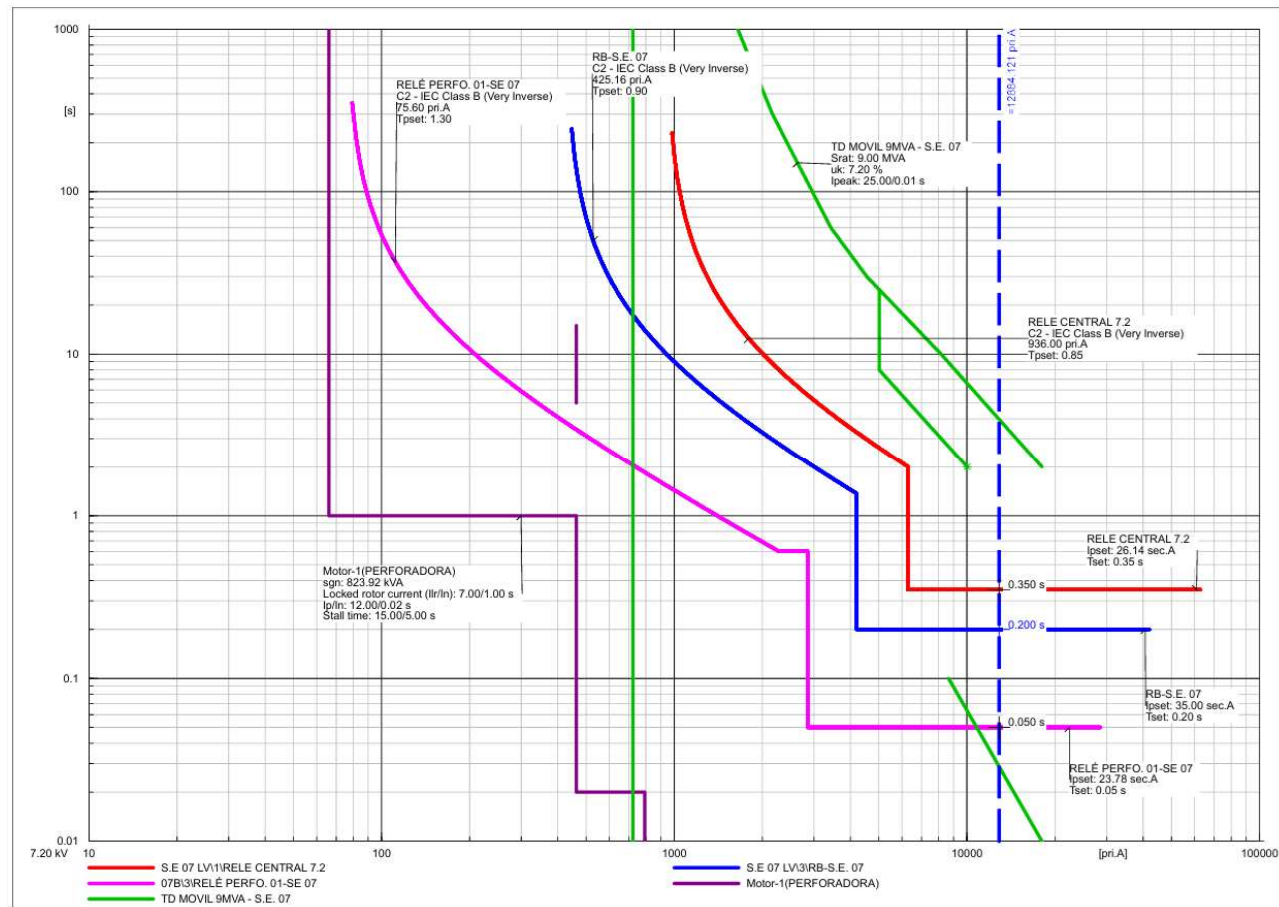


Figura D4:

Coordinación de protecciones – Pala N°. 02 - S.E. 07 – 7.2 k V.

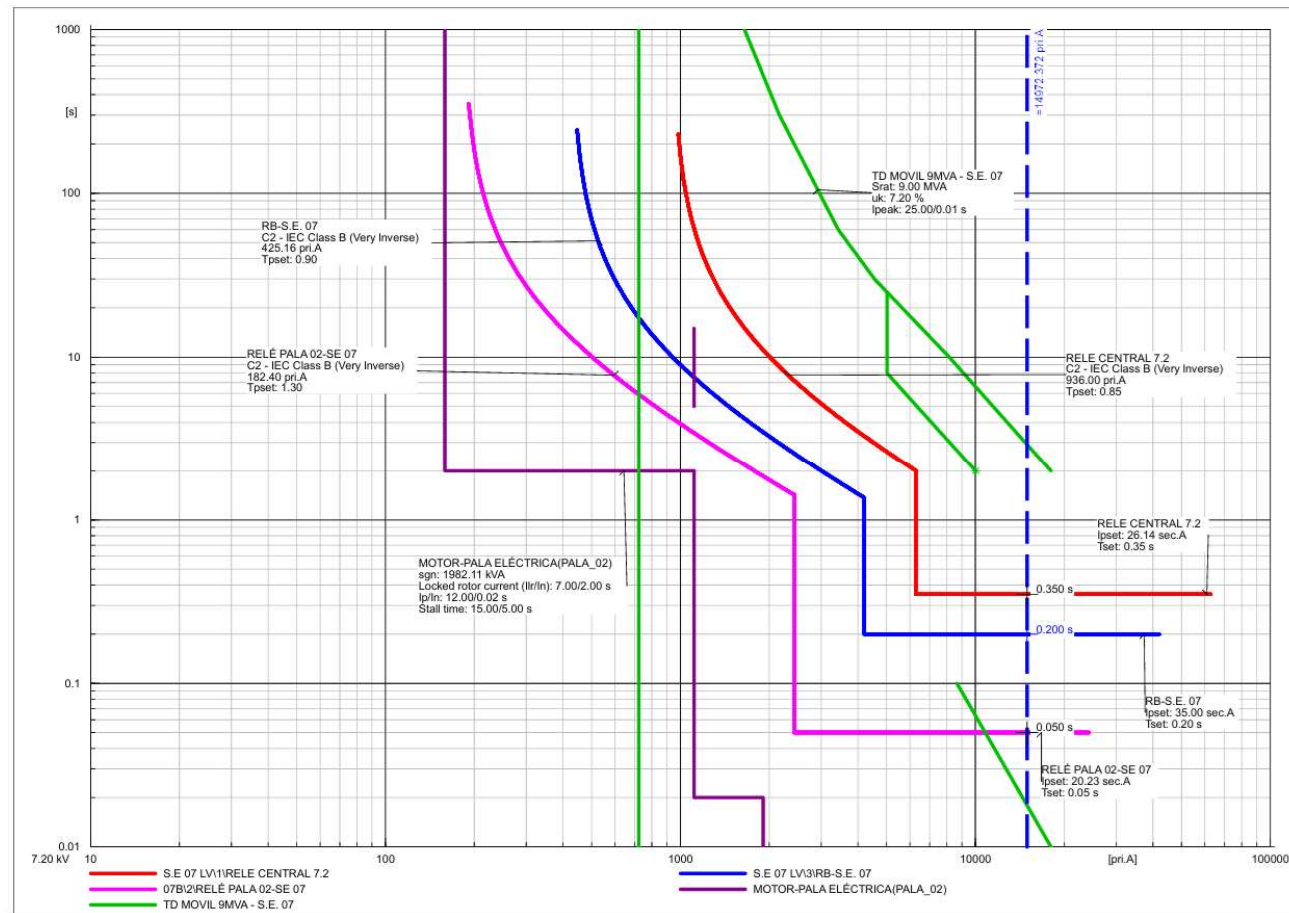


Figura D5:

Coordinación de protecciones – S.E. 08 - 69 k V.

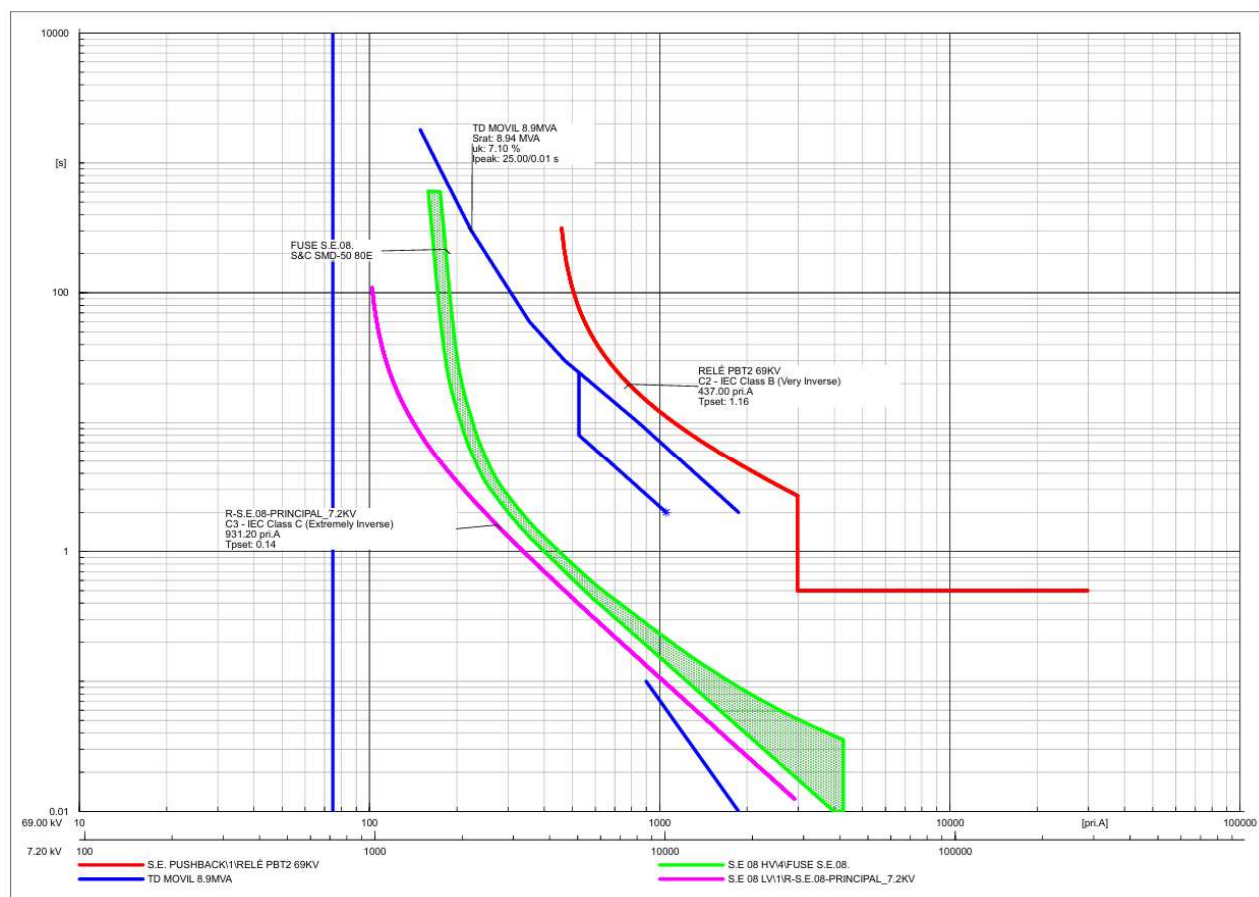


Figura D6:

Coordinación de protecciones – Perforadora N° 18 - S.E. 08 – 7.2 k V.

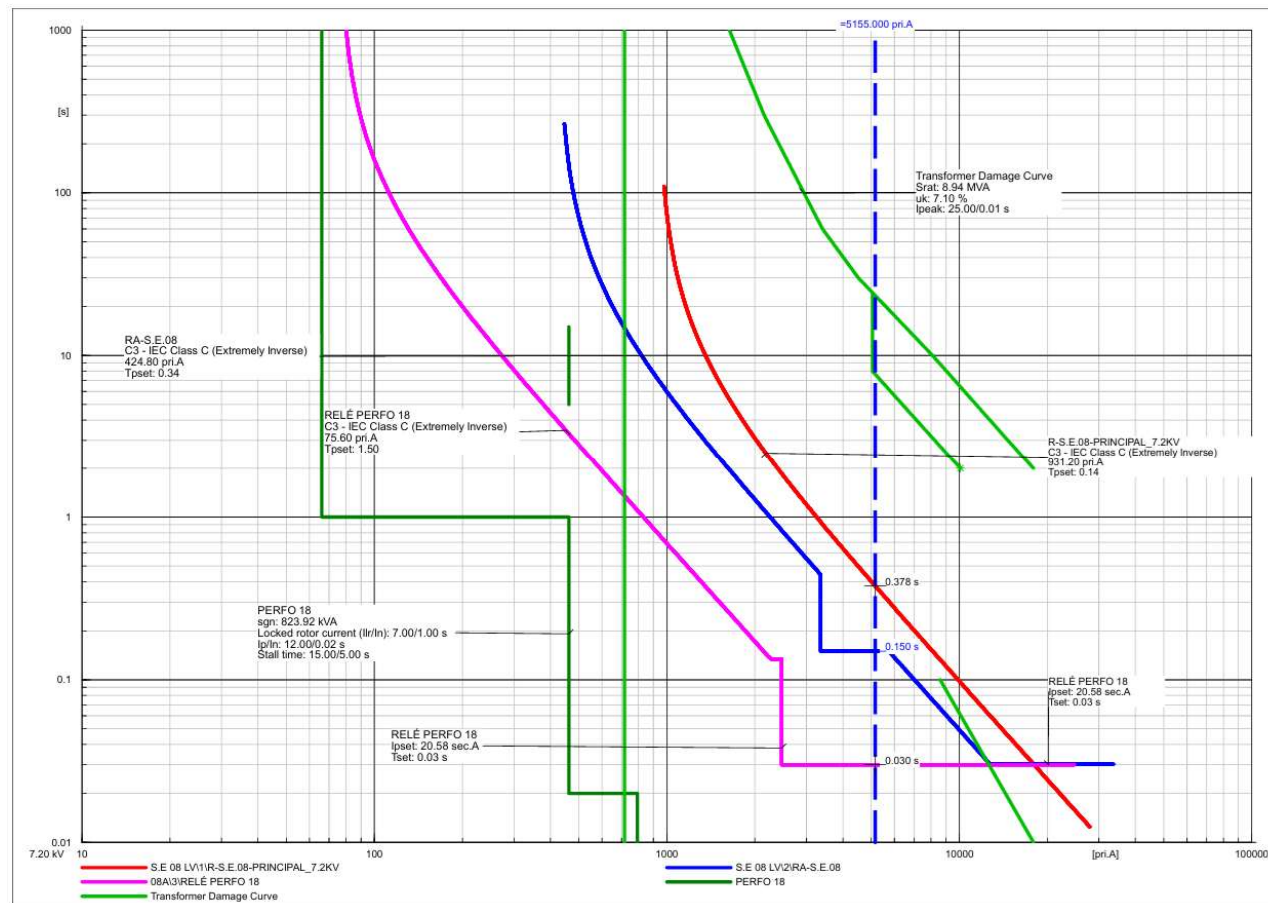


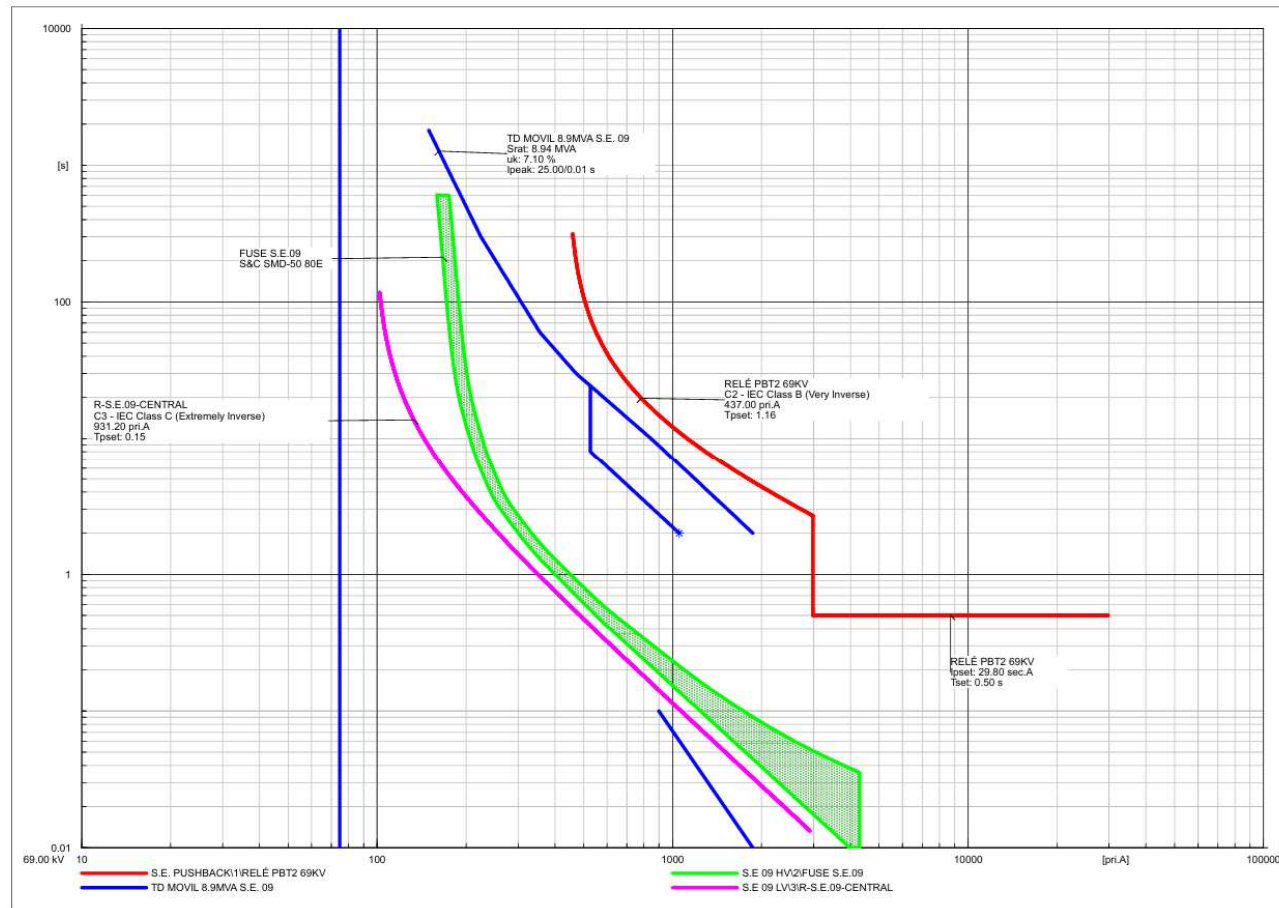
Figura D7:*Coordinación de protecciones – S.E. 09 - 69 k V.*

Figura D8:

Coordinación de protecciones – Pala N° 04 - S.E. 09 – 7.2 k V.

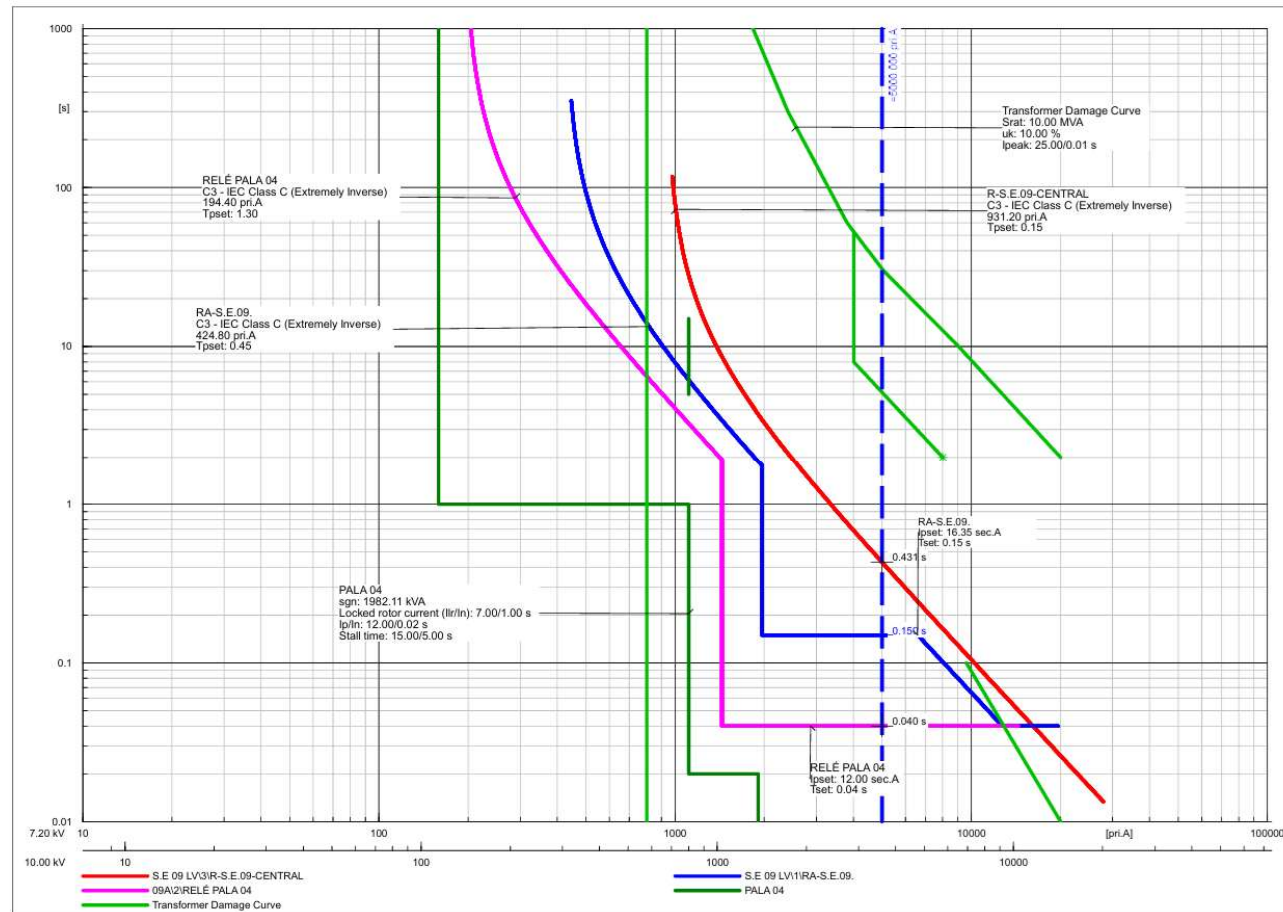


Figura D9:

Coordinación de protecciones – Perforadora N° 05 - S.E. 09 – 7.2 k V.

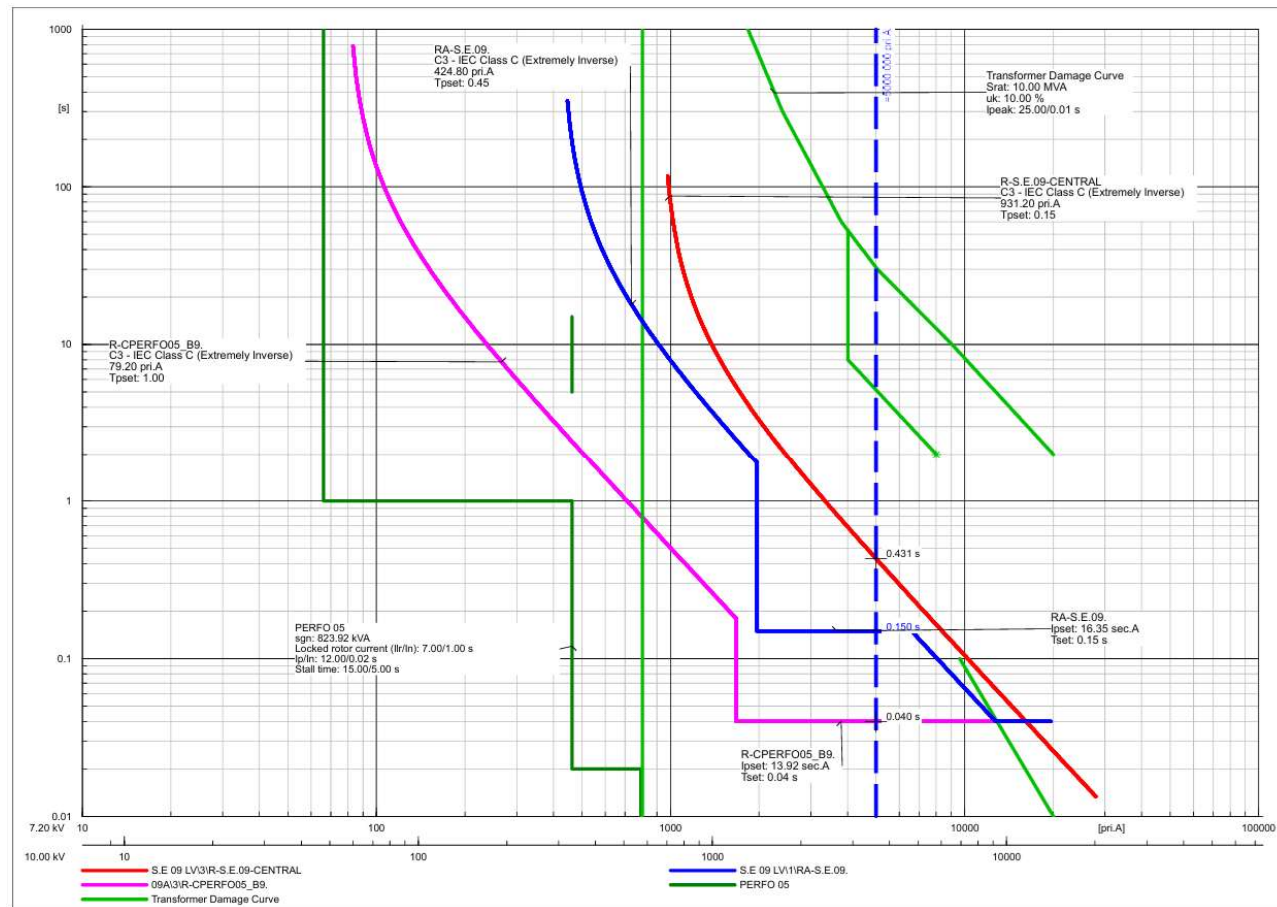


Figura D10:

Coordinación de protecciones – Pala N° 03 - S.E. 09 – 7.2 k V.

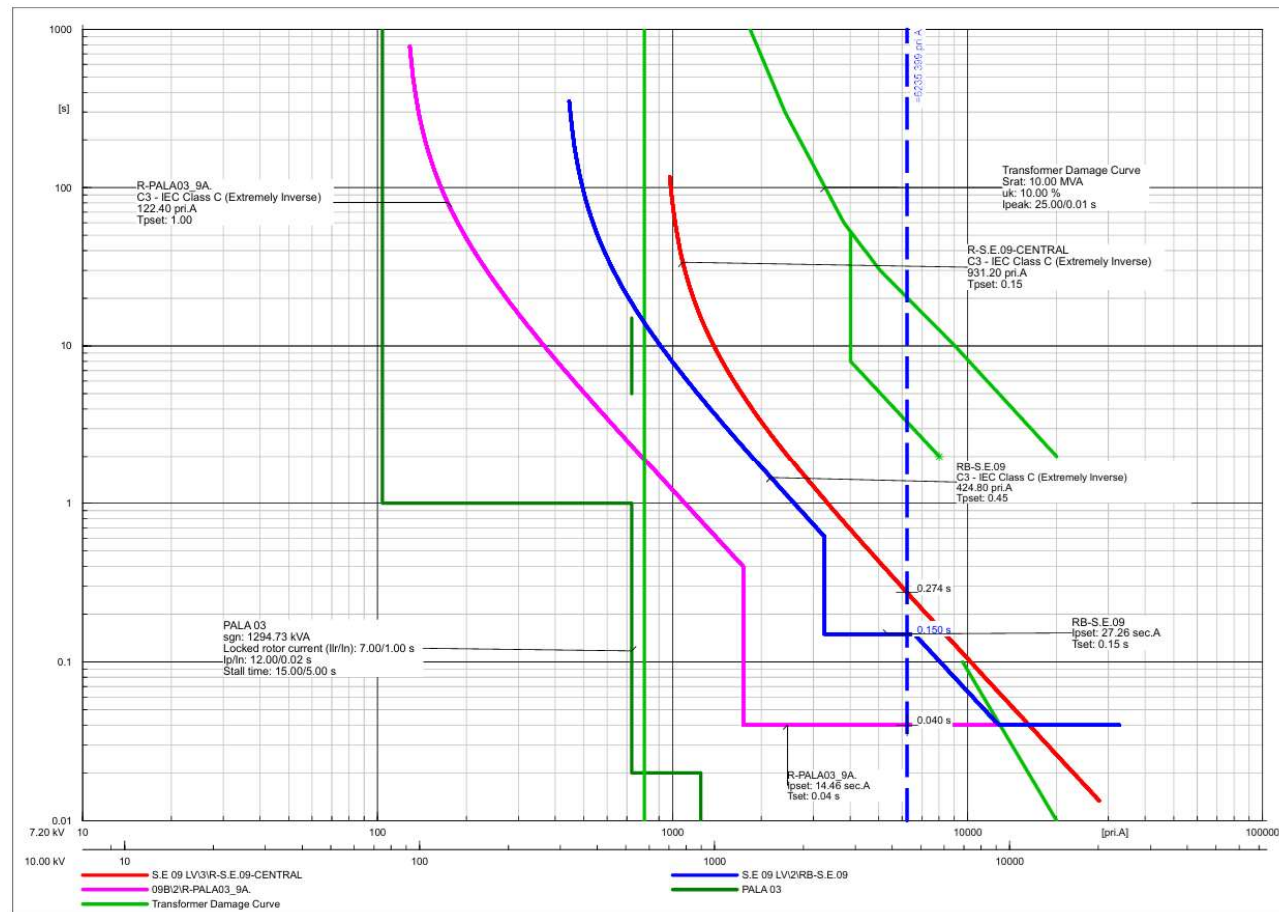


Figura D11:

Coordinación de protecciones – Perforadora N° 08 - S.E. 09 – 7.2 k V.

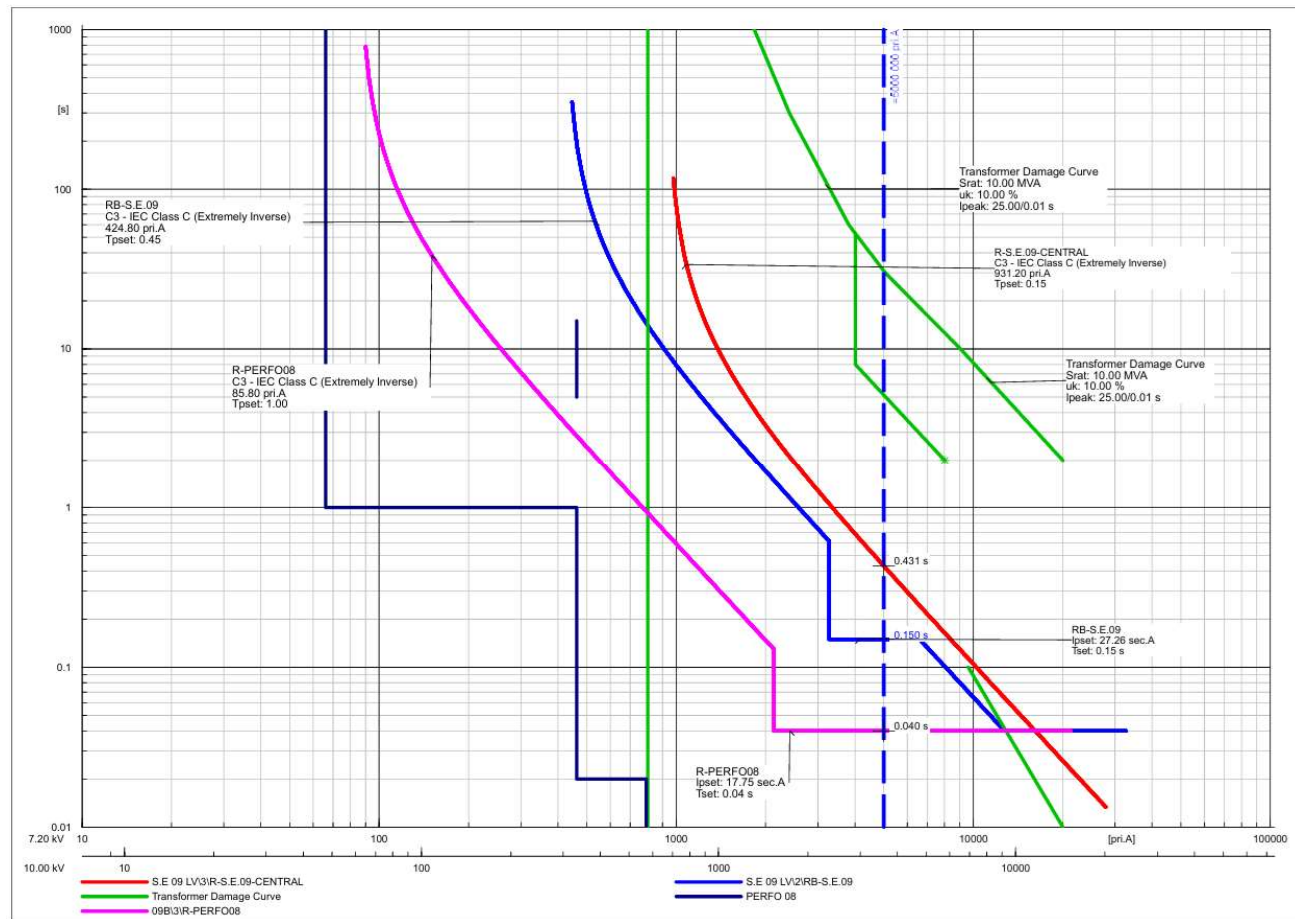


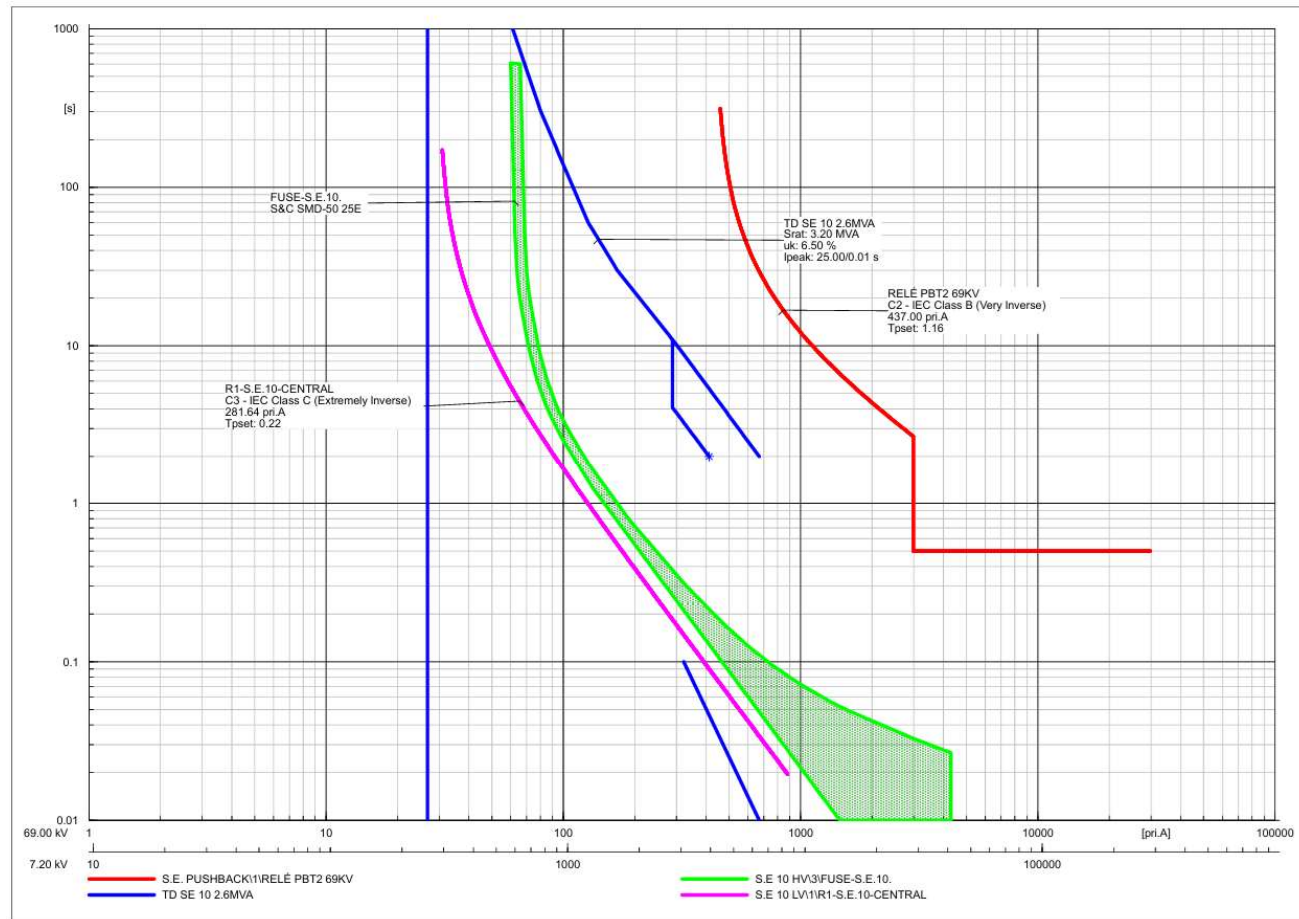
Figura D12:*Coordinación de protecciones – S.E. 10 - 69 k V.*

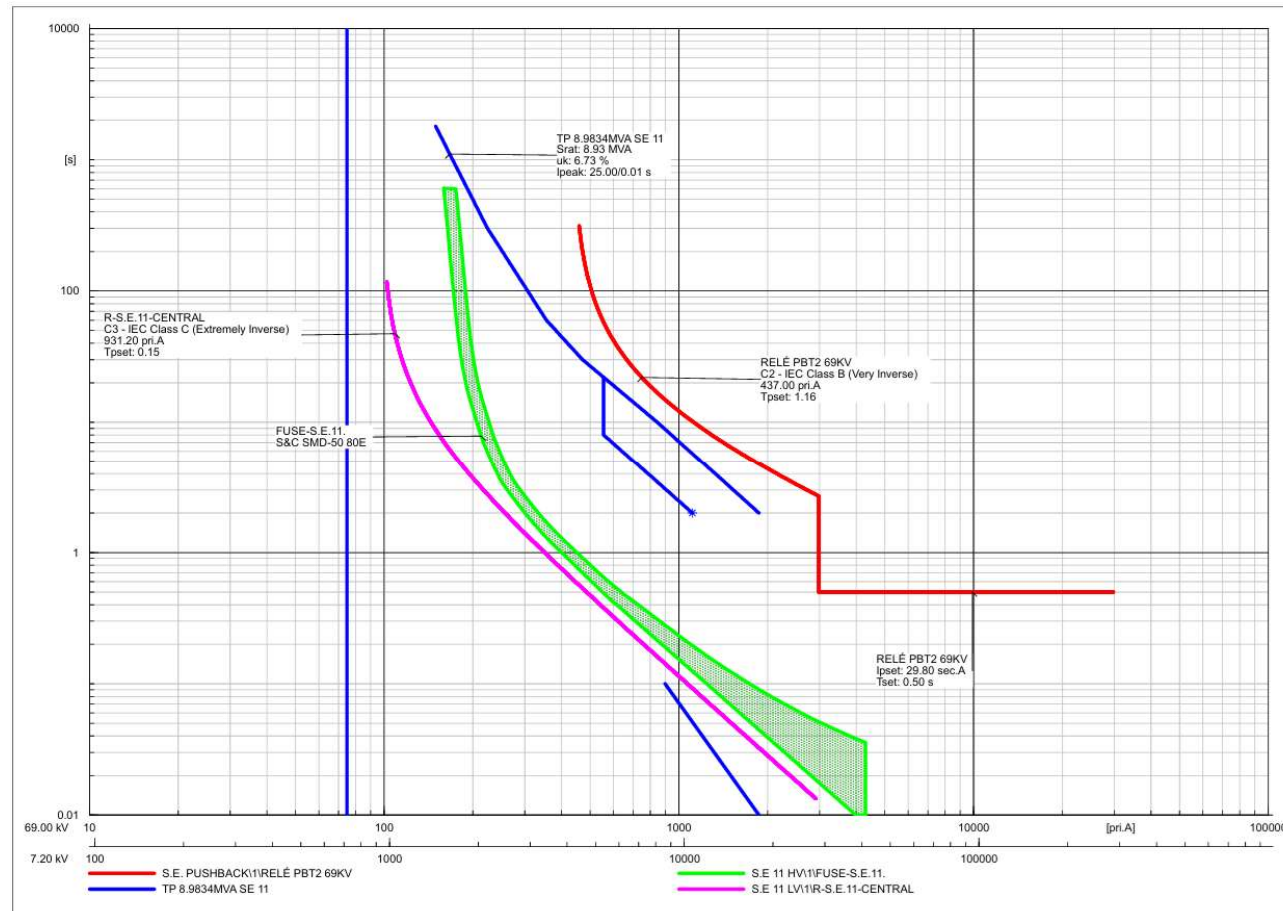
Figura D13:*Coordinación de protecciones – S.E. 11 - 69 k V.*

Figura D14:

Coordinación de protecciones – Pala N° 01 - S.E. 11 – 7.2 k V.

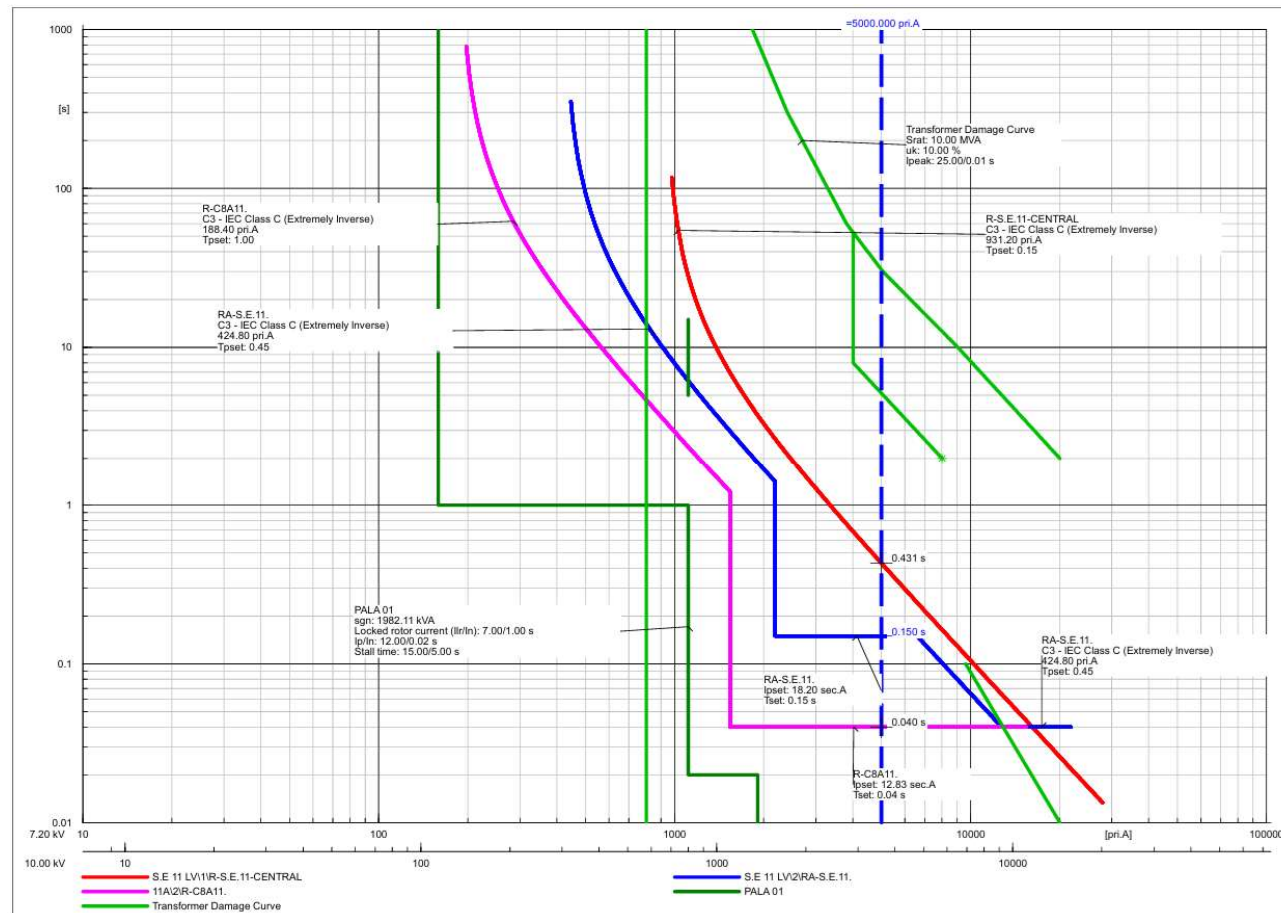


Figura D15:

Coordinación de protecciones – perforadora N° 17 - S.E. 11 – 7.2 k V.

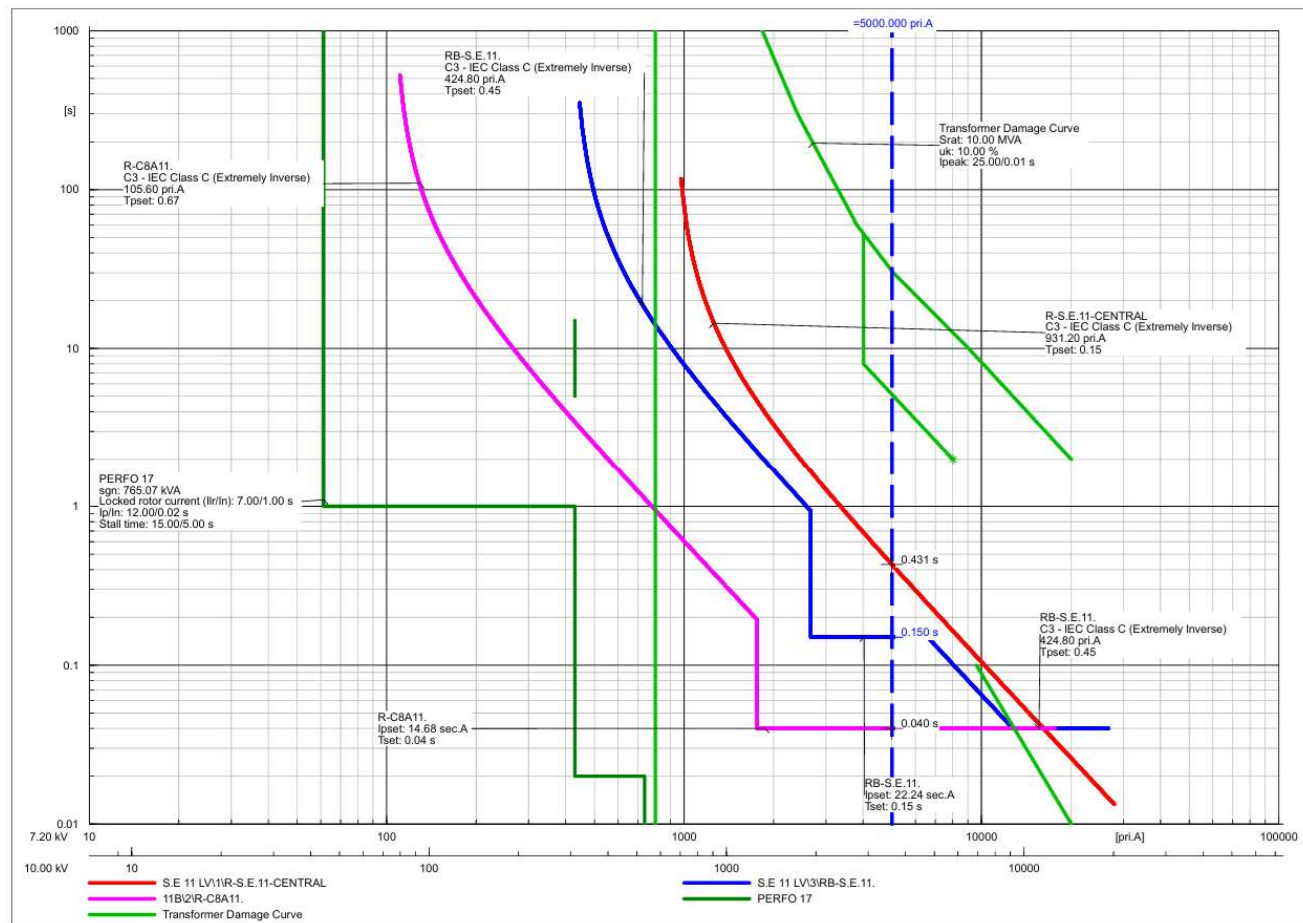


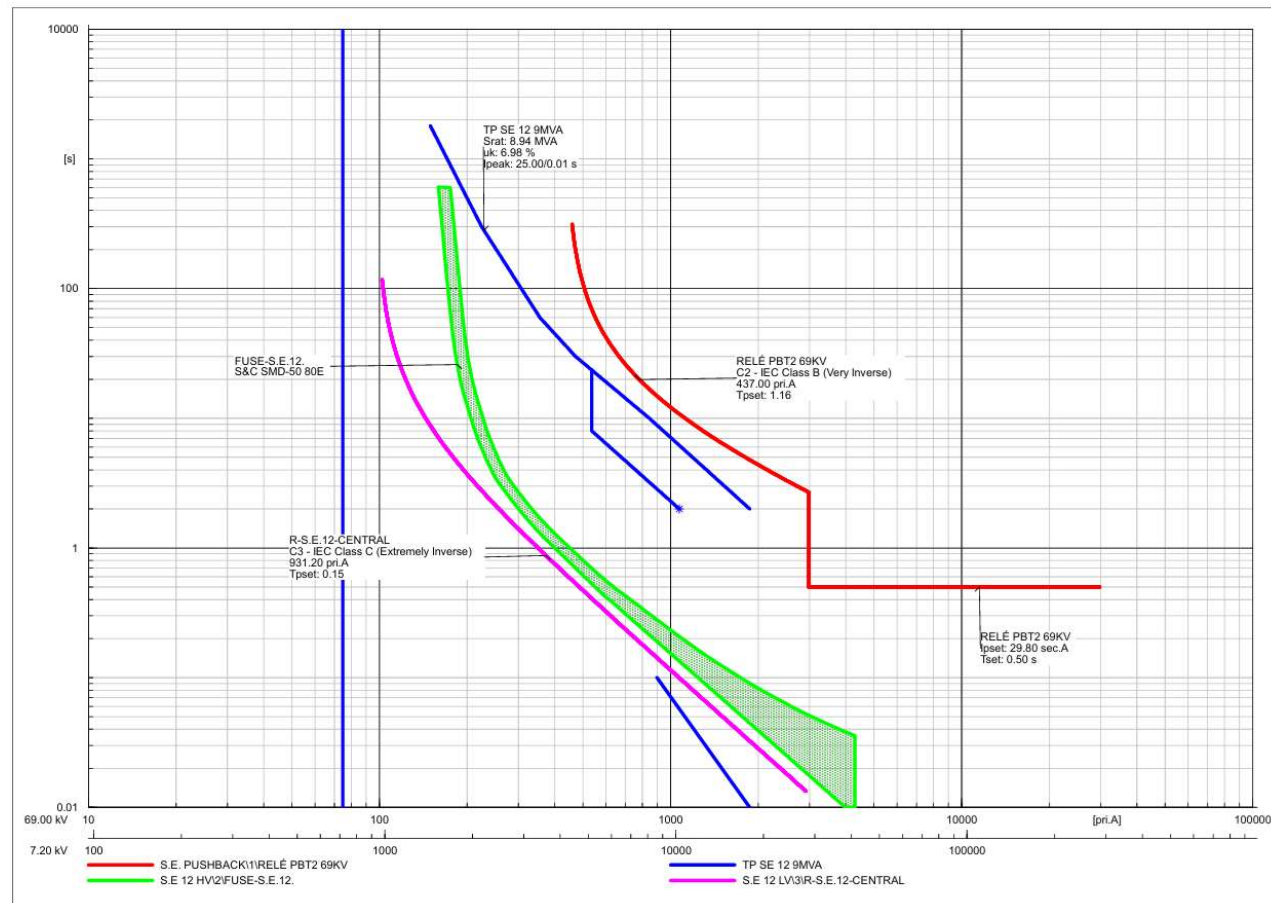
Figura D16:*Coordinación de protecciones – S.E. 12 - 69 k V.*

Figura D17:

Coordinación de protecciones – pala N° 05 - S.E. 12 – 7.2 k V.

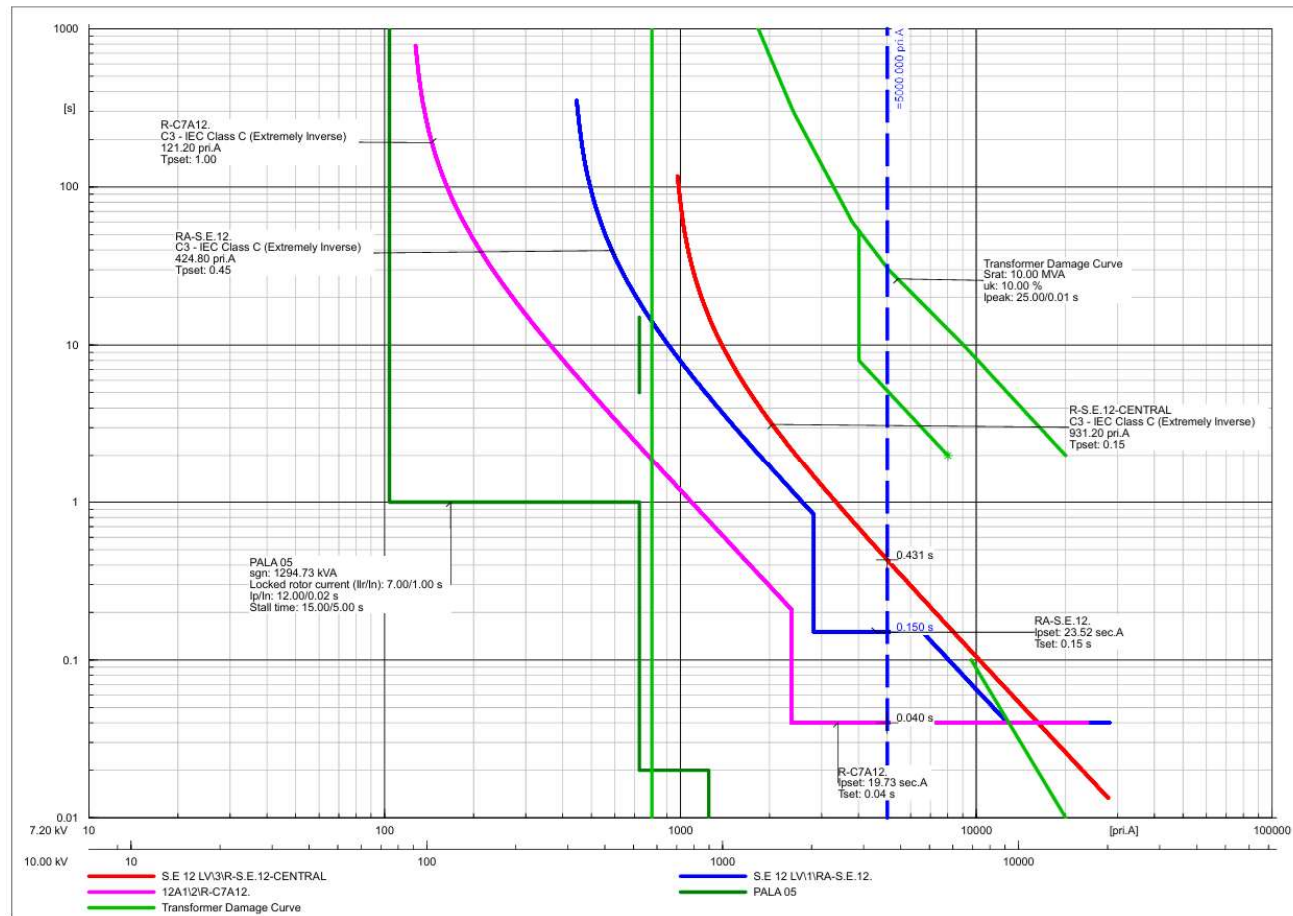




Figura D19:

Coordinación de protecciones – perforadora N° 16 - S.E. 12 – 7.2 k V.

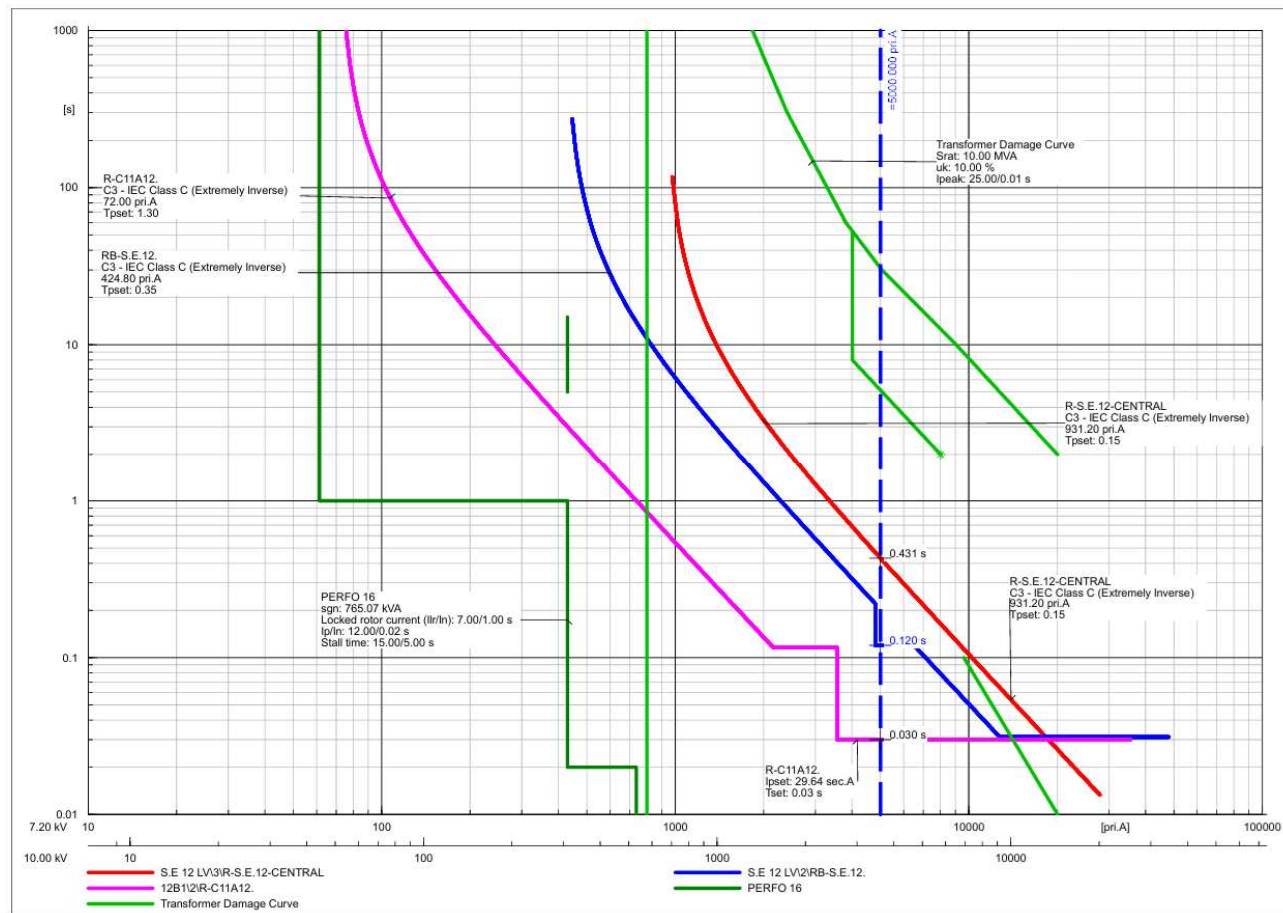


Figura D20:

Coordinación de protecciones – perforadora N° 12 - S.E. 12 – 7.2 k V.

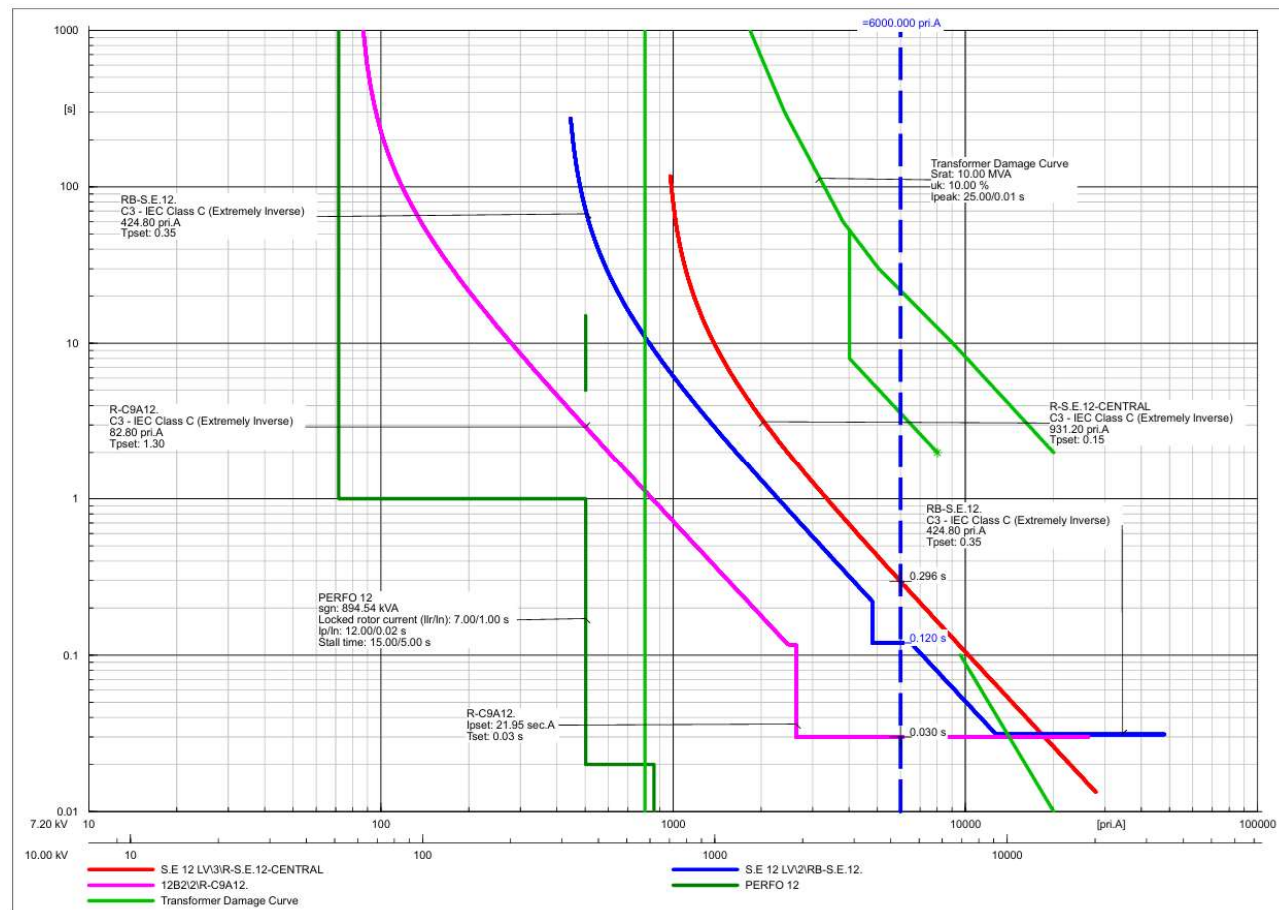


Figura D21:

Coordinación de protecciones – perforadora N° 07 - S.E. 12 – 7.2 k V.

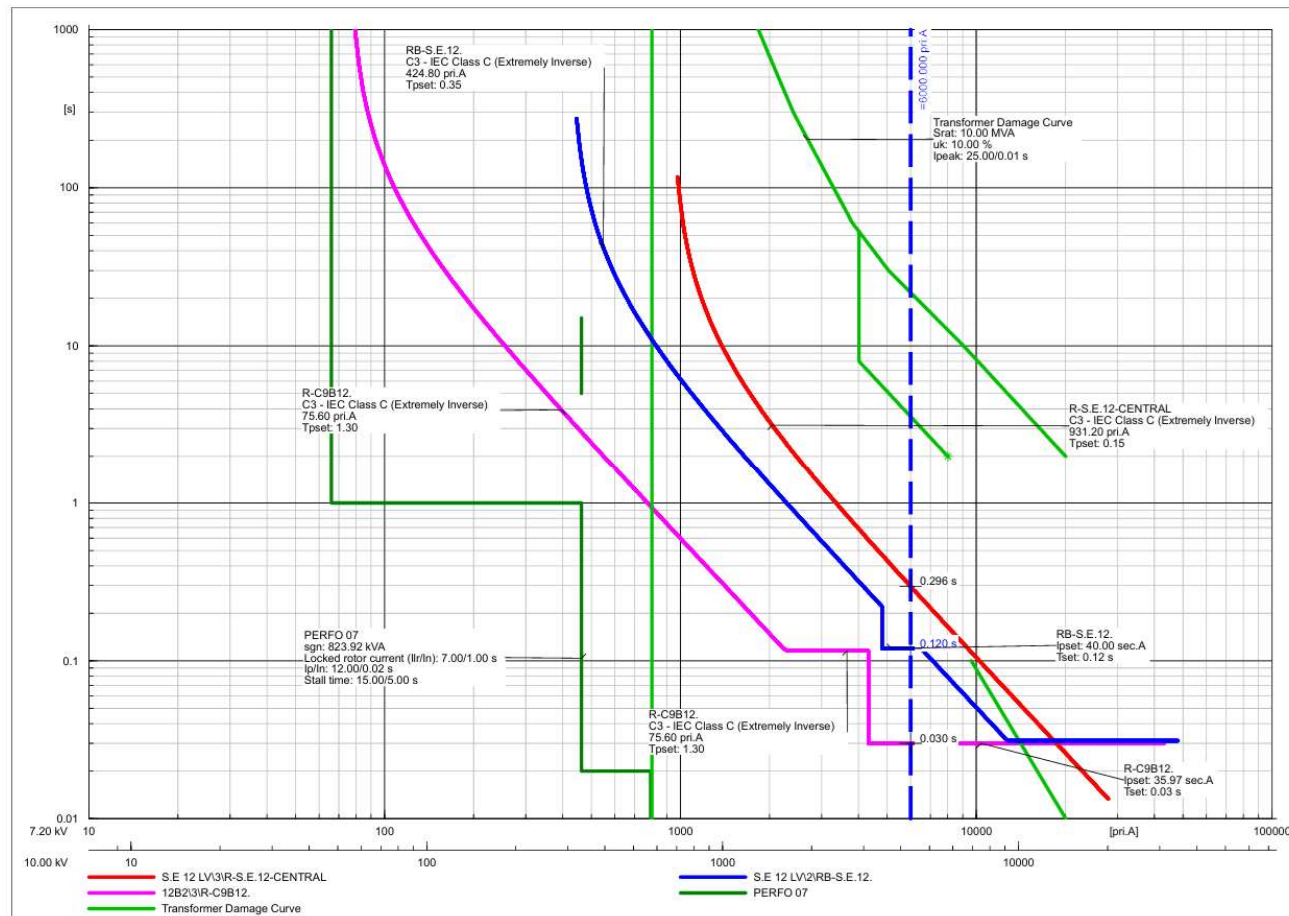


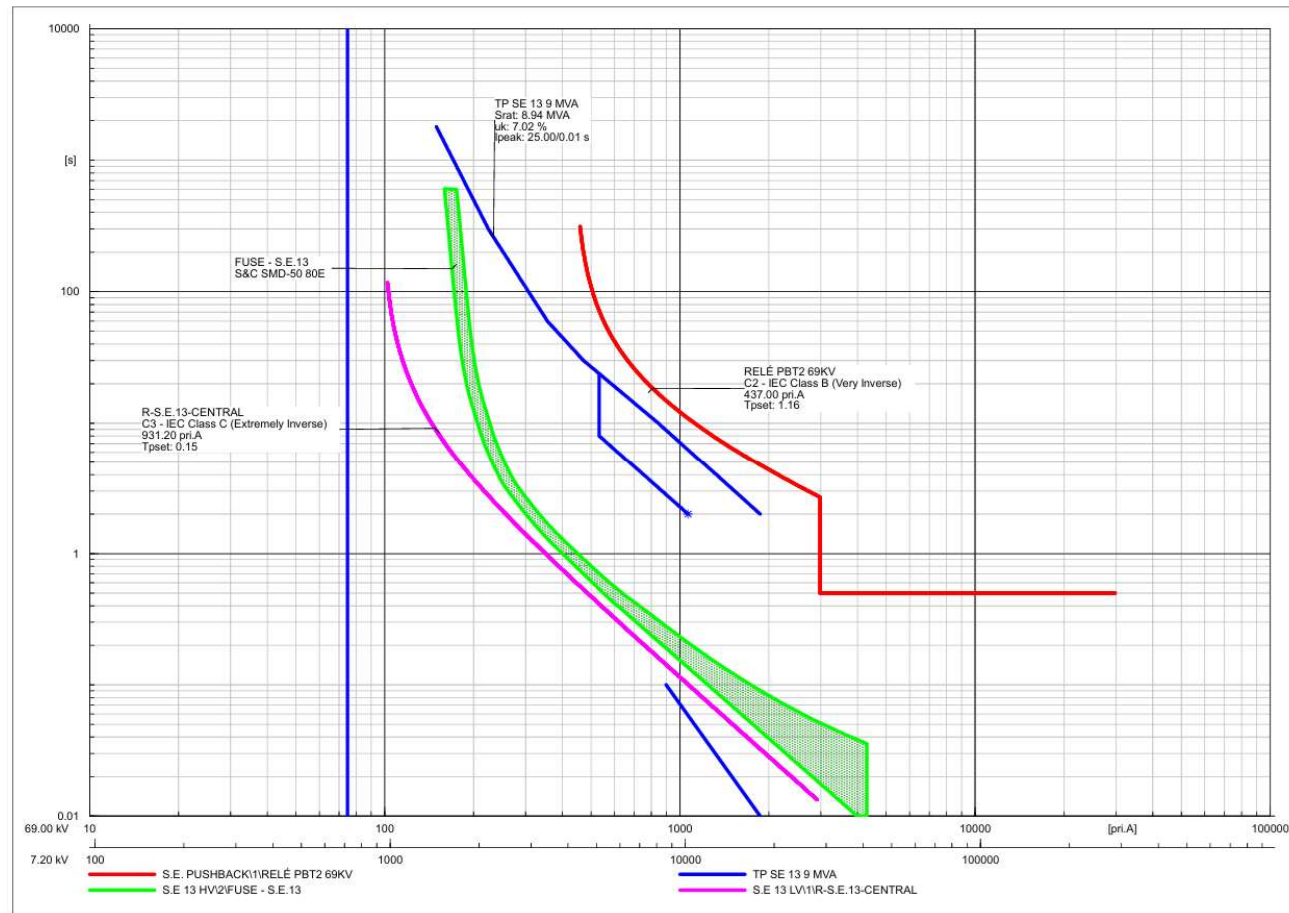
Figura D22:*Coordinación de protecciones – S.E. 12 - 69 k V.*

Figura D23:

Coordinación de protecciones – pala N° 08 - S.E. 13 – 7.2 k V.

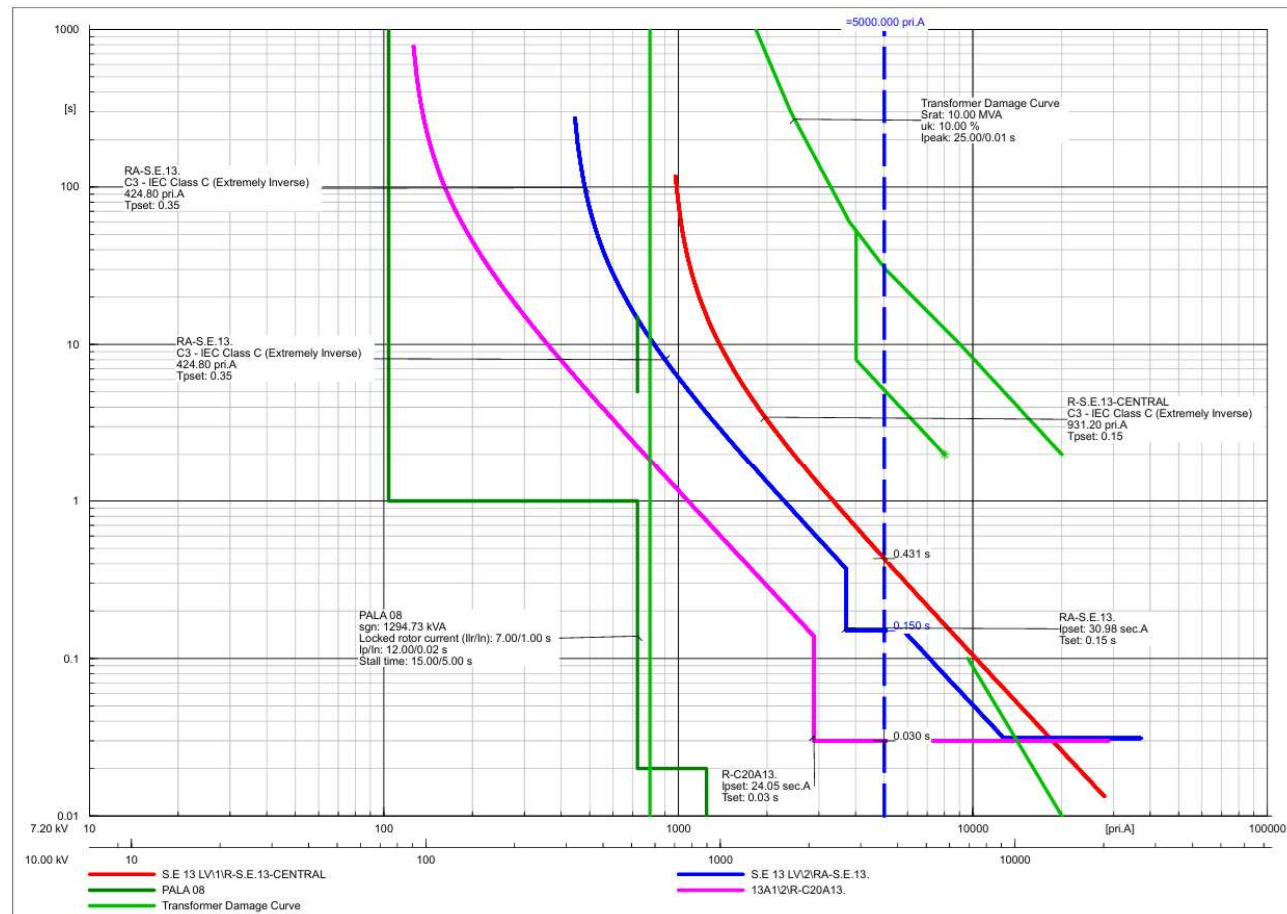


Figura D24:

Coordinación de protecciones – perforadora N° 04 - S.E. 13 – 7.2 k V.

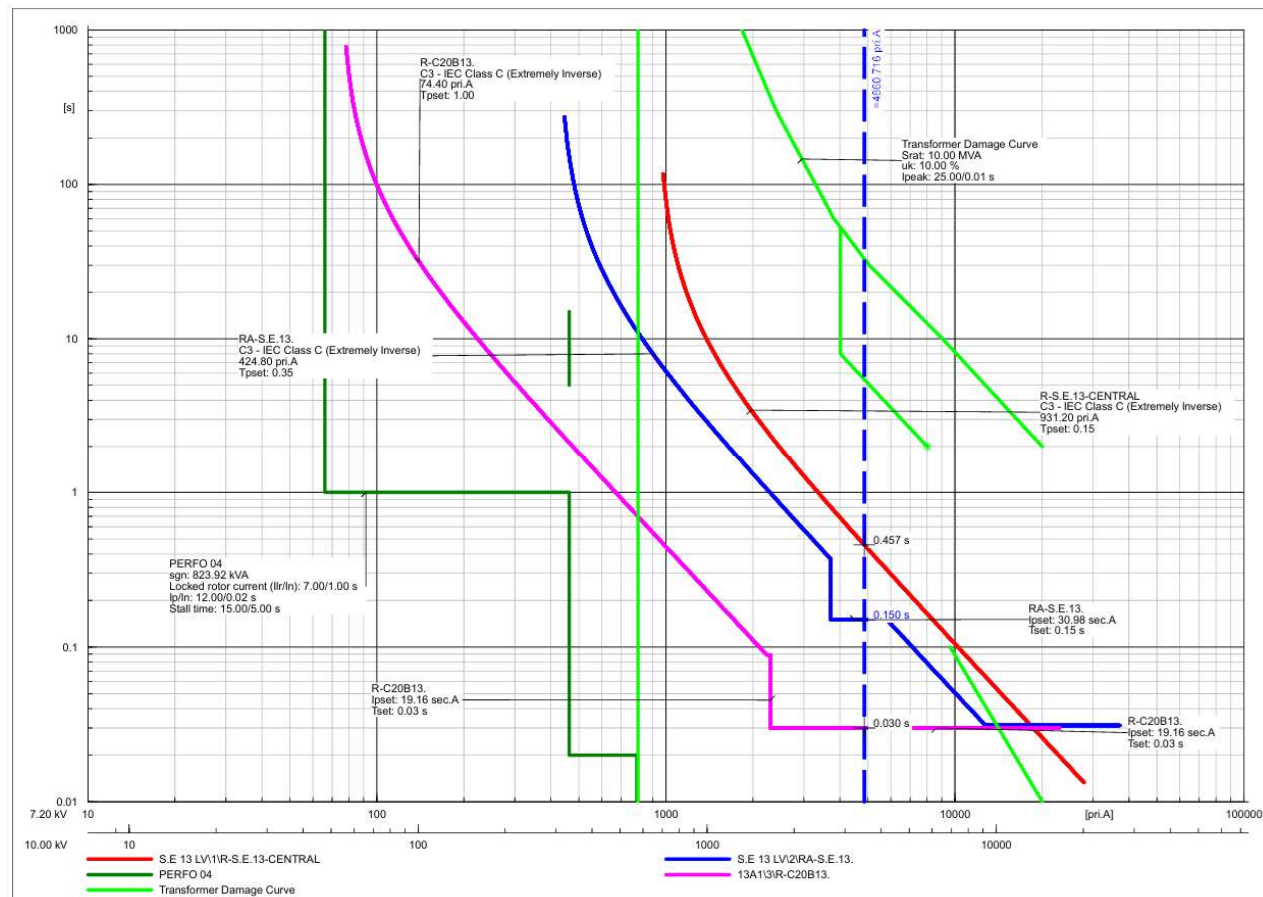


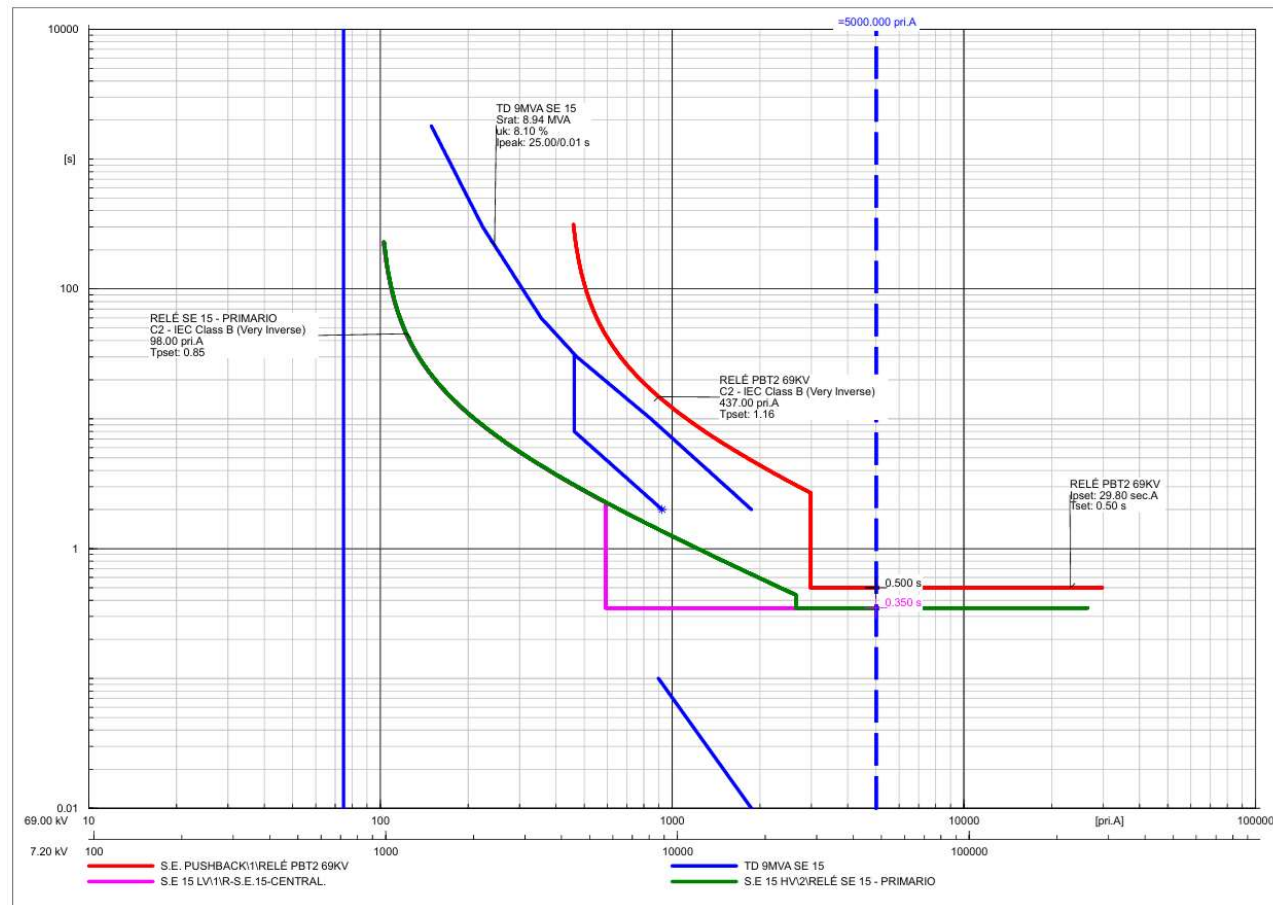
Figura D25:*Coordinación de protecciones – S.E. 15 - 69 k V.*

Figura D26:

Coordinación de protecciones – pala N° 07 - S.E. 15 – 7.2 k V.

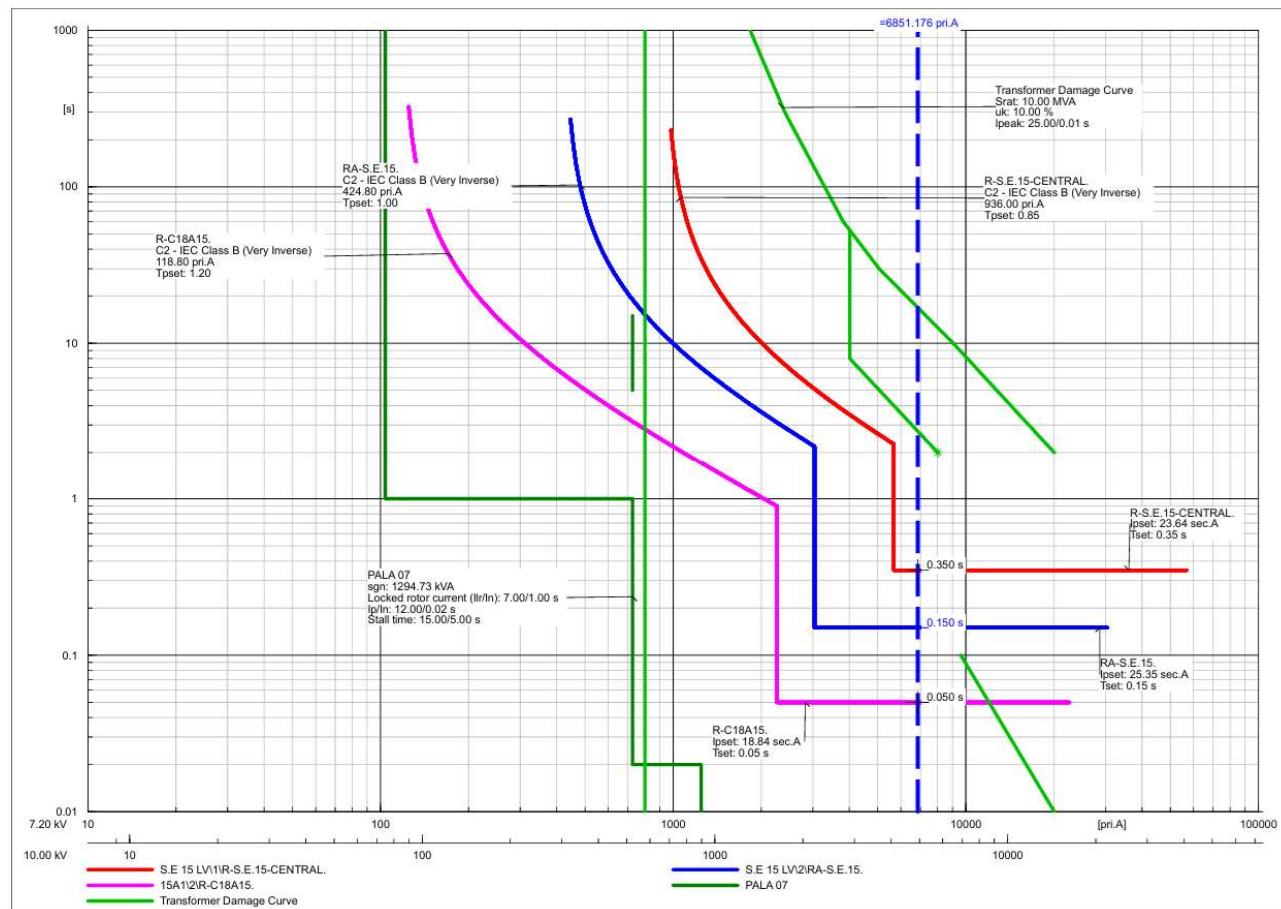


Figura D27:

Coordinación de protecciones – perforadora N° 09 - S.E. 15 – 7.2 k V.

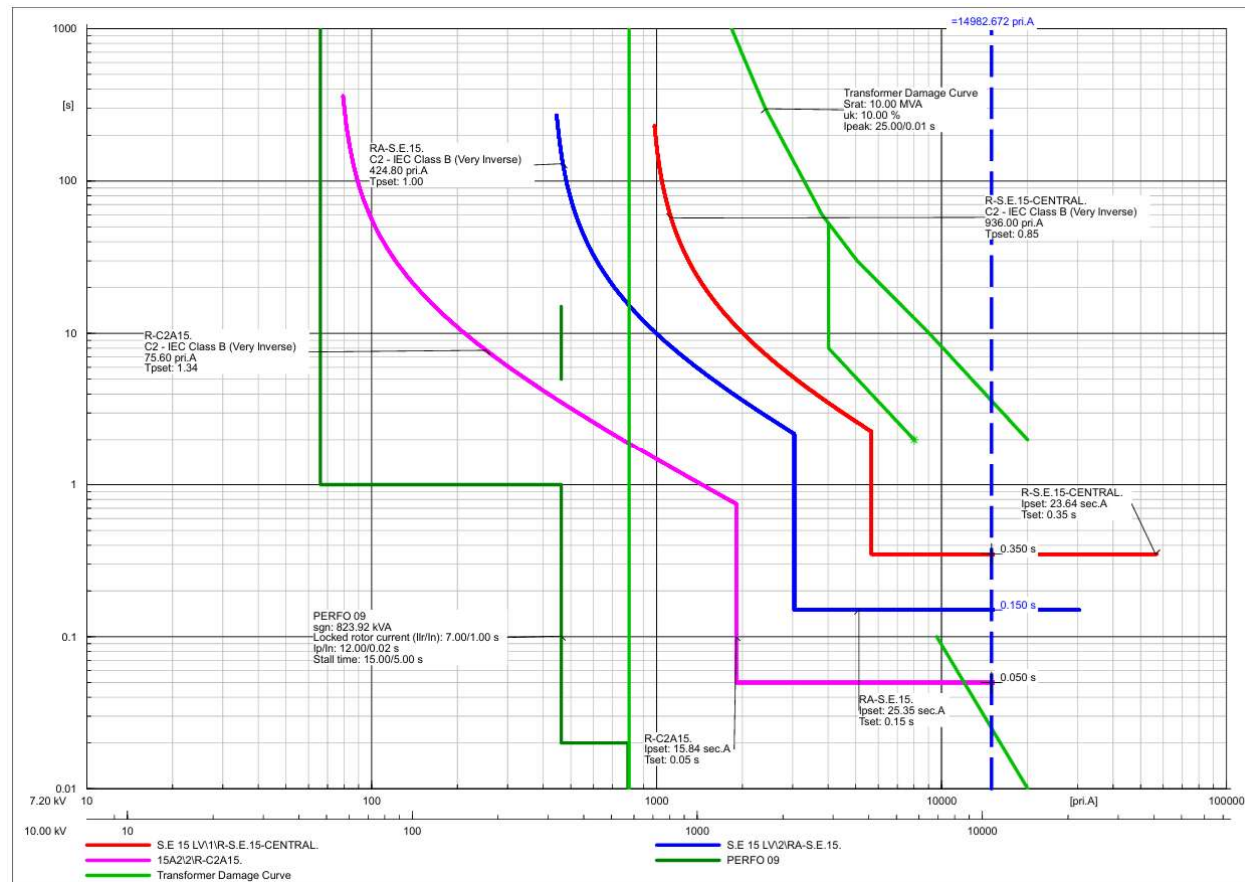


Figura D28:

Coordinación de protecciones – perforadora N° 21 - S.E. 15 – 7.2 k V.

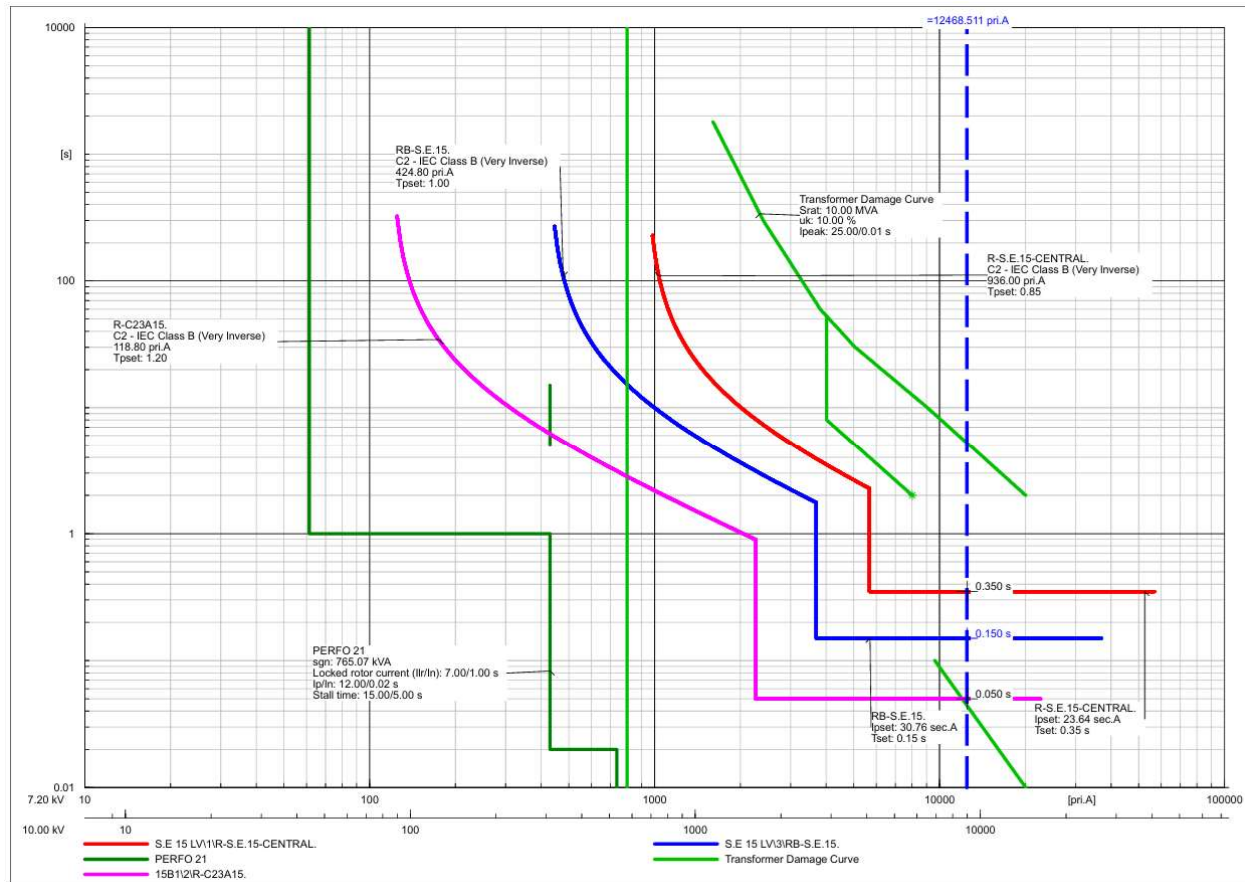
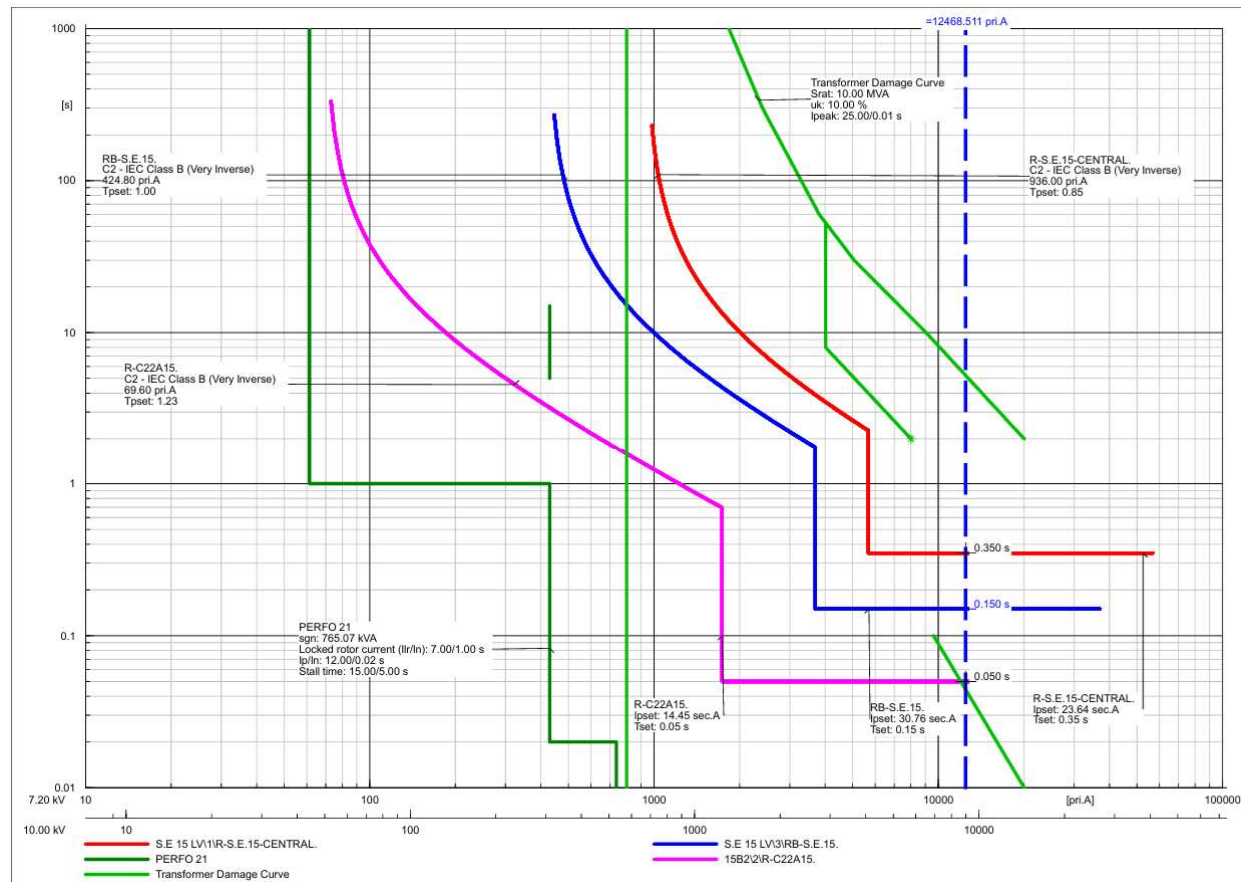


Figura D29:

Coordinación de protecciones – perforadora N° 21 - S.E. 15 – 7.2 kV.



Anexo E: Ficha técnica de cables de arrastre mineros 2/0 y 4/0, 7.2 kV.

Figura E01:

Ficha técnica 01 cable AWG 2/0, 4/0 American Cable Nexans.



36-526
TYPE SHD-GC 3/C
TPU JACKET • 25000 VOLTS

APPLICATION

Heavy duty high voltage portable power cable for use in circuits not exceeding the rated voltage. These cables are used for heavy mobile equipment such as drag lines, shovels, dredges, and for power feeders. Recommended maximum continuous conductor temperature in 90°C. Suitable for shallow water submersion.

Cable carries "P-184-MSHA" marking indicating acceptance as flame resistant by the Pennsylvania Department of Environmental Protection and the Mine Safety and Health Administration.

Tiger® Brand Mining Cable meets or exceeds ICEA Standards S-75-381/NEMA WC-58, ASTM B-172 and B-33.

Conductors
Flexible tinned copper

Ground Check Conductor²
Flexible tinned copper with yellow polypropylene insulation

Strand Shield
Semi-conducting layer

Insulation
90°C ethylene-propylene rubber (EPR)

Ground Wires
Flexible tinned copper

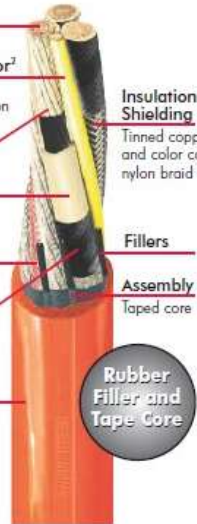
Insulation Shielding
Semi-conducting rubber and semi-conductive tape

Jacket¹
Thermoplastic Polyurethane (TPU) Jacket.
Cable identification via permanent marking.

Black jacket standard.
See Page 34 for jacket color options.

Also available with mold-cured thermosetting Chlorinated Polyethylene (CPE) jacket.
See page 18.

Application Note:
TPU may not be appropriate for non-mining applications.



Insulation Shielding
Tinned copper and color coded nylon braid

Fillers

Assembly
Taped core

Rubber Filler and Tape Core

Round-shaped cross-section



RATINGS & APPROVALS

- Mine Safety & Health Administration 184-MSHA.
- Pennsylvania Department of Environmental Protection P-184.
- Insulated Cable Engineers Association S-75-381/NEMA WC-58. Design standard for mining cables.
- Canadian Standards Association C22.2 No. 96
File 82346, FT1, FT5, -50°C
CSA Phase Color ID available on MTO
Type SHD-GC, SHD-BGC up to 25kV

Tiger® Brand is a registered trademark of AmerCable Incorporated, a Nexans Company.

20

Manufactured by Nexans AmerCable • (870) 862-4919 • (800) 643-1516 • Fax (870) 862-9613

Figura E02:

Ficha técnica 02 cable AWG 2/0, 4/0 American Cable Nexans.



36-526 • TYPE SHD-GC 3/C • TPU JACKET • 25000 VOLTS

36-526	Power Conductors			Grounding Conductors			Nominal Outside Dimensions in.	Approx. Weight lbs. per 1,000 ft.	Ampacity* 40°C Ambient Temp	Primary Usage Recommendation
	Size AWG	No. of Wires per Conductor	Insulation Thickness mils	Size AWG	No. of Wires per Conductor	Jacket Thickness mils				
001	1	259	260	5	133	265	2.95	4410	191	 Dragline
010	1/0	266	260	4	259	265	3.05	4866	218	
020	2/0	323	260	3	259	280	3.20	5560	249	
030	3/0	418	260	2	259	280	3.33	6192	286	
040	4/0	532	260	1	259	295	3.50	7110	327	
250	250	627	260	1/0	266	295	3.54	7692	360	
350	350	888	260	2/0	323	295	3.85	9608	439	

¹ Jacket – Standard jacket is black.
See page 34 for TPU jacket color options.

² Ground Check Conductor – 8 AWG (minimum 133 strand 7x19) ground check conductor on 4 AWG through 4/0 AWG cable.
6 AWG (minimum 133 strand 7x19) ground check conductor on 250 kcmil and larger cable.

* Ampacity – Based on continuous duty at 90°C conductor temperature.

Tolerances – +8%/-5% of nominal outside diameter.



AWG/Metric Cross Reference

AWG/ kcmil Size	Area of AWG/kcmil in mm ²	Nearest Standard Metric Cond. mm ²
22	0.35	0.50
20	0.52	0.50
18	0.82	1.00
16	1.31	1.50
14	2.08	2.50
12	3.31	4
10	5.26	6
8	8.37	10
6	13.30	16
4	21.15	25
2	33.62	35
1	42.41	50
1/0	53.49	50
2/0	67.43	70
3/0	85.01	95
4/0	107.2	120
250	126.7	120
300	152.0	150
350	177.3	185
400	202.7	240
500	253.4	240
600	304.0	300
750	380.0	400
800	405.4	400
1000	506.7	500

350 Bailey Road • El Dorado, Arkansas USA • www.nexansamericable.com • e-mail: mining@nexansamericable.com

21



Figura E03:

Ficha técnica 01 de cables aéreo de cobre AWG 4/0, 7.2kV.





ALAMBRE Y CABLE DE COBRE DESNUDO

DESCRIPCIÓN:
Conductor sólido (alambre) o cable (concéntrico multifilamento) de cobre cableado clase A o B en temple duro o recocido para fines eléctricos.

APLICACIÓN:
Conductores ideales para sistemas de puesta a tierra.
Líneas aéreas de distribución

EMPAQUE: Calibres del 8 al 14 AWG: rollos de 100 m.
Calibres mayores a 8 AWG: Carretas en múltiplos de 1000 m.

TEMP. DE OPERACIÓN: 75°C

VOLTAJE: 600 V

ALAMBRE
CABLE




NORMA APLICABLE:
NTC 359 ASTM B8

CERTIFICADOS:
SEGÚN RETIE: 01861
SEGÚN NORMA: 00814

nuestra empresa

construcción

flexibles

Cu desnudo

telefónicos

Al desnudo

control

fuerza

distribución

media tensión

esmaltados

otras aplicaciones

27

Figura E04:

Ficha técnica 02 de cables aéreo de cobre AWG 4/0, 7.2kV.

Nexans
COLOMBIA

CABLES Y ALAMBRES DE COBRE DESNUDO

AWG ó KCM	CONDUCTOR				PESO (kg/km)	RESISTENCIA ELÉCTRICA 20°C DC (ohm/km)		RMG (mm)	REACT. INDUCTIVA (ohm/km)	REACT. CAPACITIVA (Mohm-km)	CAPAC. DE CORRIENTE (A)
	HILOS		CABLEADO			SUAVE	DURO				
	CANT.	DIÁM. (mm)	DIÁM. (mm)	ÁREA (mm²)							
14	1	1,628	1,63	2,08	18,86	8,279	8,610	0,63	0,466	0,283	36
14	7	0,615	1,85	2,08	18,86	8,444	8,782	0,67	0,461	0,277	37
12	1	2,052	2,05	3,31	30,01	5,211	5,419	0,80	0,448	0,272	48
12	7	0,775	2,33	3,31	30,01	5,315	5,525	0,85	0,444	0,266	49
10	1	2,588	2,59	5,26	47,70	3,278	3,409	1,01	0,431	0,261	64
10	7	0,978	2,93	5,26	47,70	3,344	3,477	1,07	0,426	0,255	65
8	1	3,264	3,26	8,37	75,90	2,061	2,143	1,27	0,413	0,250	85
8	7	1,234	3,70	8,37	75,90	2,100	2,185	1,34	0,409	0,244	87
6	1	4,115	4,12	13,3	120,60	1,297	1,349	1,60	0,396	0,239	113
6	7	1,554	4,66	13,3	120,60	1,320	1,375	1,69	0,392	0,233	116
4	1	5,189	5,19	21,2	192,24	0,815	0,848	2,02	0,378	0,228	151
4	7	1,961	5,88	21,2	192,24	0,830	0,863	2,14	0,374	0,222	154
2	7	2,474	7,42	33,6	304,68	0,522	0,544	2,69	0,357	0,210	206
1	19	1,686	8,43	42,4	384,47	0,415	0,431	3,19	0,344	0,204	239
1/0	19	1,892	9,46	53,5	485,13	0,328	0,342	3,59	0,335	0,199	276
2/0	19	2,126	10,63	67,4	611,17	0,261	0,271	4,03	0,326	0,193	319
3/0	19	2,388	11,94	85,0	770,76	0,207	0,215	4,53	0,317	0,188	369
4/0	19	2,680	13,40	107	970,25	0,164	0,171	5,08	0,309	0,182	427
250	37	2,088	14,62	127	1151,61	0,139	0,144	5,61	0,301	0,178	474
300	37	2,286	16,00	152	1378,31	0,116	0,120	6,15	0,294	0,174	531
350	37	2,471	17,30	177	1605,00	0,099	0,103	6,64	0,289	0,170	584
400	37	2,642	18,49	203	1840,76	0,087	0,090	7,10	0,284	0,167	635
500	37	2,951	20,66	253	2294,15	0,069	0,072	7,94	0,275	0,162	728
600	61	2,520	22,68	304	2756,61	0,058	0,060	8,75	0,268	0,157	814
700	61	2,720	24,48	355	3219,07	0,050	0,052	9,45	0,262	0,153	894
750	61	2,817	25,35	380	3445,76	0,046	0,048	9,79	0,259	0,159	932
1000	61	3,251	29,26	507	4597,37	0,035	0,036	11,30	0,248	0,145	1103

Capacidad de corriente a temperatura ambiente de 40°C, temperatura del conductor de 80°C, velocidad del viento de 610 mm/seg, a nivel del mar y a 60 Hz.

Reactancias inductiva y capacitiva a 60 Hz y a una separación de 0.3048 m entre fases, de forma equilateral.

RMG= Radio Medio Geométrico

Los datos indicados en esta tabla están sujetos a tolerancias normales de fabricación.

nuestra empresa	construcción	flexibles	Cu desnudo	telefónicos	Al desnudo
control	fuerza	distribución	media tensión	esmaltados	otras aplicaciones

Figura E05:

Ficha técnica 01 de cables aéreo de aluminio ACSR 4/0, 69kV.

CABLE ACSR

DESCRIPCIÓN:
 Los cables tipo ACSR (Aluminum Conductors Steel Reinforced), están formados a partir de aluminio obtenido por refinación electrolítica con pureza de 99,5 % y conductividad mínima de 61,0 % de la conductividad del cobre a 20°C (IACS) "International Annealed Copper Standard", todos los cables están formados por hilos de temple duro, cableados concéntricamente sobre un número de acero galvanizado.

CARACTERÍSTICAS:
 Alta resistencia a la tensión, debido al núcleo de acero galvanizado. Bajo peso y alta capacidad de corriente, larga vida, mayor claro interpostal y bajo mantenimiento.

VOLTAJE MÁXIMO DE OPERACIÓN:
 De acuerdo al aislador soporte.

TEMPERATURA MÁXIMA DE OPERACIÓN:
 Para líneas aéreas 75°C en su diseño.

APLICACIÓN:
 Los conductores tipo ACSR son utilizados como líneas de transmisión en altos voltajes a grandes distancias, y líneas de distribución en circuitos de alta y baja tensión en áreas urbanas y rurales, así como alimentación general a empresas y subestaciones, con una mayor distancia interpostal.

EMPAQUE:
 Carretes de madera.

RANGO DE FABRICACIÓN:
 Calibres del 6 AWG hasta 1 113 kcmil.

ESPECIFICACIONES:
 NOM-063-SCFI
 NMX-J-027-ANCE
 NMX-J-058-ANCE NRF 017 CFE

REGISTRO:
 Aprobación NOM, ANCE.

DATOS PARA PEDIDO:
 Cable de aluminio tipo ACSR, calibre, código mundial y cantidad requerida en kilogramos o en metros.



Figura E06:

Ficha técnica 01 de cables aéreo de aluminio ACSR 4/0, 69kV.

CABLE ACSR								
CÓDIGO MUNDIAL	CALIBRE AWG O kcmil	NÚMERO DE HILOS ALUMINIO	NÚMERO DE HILOS ACERO	EQUIVALENTE EN COBRE A W G kcmil	MASA APROX. kg/km	CARGA DE RUPTURA APROX. kN	RESISTENCIA ELÉCTRICA A 20°C Ω/km	AMPACIDAD * AMPÉRES (A)
TURKEY	6	6	1	8	53,7	5,30	2,150	100
SWAN	4	6	1	6	85,5	8,30	1,350	140
SPARROW	2	6	1	4	135,7	12,67	0,853	180
RAVEN	1/0	6	1	2	216,2	19,48	0,535	230
QUAIL	2/0	6	1	1	272,0	23,52	0,424	270
PIGEON	3/0	6	1	1/0	343,8	29,38	0,336	300
PENGUIN	4/0	6	1	2/0	433,1	37,03	0,267	340
PATRIDGE	266,8	26	7	3/0	545,4	50,22	0,214	460
LINNET	336,4	26	7	4/0	689,9	62,99	0,170	530
ORIOLE	336,4	30	7	4/0	784,5	77,34	0,170	530
IBIS	397,5	26	7	250	813,4	72,55	0,143	590
LARK	397,5	30	7	250	924,4	90,66	0,144	600
HAWK	477,0	26	7	300	975,8	86,54	0,119	670
FLICKER	477,0	24	7	300	914,6	76,50	0,119	654
HEN	477,0	30	7	300	1 110,0	105,35	0,119	670
DOVE	556,5	26	7	350	1142,0	101,22	0,102	730
EAGLE	556,5	30	7	350	1298,0	123,07	0,103	730
GROSBEAK	636,0	26	7	400	1302,0	112,23	0,089 8	780
STARLING	715,5	26	7	450	1465,0	126,37	0,079 8	840
CONDOR	795,0	54	7	500	1522,0	125,46	0,071 6	900
DRAKE	795,0	26	7	500	1626,0	140,07	0,071 6	900
CANARY	900,0	54	7	566	1726,0	141,37	0,063 3	970
BLUEJAY	1 113,0	45	7	700	1871,0	133,17	0,051 1	1051

Nota: datos aproximados y sujetos a tolerancias normales de manufactura.
 * Ampacidad calculada para una temperatura de operación de 75°C en el conductor, 25°C temperatura ambiente 0,5 factor de emisión (para cobre opaco) y viento de 0,6 m/s (2,0 ft/s.) en dirección perpendicular al eje de la línea.

Figura E07:

Ficha técnica 01 de perforadora eléctrica P&H 320XPC.

General Specifications

320XPC

Rotary Blasthole Drill

Rotary Machinery

Design	Dual DC P&H electric motors, independent ABB DCS-800 drives control (Master/Follower drive topology), can be run as single rotary motor during service/repairs
Rotation Speed	0-119 RPM
Maximum Torque	Up to 33,895 Nm (25,000 ft-lbs.) for standard gear ratio

Working Ranges

Hole Diameter	270 mm to 444 mm	10 3/4 in. to 17 1/2 in.
Maximum Single Pass Hole Depth:		
Standard:	19.8 m	65 ft.
Optional:	21.3 m	70 ft.
Maximum Multi-Pass Hole Depth:		
Single Pipe Rack:	39.6 m	130 ft.
Dual Pipe Rack:	59.4 m	195 ft.
Maximum Bit Loading	68,038 kg	150,000 lbs.

Mast

Construction	Lattice type using alloy steel structural shapes		
Mast	Standard:	19.81 m	65 ft.
	Optional:	21.3 m	70 ft.
Raising and Lowering	Two hydraulic cylinders Standard diameter:	267 mm	10.5 in.

Hoist/Pulldown

Design	DC electric motor driven chainless rack and pinion design		
Bit Loading (maximum)	68,038 kg	150,000 lbs.	
Drill Feed	To	4.9 m/min	16 ft/min
Hoist	To	37.0 m/min	105 ft/min

Pipe Handling

Type	Parallelogram style pipe rack, one rack is standard		
Pipe Size	Diameter:	235 mm - 346 mm	9.25 in. - 13.625 in.
Options	Additional pipe rack, up to two total		
Auxiliary Equipment	Standard deck wrench		
Auxiliary Winch	Capacity:	8164 kg	18,000 lbs.
Breakout Wrench	P&H SureWrench™		

Figura E08:

Ficha técnica 02 de perforadora eléctrica P&H 320XPC.

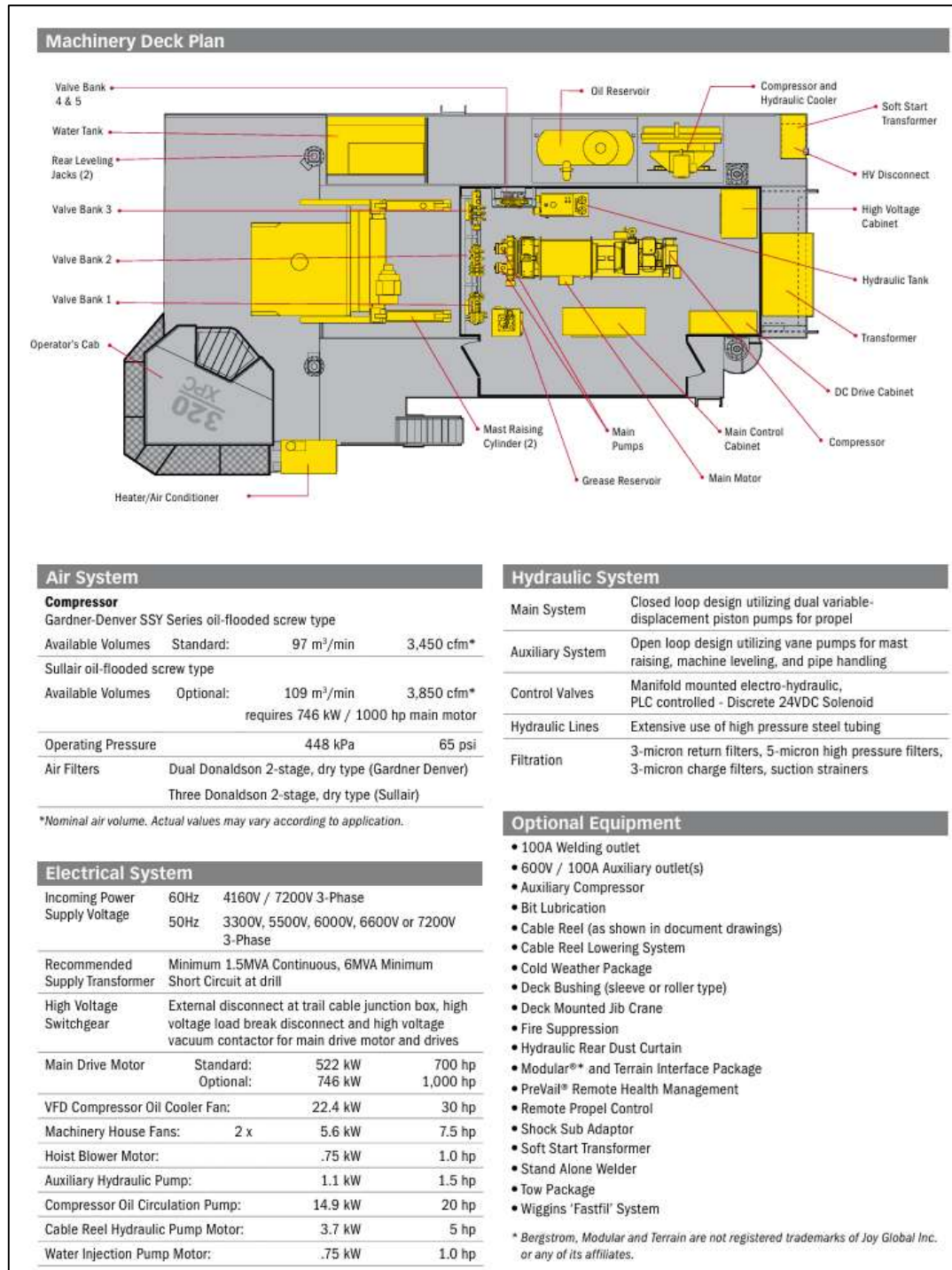


Figura E09:

Ficha técnica 01 de pala eléctrica P&H 4100XPC.

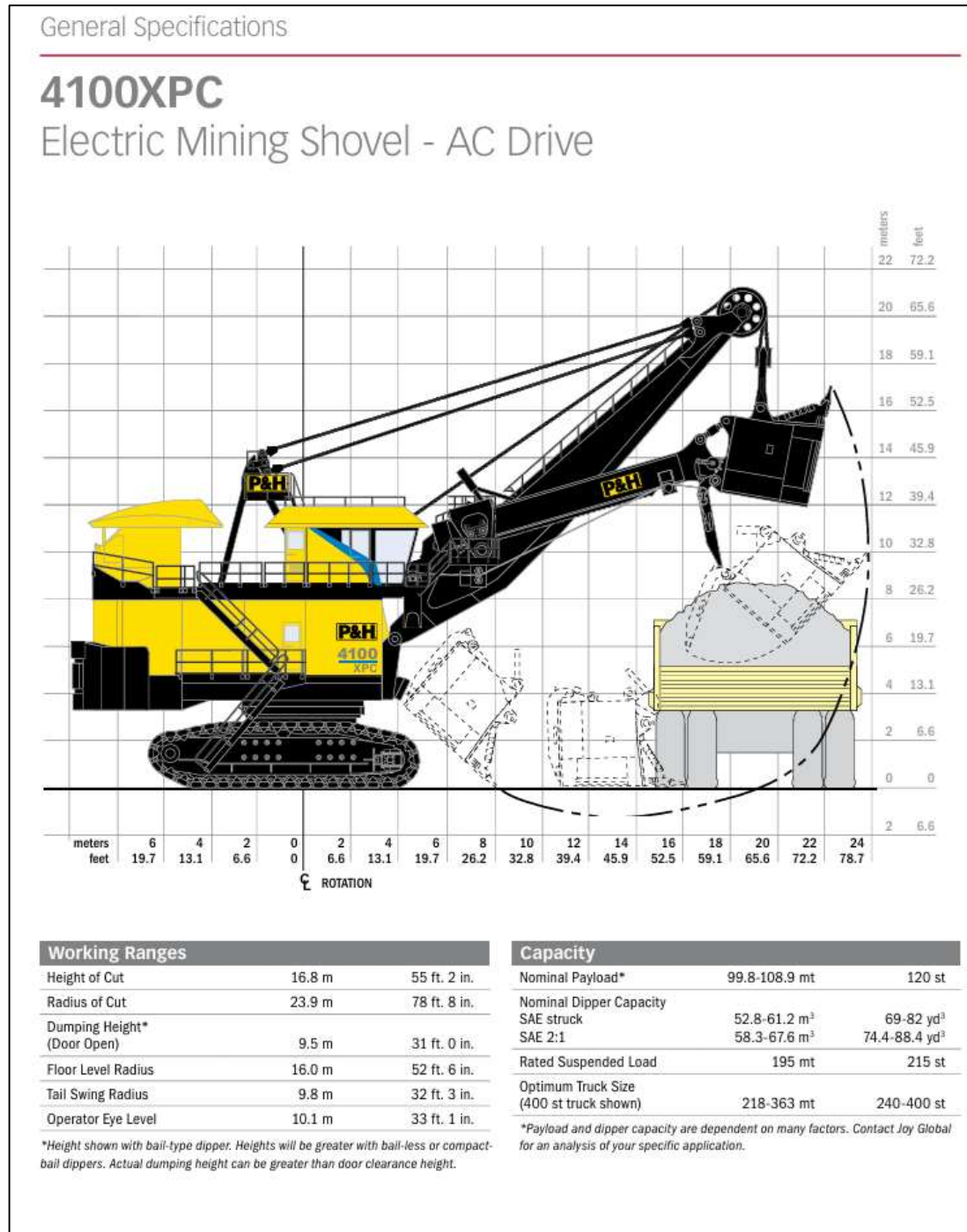


Figura E10:

Ficha técnica 02 de pala eléctrica P&H 4100XPC.

Electrical Control

P&H Centurion® Supervisory Controller provides direct integrated communication with motor drives giving precise motor control and fast cycle times. Real-time multi-tasking capability allows for optimal machine logic sequencing, monitoring and control.

Centurion I/O System uses 'Profibus' communication protocol for seamless integration of all shovel subsystems and future expandability. Low-voltage 24V DC I/O drop points feature open and short circuit detection for improved diagnostics and troubleshooting.

Centurion Information System's enhanced Graphical User Interface (GUI) features intuitive, icon-based screens to display vital information such as shovel status, troubleshooting information, and optional production monitoring data and operator feedback.

P&H Digital AC Drive provides precise, reliable, solid state power to the main motion motors.

Electrical Control Systems

Electrical Drive Ratings

(50°C, 2000m)

	Drive Power
IGBT Supply Unit (ISU)	4550 kVA
Crowd Motion	1160 kVA
Hoist Motion	4640 kVA
Propel Motion	2320 kVA
Swing Motion	3480 kVA

The electrical drive system is comprised of a multi drive platform, sharing a common DC bus between the IGBT Supply Unit (ISU) and the motor drive Inverter Units (INU). The fully regenerative ISU controls the power flow to and from the shovel, maintaining a unity power factor with extremely low harmonic content. The fully regenerative INU controls the power flow to and from the individual AC motors.

P&H AC Fast Response main machinery motors

Hoist Motor (Two used)	Continuous rating @ 690 volts	Total 2388kW / 3200hp
	Peak developed power	2964kW / 3973hp
Swing Motor (Three used)	Continuous rating @ 690 volts	Total 1635kW / 2190hp
	Peak developed power	1644kW / 2205hp
Crowd Motor (One used)	Continuous rating @ 690 volts	Total 545kW / 730hp
	Peak developed power	759kW/1017hp
Propel Motor (Two used)	Continuous rating @ 690 volts	Total 1090kW / 1460hp
	Peak developed power	1644kW / 2205hp

Power Requirements

Supply Voltage*	7200 or 13800V 3 Phase, 60 Hz	6000, 6600, 7200 or 11000 3 Phase, 50 Hz
Supply Transformer	(Minimum) 3750 kVA	
Minimum Short Circuit VA Available at Shovel	30 MVA	

*Voltage per customer requirements

Dipper & Dipper Trip

P&H Optima® dippers combine consistent productivity with high durability and maintainability. Dippers are configured to mine specific conditions and capacity requirements from a variety of combinations of body and lip designs, as well as other unique Joy Global technologies. Specific wear packages and GET styles can be cooperatively specified.

P&H TripRite™ system utilizes a brushless DC electric motor with sealed planetary drive unit for reliable trip and slack take up operation.

Swing

Three modular P&H planetary gear cases of proven design and a single piece forged swing gear transmit torque for fast cycle times.

Spring-set air release disc brakes – one per motor.

Splash lube filtration system.

Propel

Propel on demand provides rapid transfer to propel mode. Rapid transfers allow frequent positioning of the shovel to the bank resulting in faster cycle times and more efficient digging.

Two rugged P&H planetary gear cases of proven design independently transmit torque to the drive sprockets, producing the tractive effort required for fast, efficient propel and positioning operations.

P&H DELTA™ Drive low tension sprocket drive system with heavy duty cast crawler shoes.

Spring-set air release disc brakes – one per motor.

Crowd

Powerband V-belt drive between motor and gear case absorbs shock loads.

First and second reduction gearing in enclosed gear case for reliable splash lubrication, ease of maintenance, and extended component life.

Twin-leg dipper handle with torsion box and rack and pinion drive has inherent stability in the bank for optimal digging.

Spring-set air release disc brake.

Hoist

All gearing housed in single enclosed gear case with filtered and cooled oil fed to all bearings in addition to splash lubrication for reliable operation and ease of maintenance.

Large 68" diameter hoist drum for extended rope bending life. Ferrule becket system and dual electric tuggers are standard for efficient rope change.

Spring-set air release disc brakes – one per motor.

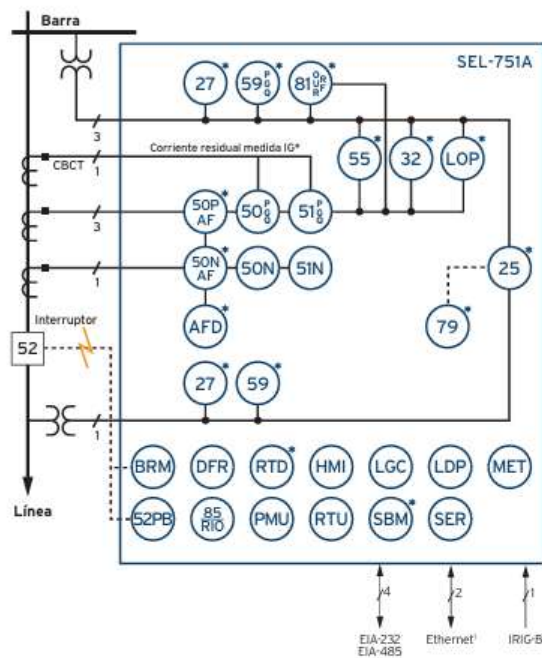
Cable Data

Hoist (wire rope)	73 mm	2.75 in. dia.
Suspension (bridge strand)	102 mm	4.00 in. dia.
Dipper Trip (wire rope)	19 mm	0.75 in. dia.

Figura E11:

Ficha técnica 01 de relé SEL 751-A.

Presentación funcional general



Números/acrónimos y funciones ANSI

25	Verificación de sincronismo*
27	Bajo voltaje*
32	Direccional de potencia*
50	Sobrecorriente adaptativa
50 (P,G,Q)	Sobrecorriente (fase, tierra, secuencia negativa)
50N	Sobrecorriente de neutro
50N AF	Sobrecorriente de neutro de arco eléctrico*
50P AF	Sobrecorriente de fase de arco eléctrico*
51 (P,G,Q)	Sobrecorriente temporizado (Fase, tierra, secuencia negativa)
51N	Sobrecorriente temporizado de neutro
52PB	Botones de disparo/cierre
55	Factor de potencia*
59	Sobrevoltaje*
79	Autorrecierre*
81 (O,U,R/R,F)	Sobre/baja frecuencia (tasa, tasa rápida)*
85 RIO	Comunicaciones SEL MIRRORED BITS®
AFD	Detector de arco eléctrico*
BRM	Supervisor de desgaste de interruptores
DFR	Reportes de eventos
LOP	Lógica de pérdida de potencial*

Funciones adicionales

IHM	Interfaz hombre-máquina
LDP	Perfil de datos de carga
LGC	Ecuaciones de control SELogic®
PMU	Sincrofasores
RTD	Temperatura
UTR	Unidad terminal remota
SBM	Supervisor baterías de subestaciones*
SER	Registador de Eventos Secuenciales

*Función opcional

¹ Cobre o fibra óptica



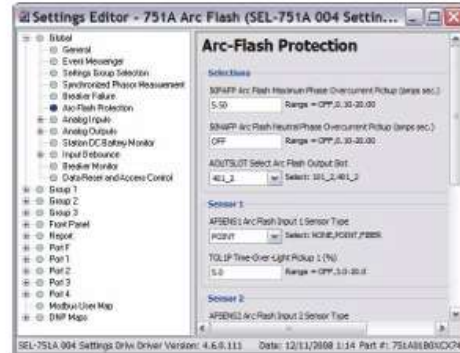
Figura E12:

Ficha técnica 02 de relé SEL 751-A.

Fácil ajuste y uso

Ajuste, supervise y controle el SEL-751A con el software ACSELERATOR QuickSet® SEL-5030

- Ahorre tiempo de ingeniería y simplifique la configuración del dispositivo. QuickSet le permite comunicarse con el SEL-751A mediante cualquier terminal ASCII o con la interfaz gráfica de usuario del software.
- Desarrolle ajustes fuera de línea con una interfaz basada en menús y pantallas de ayuda completamente documentadas. Al copiar los archivos de ajustes existentes y modificar solo los elementos específicos de la aplicación, puede disminuir el tiempo de instalación.
- Simplifique el procedimiento de ajuste con arquitectura basada en reglas para verificar automáticamente los ajustes interrelacionados. QuickSet resalta los ajustes fuera de rango o conflictivos para su corrección.



Recupere y visualice informes de eventos con el software ACSELERATOR TEAM® SEL-5045

- Visualice los oscilogramas del reporte de eventos como un gráfico de magnitud en función tiempo. Puede seleccionar puntos analógicos y digitales para crear una pantalla personalizada.
- Analice los eventos de arco eléctrico usando la intensidad de la luz y las formas de onda de la corriente de fase registradas durante una falla de arco.
- Visualice fases y fasores de componentes simétricas. La vista de fasor de los datos eléctricos puede ayudarlo a comprender mejor las fallas trifásicas asimétricas. También puede construir un gráfico personalizado utilizando voltajes y corrientes de secuencia de componentes simétricas y por fase.
- Recupere reportes de eventos mediante enlaces de comunicaciones seriales o Ethernet.

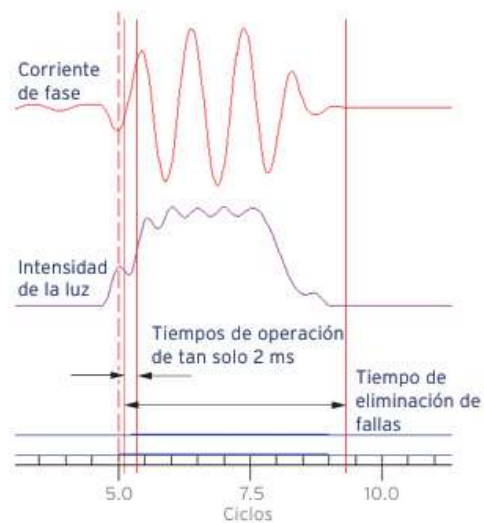


Figura E13:

Ficha técnica 03 de relé SEL 751-A.

Especificaciones del SEL -751A

General

Entradas de corriente de CA	5 A, 1 A, 50 mA, o 2,5 mA (alta sensibilidad) secundarios, dependiendo del modelo
Entradas de voltaje de CA	300 Vca continuo, 600 Vca por 10 segundos
Contactos de salida	El relé soporta salidas Forma A, B y C.
Entradas de control Optoaisladas	Señales de control CD/CA: 250, 220, 125, 110, 48 ó 24 V
Frecuencia y rotación de fases	Frecuencia del sistema: 50, 60 Hz Rotación de fases: ABC, ACB Seguimiento de frecuencia: 15 a 70 Hz (requiere entradas de voltaje de CA)
Elementos de tiempo-sobreintensidad luminosa de arco eléctrico (TOL1–TOL4)	Tiempo de operación: 2 a 5 ms Tiempo de reposición: 1 ciclo
Medios de comunicaciones	Ethernet 10/100BASE-T; Ethernet 100BASE-FX; puertos Ethernet unitarios o duales, EIA-232 serial; EIA-485 serial; conectores multimodo ST® serial o de fibra óptica
Protocolos de comunicaciones	Comunicaciones MIRRORED BITS; IEC 61850; Modbus® RTU/TCP; DNP3 serial y LAN/WAN; DeviceNet™; Telnet; Protocolo de transferencia de archivos (FTP); Protocolo simple de tiempo de red (SNTP); ASCII simple y comprimido; Fast Meter y Fast Operate Extendidos; Fast SER; Event Messenger; sincrofasores IEEE C37.118 (solo mediante puerto serial)
Fuente de alimentación	125/250 Vcd o 120/240 Vca Rango de voltaje de entrada: 85–300 Vcd u 85–264 Vca 24/48 Vcd Rango de voltaje de entrada: 19.2 a 60 Vcd
Temperatura de operación¹	–40 ° a +85 °C (–40 ° a +185 °F)

¹El contraste de la pantalla de LCD resulta afectado con temperaturas menores a –20°C (–4°F) y mayores a +70°C (+158°F).

Figura E14:*Ficha técnica 01 de relé SEL 351*

SEL-351

Sistema de protección



Una solución comprobada de alimentador de distribución con protección, monitoreo y control integrados

- Obtenga detección de falla segura y sensible con las funciones de protección integrales.
- Supervise el estado del interruptor y programe el mantenimiento en función del monitoreo del interruptor mejorado.
- Optimice el funcionamiento y simplifique los paneles con los pulsadores de disparo/cierre SafeLock[®] opcionales e independientes.
- Resuelva los problemas de calidad de potencia locales o de todo el sistema con el uso de reportes sobre la caída, aumento e interrupción de voltaje (VSSI).



Figura E15:

Ficha técnica 02 de relé SEL 351.

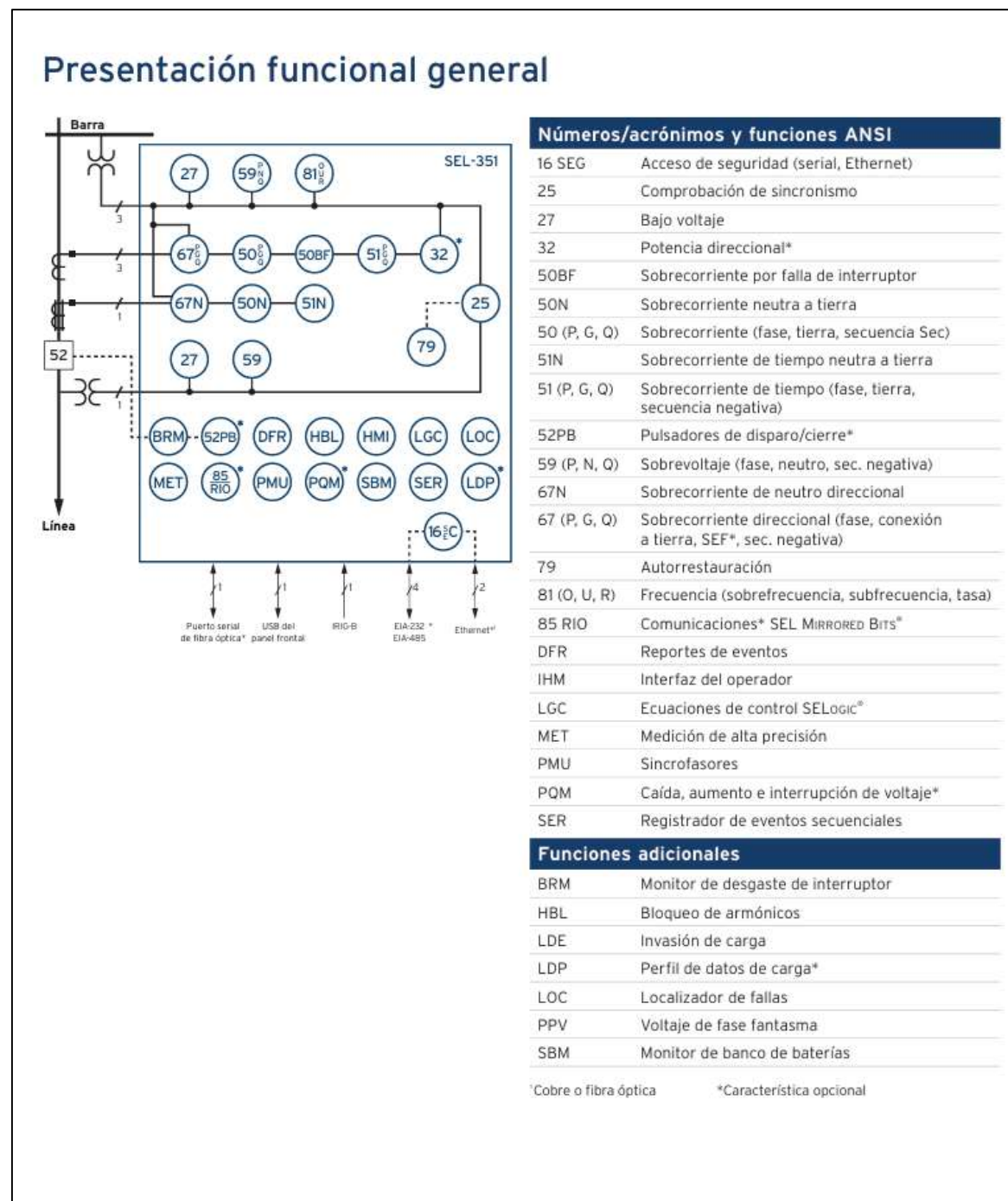


Figura E16:*Ficha técnica 03 de relé SEL 351.*

Especificaciones del SEL-351	
General	
Entradas de corriente de CA	IA, IB e IC: 5 A o 1 A nominal Entrada: 5 A, 1 A, 0.2 A o 0.05 A nominal
Entradas de voltaje de CA	300 V máximo
Calificaciones del contactor de salida	Contactores de salida estándar Cierre: 30 A Permanente: Transmisión continua de 6 A a +70 °C Capacidad de interrupción: 0.20–0.75 A (según el voltaje) Contactos de salida de interrupción de alta corriente Cierre: 30 A Permanente: Transmisión continua de 6 A a +70 °C Capacidad de interrupción: 10 A
Frecuencia y rotación de fases	Frecuencia del sistema 60/50 Hz Rotación de fases ABC/ACB
Puertos de comunicaciones	EIA-232 (3 puertos) USB tipo B EIA-485 Puerto serial ST* de fibra óptica multimodo (opcional) Puerto Ethernet: 10/100BASE-T doble (conector RJ-45) 100BASE-FX simple (conector LC) (opcional) 100BASE-FX doble (conector LC) (opcional) 100BASE-FX simple (conector LC) (opcional) e 100BASE-FX simple (conector LC) (opcional)
Protocolos de comunicaciones	SEL, IEC 61850 (opcional), comunicaciones MIRRORED BITS (opcional), Modbus, DNP3, protocolos ASCII, SNTP, IEEE C37.118 (sincrofasores), servidor web integrado, FTP, PRP (opcional), Telnet
Sincrofasores (norma IEEE C37.118)	Hasta 50 mensajes por segundo (sistema de 50 Hz) Hasta 60 mensajes por segundo (sistema de 60 Hz)
Processing	Entradas de voltaje y corriente de CA: 128 muestras por ciclo, frecuencia de corte de filtro paso bajo de 3 dB de 3 kHz Filtración digital: Filtros de coseno de ciclo completo después de filtrado digital y analógico con filtros paso bajo Procesamiento de protección y control: 4 veces por ciclo de sistema de potencia
Fuente de alimentación	125/250 Vcd o 120/230 Vca Rango: 85–350 Vcd u 85–264 Vca 48/125 Vcd o 120 Vca Rango: 38–200 Vcd u 85–140 Vca 24/48 Vcd Rango: 18 a 60 Vcd
Temperatura de funcionamiento	De –40 °C a +85 °C (de –40 °F a +185 °F)


SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES

Haciendo la energía eléctrica más segura, más confiable y más económica
(+52) 01 800 228 2000 | servicioclientes@selinc.com | selinc.com/es

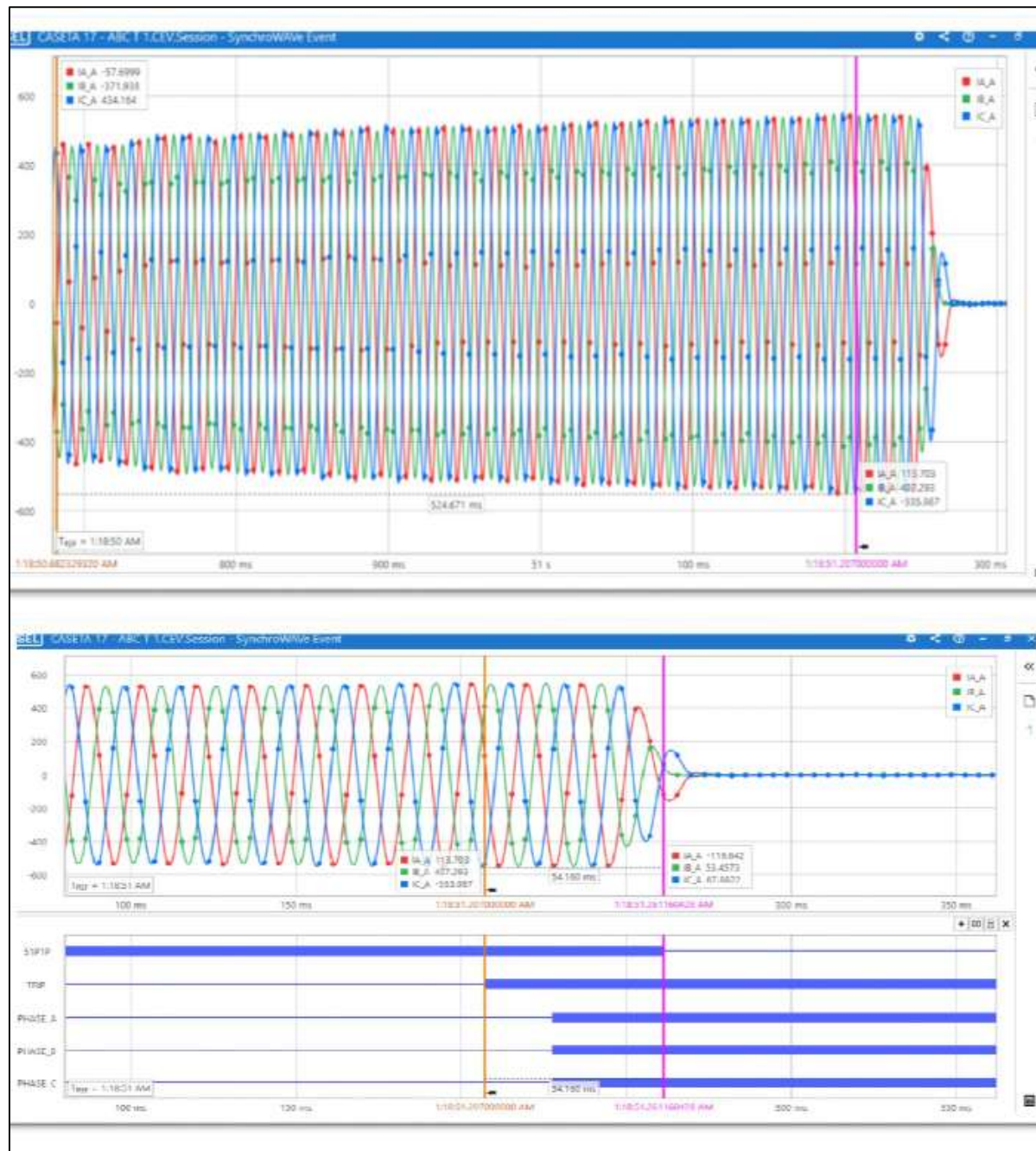
© 2009–2017 por Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.
20170815



ANEXO J: Gráfica de eventos de disparo de relé.

Figura J01: Gráficas de evento oscilo gráfico de sobrecarga en Switch house N°. 17

– Lado A con Pala N° 09.



ANEXO K: Certificado y constancias.

Figura K1:

Constancia de entrega 01 de propuesta de mejora a Southern Perú Cooper Corporation.

	
<u>Propuesta Proyecto De Mejora / Otros</u>	
Nombre Becario:	David Brian Cáceres Jiménez
Registro:	100308
Gerencia/Superintendencia:	Mantenimiento Mina / Electricidad Mina)
Área:	Alta tensión.
Supervisor(es)	(Hebert Joel Armas Jesús, 93210/Francisco Javier Alca Chacón, 96607)

1. Nombre del proyecto a desarrollar

- ANÁLISIS Y PROPUESTAS PARA EL CORRECTO FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA ELÉCTRICO DEL ANILLO MINA TOQUEPALA - SPCC.

2. Objetivos

➤ **Objetivo Principal**

- Realizar un análisis de flujo de carga, cortocircuito, coordinación de protecciones y armónicos en el software **Digsilent - Power Factory** y plantear propuestas de mejora para el correcto funcionamiento del sistema eléctrico del anillo mina Toquepala.

➤ **Objetivo Específicos**

- Realizar el análisis de flujo de carga para diferentes escenarios de operación.
 - Analizar el comportamiento del anillo eléctrico de Toquepala bajo condiciones de máxima y mínima demanda.
 - Diagnosticar los parámetros de tensión, corriente, potencia activa, potencia reactiva y cargabilidad de equipos del sistema eléctrico de la mina Toquepala.
 - Realizar recomendaciones de topología y operación para el óptimo flujo de carga, disminuyendo las pérdidas por efecto Joule en las líneas aéreas y cables de arrastre.
 - Analizar el cambio de tensión del sistema de distribución en mina de 7.2 kV a 13.8 kv y especificar los beneficios de este sistema bajo simulaciones de flujo de carga.
- Realizar el estudio de cortocircuito para diferentes condiciones del sistema y topología variable.
 - Analizar el comportamiento de las corrientes subtransitorias ante fallas de origen operativo o atmosférico.
 - Realizar la comparación de resultados ante distintos tipos de fallas balanceadas y desbalanceadas en barras y líneas de 69 kV y 7.2 kV.
 - Analizar la soportabilidad de corriente de cortocircuito de los diferentes equipos del anillo eléctrico de Toquepala, como transformadores, interruptores, líneas aéreas y cables de arrastre.
- Realizar el estudio y análisis de coordinación de protecciones.
 - Analizar en base al estudio de cortocircuito el ajuste seguro y correcto de los relés de sobrecorriente con características de confiabilidad, selectividad, simplicidad y velocidad.

Figura K2:

Constancia de entrega 02 de propuesta de mejora a Southern Perú Cooper Corporation.



SOUTHERN COPPER
SOUTHERN PERÚ

- Coordinar correctamente los relés de sobrecorriente ubicados en las casetas, subestaciones secundarias y la subestación principal PushBack.
- Estandarizar los ajustes en los todos los relés de sobrecorriente con la finalidad de ganar tiempo valioso en producción.
- Implementar un sistema de protección con “Reclosers y Seccionalizadores” en la línea de transmisión de 69 kv, con la finalidad de aislar sectores del anillo eléctrico ante fallas de origen operativo o atmosférico.

- Realizar el estudio y análisis de armónicos del sistema eléctrico del anillo de Toquepala.
 - Analizar los valores de distorsión armónica en el sistema eléctrico del anillo mina Toquepala.
 - Analizar los posibles casos de resonancia producidos por la distorsión armónica.
 - Mantener el nivel de tensión de operación por encima del valor establecido por norma (< 0.95 p.u.).
 - Implementar un sistema de compensación reactiva con “Filtros Pasivos Multietapas” de armónicos en las casetas o Swicht-House.
 - Implementar un “Banco de Capacitores Serie” en las líneas aéreas más largas de 7.2 kV.

3. Breve descripción del proyecto (Problema identificado y aspectos de mejora a lograr)

Como primer paso se realizará el estudio y análisis del sistema eléctrico del anillo de toquepala, en los niveles de tensión de 69 kV y 7.2 kV, este estudio será realizado en el software **Digsilent - Power Factory Ver. 15.1**, en donde se realizará el estudio de flujo de carga con los equipos y topología actual. En este análisis se verá el problema de caída de tensión y sobrecarga de equipos, por lo cual se procederá a realizar conclusiones y recomendaciones; una de estas recomendaciones será proponer el cambio del nivel de tensión en el sistema de distribución de 7.2 kV a 13.8 kV, en donde se mostrarán los beneficios obtenidos. Luego procederemos a realizar el análisis de cortocircuito con la finalidad de ver los resultados de corriente subtransitoria para los distintos tipos de fallas balanceadas y desbalanceadas en barras y líneas. Estos resultados nos ayudarán a realizar el ajuste de coordinación de protecciones de los relés de sobrecorriente ubicados en las subestaciones y casetas Swicht-House; y modificarlos en caso de ser necesario. Posteriormente se propondrá un sistema de reclosers y seccionalizadores para el despeje de fallas en el anillo eléctrico de 69 kv, estos dispositivos aislaran la zona en la cual se registró la falla y se procederá a energizar automáticamente la zona aislada en caso la falla se haya despejado. Por ultimo realizaremos el análisis de armónicos que se encuentran en el sistema eléctrico, con la finalidad de proponer un sistema de filtros pasivos de armónicos que ayuden también a compensar el nivel de tensión en el sistema; y por otra parte ver la posibilidad de implementar bancos de capacitores en serie en las líneas más largas de 7.2 kV con el finalidad de reducir la caída de tensión y sobrecarga en los cables.

4. Análisis y beneficios

- Disminuir los costos de tarifa eléctrica por potencia activa y reactiva en el tajo.
- Se reducirá la cargabilidad de los transformadores, interruptores, líneas aéreas y cables de arrastre, aumentando su vida útil.
- La coordinación de protecciones garantizará un correcto funcionamiento del sistema eléctrico, el cual permitirá a la vez tener el menor número de interrupciones del sistema por fallas en la línea de 69 kV, aumentando la productividad en mina.
- Los equipos en mina (palas y perforadoras) trabajaran con un nivel de tensión apropiado por norma, aumentando la vida útil de los mismos.

Figura K3:

Certificado de prácticas profesionales de Southern Perú Cooper Corporation.

 **SOUTHERN COPPER**
SOUTHERN PERU

CERTIFICADO DE PRACTICAS PROFESIONALES

Otorgado a:

David Brian Cáceres Jiménez

Egresado de la Carrera Profesional de Ingeniería Eléctrica, de Universidad Nacional Mayor de San Marcos, quién en virtud a lo establecido en la Ley Sobre Modalidades Formativas Laborales realizó sus Prácticas Profesionales en Southern Peru Copper Corporation, Sucursal del Perú, en la Gerencia Mantenimiento, Superintendencia Mantenimiento Mina, en la Unidad de Producción Toquepala, del 6 de enero al 20 de diciembre del 2020.

Durante el desarrollo de las Prácticas Profesionales aplicó sus conocimientos, habilidades y aptitudes en el desempeño efectivo de las siguientes actividades:

- Mantenimiento preventivo y correctivo de Switch Houses, S.E. móviles, líneas aéreas y cables de media tensión realizando formatos de mantenimiento y diagramas de Gantt.
- Desarrollo del "Estudio y Análisis del Sistema del Anillo Eléctrico en 69 kV / 7.2 kV de la Mina Toquepala" en el software Digsilent- Power Factory. Análisis de flujo de carga para diferentes condiciones del sistema, análisis de cortocircuito, coordinación de protecciones y análisis de armónicos.
- Generación de reportes, protocolos de medición, evaluación, calibración de relés y pruebas a maquinas eléctricas y circuitos eléctricos (Transformadores de tensión, transformadores de corriente e interruptores) con "OMICRON CPC 100", tales como resistencia de contacto, curva de saturación, relación de transformación. Medidas eléctricas con los analizadores de redes FLUKE 435 y 438 Series II, en Switch Houses, S.E. Móviles, palas eléctricas y perforadoras eléctricas (P&H y CAT).
- Participación en el Programa de Desarrollo de Becarios (PDB) en modalidad online, orientado a reforzar el conocimiento y desarrollo de las competencias conductuales de Southern Peru, tales como Liderazgo, Comunicación, Inteligencia Emocional, Integridad, Excelencia y Responsabilidad.
- Participación del programa SBC (Seguridad Basada en el Comportamiento) donde se elaboró reportes y estadísticas mensuales, charlas y dinámicas en los talleres de mantenimiento mina.

Se expide el presente certificado de acuerdo a ley y para los fines que estime conveniente.

Toquepala, 20 de diciembre del 2020

 Southern Peru Copper Corporation
Sucursal del Perú
Jefatura
CARLOS W. ESCOBEDO FERRADAS
Jefe de Capacitación Toquepala