



**UNIVERSIDAD JOSÉ CARLOS MARIÁTEGUI**

**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y  
ARQUITECTURA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA**

**T E S I S**

**ESTUDIO DE COORDINACIÓN DE PROTECCIÓN  
ELÉCTRICA PARA EQUIPOS DE PALAS Y  
PERFORADORAS MINA CUAJONE  
SPCC, 2019**

**PRESENTADA POR**

**BACHILLER FERNANDO FRIAS SERRUTO**

**ASESOR:**

**ING. ORLANDO ALFREDO CATARI TICONA**

**PARA OPTAR TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO MECÁNICO ELÉCTRICO**

**MOQUEGUA - PERÚ**

**2022**

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
PÁGINA DE JURADO .....	i
DEDICATORIA .....	ii
AGRADECIMIENTOS .....	iii
CONTENIDO .....	iv
ÍNDICE DE TABLAS .....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE APÉNDICES.....	xiv
RESUMEN.....	xv
ABSTRACT.....	xvi
INTRODUCCIÓN .....	xvii

## CAPÍTULO I

### PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Descripción de la realidad del problema.....	1
1.2. Definición del problema.....	2
1.2.1. Problema general.....	2
1.2.2. Problemas específicos .....	2
1.3. Objetivos de la investigación .....	3
1.3.1. Objetivo general .....	3
1.3.2. Objetivos específicos .....	3
1.4. Justificación.....	4
1.5. Alcances y limitaciones.....	5
1.6. Variables .....	5

1.6.1. Operacionalización de variables .....	6
1.7. Hipótesis de la investigación.....	6
1.7.1. Hipótesis general.....	6
1.7.2. Hipótesis específicas .....	6

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

2.1. Antecedentes de la investigación .....	8
2.1.1. A nivel internacional.....	8
2.1.2. A nivel nacional .....	10
2.2. Bases teóricas .....	11
2.2.1. Filosofía del sistema de protección .....	11
2.2.2. Equipos de protección .....	18
2.2.3. Zonas de protección .....	20
2.2.4. Transformadores de medida.....	20
2.2.5. Transformadores de potencia .....	21
2.2.6. Transformadores de corriente .....	23
2.2.7. Estudio de coordinación de protecciones .....	24
2.2.8. Pala eléctrica .....	26
2.2.9. Perforadora eléctrica .....	28
2.3. Definición de términos.....	31
2.3.1. Protección Eléctrica .....	31
2.3.2. Coordinación de protección eléctrica.....	31
2.3.3. Corriente Eléctrica .....	31
2.3.4. I pickup .....	31

2.3.5. KPI's (Key Performance Indicator) .....	32
--	----

### **CAPÍTULO III**

#### **MÉTODO**

3.1. Tipo de la investigación .....	33
3.2. Diseño de la investigación .....	33
3.3. Población y Muestra.....	33
3.3.1. Palas .....	34
3.3.2. Perforadoras .....	48
3.3.3. Switch house .....	58
3.3.4. Subestaciones .....	61
3.3.5. Fórmulas de performance.....	67
3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	68
3.5. Técnicas de procesamiento y análisis de datos .....	69

### **CAPÍTULO IV**

#### **ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS**

4.1. Presentación de resultados .....	70
4.1.1. Digitalización de la población y muestra .....	70
4.1.2. Caracterización de los resultados de la simulación de la digitalización.....	99
4.1.3. Obtención de los nuevos grupos de ajuste .....	101
4.1.4. Caracterización del performance de la población y muestra en el año 2019.....	102
4.1.5. Caracterización del performance de la población y muestra posterior al estudio de coordinación.....	107

4.1.6. Presentación de los esquemas de protección especial.....	112
4.2. Contratación de hipótesis .....	113
4.2.1. Primera hipótesis específica.....	113
4.2.2. Segunda hipótesis específica.....	114
4.2.3. Tercera hipótesis específica .....	115
4.2.4. Hipótesis general.....	116
4.3. Discusión de resultados.....	117

## **CAPÍTULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

5.1. Conclusiones .....	123
5.2. Recomendaciones.....	126
BIBLIOGRAFÍA .....	127
APÉNDICES.....	129
MATRIZ DE CONSISTENCIA .....	175

## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 Operacionalización de variables .....	6
Tabla 2 Principales funciones de protección según ANSI.....	17
Tabla 3 Modelos Palas P&H mina Cuajone.....	34
Tabla 4 Modelos Palas Bucyrus mina Cuajone.....	34
Tabla 5 Especificaciones motores movimientos principales Pala 1 .....	36
Tabla 6 Especificaciones bancos de compensación de Pala 1 .....	37
Tabla 7 Especificaciones motores movimientos principales Pala 3 .....	39
Tabla 8 Especificaciones bancos de compensación de Pala 3 .....	40
Tabla 9 Especificaciones motores movimientos principales Pala 4 .....	42
Tabla 10 Especificaciones motores movimientos principales Palas 5 y 6... 45	
Tabla 11 Especificaciones motores movimientos principales Pala 7.....	47
Tabla 12 Especificaciones bancos de compensación de Pala 7 .....	47
Tabla 13 Modelos Perforadoras P&H mina Cuajone.....	48
Tabla 14 Modelos Perforadoras Bucyrus mina Cuajone .....	48
Tabla 15 Especificaciones del motor principal Perforadoras 11, 16 y 17....	51
Tabla 16 Especificaciones motor Hoist/Pulldown Perforadoras 11, 16 y 17.....	52
Tabla 17 Especificaciones de los motores Rotary Perforadoras 11, 16 y 1753	
Tabla 18 Especificaciones del motor principal Perforadoras 13, 14 y 18....	55
Tabla 19 Especificaciones del motor principal Perforadoras 13, 14 y 18....	56
Tabla 20 Especificaciones del motor principal Perforadoras 13, 14 y 18....	57
Tabla 21 Características principales subestaciones mina Cuajone .....	62

Tabla 22 Características principales fusibles subestaciones mina Cuajone.	65
Tabla 23 Nuevos grupos ajuste equipos de Palas y Perforadoras mina Cuajone .....	101
Tabla 24 Estados equipos de Palas y Perforadoras año 2019 .....	103
Tabla 25 Cálculo tiempos equipos de Palas y Perforadoras año 2019.....	105
Tabla 26 Cálculos indicadores de performance equipos de Palas y Perforadoras año 2019.....	106
Tabla 27 Estados equipos de Palas y Perforadoras posterior al estudio de coordinación.....	108
Tabla 28 Cálculo tiempos equipos de Palas y Perforadoras posterior al estudio de coordinación.....	109
Tabla 29 Cálculos indicadores de performance equipos de Palas y Perforadoras posterior al estudio de coordinación. ....	111
Tabla 30 Nuevos esquemas de protección especial .....	112
Tabla 31 Indicadores calculados equipos de Palas y Perforadoras año 2019 y posterior al estudio de coordinación. ....	119
Tabla 32 Comparación D.M. año 2019 y posterior al estudio de coordinación.....	121

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Sistemas de control y protección típicos de una subestación .....	12
Figura 2. Ubicación típica de los dispositivos de protección en una subestación móvil.....	14
Figura 3. Traslape de zonas de protección .....	15
Figura 4. Diagrama unifilar de protecciones con números ANSI.....	16
Figura 5. Imagen relé de protección MULTILIN 750 .....	18
Figura 6. Diagrama de bloques relé de protección.....	19
Figura 7. Zonas de protección típica para una red de distribución .....	20
Figura 8. Imagen de un transformador de tensión.....	21
Figura 9. Imagen de un transformador de potencia.....	21
Figura 10. Representación simbólica de un transformador de potencia .....	22
Figura 11. Imagen de un transformador de corriente del tipo toroidal .....	23
Figura 12. Representación de un transformador de relación simple .....	24
Figura 13. Representación de un transformador de corriente de un núcleo secundario .....	24
Figura 14. Estudio de coordinación ETAP .....	26
Figura 15. Imagen interior sala de máquinas Palas P&H .....	27
Figura 16. Imagen componentes Truck Frame Palas P&H.....	28
Figura 17. Imagen circuito eléctrico equivalente Perforadoras 11, 16 y 17	29
Figura 18. Imagen circuito eléctrico equivalente Perforadoras 13, 14 y 18	30
Figura 19. Imagen Pala 1 modelo 2800XPB.....	35
Figura 20. Imagen del motor Hoist de frame K925 Pala 1 .....	36



Figura 21. Imagen Pala 3 modelo 4100A+ .....	37
Figura 22. Imagen del transformador principal 2500 kVA Pala 3 .....	38
Figura 23. Imagen componentes internos motor corriente continua .....	39
Figura 24. Imagen Pala 4 modelo 495BII .....	41
Figura 25. Imagen Pala 5 modelo 495HR .....	43
Figura 26. Imagen Pala 6 modelo 495HR .....	43
Figura 27. Imagen datos de placa del motor Hosit Pala 6 .....	44
Figura 28. Imagen Pala 7 modelo 4100XPX-DC .....	45
Figura 29. Imagen placa de datos motor Propel Pala 7 .....	46
Figura 30. Imagen Perforadora 11 modelo 120A .....	49
Figura 31. Imagen Perforadora 16 modelo 320XPC .....	49
Figura 32. Imagen Perforadora 17 modelo 320XPC .....	50
Figura 33. Imagen del motor principal y componentes Perforadora 17 modelo 320XPC .....	51
Figura 34. Imagen del motor Hoist Perforadora 16 modelo 320XPC .....	52
Figura 35. Datos de placa del motor Hoist / Pulldownt Perforadora 16 modelo 320XPC .....	53
Figura 36. Imagen Perforadoras 13 y 18 modelos 49RIII y MD6640 .....	54
Figura 37. Imagen Perforadoras 14 modelo 49HR .....	54
Figura 38. Imagen del motor Hoist / Pulldown de la Perforadoras 18 modelo MD6640 .....	56
Figura 39. Imagen del motor Rotary de la Perforadoras 18 modelo MD6640 .....	57
Figura 40. Imagen del switch house Nro. 35 de marca LinePower .....	58

Figura 41. Imagen del diagrama unifilar de un switch house de marca LinePower .....	59
Figura 42. Imagen del interruptor bajo carga VCB de marca LinePower ...	60
Figura 43. Imagen de un relé de protección de marca Multilin .....	61
Figura 44. Imagen de la subestación Nro. 14 de mina Cuajone.....	62
Figura 45. Imagen de la placa de datos de un transformador de potencia de marca TRAF0 .....	64
Figura 46. Imagen de un relé de protección Multilin 750 de las subestaciones mina Cuajone .....	66
Figura 47. Imagen referencial digitalización Palas y Perforadoras.....	71
Figura 48. Imagen digitalizada del circuito equivalente de Pala 1 .....	74
Figura 49. Imagen digitalizada del circuito equivalente de Pala 3 .....	76
Figura 50. Imagen digitalizada del circuito equivalente de Pala 4 .....	78
Figura 51. Imagen digitalizada del circuito equivalente de Pala 5 .....	80
Figura 52. Imagen digitalizada del circuito equivalente de Pala 6 .....	82
Figura 53. Imagen digitalizada del circuito equivalente de Pala 7 .....	84
Figura 54. Imagen digitalizada del circuito equivalente de Perforadora 11	86
Figura 55. Imagen digitalizada del circuito equivalente de Perforadora 13	88
Figura 56. Imagen digitalizada del circuito equivalente de Perforadora 14	90
Figura 57. Imagen digitalizada del circuito equivalente de Perforadora 16	92
Figura 58. Imagen digitalizada del circuito equivalente de Perforadora 17	94
Figura 59. Imagen digitalizada del circuito equivalente de Perforadora 18	96
Figura 60. Imagen referencial digitalización switch house y subestaciones	97

Figura 61. Imagen digitalizada del circuito equivalente de switch house 29 y subestación 14 .....	99
Figura 62. Imagen curva Very Inverse General Electric.....	101
Figura 63. Gráfica estados equipos Palas y Perforadoras año 2019 .....	104
Figura 64. Gráfica tiempos calculados equipos Palas y Perforadoras año 2019.....	105
Figura 65. Gráfica indicadores calculados equipos Palas y Perforadoras año 2019.....	107
Figura 66. Gráfica estados equipos Palas y Perforadoras posterior al estudio de coordinación. ....	108
Figura 67: Gráfica tiempos calculados equipos Palas y Perforadoras posterior al estudio de coordinación. ....	110
Figura 68. Gráfica indicadores calculados equipos Palas y Perforadoras posterior al estudio de coordinación. ....	111
Figura 69. Gráfica nuevos esquemas de protección especiales.....	112
Figura 70. Gráfica indicadores calculados equipos Palas y Perforadoras año 2019 y posterior al estudio de coordinación. ....	120
Figura 71. Gráfica D.M. año 2019 y posterior al estudio de coordinación.....	121

## ÍNDICE DE APÉNDICES

	<b>Pág.</b>
Apéndice A: Ficha Técnica del Amperímetro de Medición Remota con Transformador de Corriente Usado para Medir la Corriente Eléctrica que Consumen las Palas y Perforadoras en las Subestaciones Mina.....	130
Apéndice B: Ficha de Observación de Disponibilidad Mecánica de Palas y Perforadoras .....	131
Apéndice C: Curvas de Coordinación de Protección Obtenidas para las Subestaciones Mina.....	132
Apéndice D: Planos.....	156

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación cuasi experimental con diseño correlacional tuvo como objetivo diseñar, implementar y analizar de qué manera un estudio de coordinación de protección eléctrica incrementa la disponibilidad de los equipos de Palas y Perforadoras en la mina Cuajone perteneciente a la empresa Southern Perú Copper Corporation. La mina Cuajone cuenta con una red de distribución de energía eléctrica en configuración tipo anillo conformada por subestaciones en 69kV y alimentadores en 7.2kV que se encuentran distribuidos en diversos puntos del tajo, los cuales poseen relés de protección que contienen los ajustes de protección para proteger a las Palas y Perforadoras de fallas eléctricas imprevistas. Por lo tanto, debido a esta característica metodológicamente se procedió a digitalizar los circuitos eléctricos equivalentes, validar los resultados a través de los módulos de flujo de carga y corto circuito correspondientes mediante el software ETAP para posteriormente coordinar las protecciones en las subestaciones y alimentadores. Ello origino nuevos grupos de ajuste que fueron ingresados en los relés de protección de las subestaciones y alimentadores para su validación. Como resultado se obtuvo un incremento en la disponibilidad de las Palas y Perforadoras de la mina Cuajone y por ende la reducción de los costos de pérdidas generadas por las paradas imprevistas ocasionadas por fallas eléctricas. Así mismo abrió la posibilidad de obtener grupos de ajuste especiales para incrementar aún más la disponibilidad de las Palas y Perforadoras en la mina Cuajone.

*Palabras clave:* disponibilidad, subestación, alimentador, palas, perforadoras.

## **ABSTRACT**

The objective of this quasi-experimental research work with correlational design was to design, implement and analyze how an electrical protection coordination study increases the availability of Shovels and Drilling equipment in the Cuajone mine belonging to the company Southern Peru Copper Corporation. The Cuajone mine has a ring-type electrical power distribution network made up of 69kV substations and 7.2kV feeders that are distributed at various points in the pit, which have protection relays that contain the protection settings to protect to Shovels and Drills from unforeseen electrical failures. Therefore, due to this methodological characteristic, the equivalent electrical circuits were digitized, the results validated through the corresponding load flow and short circuit modules using the ETAP software to later coordinate the protections in the substations and feeders. This originated new adjustment groups that were entered in the protection relays of the substations and feeders for their validation. As a result, an increase in the availability of the Shovels and Drilling Machines of the Cuajone mine was obtained and, therefore, the reduction of the costs of losses generated by unforeseen stops caused by electrical failures. It also opened the possibility of obtaining special adjustment groups to further increase the availability of Shovels and Drills in the Cuajone mine.

*Keywords:* availability, substation, feeder, shovels, drills.

## INTRODUCCIÓN

Los actuales procesos de minería a tajo abierto en el Perú cuentan con muchos sub sistemas eléctricos, mecánicos, electrónicos, metalúrgicos, químicos, etc. Dentro de estos está el sistema de distribución de energía eléctrica para los principales equipos de perforación y carguío de la mina.

Estos equipos también conocidos como máquinas eléctricas necesitan que su sistema de distribución de energía se encuentre listo para entregar energía en los puntos de utilización tanto en confiabilidad como en economía. Al tener cortes de energía imprevistos en las operaciones mineras éstas se paralizan, generando cuantiosas pérdidas económicas, por lo que el suministro debe ser confiable y seguro para evitar dichas pérdidas.

Muchos de los sistemas de coordinación eléctrica que se utilizan son de gran valor, por lo que requeriría de un monto elevado para llevar a cabo pruebas experimentales, es por ello que existen softwares que simulan los diversos escenarios que se pueden presentar, como es el caso del “Electrical Transient and Analysis Program” (ETAP) o Programa Analizador y Transiciones Eléctricas, en español, que permite identificar la configuración adecuada con el que deben programarse los relés de protección, de esta manera aseguramos aislar la corriente de falla.

Por los datos históricos en la mina de Cuajone, podemos identificar algunos tipos de fallas de corte eléctrico que se han presentado en el año 2019

Por lo tanto, el motivo del presente trabajo es solucionar este problema a través de un diseño adecuado de la coordinación eléctrica que asegure un funcionamiento óptimo de las máquinas eléctricas de minería en Cuajone.

## **CAPÍTULO I**

### **PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **1.1. Descripción de la realidad del problema**

Actualmente la mina Cuajone cuenta con una variedad de equipos de diseño mecánico eléctrico que son usados para la extracción de minerales a gran escala. Los equipos principales usados en este proceso son conocidos como Palas y Perforadoras.

Para el funcionamiento de estos equipos se usa energía eléctrica como fuente de alimentación que es suministrada por diferentes alimentadores y subestaciones instalados estratégicamente dentro del área que corresponde a la mina Cuajone.

Tanto los equipos como sus alimentadores y subestaciones cuentan con sistemas de protección eléctrica, los cuales deben poseer un nivel de coordinación adecuado para despejar cualquier tipo de falla de naturaleza eléctrica.

Esta coordinación de protección es reflejada en un grupo de ajustes de protección eléctrica para los equipos, alimentadores y subestaciones.

Los grupos de ajuste de protección, por contar con estudios desactualizados, no son los apropiados para las operaciones de la mina Cuajone de la empresa Southern Peru Cooper Corporation.



En ese escenario, destaca la preocupación por la ocurrencia de fallas eléctricas no despejadas adecuadamente por los alimentadores y subestaciones, tal es así que al no contar con una apropiada coordinación de protección se ha ido generando constantes paradas de Palas y Perforadoras en la mina Cuajone.

Cabe señalar que dichas paradas generan pérdidas económicas innecesarias a la empresa Southern Peru Copper Corporation además de afectar la disponibilidad de los equipos involucrados en el proceso de extracción de mineral.

Si el problema persiste y no es corregido, disminuirá la eficiencia del proceso de producción de la empresa Southern Peru Copper Corporation, lo que va en contra de las políticas de las empresas mineras de clase mundial.

## **1.2. Definición del problema**

### **1.2.1. Problema general.**

Por la naturaleza que posee el presente estudio, la interrogante general que se plantea es la siguiente:

- ¿De qué manera un óptimo estudio de coordinación de protección eléctrica incrementa la disponibilidad de las Palas y Perforadoras en la mina Cuajone de la empresa Southern Peru Copper Corporation en Moquegua en el año 2019?

### **1.2.2. Problemas específicos.**

Consecuentemente, las interrogantes específicas son las siguientes:

- ¿De qué manera el circuito eléctrico equivalente del estudio de coordinación de protección eléctrica incrementa la disponibilidad de las Palas y Perforadoras en la mina Cuajone de la empresa Southern Peru Copper Corporation en Moquegua en el año 2019?

- ¿De qué manera los grupos de ajuste final del estudio de coordinación de protección eléctrica incrementa la disponibilidad de las Palas y Perforadoras en la mina Cuajone de la empresa Southern Peru Copper Corporation en Moquegua en el año 2019?
- ¿De qué manera los esquemas especiales de protección del estudio de coordinación de protección eléctrica incrementan la disponibilidad de las Palas y Perforadoras en la mina Cuajone de la empresa Southern Peru Copper Corporation en Moquegua en el año 2019?

### **1.3. Objetivos de la investigación**

#### **1.3.1. Objetivo general.**

Analizar de qué manera incrementa un óptimo estudio de coordinación de protección eléctrica la disponibilidad de Palas y Perforadoras en la mina Cuajone de la empresa Southern Peru Copper Corporation en Moquegua en el año 2019

#### **1.3.2. Objetivos específicos.**

- Analizar de qué manera incrementa el circuito eléctrico equivalente del estudio de coordinación de protección eléctrica la disponibilidad de Palas y Perforadoras en la mina Cuajone de la empresa Southern Peru Copper Corporation en Moquegua en el año 2019
- Analizar de qué manera incrementa los grupos de ajuste final del estudio de coordinación de protección eléctrica la disponibilidad de Palas y Perforadoras en la mina Cuajone de la empresa Southern Peru Copper Corporation en Moquegua en el año 2019
- Analizar de qué manera incrementa los esquemas especiales de protección del estudio de coordinación de protección eléctrica la disponibilidad de Palas y

Perforadoras en la mina Cuajone de la empresa Southern Peru Copper Corporation en Moquegua en el año 2019

#### **1.4. Justificación**

La justificación para haber realizado el presente trabajo de investigación tiene que ver con los aspectos económico, profesional, académico y también personal.

En el aspecto económico, se pretende obtener un posible ahorro para la empresa en cuanto a consumo de recursos traducidos a través del costo de parada de maquinaria y las horas hombre para llevar a cabo las operaciones. Además, los colaboradores podrán optimizar su trabajo diario si se reduce el riesgo de paradas no planificadas de las máquinas. También existe la posibilidad de una escalabilidad de esta herramienta, ya que puede incluir otro tipo de observaciones e incluso puede extenderse en un sistema de gestión de seguridad completo que abarque todas las máquinas de la empresa. Finalmente, esta herramienta, así como sus posibles expansiones, puede ser replicada en otras empresas llevando así estos beneficios a una escala mayor.

En el aspecto profesional, el presente trabajo de tesis ha permitido desarrollar la capacidad de evaluar procesos y, en función a los resultados obtenidos, poder proponer opciones de mejora continua que tengan como resultado beneficios para la empresa donde éstas sean aplicadas.

En el aspecto académico, se busca poner en práctica los conocimientos adquiridos durante el desarrollo de la importante carrera de Ingeniería Mecánica Eléctrica en la Universidad José Carlos Mariátegui.

Finalmente, en cuanto al aspecto lo personal, el presente trabajo de investigación ha hecho posible lograr una importante contribución a la industria

minera de extracción, realizado con el único fin de obtener el Título de Ingeniero Mecánico Eléctrico.

### **1.5. Alcances y limitaciones**

Respecto a los alcances y limitaciones del estudio se considera lo siguiente:

En el aspecto temático, el presente trabajo de tesis de pregrado comprende un cambio efectivo en la forma de realización y gestión de protección eléctrica para los equipos de Palas y Perforadoras dentro de la empresa minera Southern Peru Cooper Corporation, específicamente en la explotación minera ubicada en Cuajone. Se realizará una propuesta técnica que servirá de soporte del Sistema de Coordinación Eléctrico para la mejora del mismo. Es decir, luego de la investigación de tipo correlacional utilizada, se procederá a formular y hacer efectiva la propuesta técnica antes mencionada.

En el aspecto espacial, el presente proyecto se llevará a cabo en la mina Cuajone la cual se encuentra ubicada al departamento de Moquegua en la latitud -17.0313889 y longitud -70.7094444.

En el aspecto temporal, el presente trabajo se llevará a cabo en 10 semanas y los datos analizados son del año 2019 para una propuesta de mejora posterior al estudio de coordinación.

### **1.6. Variables**

La variable independiente es el Estudio de coordinación de protección eléctrica. La variable dependiente es el Índice de Disponibilidad de Palas y Perforadoras.

### 1.6.1. Operacionalización de variables.

**Tabla 1**

*Operacionalización de variables*

Variable	Definición conceptual	Dimensión	Unidad de medida	Escala	Instrumento de medición
INDEPENDIENTE: E: Estudio de coordinación de protección eléctrica	Metodología de la electricidad que se encarga de estudiar, seleccionar, manipular y analizar los elementos de protección eléctrica.	Corriente eléctrica	Amperios (A)	Intervalo	Amperímetro de medición remota con transformador de corriente 750X014103 (Anexo 3)
DEPENDIENTE: Disponibilidad de Palas y Perforadoras	Relación que muestra la proporción de tiempo útil efectivo frente al tiempo total disponible. $D.M. = \frac{T.Efectivo}{T.Efectivo + T.No Dispo}$	Disponibilidad	Porcentual (%)	Razon	Ficha de observación de Disponibilidad Mecánica (Anexo 4)

### 1.7. Hipótesis de la investigación

#### 1.7.1. Hipótesis general.

- El óptimo estudio de coordinación de protección eléctrica incrementa la disponibilidad de las Palas y Perforadoras en la mina Cuajone de la empresa Southern Peru Copper Corporation en Moquegua en el año 2019

#### 1.7.2. Hipótesis específicas.

- El circuito eléctrico equivalente del estudio de coordinación de protección eléctrica incrementa la disponibilidad de las Palas y Perforadoras en la mina Cuajone de la empresa Southern Peru Copper Corporation en Moquegua en el año 2019
- Los grupos de ajuste final del estudio de coordinación de protección eléctrica incrementa la disponibilidad de las Palas y Perforadoras en la mina Cuajone de la empresa Southern Peru Copper Corporation en Moquegua en el año 2019

- Los esquemas especiales de protección del estudio de coordinación de protección eléctrica incrementan la disponibilidad de las Palas y Perforadoras en la mina Cuajone de la empresa Southern Peru Copper Corporation en Moquegua en el año 2019

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. Antecedentes de la investigación**

##### **2.1.1. A nivel internacional.**

###### ***2.1.1.1. México D.F., Instituto Politécnico Nacional, 2009.***

Los bachilleres Rosas Reyes y Santana García realizaron el trabajo denominado “Coordinación de Protecciones para un Sistema Eléctrico Industrial” para obtener el grado de Ingeniero Electricista llegando a las siguientes conclusiones:

Se debe realizar el cálculo de cortocircuito para cada una de las barras del sistema eléctrico para de esta forma seleccionar la protección eléctrica adecuada.

El proceso de coordinación de protecciones se debe realizar desde la barra más alejada a la fuente de alimentación, ya que de esta forma se obtendrá la secuencia de protecciones a diferentes márgenes de tiempo a manera de que el sistema sea secuencial.

Finalmente, el dispositivo protege el circuito fallado, asilando la falla antes que las otras protecciones tengan que dispararse (Galván, Rosas, & Santana, 2009).

### ***2.1.1.2. México D.F., Instituto Politécnico Nacional, 2013.***

Los bachilleres Cuevas Camacho y Hernández Quintero realizaron el trabajo denominado **“Coordinación de Protecciones en un Sistema de Distribución”** para obtener el grado de Ingeniero Electricista, llegando a las conclusiones siguientes:

Luego de predecir con precisión las fallas, es improbable que las mismas puedan afectar la distribución de energía.

- Es necesario conocer con precisión las características de los elementos que son parte del sistema eléctrico.
- Las protecciones eléctricas son diseñadas para despejar o eliminar fallas que perjudican el adecuado funcionamiento eléctrico cualquiera que sea y en el menor tiempo posible.
- Lo que busca un estudio de coordinación es ajustar y seleccionar protecciones a manera de que el elemento protector despeje la falla del elemento respaldado, de ésta forma se logra seccionar únicamente la parte fallada y el resto del sistema permanece estable (Cuevas & Hernández, 2013).

### ***2.1.1.3. Concepción, Universidad del Bio-Bio, 2016.***

Acuña y Monroy (2016), realizaron el trabajo denominado **“Estudio de Coordinación de Protecciones Eléctricas en planta eléctrica típica”** en la ciudad de Concepción, Chile, estudio que se pudo realizar a través del uso del software ETAP y configuración de relés digitales 750/760.

Dicho estudio comprendió lo siguiente:



- Se consideraron dos escenarios y a través del uso del software se realizaron los cálculos de cortocircuito trifásico a manera de lograr determinar las corrientes de falla máxima y mínima de la red eléctrica en estudio, de esta manera se validaron los resultados obtenidos a través del software.
- Se realizó la simulación de fallas con las impedancias obtenidas para obtener la secuencia de operación en el diagrama unifilar del ETAP, así como el tiempo de operación y resultados de coordinación, con esto fue posible analizar las fallas simuladas.

### **2.1.2. A nivel nacional.**

#### ***2.1.2.1. Arequipa, Universidad Nacional de San Agustín, 2018.***

- Sánchez (2018), realizó el trabajo denominado **“Diseño de Redes de Distribución Subterránea, Subestaciones Eléctricas, Estudio de Coordinación de Protecciones de un Sistema de Distribución Radial”** llegando a las siguientes conclusiones:
  - La empresa prestadora de servicio SEAL debe solicitar los parámetros de diseño y restricciones que deben tener en consideración al momento de elaborar un proyecto.
  - Para los cálculos de máxima demanda, se deben aplicar los criterios descritos en el código nacional de electricidad para una arquitectura definida a aplicar según la sección, y las cargas especiales deben ser proporcionadas por especialistas contra incendios, ascensores, ventilación forzada, etc (Sánchez, 2018),.

#### ***2.1.2.2. Lima, Universidad Nacional de Ingeniería, 2018.***

- Paucar Paz y Huarhua Pumayalli realizaron el trabajo denominado **“Estudio de Coordinación del Sistema de Protección de Alimentadores de Media**

**Tensión con Generación Distribuida ante Fallas en Redes Adyacentes en Cusco y Apurímac”, para optar el título de Ingeniero Electricista, llegándose a la siguiente conclusión:**

- El sistema de protección de los alimentadores de media tensión con generación distribuida, con los ajustes necesarios en los relés, habilitación y configuración de las funciones de direccionalidad 67 y 67 N, brindan una mejor respuesta del sistema de protección del alimentador con generación distribuida en las fallas presentadas en redes de media tensión (Paucar & Huarhua, 2018).

## **2.2. Bases teóricas**

### **2.2.1. Filosofía del sistema de protección.**

Para Zúñiga (2015), el sistema de coordinaciones busca evitar las ocurrencias de perturbaciones o fallas graves, que por motivos de seguridad es necesario que se eliminen en el menor tiempo posible; sin embargo, estos tiempos son tan cortos que no es posible realizarlos con la intervención humana. Para ello se cuentan con dispositivos automáticos de protección y control, los cuales le dan la orden de operación a los interruptores, que abren el circuito fallado aislando la fuente de energía y evitando los efectos que puedan repercutir en el resto del sistema, sea bien para anular la sobretensión o desviar a tierra la corriente proveniente de la falla.

Estos sistemas de protección y control se encuentran conformados por fusibles, transformadores de corriente y tensión, transformadores de control, detectores o relés de protección, relés auxiliares que operan en los interruptores, seccionadores, pararrayos, sistemas de baterías e interruptores capaces de interrumpir las fuertes corrientes de falla.

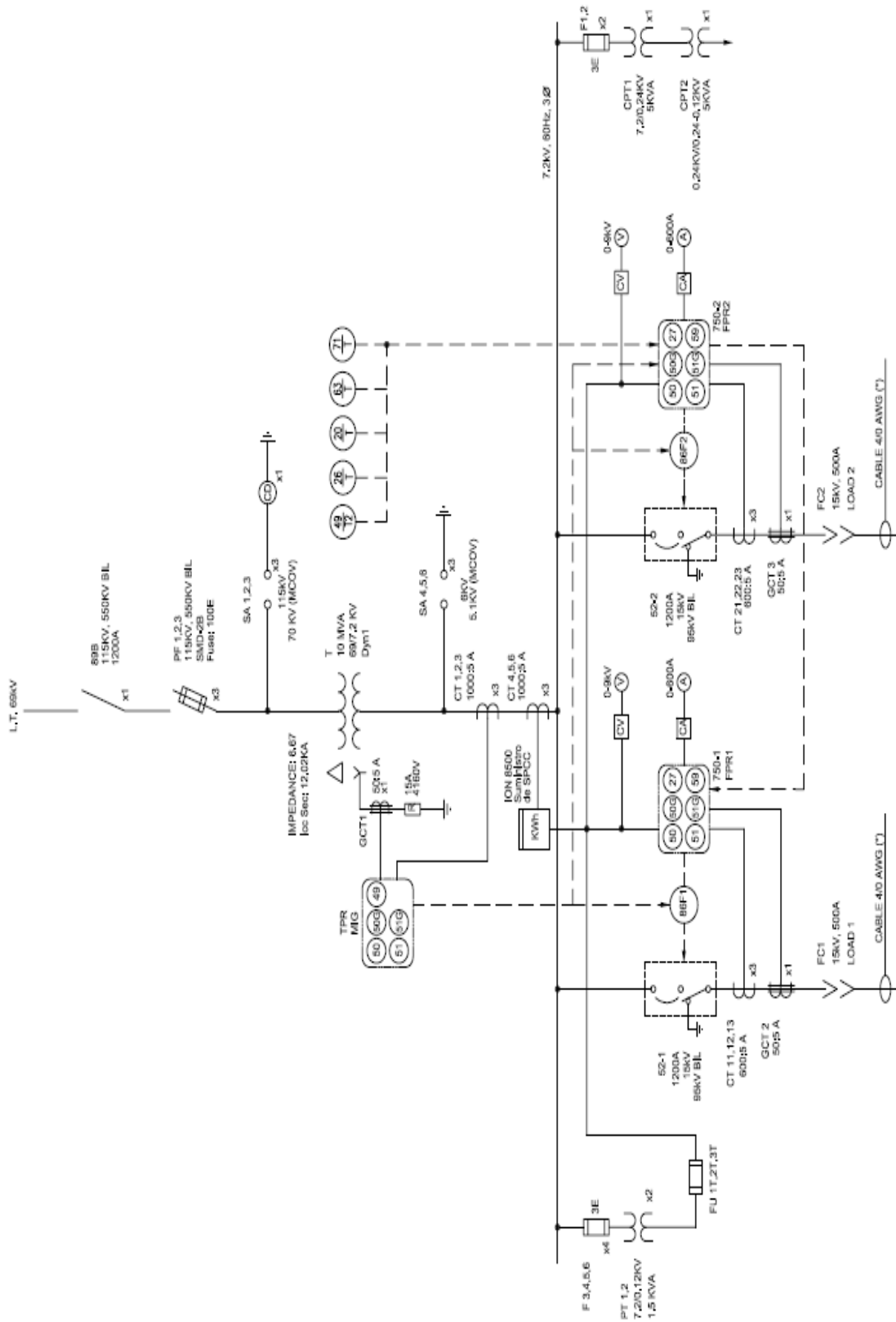


Figura 1. Sistemas de control y protección típicos de una subestación

Fuente: SPCC, 2019

Mientras más dispositivos de protección y control existan en una Subestación, los costos serán mayores, por ende, es necesario evaluar cuidadosamente el sistema de potencia al cual queremos proteger. Las principales características que debemos considerar es la rapidez de respuesta ante una falla, buscando minimizar los tiempos de duración de las fallas eléctricas los cuales deben realizarse en milisegundos, también debemos considerar la ubicación de los transformadores de corriente y tensión; estos deben estar dentro de las instalaciones de la Subestación.

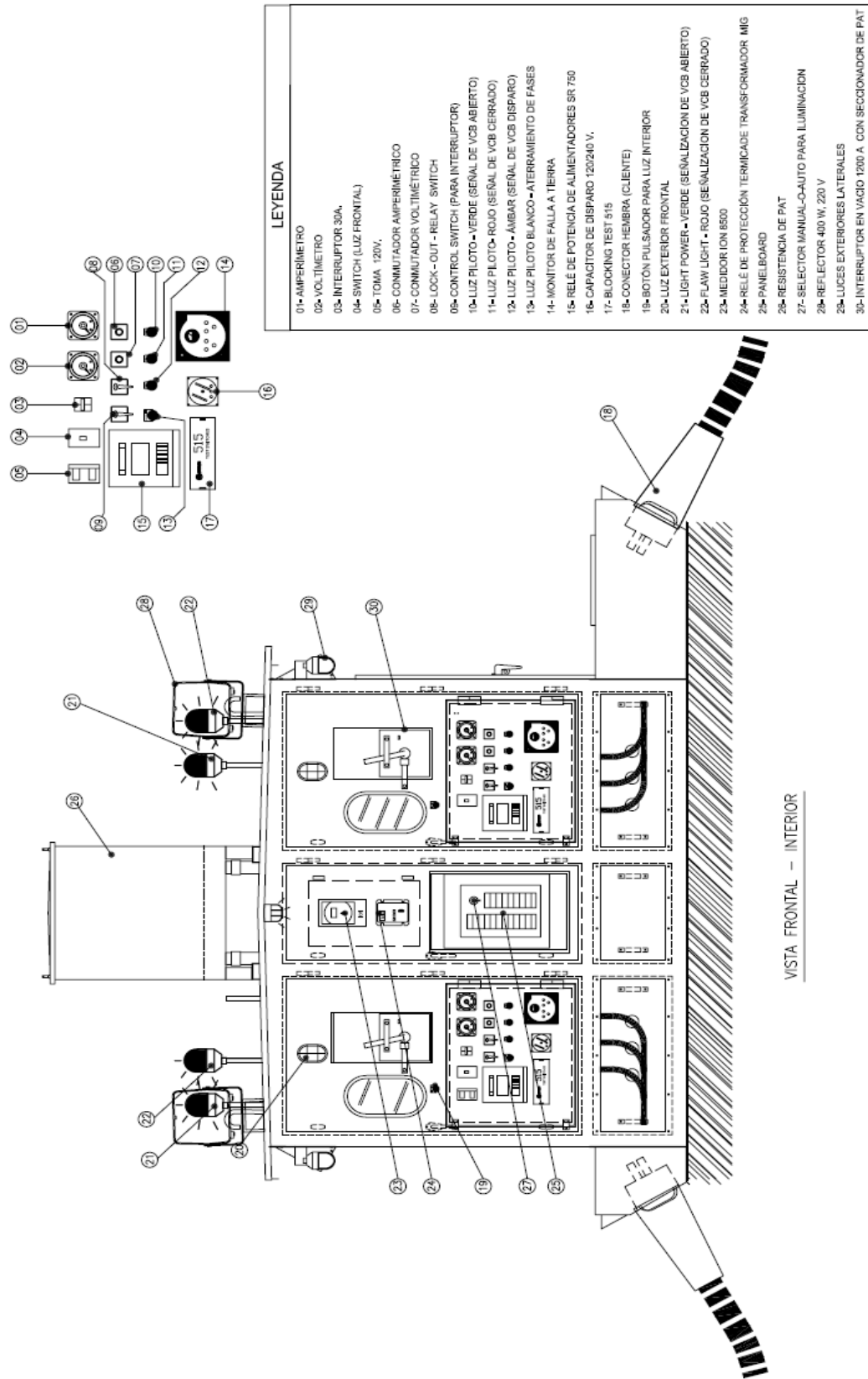


Figura 2. Ubicación típica de los dispositivos de protección en una subestación móvil

Fuente: SPCC, 2019

El monitoreo de cada equipo es constante a través de los sistemas de protección, es decir que se busca incluso el traslape entre estos sistemas para que no existan zonas sin protección.

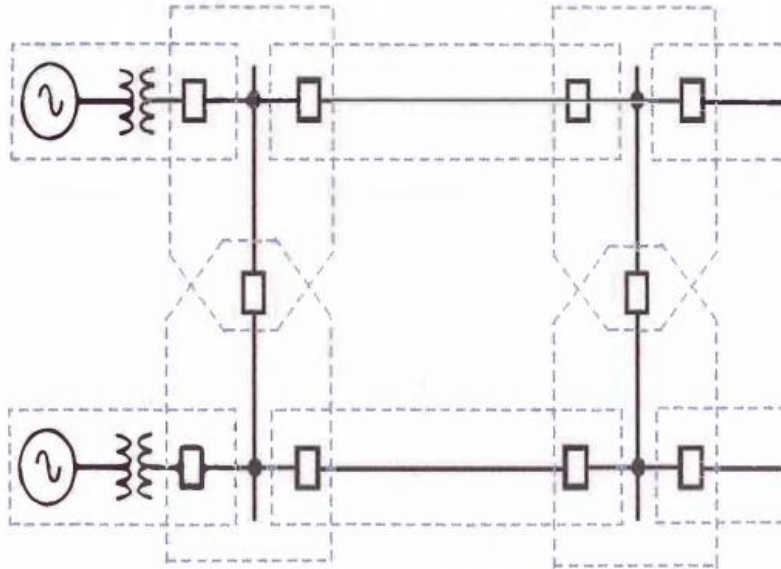


Figura 3. Traslape de zonas de protección

Fuente: Zuñiga, 2015

Dicho traslape se aplica comúnmente en líneas de transmisión aérea, en alta y extra alta tensión; específicamente en zonas a distancia. En cuanto a los diagramas unifilares de protección, usan números bajo las normas IEEE Std.37.2. y símbolos según IEC 60617.7, como se muestra en la siguiente figura.

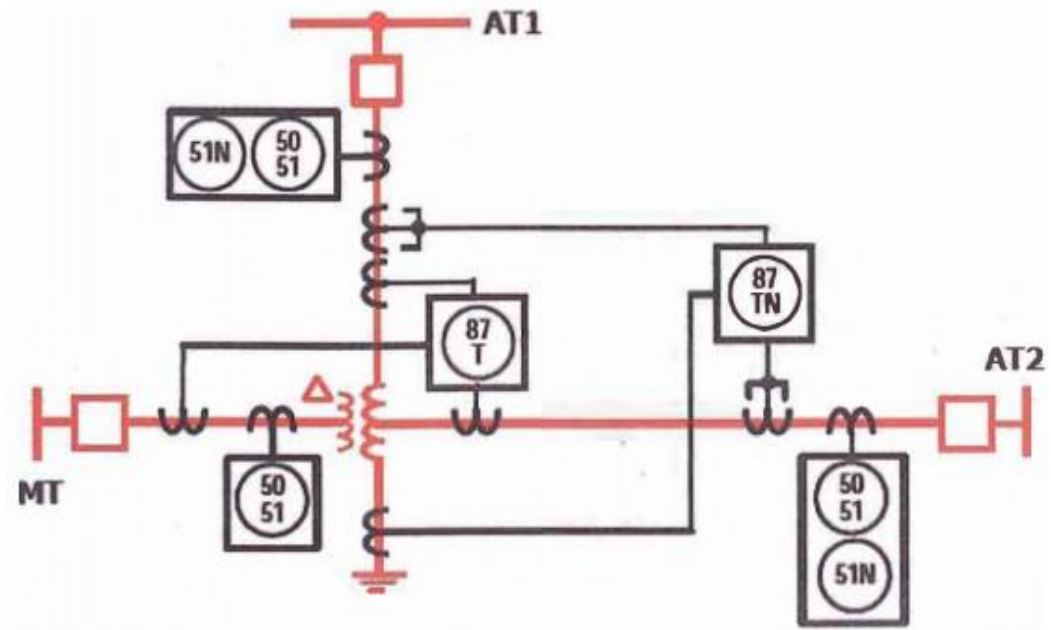


Figura 4. Diagrama unifilar de protecciones con números ANSI

Fuente: Zuñiga, 2015

A continuación, se muestran las principales funciones según normas ANSI

**Tabla 2***Principales funciones de protección según ANSI*

<b>número</b>	<b>Función</b>
12	Detector de relé de sobre velocidad
14	Detector de baja velocidad
21	Detector de distancia
23	Relé de control de temperatura
25	Relé verificador de sincronismo
27	Relé de mínima tensión
32	Relé direccional de potencia
37	Relé de mínima intensidad o baja potencia baja
40	Relé de campo / Pérdida de excitación
46	Relé de secuencia negativa o desbalance de corriente
47	Detector de secuencia de fases
49	Detector térmico para máquina, aparato o transformador
50	Relé de sobre corriente instantáneo
51	Relé de sobre corriente temporizado
52	Interruptor
55	Relé de factor de potencia
59	Relé de máxima tensión
63	Relé de presión de gas, líquido o vacío (Bucholz)
67	Relé direccional de sobre corriente
74	Relé de alarma
79	Relé de conexión o reenganche
81	Relé de frecuencia
85	Relé receptor de ondas portadoras o hilo piloto
87	Relé de protección diferencial
94	Relé de disparo (trip) o disparo libre

Fuente: Zuñiga, 2015



### 2.2.2. Equipos de protección.

Los equipos de protección son un conjunto de dispositivos de protección, donde se excluyen los dispositivos como TC's, mini interruptores, contactores, entre otros (Amador, 2007). Para cumplir con los diversos tipos de protección con la rapidez óptima para las diferentes configuraciones y condiciones de uso, se tienen diversos tipos de relés que sean variables como los sistemas de potencia, de acuerdo a la tecnología utilizada estos pueden ser: electromecánicos, estáticos, digitales y numéricos. Para las adecuadas protecciones es necesario realizar un arreglo que responda a distintas variables.



Figura 5. Imagen relé de protección MULTILIN 750

Fuente: Amador, 2007

Un relé de protección internamente cuenta con muchos bloques de medición y control, esto permite realizar la función de protección de un sistema de distribución de energía.

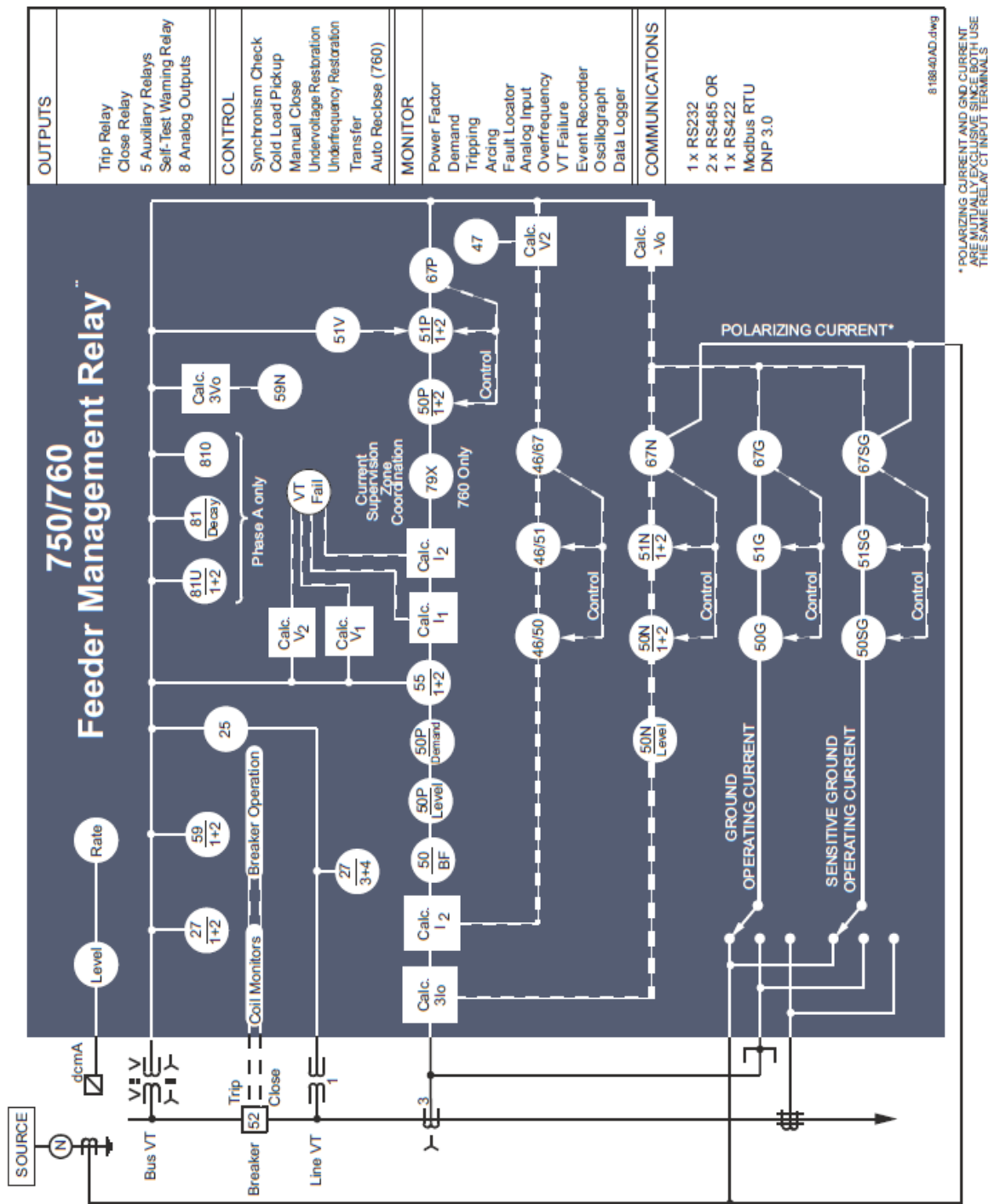


Figura 6. Diagrama de bloques relé de protección

Fuente: Amador, 2007

### 2.2.3. Zonas de protección.

Las protecciones son implementadas en zonas para limitar la porción del sistema que se desconecta cuando ocurre una falla.

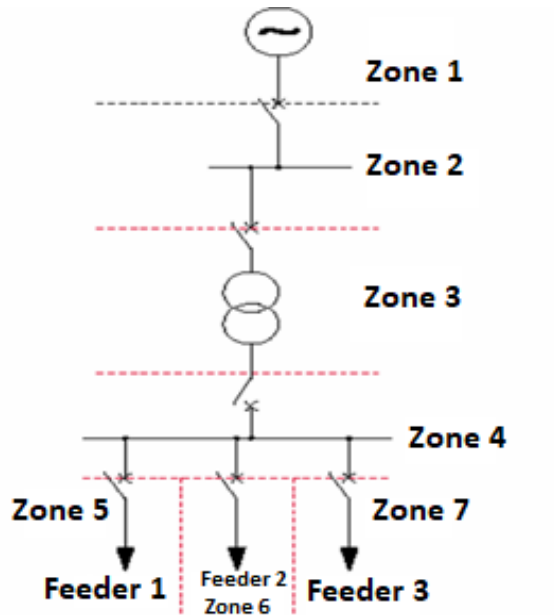


Figura 7. Zonas de protección típica para una red de distribución

Fuente: Amador, 2007

### 2.2.4. Transformadores de medida.

Los transformadores de medida son máquinas eléctricas que permiten aumentar o disminuir la tensión en un circuito eléctrico de corriente alterna, manteniendo la frecuencia; consecuentemente, son máquinas eléctricas que tienen la función de reducir los voltajes en función a los equipos de protección a medida.



*Figura 8.* Imagen de un transformador de tensión

Fuente: General Electric, 2021

### **2.2.5. Transformadores de potencia.**

El transformador de potencia es un dispositivo que no tiene partes móviles, el cual transfiere la energía eléctrica de un circuito a otro bajo el principio de inducción electromagnética. La transferencia de energía la hace por lo general con cambios en los valores de voltajes y corrientes.



*Figura 9.* Imagen de un transformador de potencia

Fuente: General Electric, 2021

Así mismo, en un transformador de potencia la tensión secundaria es proporcional a la tensión primaria. El voltaje primario debe ser igual al voltaje de potencia para la conexión entre una línea de un sistema trifásico y tierra o al neutro del sistema, y su valor es  $1/\sqrt{3}$  veces el valor del voltaje nominal del sistema. El voltaje secundario varía según la norma. Los valores más comunes son:

- IEC = 100, 110,  $100/\sqrt{3}$ ,  $110/\sqrt{3}$ , 115,  $115/\sqrt{3}$
- ANSI = 120 y  $120/\sqrt{3}$  para transformadores menores a 25 kV
- ANSI = 115 y  $115/\sqrt{3}$  para transformadores menores a 34 kV

En cuanto a la relación de transformación de potencial (RTP) Amador (2007) menciona que la relación entre el voltaje primario y secundario nominal se da de la siguiente manera:

$$RTP = \frac{V \text{ primario}}{V \text{ secundario}}$$

La RTP se utiliza normalmente para calcular la relación de tensiones del transformador de potencia.

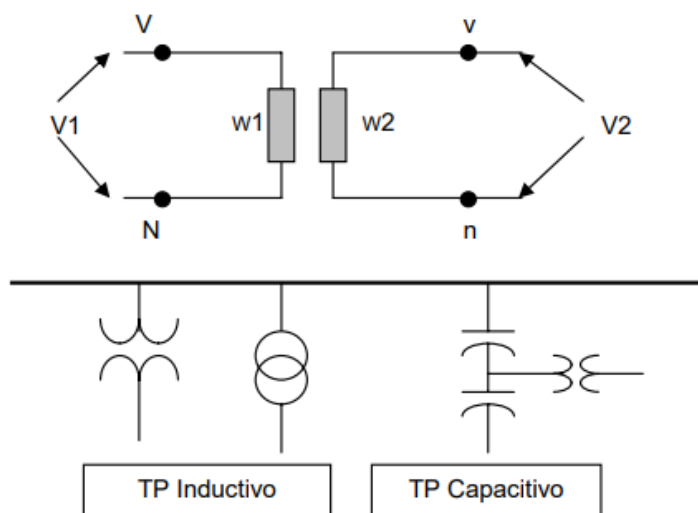
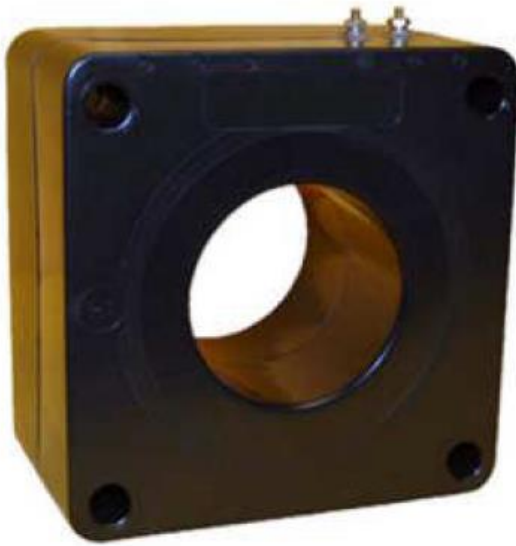


Figura 10. Representación simbólica de un transformador de potencia

Fuente: Amador, 2007

### 2.2.6. Transformadores de corriente.

Un transformador de corriente (TC o CT por sus siglas en inglés) es un transformador utilizado para aumentar o disminuir una corriente alterna (AC). Este transformador logra que la corriente secundaria sea prácticamente proporcional a la corriente primaria y circula por circuito cerrado a través de devanados conectados.



*Figura 11.* Imagen de un transformador de corriente del tipo toroidal

Fuente: General Electric, 2021

En este tipo de transformador, las corrientes nominales primarias son establecidas en placas características y existen de relación sencilla como se muestra a continuación:

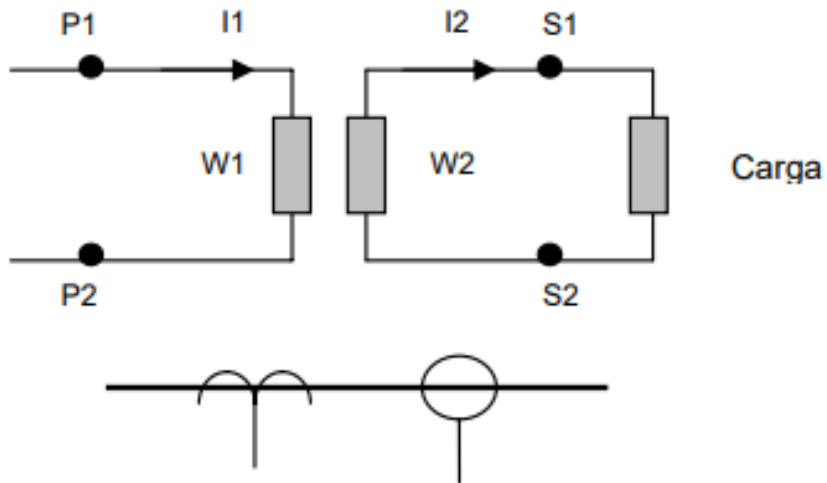


Figura 12. Representación de un transformador de relación simple

Fuente: Amador, 2007

Así mismo Amador (2007), denomina relación de transformación de corriente (RTC) a la relación entre las corrientes nominales primaria y secundaria

$$RTC = \frac{I \text{ primaria}}{I \text{ secundaria}}$$

Una TC de relación 600/5 con 3 núcleos secundarios se especifica de relación 600/5/5/5.

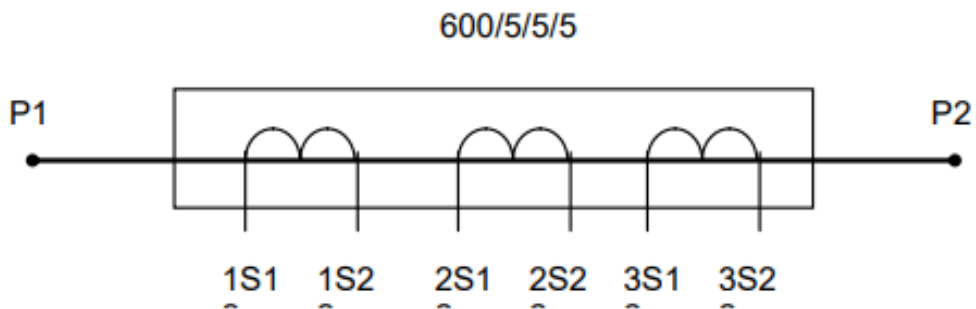


Figura 13. Representación de un transformador de corriente de un núcleo secundario

Fuente: Amador, 2007

### 2.2.7. Estudio de coordinación de protecciones.

El estudio de coordinación de protecciones eléctricas busca la selectividad y velocidad en el aislamiento de fallas que se pueden dar en un momento inesperado

del sistema. Es decir que la protección más cercana a la falla debe actuar para aislarla antes de que pueda causar daños a cualquier componente del sistema. Para lograr ello debe buscarse la consistencia con la carga servida y con la fuente de generación.

Para dicho estudio se emplea comúnmente el software ETAP que automáticamente puede calcular “hasta 2000 buses las corrientes simétricas y asimétricas para fallas trifásicas, bifásicas y de línea a tierra, y compararla con la capacidad de interrupción y momentánea de los equipos de protección contra los valores obtenidos. Cumple con los estándares ANSI/IEEE & IEC para Análisis de Fallas Transitorias (IEC 61363), Flasheo de Arco (NFPA 70E-2015), y cumple además con los estándares ANSI/IEEE: C37, 141, 242, 399, UL 489-9” (SETISA, 2019).



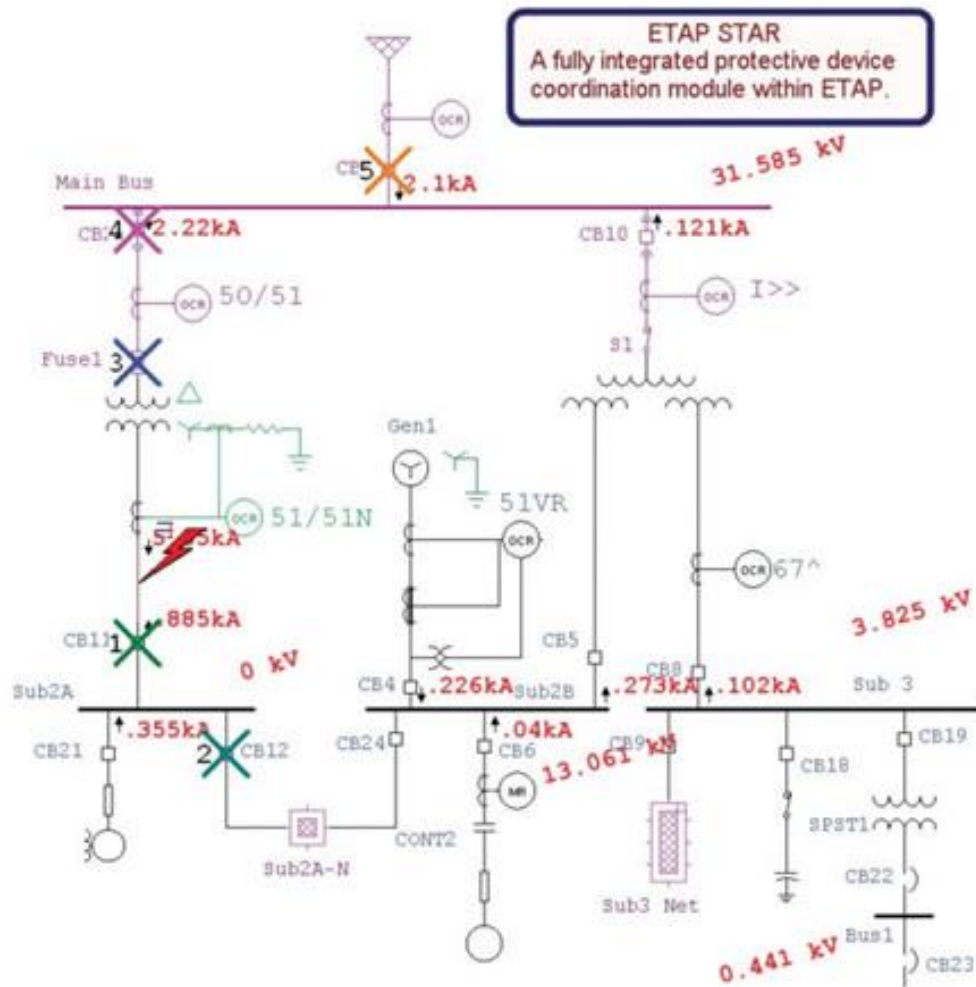


Figura 14. Estudio de coordinación ETAP

Fuente: SETISA, 2019

### 2.2.8. Pala eléctrica.

Las palas eléctricas son máquinas cuya función principal es el carguío del mineral en los camiones de acarreo. Dichas máquinas tienen dos formas de operación: modo DIG y modo PROPEL. Para el modo de operación DIG funcionan los movimientos de Hoist, Crowd y Swing, para el modo de operación PROPEL funcionan los movimientos de Propel y Swing, estas formas de funcionamiento definirá el modelo del circuito equivalente de estas máquinas en el software ETAP

Las palas para poder realizar los movimientos antes mencionados cuentan con un conjunto de motores, transmisiones mecánicas y componentes auxiliares los cuales interactúan entre sí para permitir el modo de funcionamiento seleccionado por el operador.

Los sistemas de Hoist, Crowd y Swing se encuentran dentro de sala de máquinas en la Pala, el sistema de Propel se encuentra en el Truck Frame de la Pala. Esto se puede apreciar en las dos figuras siguientes.

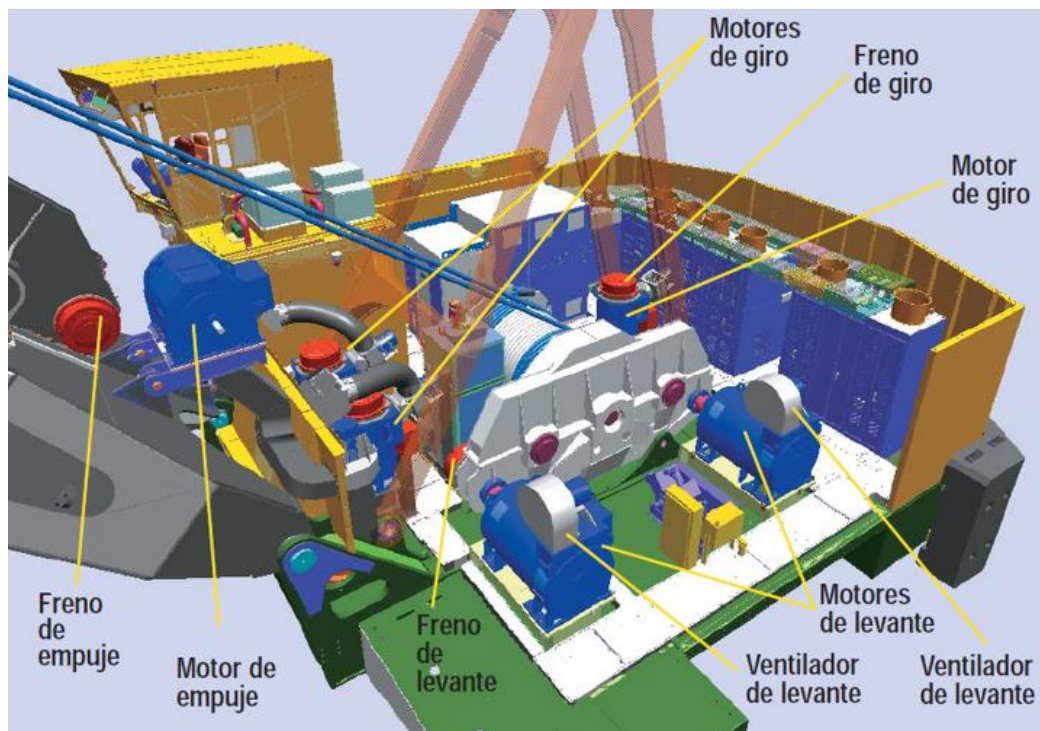


Figura 15. Imagen interior sala de máquinas Palas P&H

Fuente: SPCC, 2019

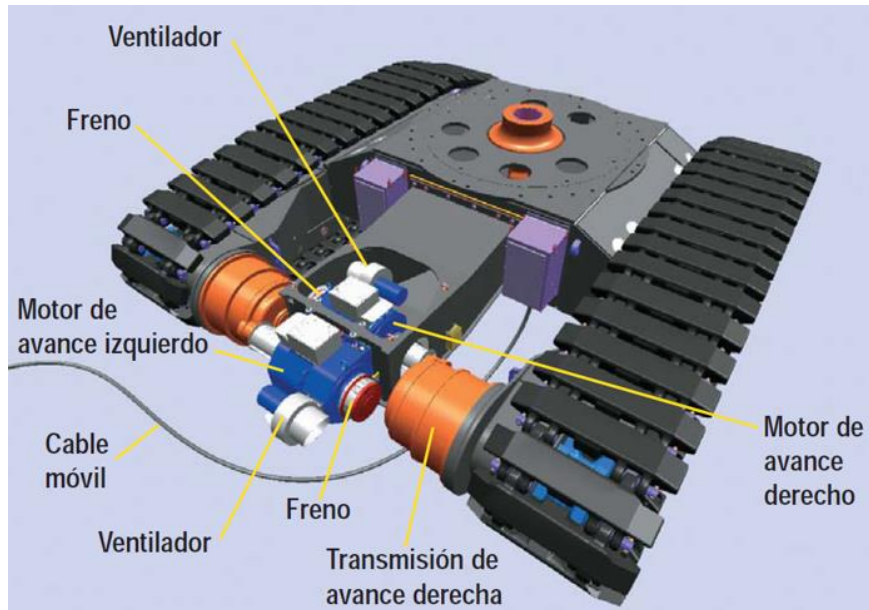


Figura 16. Imagen componentes Truck Frame Palas P&H

Fuente: SPCC, 2019

### 2.2.9. Perforadora eléctrica.

Las perforadoras eléctricas son máquinas cuya función principal es perforar el suelo rocoso de la mina para generar un taladro que posteriormente será rellenado de materiales e insumos propios de proceso de voladura. Dichas maquinas tienen varias formas de operación, resaltando dos de ellas las cuales son: modo DRILL y modo PROPEL. Para el modo de operación DRILL funcionan el motor principal, así como los movimientos de Hoist/Pulldowd y Rotary, para el modo de operación PROPEL funciona el motor principal, estas formas de funcionamiento definirá el modelo del circuito equivalente de estas máquinas en el software ETAP.

Las perforadoras para poder realizar los movimientos antes mencionados cuentan con un conjunto de motores, transmisiones mecánicas y componentes auxiliares los cuales interactúan entre sí para permitir el modo de funcionamiento seleccionado por el operador. Líneas abajo se muestra los circuitos unifilares equivalentes de estas máquinas.

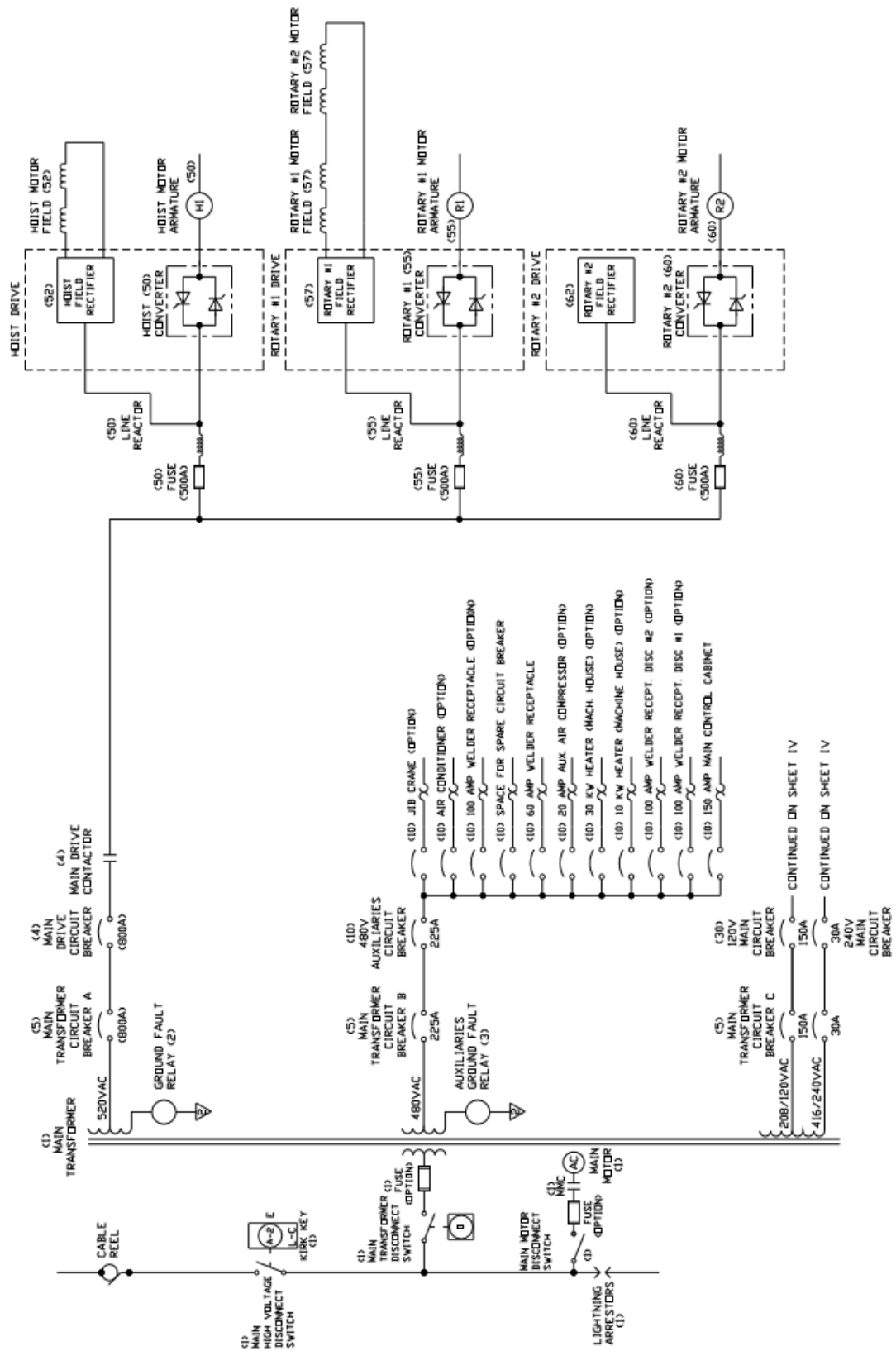


Figura 17. Imagen circuito eléctrico equivalente Perforadoras 11, 16 y 17

Fuente: SPCC, 2019

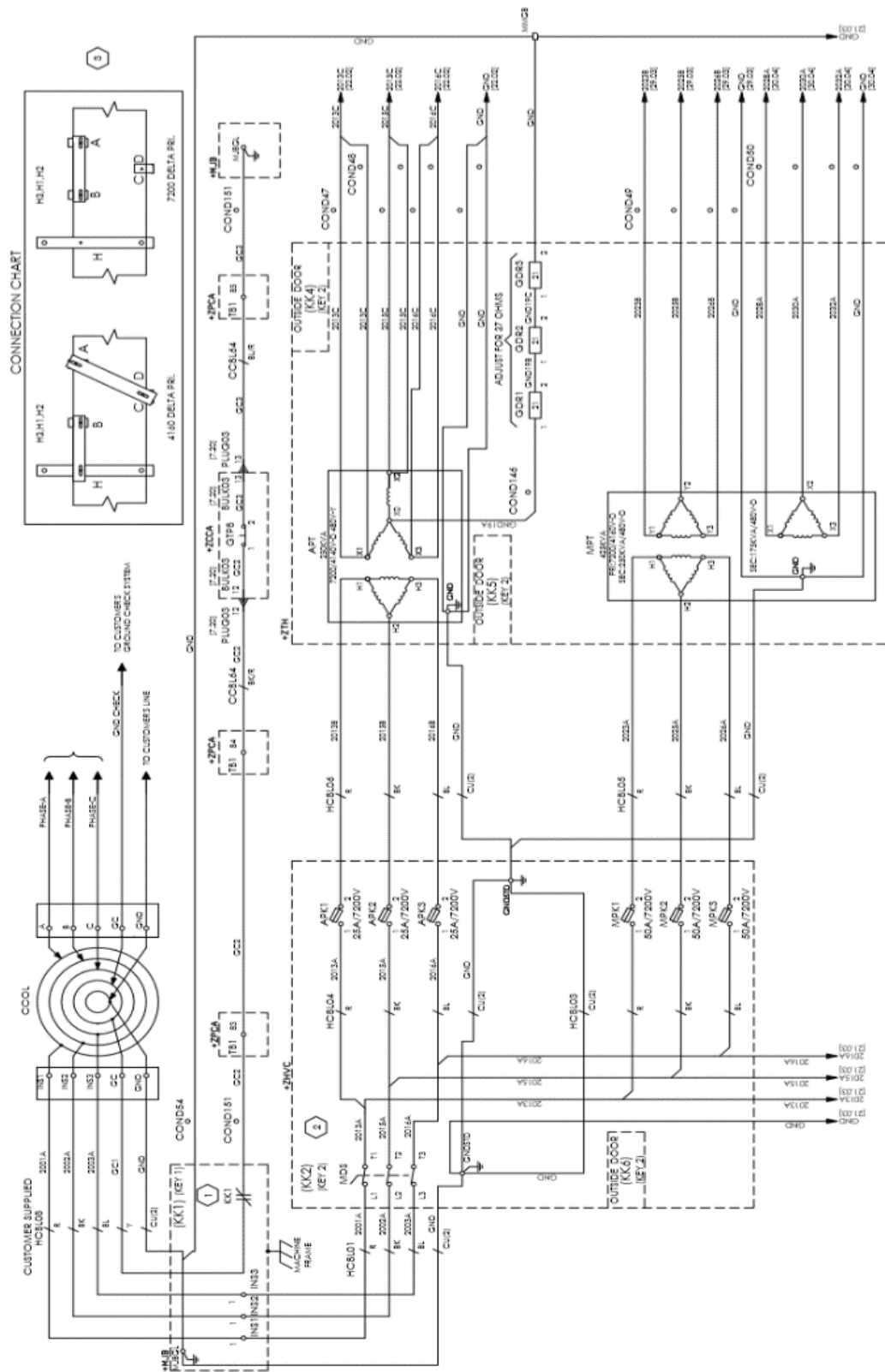


Figura 18. Imagen circuito eléctrico equivalente Perforadoras 13, 14 y 18

Fuente: SPCC, 2019

### **2.3. Definición de términos**

#### **2.3.1. Protección Eléctrica.**

Sistema de monitoreo y control implementado en una instalación eléctrica con la finalidad de prevenir o minimizar el daño del equipo o instalación producto de una falla de naturaleza eléctrica.

#### **2.3.2. Coordinación de protección eléctrica.**

Rama de la electricidad que se encarga de estudiar, seleccionar, manipular y analizar los elementos de protección eléctrica.

#### **2.3.3. Corriente Eléctrica.**

Dimensión de la variable coordinación de protección eléctrica que representa el fenómeno físico producido por el desplazamiento de electrones a través de un material con propiedades conductivas como por ejemplo un cable de cobre.

#### **2.3.4. I pickup.**

Indicador de la variable coordinación de protección eléctrica que representa el valor de corriente eléctrica que expresa el inicio de la curva logarítmica de funcionamiento de un determinado ajuste de protección eléctrica.

Disponibilidad de Palas y Perforadoras

Relación que muestra la proporción de tiempo útil efectivo frente al tiempo total disponible de una máquina o equipo.

*Disponibilidad de equipos 2019 y posterior al estudio de coordinación*

Indicador de la variable Disponibilidad de Palas y Perforadoras que representa el valor en porcentaje de las disponibilidades de los equipos de Palas y Perforadoras obtenidos en la mina Cuajone durante el año 2019 y posterior al estudio de coordinación.

### **2.3.5. KPI's (Key Performance Indicator).**

Indicadores de calidad o desempeño usados para medir la eficacia y productividad de los equipos de Palas y Perforadoras obtenidos en la mina Cuajone.

## **CAPÍTULO III**

### **MÉTODO**

#### **3.1. Tipo de la investigación**

La investigación es del tipo cuasi experimental ya que se realizará un análisis del óptimo estudio de coordinación de protección eléctrica y se experimentará simulando la misma a través de un software, lo cual permitirá responder las hipótesis formuladas y cumplir con los objetivos propuestos.

#### **3.2. Diseño de la investigación**

Debido a la naturaleza del problema que se va a abordar, el diseño de la investigación será del tipo Correlacional ya que se analizará la relación entre el óptimo estudio de coordinación de protección eléctrica y la razón de disponibilidad de los equipos de palas y perforadoras. Esto con la finalidad de plantear nuevos grupos de ajuste final y esquemas de protección especial a través de la utilización de un software simulador denominado ETAP v.16.

#### **3.3. Población y Muestra**

Para la elaboración del circuito equivalente en ETAP se levantó la información relevante de los componentes de cada una de las Palas y Perforadoras, switch house y subestaciones de la mina. Este conjunto de información comprende datos de placa, características y especificaciones técnicas que se detallaran a continuación.



### 3.3.1. Palas.

Para este estudio se consideró seis Palas, tres en la marca P&H y tres en la marca Bucyrus cuyos modelos se muestran en la tabla inferior.

**Tabla 3**

*Modelos Palas P&H mina Cuajone*

<b>Especificaciones</b>	<b>Pala 1</b>	<b>Pala 3</b>	<b>Pala 7</b>
Modelo	2800XPB	4100A+	4100XPC
Marca	P&H	P&H	P&H

**Tabla 4**

*Modelos Palas Bucyrus mina Cuajone*

<b>Especificaciones</b>	<b>Pala 4</b>	<b>Pala 5</b>	<b>Pala 6</b>
Modelo	495BII	495HR	495HR
Marca	Bucyrus	Bucyrus	Bucyrus

A continuación, se detallará las características y especificaciones técnicas de los componentes relevantes de cada Pala para el presente estudio.

#### **3.3.1.1. Pala 1 modelo 2800XPC.**

Pala 1 cuenta con un transformador principal con doble secundario, estos bobinados secundarios alimentan a dos barras las cuales a su vez energizan los convertidores de los motores principales, así como los sistemas de compensación de potencia reactiva. Existe un transformador auxiliar para los sistemas de control y cargas auxiliares.



*Figura 19.* Imagen Pala 1 modelo 2800XPB

*a. Transformador principal.*

Pala 1 cuenta con un transformador principal del tipo seco con ventilación forzada de 2000 kVA, el cual tiene una relación de tensión de 7.2 kV a 600V con doble bobinado secundario. Cuenta con un grupo de conexión DYN1 aterrado sólidamente a tierra.

*b. Transformador auxiliar.*

Pala 1 cuenta con un transformador auxiliar del tipo seco sin ventilación de 350 kVA, el cual tiene una relación de tensión de 7.2 kV a 480V. Cuenta con un grupo de conexión DYN1 aterrado sólidamente a tierra.

*c. Motores para los movimientos principales.*

Pala 1 cuenta con dos motores de Hoist, un motor de Crowd, dos motores de Swing y dos motores de Propel, todos estos motores son de corriente continua del tipo de excitación independiente tanto para el circuito de armadura como para el circuito de excitación. En la siguiente figura se aprecia un motor Hoist de frame K925 con su respectivo ventilador para su enfriamiento.



Figura 20. Imagen del motor Hoist de frame K925 Pala 1

Fuente: SPCC, 2019

Las armaduras están conectadas a los convertidores AC/DC los cuales usan SCR'S en la etapa de electrónica de potencia. Los convertidores de campo o excitación se energizan del bobinado secundario del transformador auxiliar. Las sumas de ambos convertidores junto con la etapa de control forman el variador de velocidad para cada uno de los motores de los movimientos principales de Pala 1. Las características más importantes de dichos motores se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla 5**

*Especificaciones motores movimientos principales Pala 1*

<b>Especificaciones</b>	<b>2 motores Hoist</b>	<b>1 motor Crowd</b>	<b>2 motores Swing</b>	<b>2 motores Propel</b>
Frame	K925	K489	K558A	K408
Potencia	365 HP	175 HP	240 HP	140 HP

*d. Bancos de compensación de potencia reactiva.*

La potencia reactiva es generada por los motores de los movimientos principales al generar el campo electromagnético. Los bancos de compensación de potencia reactiva de Pala 1 aprovechan la tendencia natural de los capacitores para arrastrar la corriente adelantada al conectarse a una fuente AC.

**Tabla 6**

*Especificaciones bancos de compensación de Pala 1*

<b>Especificaciones</b>	<b>Banco 1/2</b>	<b>Banco 1</b>	<b>Banco 2</b>	<b>Banco 3</b>
RPC	675 kVAR	1350 kVAR	1350 kVAR	1350 kVAR
Frecuencia	60 Hz	60 Hz	60 Hz	60 Hz

**3.3.1.2. Pala 3 modelo 4100A+.**

Pala 3 cuenta con un transformador principal con doble secundario, estos bobinados secundarios alimentan a dos barras las cuales a su vez energizan los convertidores de los motores principales, así como los sistemas de compensación de potencia reactiva. Existe un transformador auxiliar para los sistemas de control y cargas auxiliares.



*Figura 21. Imagen Pala 3 modelo 4100A+*

*a. Transformador Principal.*

Pala 3 cuenta con un transformador principal del tipo seco con ventilación forzada de 2500 kVA, el cual tiene una relación de tensión de 7.2 kV a 600V con doble bobinado secundario. Cuenta con un grupo de conexión DYN1 aterrado sólidamente a tierra.



*Figura 22.* Imagen del transformador principal 2500 kVA Pala 3

*b. Transformador Auxiliar.*

Pala 3 cuenta con un transformador auxiliar del tipo seco sin ventilación de 350 kVA, el cual tiene una relación de tensión de 7.2 kV a 480V. Cuenta con un grupo de conexión DYN1 aterrado sólidamente a tierra.

*c. Motores para los movimientos principales*

Pala 3 cuenta con dos motores de Hoist, un motor de Crowd, dos motores de Swing y dos motores de Propel, todos estos motores son de corriente continua del tipo de excitación independiente tanto para el circuito de armadura como para el circuito de excitación. Las armaduras están conectadas a los convertidores AC/DC los cuales usan SCR'S en la etapa de electrónica de potencia. Los convertidores de campo o excitación se energizan del bobinado secundario del transformador

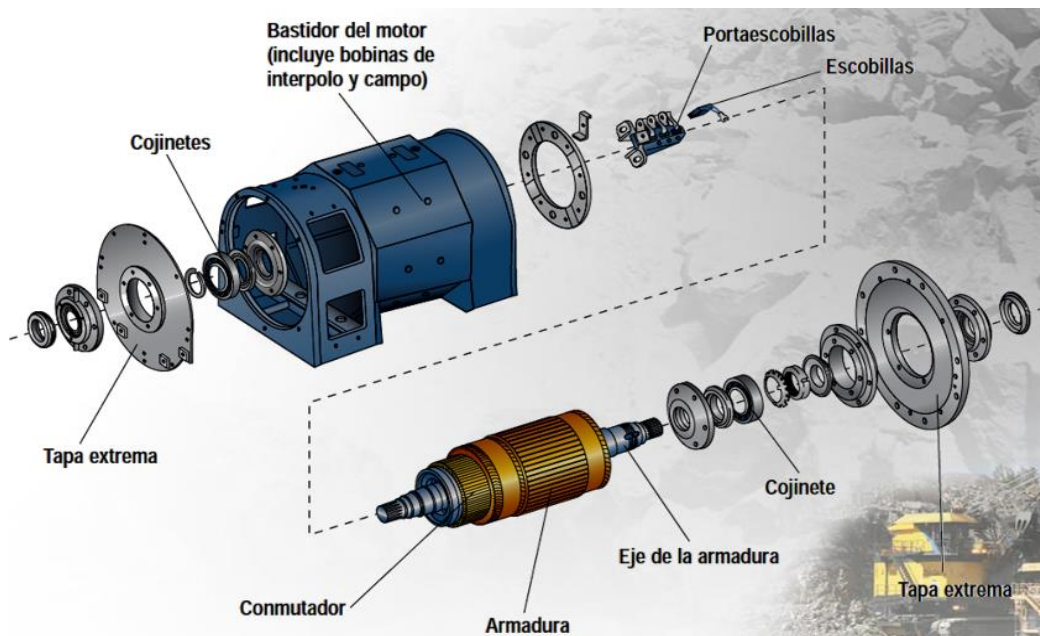
auxiliar. Las sumas de ambos convertidores junto con la etapa de control forman el variador de velocidad para cada uno de los motores de los movimientos principales de Pala 3 Las características más importantes de dichos motores se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla 7**

*Especificaciones motores movimientos principales Pala 3*

<b>Especificaciones</b>	<b>2 motores Hoist</b>	<b>1 motor Crowd</b>	<b>2 motores Swing</b>	<b>2 motores Propel</b>
Frame	K1690	K700	K558A	K558B
Potencia	1265 HP	310 HP	240 HP	210 HP

Un motor de corriente continua está constituido por el estator (donde se encuentran las bobinas de conmutación y excitación) y la armadura o inducido. Existen escobillas en el conmutador del inducido para transmitir la corriente eléctrica.



*Figura 23. Imagen componentes internos motor corriente continua*

Fuente: SPCC, 2019

*d. Bancos de compensación de potencia reactiva.*

La potencia reactiva es generada por los motores de los movimientos principales al generar el campo electromagnético. Los bancos de compensación de potencia reactiva de Pala 3 aprovechan la tendencia natural de los capacitores para arrastrar la corriente adelantada al conectarse a una fuente AC.

**Tabla 8**

*Especificaciones bancos de compensación de Pala 3*

<b>Especificaciones</b>	<b>Banco 1/2</b>	<b>Banco 1</b>	<b>Banco 2</b>	<b>Banco 3</b>
RPC	675 kVAR	1350 kVAR	1350 kVAR	1350 kVAR
Frecuencia	60 Hz	60 Hz	60 Hz	60 Hz

**3.3.1.3. Pala 4 modelo 495BII.**

Pala 4 cuenta con dos transformadores principales con doble secundario, estos bobinados secundarios alimentan a la etapa de rectificación de un único variador de velocidad, a su vez la salida de este variador energiza a los motores principales. El variador de velocidad usa IGBT'S en su electrónica de potencia para las etapas de rectificación e inversión. Así mismo la tecnología AFE de esta Pala permite obtener factores de potencia cercanos a 1, lo que elimina el uso de bancos de compensación de potencia reactiva. También existe un transformador auxiliar para los sistemas de control y cargas auxiliares.



*Figura 24. Imagen Pala 4 modelo 495BII*

*a. Transformador Auxiliar*

Pala 4 cuenta con un transformador auxiliar del tipo seco sin ventilación de 350 kVA, el cual tiene una relación de tensión de 7.2 kV a 480V. Cuenta con un grupo de conexión DYN1 aterrado sólidamente a tierra.

*b. Transformadores Principales*

Pala 4 cuenta con dos transformadores principales del tipo seco con ventilación forzada de 1000 kVA cada uno, los mismos tienen una relación de tensión de 7.2 kV a 930 con doble bobinado secundario. Cuenta con un grupo de conexión DYN1 aterrado sólidamente a tierra.

*c. Motores para los movimientos principales.*

Pala 4 cuenta con un motor de Hoist, un motor de Crowd, dos motores de Swing y dos motores de Propel, todos estos motores son de corriente alterna y llevan transductores de velocidad en sus ejes para el lazo de control. Estos motores están diseñados para trabajar con frecuencias variables, debido a ello los rodamientos son



aislados con respecto a tierra. El variador de velocidad de estos motores usa tecnología AFE en sus etapas de rectificación e inversión. Las características más importantes de dichos motores se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla 9**

*Especificaciones motores movimientos principales Pala 4*

<b>Especificaciones</b>	<b>1 motor Hoist</b>	<b>1 motor Crowd</b>	<b>2 motores Swing</b>	<b>2 motores Propel</b>
Frame	8011YZ	509YZ	507UPZ	588YZ
Potencia	2600 HP	700 HP	505 HP	700 HP
Voltaje	1400 VAC	1400 VAC	1400 VAC	1400 VAC
Amperaje	906 A	260 A	194 A	267 A

#### **3.3.1.4. Palas 5 y 6 modelos 495HR.**

Las palas 5 y 6 cuentan con dos transformadores principales con doble secundario cada una, estos bobinados secundarios alimentan a la etapa de rectificación de un único variador de velocidad, a su vez la salida de este variador energiza a los motores principales. El variador de velocidad usa IGBT'S en su electrónica de potencia para las etapas de rectificación e inversión. Así mismo la tecnología AFE de esta Pala permite obtener factores de potencia cercanos a 1, lo que elimina el uso de bancos de compensación de potencia reactiva. También existe un transformador auxiliar para los sistemas de control y cargas auxiliares.



*Figura 25. Imagen Pala 5 modelo 495HR*



*Figura 26. Imagen Pala 6 modelo 495HR*

*a. Transformadores Principales.*

Las palas 5 y 6 cuentan con dos transformadores principales del tipo seco con ventilación forzada de 1200 kVA cada uno, los mismos tienen una relación de tensión de 7.2 kV a 900 con doble bobinado secundario. Cuenta con un grupo de conexión DYN1 aterrado sólidamente a tierra.

b. *Transformador Auxiliar.*

Palas 5 y 6 cuentan con un transformador auxiliar del tipo seco sin ventilación de 350 kVA, el cual tiene una relación de tensión de 7.2 kV a 480V. Cuenta con un grupo de conexión DYN1 aterrado sólidamente a tierra.

c. *Motores para los movimientos principales.*

Palas 5 y 6 cuentan con un motor de Hoist, un motor de Crowd, dos motores de Swing y dos motores de Propel, todos estos motores son de corriente alterna y llevan transductores de velocidad en sus ejes para el lazo de control. Estos motores están diseñados para trabajar con frecuencias variables, debido a ello los rodamientos son aislados con respecto a tierra.

<b>SIEMENS</b>									
Induction Motor									
			LOW VOLT CONNECTION					HIGHT VOLT CONNECTION	
SER. N°	1220371 - 030 - 2		TYPE	RG		DATE OF. MFG.	07 / 08		
H.P.	700		FRAME	509YZ		SERVICE FACTOR	1.0		
AMPS.	260 / 520		VOLTS	1400 / 700		CLASS INSUL	F		
R.P.M.	1481		HERTZ	50		NEMA EFF	NOM		
DUTY	CONT.		AMB.	40 °C		PHASE	3		KVA CODE
SH BRG	END	100RU02MO	END BRG	OPP.	100RU02MO	100BC02J3	G	NEMA DESIGN	
SPACE HEATERS : 240 V / 435 W			BUCYRUS P / N : 12479407						
BUCYRUS SHOVEL CROWD MOTOR - VFD			DUTY			A1103012123			
ROTATION	FACING	DRIVE	END	WITH	PHASE	SEQUENCE	A - B - C		
CCW A - T	3	B - T2	C - T	1	CW A - T	1	B - T2	C - T	3

Figura 27. Imagen datos de placa del motor Hosit Pala 6

Fuente: SPCC, 2019

El variador de velocidad de estos motores usa tecnología AFE en sus etapas de rectificación e inversión. Las características más importantes de dichos motores se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla 10**

*Especificaciones motores movimientos principales Palas 5 y 6*

<b>Especificaciones</b>	<b>1 motor Hoist</b>	<b>1 motor Crowd</b>	<b>2 motores Swing</b>	<b>2 motores Propel</b>
Frame	8011YZ	509YZ	507UPZ	588YZ
Potencia	2600 HP	700 HP	505 HP	700 HP
Voltaje	1400 VAC	1400 VAC	1400 VAC	1400 VAC
Amperaje	906 A	260 A	194 A	267 A

### **3.3.1.5. Pala 7 modelo 4100XPX-DC.**

La pala 7 cuenta con un transformador principal con doble secundario, estos bobinados secundarios alimentan a dos barras las cuales a su vez energizan los convertidores de los motores principales, así como los sistemas de compensación de potencia reactiva. Existe un transformador auxiliar para los sistemas de control y cargas auxiliares.



*Figura 28. Imagen Pala 7 modelo 4100XPX-DC*

a. *Transformador Principal.*

Pala 7 cuenta con un transformador principal del tipo seco con ventilación forzada de 3000 kVA, el cual tiene una relación de tensión de 7.2 kV a 600V con doble bobinado secundario. Cuenta con un grupo de conexión DYN1 aterrado sólidamente a tierra.

b. *Transformador Auxiliar.*

Pala 7 cuenta con un transformador auxiliar del tipo seco sin ventilación de 450 kVA, el cual tiene una relación de tensión de 7.2 kV a 480V. Cuenta con un grupo de conexión DYN1 aterrado sólidamente a tierra.

c. *Motores para los movimientos principales.*

Pala 7 cuenta con dos motores de Hoist, un motor de Crowd, tres motores de Swing y dos motores de Propel, todos estos motores son de corriente continua del tipo de excitación independiente tanto para el circuito de armadura como para el circuito de excitación. En la figura inferior se aprecia los datos de placa y los motores Propel de Pala 7.

<b>TAG MOTOR:</b>	<b>PROPEL</b>		<b>Equipo:</b>	<b>Pala 7</b>
			<b>Subsistema:</b>	<b>Avance</b>
<b>IDENTIFICACION</b>				
<b>Descripcion del servicio:</b>		Motor de Propulsion Izquierda Pala Nro 7		
<b>Ubicación Fisica:</b>		Armado Pala 7		
<b>Area:</b>	Mantenimiento Electrico Mina	Plano		
<b>Temp (°C):</b>	19 °C			
<b>DATOS DE PLACA</b>				
<b>Descripcion:</b>	DIRECT CURRENT SHOVEL MOTOR SHUNT WOUND			
<b>Frame:</b>	K700B			
<b>List No:</b>	R65824F1			
<b>Serial NO.:</b>	807173 6/13			
<b>Insulation System Class:</b>	H			
<b>Air Gape</b>	<b>Main Pole:</b>	.375	<b>Marca :</b>	P&H
	<b>Interpole:</b>	.313	<b>Tip. Carbon:</b>	R56287D43

Figura 29. Imagen placa de datos motor Propel Pala 7

Fuente: SPCC, 2019

Las armaduras están conectadas a los convertidores AC/DC los cuales usan SCR'S en la etapa de electrónica de potencia. Los convertidores de campo o excitación se energizan del bobinado secundario del transformador auxiliar. Las sumas de ambos convertidores junto con la etapa de control forman el variador de velocidad para cada uno de los motores de los movimientos principales de Pala 7. Las características más importantes de dichos motores se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla 11**

*Especificaciones motores movimientos principales Pala 7*

<b>Especificaciones</b>	<b>2 motores Hoist</b>	<b>1 motor Crowd</b>	<b>3 motores Swing</b>	<b>2 motores Propel</b>
Frame	K1690	K700B	K558A	K700B
Potencia	1265 HP	310 HP	240 HP	310 HP

*d. Bancos de compensación de potencia reactiva.*

La potencia reactiva es generada por los motores de los movimientos principales al generar el campo electromagnético. Los bancos de compensación de potencia reactiva de Pala 7 aprovechan la tendencia natural de los capacitores para arrastrar la corriente adelantada al conectarse a una fuente AC.

**Tabla 12**

*Especificaciones bancos de compensación de Pala 7*

<b>Especificaciones</b>	<b>Banco ½</b>	<b>Banco 1</b>	<b>Banco 2</b>	<b>Banco 3</b>
RPC	675 kVAR	1350 kVAR	1350 kVAR	1350 kVAR
Frecuencia	60 Hz	60 Hz	60 Hz	60 Hz

### 3.3.2. Perforadoras.

Para este estudio se consideró seis Perforadoras, tres en la marca P&H y tres en la marca Bucyrus cuyos modelos se muestran en la tabla inferior.

**Tabla 13**

*Modelos Perforadoras P&H mina Cuajone*

Especificaciones	Perforadora	Perforadora	Perforadora
	11	16	17
Modelo	120A	320XPC	320XPC
Marca	P&H	P&H	P&H

**Tabla 14**

*Modelos Perforadoras Bucyrus mina Cuajone*

Especificaciones	Perforadora	Perforadora	Perforadora
	13	14	18
Modelo	49RIII	49HR	MD6640
Marca	Bucyrus	Bucyrus	Bucyrus

#### 3.3.2.1. Perforadoras 11, 16 y 17 modelo 120A y 320XPC.

Las perforadoras 11, 16 y 17 cuentan con un transformador principal con doble bobinado secundario. El primer bobinado secundario alimenta a los variadores de velocidad de los motores de Hoist/Pulldown y Rotary, el segundo bobinado secundario alimenta a los sistemas de control y cargas auxiliares. Adicionalmente existe un motor principal conectado directamente a la barra de 7.2kV, a dicho motor de acoplan el compresor de aire y el sistema de bombas hidráulicas.



*Figura 30.* Imagen Perforadora 11 modelo 120<sup>a</sup>



*Figura 31.* Imagen Perforadora 16 modelo 320XPC





Figura 32. Imagen Perforadora 17 modelo 320XPC

*a. Transformador Principal.*

Perforadoras 11, 16 y 17 cuenta con un transformador principal del tipo seco sin ventilación forzada de 650 kVA con doble bobinado secundario, el cual tiene una relación de tensión de 7.2 kV a 520/480VAC. Cuenta con un grupo de conexión DYN1 aterrado sólidamente a tierra. El bobinado secundario de 520VAC energiza a los convertidores de armadura y campo de los motores de Hoist/Pulldown y Rotary. El bobinado secundario de 480VAC alimenta a los sistemas de control y auxiliares de la máquina.

*b. Motor Principal.*

Perforadoras 11, 16 y 17 cuentan con un motor principal de corriente alterna del tipo jaula de ardilla de 1000HP implementado con un arranque directo en 7.2kV.

Dicho motor se encuentra acoplado el compresor, el cual suministra aire al proceso de perforación, así como a un conjunto de bombas que suministran energía hidráulica principal y auxiliar para los diversos sistemas hidráulicos propios de la máquina. Estos detalles se pueden observar en la siguiente figura.



Figura 33. Imagen del motor principal y componentes Perforadora 17 modelo 320XPC

Las características más importantes de dichos motores se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla 15**

*Especificaciones del motor principal Perforadoras 11, 16 y 17*

<b>Especificaciones</b>	<b>Frame</b>	<b>Potencia</b>	<b>Voltaje</b>	<b>Amperaje</b>
Motor principal	H5811	1000 HP	6900 VAC	69.5 A

*c. Motor Hoist/Pulldown.*

Perforadoras 11, 16 y 17 cuentan con un motor Hoist/Pulldown de corriente continua de excitación independiente montado sobre el carro de perforación como se aprecia en la figura inferior.



*Figura 34. Imagen del motor Hoist Perforadora 16 modelo 320XPC*

Dicho motor es energizado por un variador de velocidad con convertidores para los circuitos de armadura y excitación. Este motor cuando levanta el carro de perforación se lo denomina como motor de Hoist, por otro lado, el mismo motor cuando mueve el carro de perforación hacia abajo se lo denomina como motor de Pulldown. Ambos movimientos son usados para el proceso de perforación. Las características principales del motor de Hoist/Pulldown así como sus datos de placa se muestran en la siguiente tabla y figura correspondiente.

**Tabla 16**

*Especificaciones motor Hoist/Pulldown Perforadoras 11, 16 y 17*

<b>Especificaciones</b>	<b>1 motor Hoist / Pulldown</b>
Frame	K504T
Potencia	135 HP

DIRECT CURRENT MOTOR					
SER. NO.	807189	8/13	MANUF. NO.	R66967F1	
TYPE	K504T		ENC.	ODPVS	WINDING SHUNT
HP	135		CONTINUOUS		
RPM	1150		VOLTS	475	AMPS 225
FIELD VOLTS	72/144		FIELD AMPS	17.6/8.8	
					110 °C TEMP RISE (THERMOMETER)
					ARMATURE H
					INSUL. CLASS.
					FIELD H
					INSUL. CLASS

TERMINAL CONNECTIONS FOR SHUNT WOUND  
MOTORS WITH DUAL VOLTAGE FIELDS

Figura 35. Datos de placa del motor Hoist / Pulldownt Perforadora 16 modelo 320XPC

Fuente: SPCC, 2019

*d. Motores Rotación.*

Perforadoras 11, 16 y 17 cuentan con dos motores Rotary de corriente continua de excitación independiente. Dicho motor es energizado por un variador de velocidad con convertidores para los circuitos de armadura y excitación. Las características principales de los motores de Rotary se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla 17**

*Especificaciones de los motores Rotary Perforadoras 11, 16 y 17*

Especificaciones	2 motores Rotary
Frame	K504T
Potencia	135 HP

**3.3.2.2. Perforadoras 13, 14 y 18 modelos 49RIII, 49HR y MD6640.**

Las perforadoras 13, 14 y 18 cuentan con un transformador principal el cual alimenta a los variadores de velocidad de los motores de Hoist/Pulldown y Rotary, también cuenta con un transformador auxiliar el cual alimenta a los sistemas de control y cargas auxiliares. Adicionalmente existe un motor principal conectado

directamente a la barra de 7.2kV, a dicho motor de acoplan el compresor de aire y el sistema de bombas hidráulicas.



*Figura 36.* Imagen Perforadoras 13 y 18 modelos 49RIII y MD6640



*Figura 37.* Imagen Perforadoras 14 modelo 49HR

*a. Transformador Principal.*

Las perforadoras 13, 14 y 18 cuenta con un transformador principal del tipo seco sin ventilación forzada de 450 kVA, el cual tiene una relación de tensión de 7.2 kV

a 480VAC. Cuenta con un grupo de conexión DYN1 aterrado sólidamente a tierra. Este bobinado secundario energiza a los convertidores de armadura y campo de los motores de Hoist/Pulldown y Rotary.

*b. Transformador Auxiliar.*

Perforadoras 13, 14 y 18 cuentan con un transformador auxiliar del tipo seco sin ventilación de 250 kVA, el cual tiene una relación de tensión de 7.2 kV a 480V. Cuenta con un grupo de conexión DYN1 aterrado sólidamente a tierra.

*c. Motor Principal.*

Perforadoras 13, 14 y 18 cuentan con un motor principal de corriente alterna del tipo jaula de ardilla de 600HP implementado con un arranque directo en 7.2kV. A dicho motor se encuentra acoplado el compresor, el cual suministra aire al proceso de perforación, así como a un conjunto de bombas que suministran energía hidráulica principal y auxiliar para los diversos sistemas hidráulicos propios de la máquina. Las características más importantes de dichos motores se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla 18**

*Especificaciones del motor principal Perforadoras 13, 14 y 18*

<b>Especificaciones</b>	<b>Frame</b>	<b>Potencia</b>	<b>Voltaje</b>	<b>Amperaje</b>
Motor principal	588Z	600 HP	6900 VAC	44.6 A

*d. Motor Hoist/Pulldown.*

Perforadoras 13, 14 y 18 cuentan con un motor Hoist/Pulldown de corriente continua de excitación independiente montado sobre el carro de perforación como se observa en la siguiente figura.

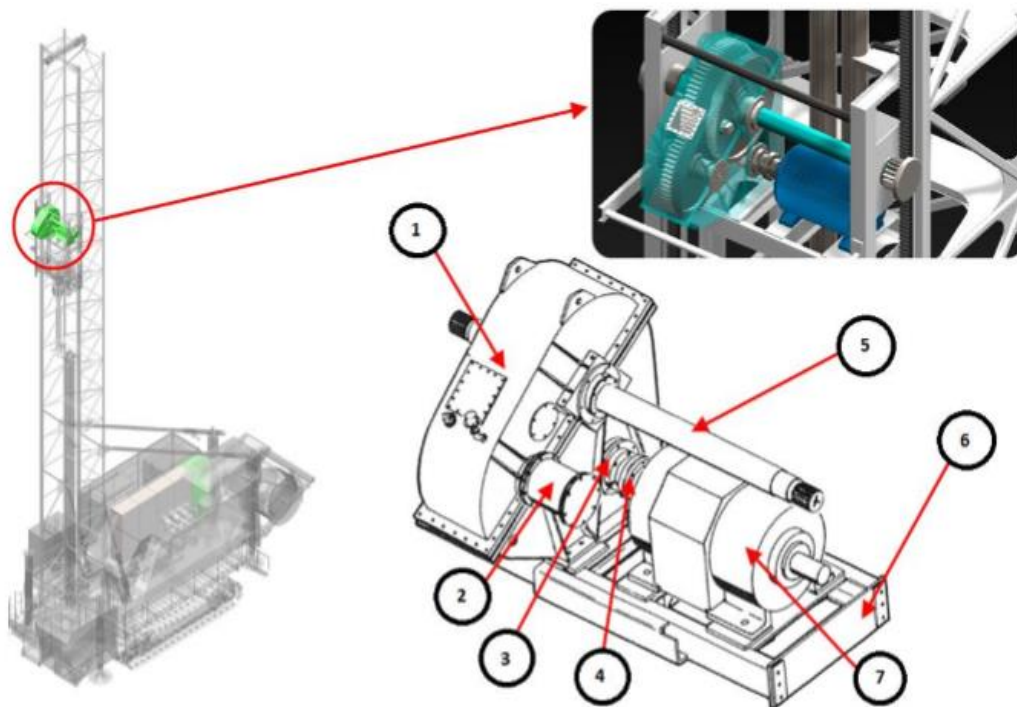


Figura 38. Imagen del motor Hoist / Pulldown de la Perforadoras 18 modelo MD6640

Fuente: SPCC, 2019

Dicho motor es energizado por un variador de velocidad con convertidores para los circuitos de armadura y excitación. Este motor cuando levanta el carro de perforación se lo denomina como motor de Hoist, por otro lado, el mismo motor cuando mueve el carro de perforación hacia abajo se lo denomina como motor de Pulldown. Ambos movimientos son usados para el proceso de perforación. Las características principales del motor de Hoist/Pulldown se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla 19**

*Especificaciones del motor principal Perforadoras 13, 14 y 18*

Especificaciones	Frame	Potencia	Voltaje	Amperaje
Motor Hoist/Pulldown	MDP808AAR	130 HP	475 VDC	225 ADC

e. *Motor de Rotación.*

Perforadoras 13, 14 y 18 cuentan con un motor Rotary de corriente continua de excitación independiente montado sobre el carro de rotación como se detalla en la siguiente figura.

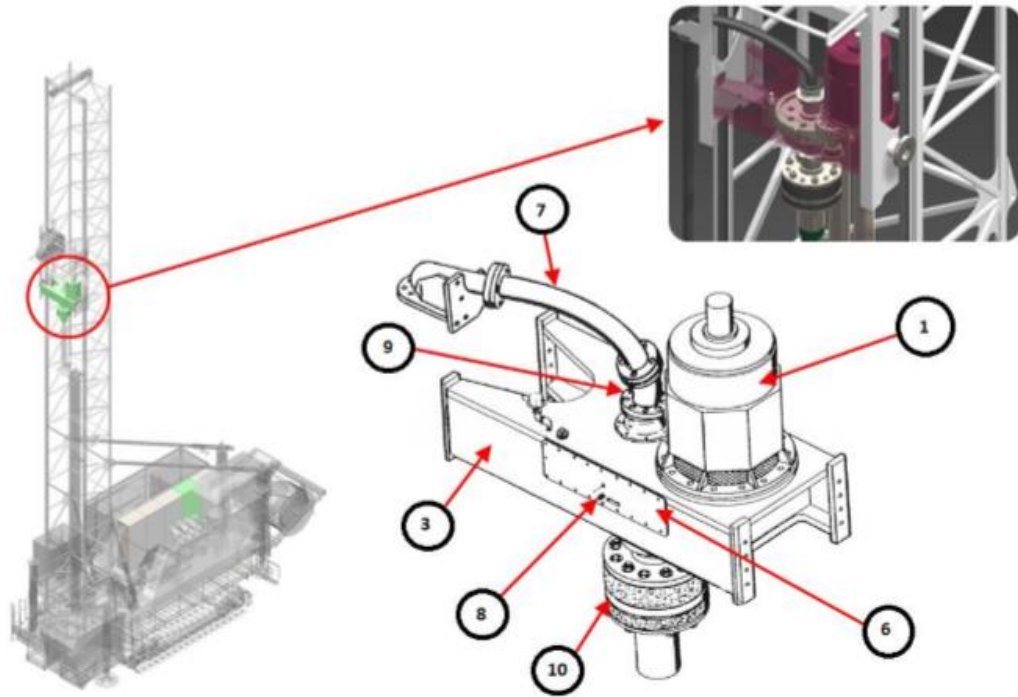


Figura 39. Imagen del motor Rotary de la Perforadoras 18 modelo MD6640

Fuente: SPCC, 2019

Dicho motor es energizado por un variador de velocidad con convertidores para los circuitos de armadura y excitación. Las características principales de los motores de Rotary se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla 20**

*Especificaciones del motor principal Perforadoras 13, 14 y 18*

<b>Especificaciones</b>	<b>Frame</b>	<b>Potencia</b>	<b>Voltaje</b>	<b>Amperaje</b>
Motor Hoist/Pulldown	MDV810AAr	195 HP	475 VDC	330 ADC



### 3.3.3. Switch house.

Mina Cuajone cuenta con 30 Switch House de los cuales 12 se consideraron para la elaboración del presente estudio en la marca canadiense Line Power. Estos Switch House están conformados por una caseta metálica cerrada protegida adecuadamente para las condiciones ambientales y climatológicas de la Mina. En su interior se encuentran varios circuitos en media y baja tensión. Estos circuitos se interrelacionan entre sí para suministrar energía eléctrica a los equipos de Mina mediante dos salidas o Feeders en 7.2kV



*Figura 40.* Imagen del switch house Nro. 35 de marca LinePower

La energía eléctrica proveniente de las Subestaciones de Mina ingresa al Switch House a través de un conector de media tensión, existen dispositivos de accionamientos bajo carga denominados VCB (Vacuum Circuit Breaker) los cuales se suministran energía a las cargas conectadas a los dos Feeders con los que cuenta el Switch House. Adicionalmente cuentan con pararrayos de protección ante descargas atmosféricas, así como un transformador de control para alimentar los circuitos de control propiamente dichos además de cargas auxiliares como iluminación, etc. Estos detalles se pueden observar en la siguiente figura.

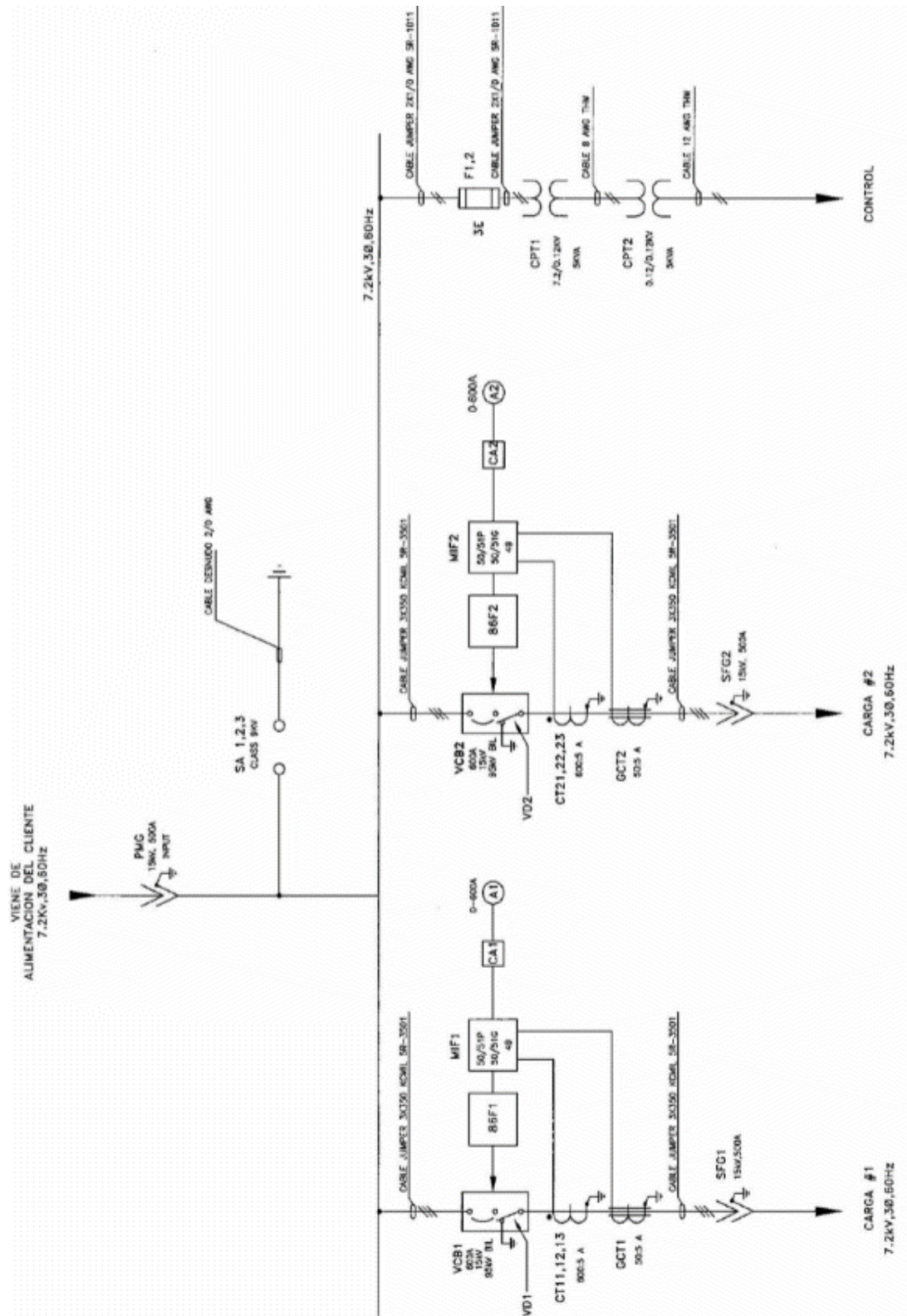


Figura 41. Imagen del diagrama unifilar de un switch house de marca LinePower

Fuente: SPCC, 2019

### **3.3.3.1. Interruptor de vacío bajo carga VCB.**

Los Switch House cuentan con dos interruptores bajo carga de vacío en la marca Line Power, tienen una capacidad de corriente de 1200A, una tensión máxima de trabajo de 15.5kV y una capacidad de ruptura de 18,000A

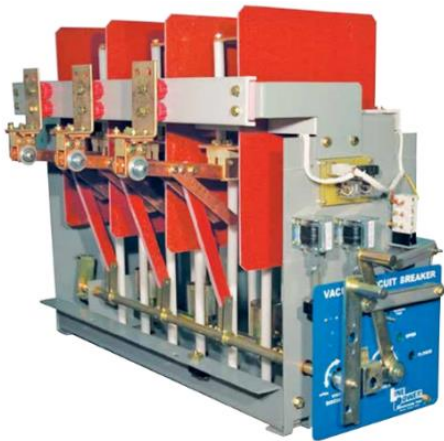


Figura 42. Imagen del interruptor bajo carga VCB de marca LinePower

Fuente: Line Power, 2021

### **3.3.3.2. Relé de protección.**

Los Switch House cuentan con dos relés de protección del modelo MIF II en la marca Multilin de GENERAL ELECTRIC, los cuales llevan los “Settings” o ajustes de protección, muy importantes para el presente estudio. Para nuestro caso estos relés tienen activadas las protecciones 50 y 51 tanto para fases como para tierra.

Existen varios transformadores de corriente del tipo toroidal los cuales miden los valores de corriente de las fases y tierra de las cargas. Estos valores son enviados y monitoreados constantemente por los relés de protección. Ante la presencia de una falla entre fases o a tierra los relés actúan de acuerdo a sus ajustes pre establecidos y abren los interruptores bajo carga VCB para despejar la falla. En la siguiente figura podemos observar un relé de protección MIF II



Figura 43. Imagen de un relé de protección de marca Multilin

Fuente: General Electric, 2021

### **3.3.3.3. Transformadores de corriente.**

Existen tres transformadores de corriente del tipo toroidal para cada alimentador, estos tienen una relación de 600:5. Las bobinas secundarias de estos transformadores están conectadas al relé de protección.

Existe un transformador de corriente homopolar del tipo toroidal para cada alimentador, este tiene una relación de 50:5. Las bobinas secundarias de estos transformadores están conectadas al relé de protección.

### **3.3.4. Subestaciones.**

La Mina Cuajone cuenta con 12 subestaciones de las cuales 9 se consideraron para la elaboración del presente estudio, en las marcas Line Power y ABB. Estas subestaciones están conformadas por una plataforma móvil sobre la cual se instaló el transformador de potencia, el pórtico de llegada en alta tensión y las celdas de media tensión que contienen a dos Feeders o alimentadores. Las Subestaciones de Mina tienen una relación de tensión de 69kV a 7.2kV y están diseñadas para las

condiciones ambientales y climatológicas de la Mina. En su interior se encuentran varios circuitos en media y baja tensión.

Estos circuitos se interrelacionan entre sí para suministrar energía eléctrica a los equipos de Mina.



Figura 44. Imagen de la subestación Nro. 14 de mina Cuajone

Las principales características de estas subestaciones se pueden apreciar en la siguiente tabla.

**Tabla 21**

*Características principales subestaciones mina Cuajone*

Subestaciones	Potencia MVA	Tipo de conexión	Tension primario kV	Corriente primario A	Tension secundario kV	Corriente secundario A
S.E. Nro. 6	7.5	Dyn1	69	62.8	7.2	601
S.E. Nro. 8	10	Dyn5	69	83.7	7.2	801.9
S.E. Nro. 9	10	Dyn1	69	83.7	7.2	801.9
S.E. Nro. 10	10	Dyn1	69	83.7	7.2	801.9
S.E. Nro. 11	10	Dyn1	69	83.7	7.2	801.9
S.E. Nro. 12	10	Dyn1	69	83.7	7.2	801.9
S.E. Nro. 13	10	Dyn1	69	83.7	7.2	801.9
S.E. Nro. 14	12	Dyn1	69	100.4	7.2	962.2
S.E. Nro. 15	12	Dyn1	69	100.4	7.2	962.2

#### ***3.3.4.1. Transformador de potencia.***

Las Subestaciones de Mina cuentan con transformadores de potencia trifásicos en 60Hz sumergidos en aceite, poseen tanques conservadores y su refrigeración es del tipo ONAN. Su relación de tensión es de 69/7.2kV y cuentan con conmutadores de derivación sin tensión los cuales permiten cambiar la relación de tensión sin la necesidad de abrir el transformador. Los tanques conservadores se encuentran normalmente presurizados.

Estos transformadores cuentan con sistemas de protección y detección de nivel de aceite, válvulas de alivio de presión, relés de protección de gases, indicadores de temperatura de aceite y arrollamientos entre otros. Todos estos sistemas están interrelacionados con el circuito de control y protección del transformador para protegerlo tanto en el lado de alta como de media tensión.

En la figura siguiente podemos apreciar la placa de datos de uno de estos transformadores de potencia.

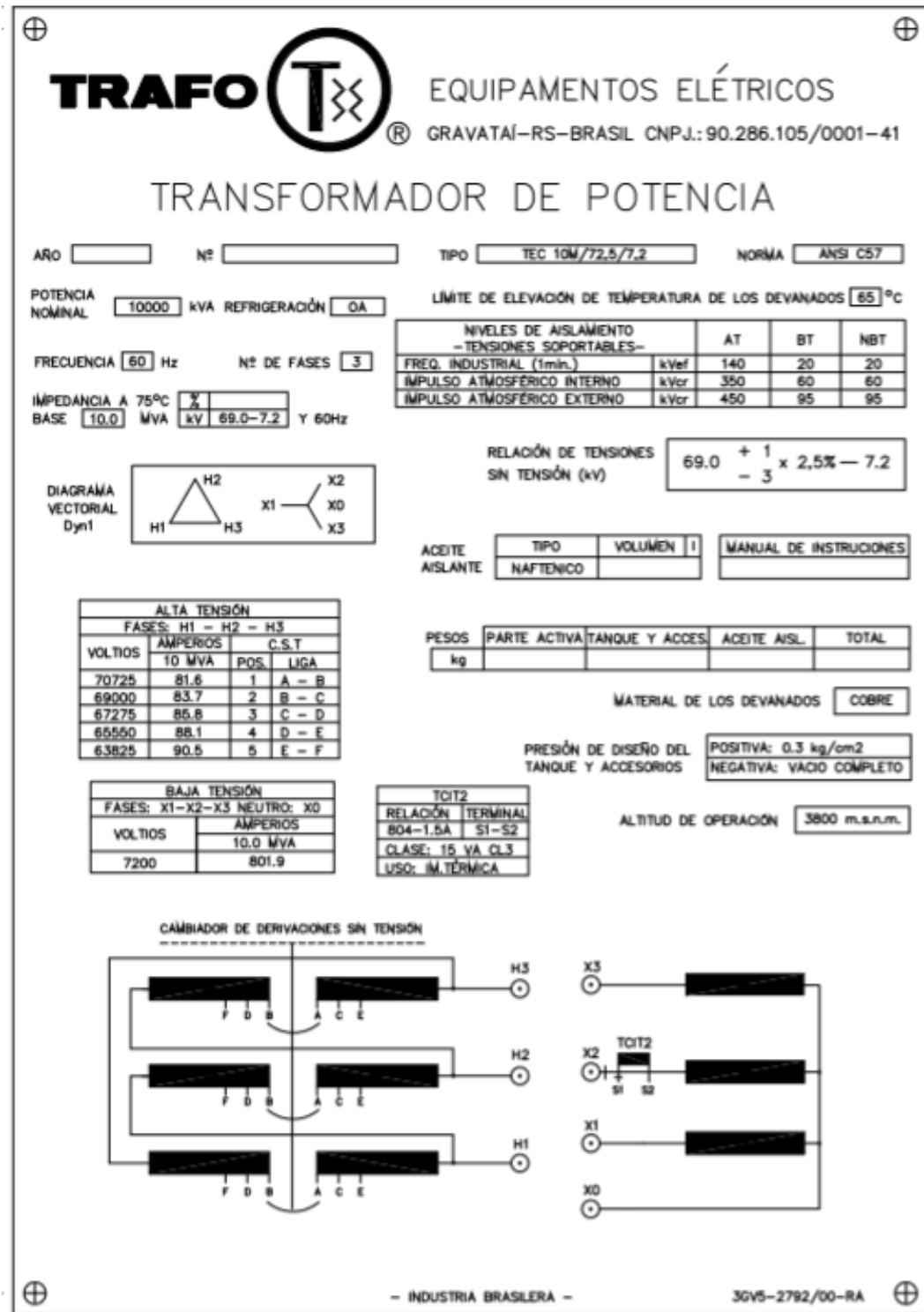


Figura 45. Imagen de la placa de datos de un transformador de potencia de marca TRAFO

Fuente: SPCC, 2019

*a. Fusible de alta tensión.*

Los fusibles de alta tensión tienen la función de proteger el lado primario del transformador ante una falla intempestiva. Estos fusibles también deben formar parte de la coordinación de protección propuesta en el presente estudio.

En la siguiente tabla podemos observar las principales características de estos fusibles.

**Tabla 22**

*Características principales fusibles subestaciones mina Cuajone*

<b>Subestación</b>	<b>Tension de barra kV</b>	<b>Nro. De fases</b>	<b>Tension fusible kV</b>	<b>Corriente fusible A</b>
S.E. Nro. 6	69	3	69	100E
S.E. Nro. 8	123	3	115	100E
S.E. Nro. 9	115	3	115	100E
S.E. Nro. 10	115	3	115	100E
S.E. Nro. 11	115	3	115	100E
S.E. Nro. 12	115	3	115	100E
S.E. Nro. 13	115	3	115	100E
S.E. Nro. 14	115	3	115	125E
S.E. Nro. 15	115	3	115	125E

*b. Interruptor de vacío bajo carga VCB.*

Las Subestaciones Mina cuentan con dos interruptores bajo carga de vacío en la marca Line Power, tienen una capacidad de corriente de 1200A, una tensión máxima de trabajo de 15.5kV y una capacidad de ruptura de 18,000A

*c. Relés de Protección.*

Las Subestaciones de Mina cuentan con dos relés de protección del modelo 750 en la marca Multilin de GENERAL ELECTRIC, los cuales llevan los “Settings” o ajustes de protección, muy importantes para el presente estudio. Para nuestro caso



estos relés tienen activadas las protecciones 50 y 51 tanto para fases como para tierra.

Existen varios transformadores de corriente del tipo toroidal los cuales miden los valores de corriente de las fases y tierra de las cargas. Estos valores son enviados y monitoreados constantemente por los relés de protección. Ante la presencia de una falla entre fases o a tierra los relés actúan de acuerdo a sus ajustes pre establecidos y abren los interruptores bajo carga VCB para despejar la falla. En la siguiente figura podemos observar un relé de protección 750



Figura 46. Imagen de un relé de protección Multilin 750 de las subestaciones mina Cuajone

Fuente: General Electric, 2021

#### *d. Transformadores de corriente.*

Existen tres transformadores de corriente del tipo toroidal para cada alimentador, estos tienen una relación de 600:5. Las bobinas secundarias de estos transformadores están conectadas al relé de protección.

### 3.3.5. Fórmulas de performance.

Observando la data que tenemos de los equipos de Palas y Perforadoras de la mina Cuajone podemos notar que tenemos 4 estados o condiciones que se repiten para todos los equipos antes mencionados, estos son: “demora”, “malogrado”, “operativo” y “standby”. Analizando esta información podemos concluir que el estado “malogrado” contiene todos los tiempos asignados a mantenimiento que pueden ser tanto programados como no programados.

Por otro lado, también observamos en la data que todos los tiempos registrados por los equipos de Palas y Perforadoras de la mina Cuajone poseen una unidad de tiempo de “minutos”

Analizando esta información concluimos que requerimos hallar el tiempo disponible, el tiempo no disponible y el tiempo total de los equipos de Palas y Perforadoras, los cuales serán calculados de la siguiente manera:

$$T. Disponible = Tiempo demora + Tiempo operativo + Tiempo standby$$

$$T. No Disponible = Tiempo malogrado$$

$$T. Total = T. Disponible + T. No Disponible$$

Donde:

- *T. Disponible* es el tiempo disponible de los equipos expresado en minutos
- *T. No Disponible* es el tiempo no disponible de los equipos expresado en minutos
- *T. Total* es la suma de los dos tiempos anteriores expresado en minutos

Existen una infinidad de indicadores y KPI's orientados a las áreas de mantenimiento que definen y proponen de una gran diversidad de autores. Estos

interpretan diferentes bases de datos para obtener resultados de acuerdo a las realidades de cada escenario.

Para el presente trabajo usaremos las siguientes fórmulas de elaboración propia:

$$D.F. = \frac{T. Disponible}{T. Total}$$

$$D.M. = \frac{T. Efectivo}{T. Efectivo + T. No Disponible}$$

$$U.D.F. = \frac{T. Efectivo}{T. Disponible}$$

$$U.T. = \frac{T. Efectivo}{T. Total}$$

Donde:

- *D.F.* es la disponibilidad física de los equipos en porcentaje
- *D.M.* es la disponibilidad mecánica de los equipos en porcentaje
- *U.D.F.* es el uso de la disponibilidad física de los equipos en porcentaje
- *U.T.* es uso total de los equipos en porcentaje
- *T. Efectivo* es el tiempo operativo de los equipos expresado en minutos

### **3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

Para la presente tesis se usarán las siguientes técnicas de recolección de datos:

La observación, técnica que se caracteriza por la indagación sistemática dirigida a estudiar los aspectos más significativos de los objetos, hechos, situaciones sociales o personas en el contexto donde se desarrollan normalmente, permitiendo la comprensión de la verdadera realidad del fenómeno. Para el presente trabajo, la observación se fundamenta en buscar e interpretar apropiadamente la raíz del problema de los equipos de Palas y Perforadoras de la mina Cuajone. Esta técnica

utiliza el método de observación participativa que monitorea y analiza constantemente el performance de los equipos. Para ello es necesario modelar todos los circuitos equivalentes para su posterior análisis.

La recopilación y análisis documental, técnica que se caracteriza por la recolección de información con la finalidad de detectar, obtener y consultar bibliografía y otros materiales que parten de otros conocimientos y/o informaciones recogidas moderadamente de cualquier realidad, de modo que puedan ser útiles para los propósitos del estudio. Para el presente trabajo, la recopilación y análisis documental se fundamenta en encontrar un grupo de ajuste final de protección eléctrica. Esta técnica utiliza la modalidad de recolección de información parte de las fuentes secundarias de datos, es decir aquella obtenida indirectamente a través de la simulación de los circuitos equivalentes hallados.

### **3.5. Técnicas de procesamiento y análisis de datos**

Para la presente tesis se usarán procedimientos automatizados propios de los recursos informáticos que tenemos en la actualidad, esto nos permitirá un tratamiento ordenado y sistemático de la información recogida.

En ese sentido, usaremos el software ETAP para digitalizar los circuitos equivalentes de los equipos de Palas y Perforadoras de la mina Cuajone además de los dispositivos que suministrarán la energía eléctrica con son los switch house y subestaciones. De la misma manera usaremos las herramientas del Excel, lo que nos permitirá ordenar los datos obtenidos con el objeto de calcular la disponibilidad u otro de resultados que corresponden a las variables mencionadas.

## **CAPÍTULO IV**

### **ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS**

#### **4.1. Presentación de resultados**

##### **4.1.1. Digitalización de la población y muestra.**

Para el presente estudio se digitalizo en el software ETAP toda la red de distribución de energía eléctrica de la Mina Cuajone. Para ello se levantó información de cada uno de sus componentes como Subestaciones, dispositivos de interconexión, líneas de transmisión en alta y media tensión, distancias entre estos componentes, equipos y cargas importantes, etc.

El diagrama resultante es bastante extenso y se adjunta en los Anexos. Para reducir y simplificar el diagrama equivalente en el ETAP se digitalizo separadamente las seis Palas y seis Perforadoras además de cableado tanto aéreo y de arrastre entre estos equipos, Switch House y Subestaciones. Este nuevo diagrama equivalente simplificado se adjunta en los Anexos.

Estos diagramas equivalentes resultantes tienen varios símbolos en común para todos los equipos de la mina cuyo significado detallaremos a continuación.

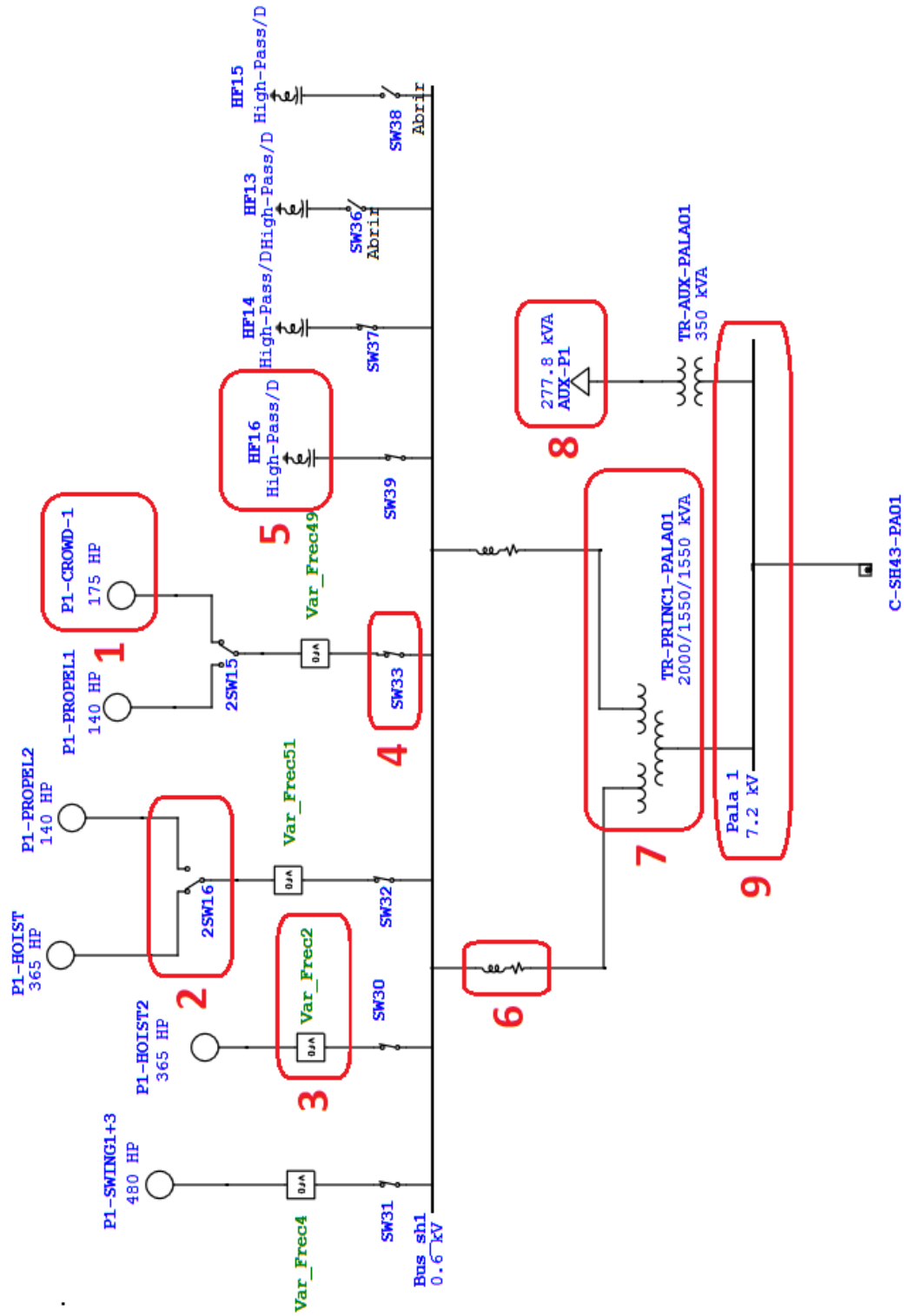


Figura 47. Imagen referencial digitalización Palas y Perforadoras

Leyenda:

1. Símbolo motor Crowd 1 con una potencia de 175HP instalado en Pala 1
2. Símbolo de un swich de dos posiciones codificado como numero 16
3. Símbolo de un variador de velocidad, en este caso controla al motor Hoist 2 instalado en Pala 1. Esta codificado como Var\_Frec2
4. Símbolo de un switch de una posición codificado como SW33
5. Símbolo de un banco RPC codificado como HF16
6. Símbolo de los cables de alimentación conectados entre el secundario del transformador principal y la barra de 600VAC
7. Símbolo del transformador principal de 2000 kVA con doble bobinado secundario instalado en Pala 1, codificado como TR-PRINC1-PALA1
8. Símbolo de una carga estática de 277.8kVA instalada en el secundario del transformador auxiliar de Pala 1, codificado como AUX-P1
9. Símbolo de una barra de energía en 7.2 kV ubicada dentro de la Pala y codificada como Pala 1

Definidos los símbolos de uso común, a continuación, detallaremos los diagramas equivalentes en ETAP de cada uno los componentes más importantes del presente estudio los cuales son las Palas, Perforadoras, Switch House y Subestaciones.

#### ***4.1.1.1. Circuito Equivalente Pala 1.***

Para el circuito equivalente de Pala 1 se consideró un escenario donde el consumo de energía sea mayor, esto sucede cuando esta Pala esta funcionando en modo DIG, además que se encuentren trabajando los siguientes componentes:

- Dos motores de Swing con una potencia total instalada de 480HP y un consumo de 0.765 MVA
- Dos motores de Hoist con una potencia instalada de 365HP cada uno, un consumo de 0.653MVA y 0.62MVA para los motores de Hoist 2 y Hoist 1 respectivamente.
- Un motor de Crowd con una potencia instalada de 175HP y un consumo de 0.203 MVA
- Dos bancos RPC con un consumo de 0.642MVA y 1.28MVA respectivamente.

Finalmente, en la barra Pala 1 de 7.2kV está conectado un transformador principal con una potencia instalada de 2000kVA y un transformador auxiliar con una potencia instalada de 350kVA Ambos tienen un consumo de 1.05MVA y 0.258MVA respectivamente.



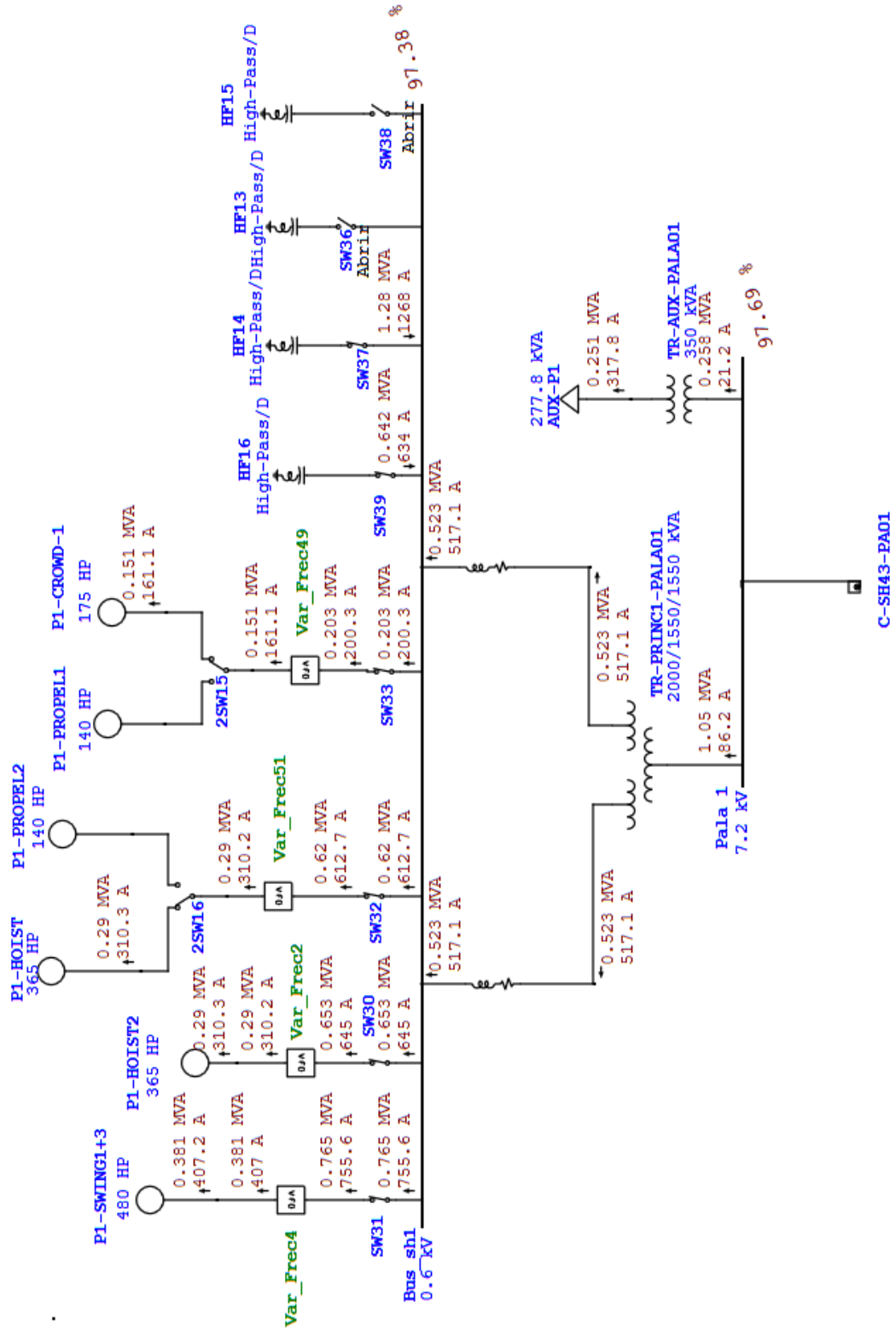


Figura 48. Imagen digitalizada del circuito equivalente de Pala 1

#### ***4.1.1.2. Circuito Equivalente Pala 3.***

Para el circuito equivalente de Pala 3 se consideró un escenario donde el consumo de energía sea mayor, esto sucede cuando esta Pala esta funcionando en modo DIG, además que se encuentren trabajando los siguientes componentes:

- Dos motores de Hoist con una potencia instalada de 1265HP cada uno, un consumo de 1.06VA y 0.955MVA para los motores de Hoist 2 y Hoist 1 respectivamente.
- Un motor de Crowd con una potencia instalada de 310HP y un consumo de 0.236MVA
- Un banco RPC con un consumo de 1.19MVA

Finalmente, en la barra ACB Pala #3 de 7.2kV está conectado un transformador auxiliar con una potencia instalada de 350kVA y un transformador principal con una potencia instalada de 2500kVA Ambos tienen un consumo de 0.212MVA y 2.25MVA respectivamente.

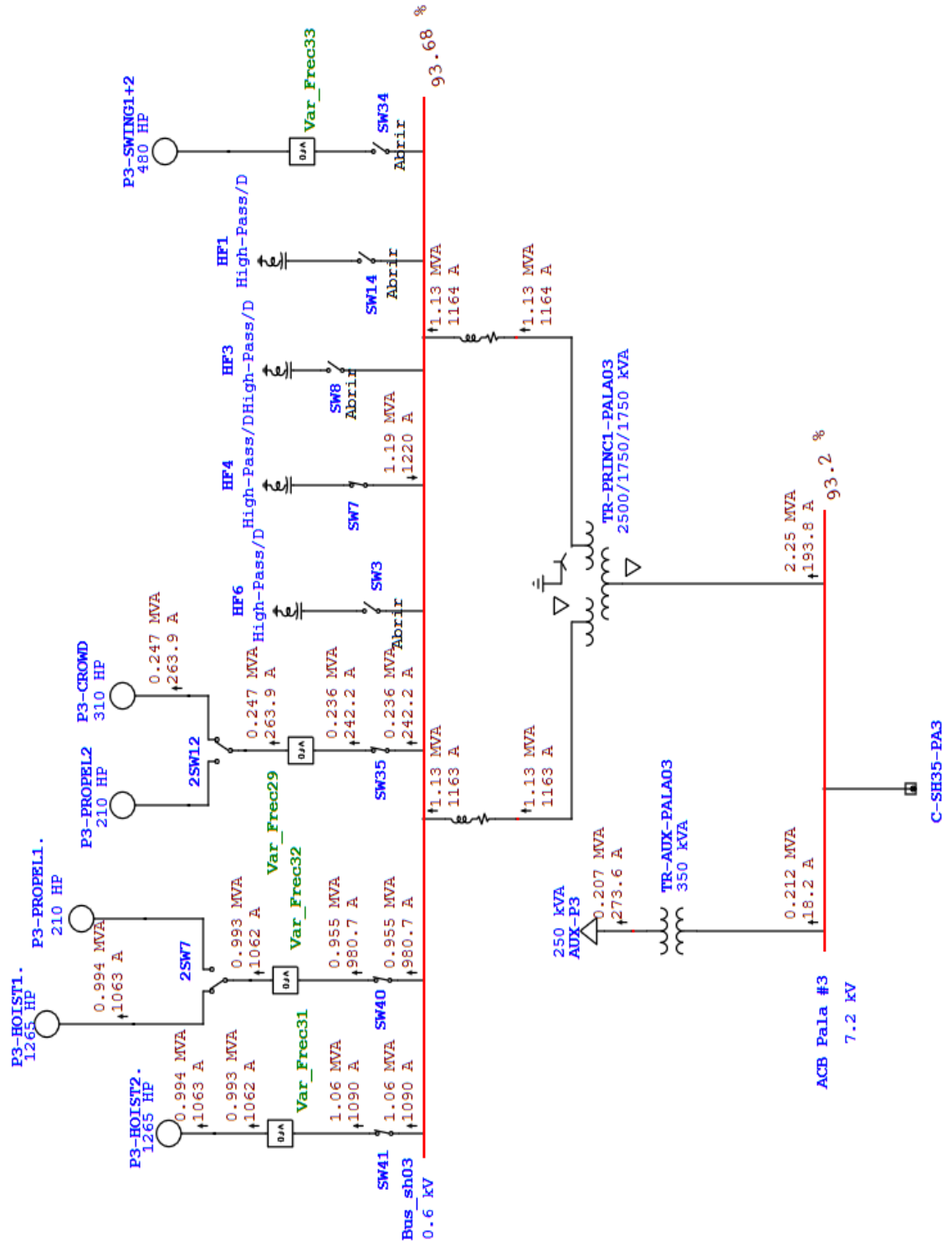


Figura 49. Imagen digitalizada del circuito equivalente de Pala 3

#### ***4.1.1.3. Circuito Equivalente Pala 4.***

Para el circuito equivalente de Pala 4 se consideró un escenario donde el consumo de energía sea mayor, esto sucede cuando esta Pala esta funcionando en modo PROPEL, además que se encuentren trabajando los siguientes componentes:

- Dos motores de Propel con una potencia total instalada de 700HP cada uno, un consumo de 0.568 MVA y 0.603MVA para los motores de Propel 1 y Propel 2 respectivamente.
- Dos motores de Swing con una potencia total instalada de 1010HP y un consumo total de 0.793MVA para los motores de Swing 1 y Swing 2

Finalmente, en la barra ACB Pala4 de 7.2kV están conectados dos transformadores principales con una potencia instalada de 1000kVA y un consumo de 1.02MVA por cada uno. Así como también está conectado un transformador auxiliar con una potencia instalada de 350kVA y un consumo de 0.176MVA

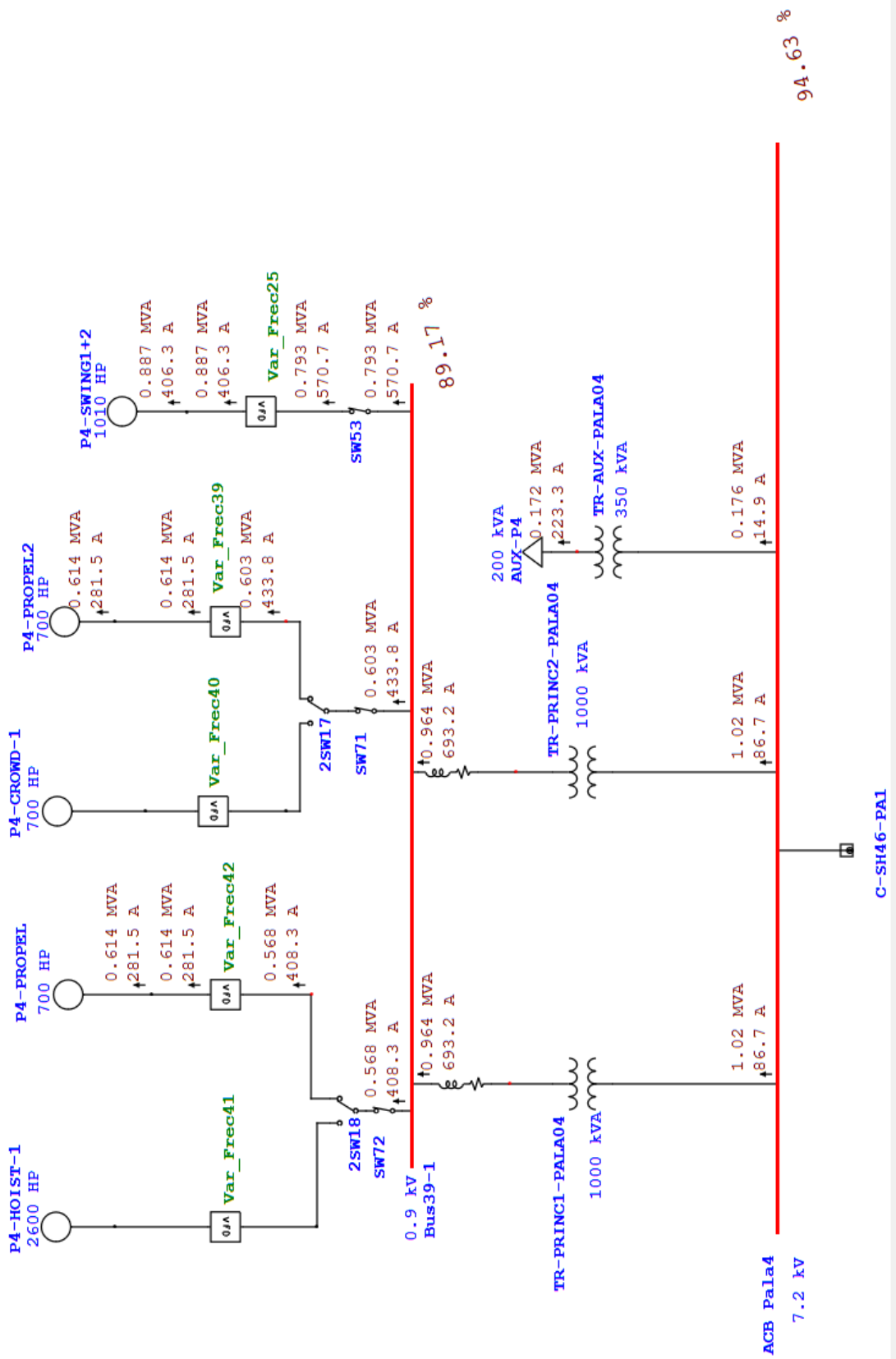


Figura 50. Imagen digitalizada del circuito equivalente de Pala 4

#### ***4.1.1.4. Circuito Equivalente Pala 5.***

Para el circuito equivalente de Pala 5 se consideró un escenario donde el consumo de energía sea mayor, esto sucede cuando esta Pala esta funcionando en modo PROPEL, además que se encuentren trabajando los siguientes componentes:

- Dos motores de Propel con una potencia total instalada de 700HP cada uno, un consumo de 0.568 MVA y 0.603MVA para los motores de Propel 1 y Propel 2 respectivamente.
- Dos motores de Swing con una potencia total instalada de 1010HP y un consumo total de 0.794MVA para los motores de Swing 1 y Swing 2

Finalmente, en la barra ACB Pala 5 de 7.2kV están conectados dos transformadores principales con una potencia instalada de 1200kVA y un consumo de 1.02MVA por cada uno. Así como también está conectado un transformador auxiliar con una potencia instalada de 350kVA y un consumo de 0.175MVA

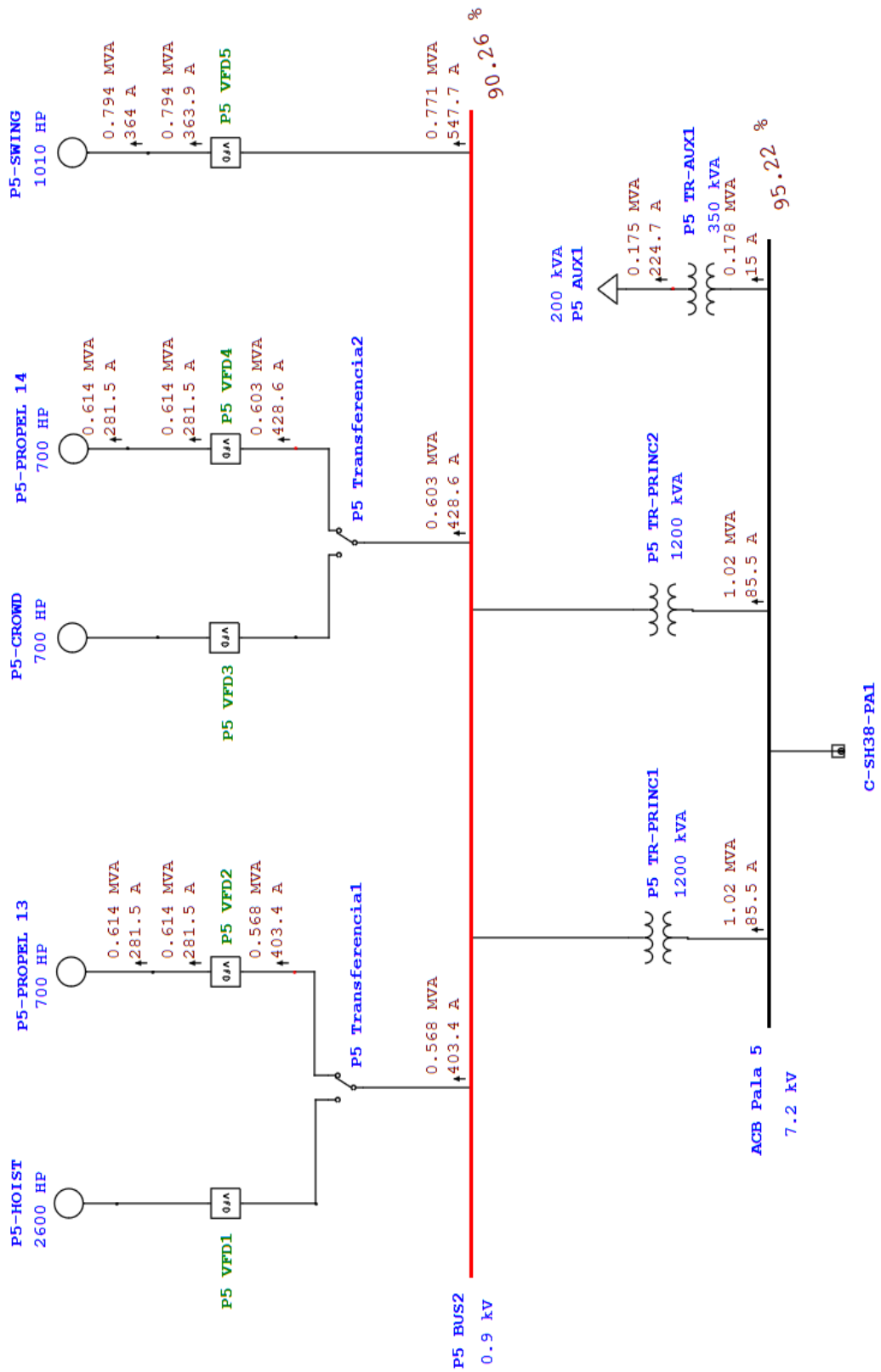


Figura 51. Imagen digitalizada del circuito equivalente de Pala 5

#### ***4.1.1.5. Circuito Equivalente Pala 6.***

Para el circuito equivalente de Pala 6 se consideró un escenario donde el consumo de energía sea mayor, esto sucede cuando esta Pala esta funcionando en modo DIG, además que se encuentren trabajando los siguientes componentes:

- Un motor de Hoist con una potencia instalada de 2600HP y un consumo de 0.671MVA
- Un motor de Crowd con una potencia instalada de 700HP y un consumo de 0.584MVA
- Dos motores de Swing con una potencia total instalada de 1010HP y un consumo total de 0.793MVA para los motores de Swing 1 y Swing 2

Finalmente, en la barra Pala 6 de 7.2kV están conectados dos transformadores principales con una potencia instalada de 1200kVA y un consumo de 0.692MVA por cada uno. Así como también está conectado un transformador auxiliar con una potencia instalada de 350kVA y un consumo de 0.125MVA



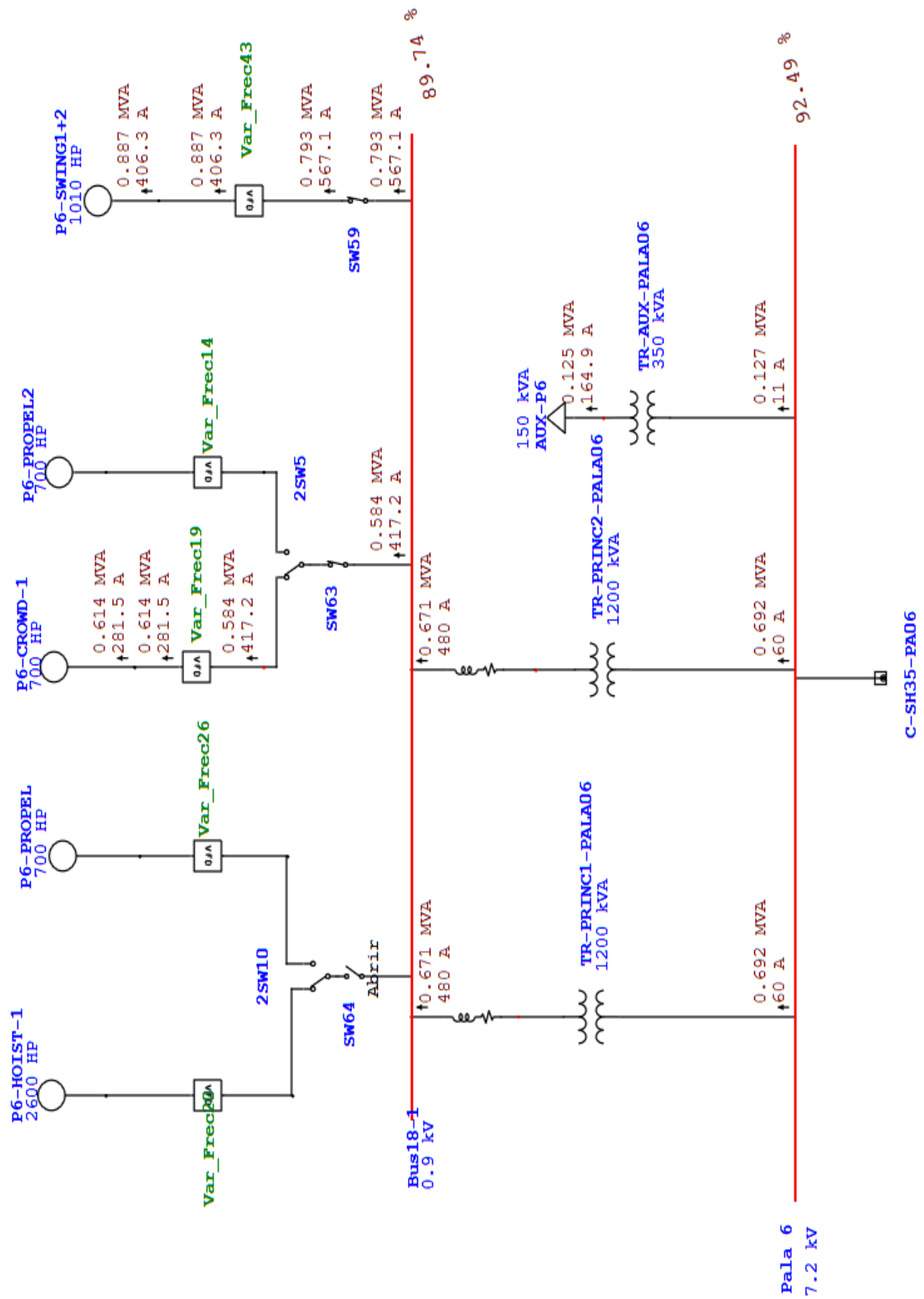


Figura 52. Imagen digitalizada del circuito equivalente de Pala 6

#### ***4.1.1.6. Circuito Equivalente Pala 7.***

Para el circuito equivalente de Pala 7 se consideró un escenario donde el consumo de energía sea mayor, esto sucede cuando esta Pala esta funcionando en modo DIG, además que se encuentren trabajando los siguientes componentes:

- Dos bancos RPC con un consumo de 1.34MVA cada uno.
- Un motor de Crowd con una potencia instalada de 310HP y un consumo de 0.306 MVA
- Dos motores de Hoist con una potencia instalada de 1265HP cada uno, un consumo de 1.22MVA y 0.955MVA para los motores de Hoist 1 y Hoist 2 respectivamente.

Finalmente, en la barra ACB Pala 7 de 7.2kV está conectado un transformador principal con una potencia instalada de 3000kVA y un transformador auxiliar con una potencia instalada de 450kVA Ambos tienen un consumo de 2.71MVA y 0.328MVA respectivamente.

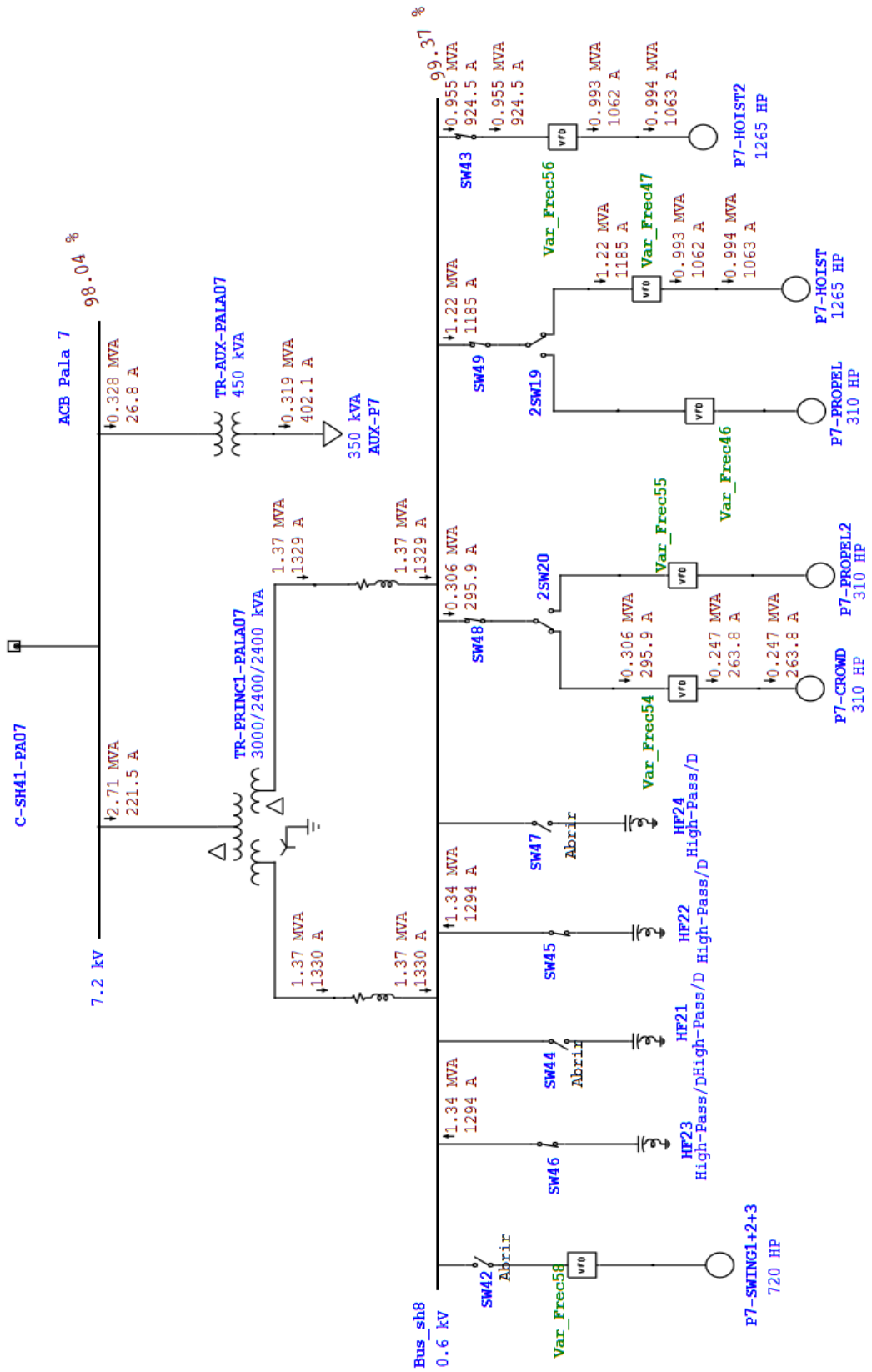


Figura 53. Imagen digitalizada del circuito equivalente de Pala 7

#### ***4.1.1.7. Circuito Equivalente Perforadora 11.***

Para el circuito equivalente de Perforadora 11 se consideró un escenario donde el consumo de energía sea mayor, esto sucede cuando esta Perforadora esta funcionando en modo DRILL, además que se encuentren trabajando los siguientes componentes:

- Un motor de Hoist/Pulldown con una potencia instalada de 135HP y un consumo de 0.114 MVA
- Dos motores de Rotary con una potencia total instalada de 270HP y un consumo total de 0.223 MVA
- Un motor de Principal con una potencia instalada de 1000HP y un consumo de 0.975MVA

Finalmente, en la barra ACB PERFO #11 de 7.2kV está conectado un transformador principal con una potencia instalada de 650kVA y un consumo de 0.419MVA

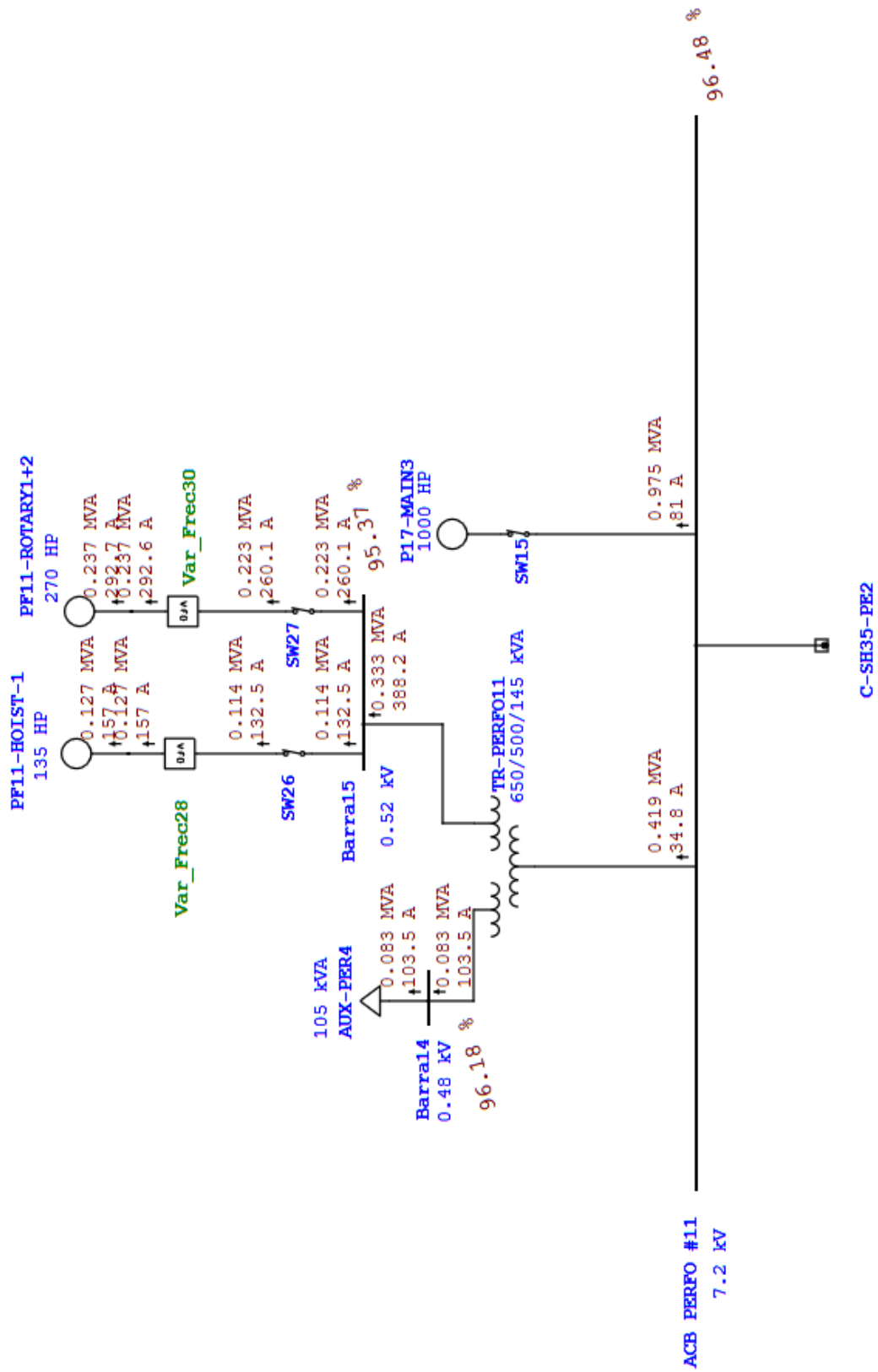


Figura 54. Imagen digitalizada del circuito equivalente de Perforadora 11

#### ***4.1.1.8. Circuito Equivalente Perforadora 13.***

Para el circuito equivalente de Perforadora 13 se consideró un escenario donde el consumo de energía sea mayor, esto sucede cuando esta Perforadora esta funcionando en modo DRILL, además que se encuentren trabajando los siguientes componentes:

- Un motor de Hoist/Pulldown con una potencia instalada de 150HP y un consumo de 0.118 MVA
- Un motor de Rotary con una potencia total instalada de 135HP y un consumo total de 0.126 MVA
- Un motor de Principal con una potencia instalada de 600HP y un consumo de 0.585MVA

Finalmente, en la barra ACB Perforadora 13 de 7.2kV está conectado un transformador principal con una potencia instalada de 450kVA y un consumo de 0.242MVA, así como un transformador auxiliar con una potencia instalada de 250kVA y un consumo de 0.139MVA

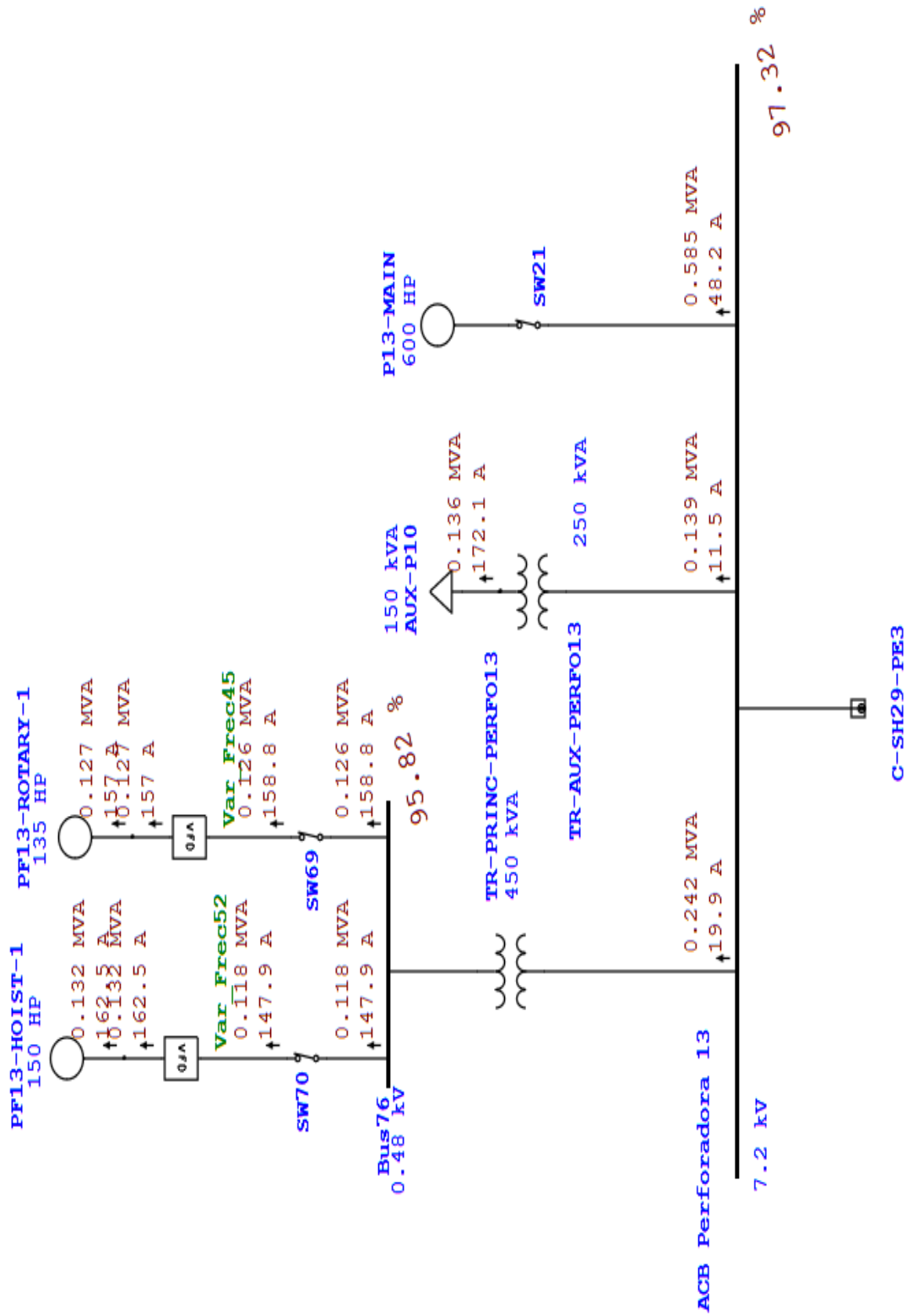


Figura 55. Imagen digitalizada del circuito equivalente de Perforadora 13

#### ***4.1.1.9. Circuito Equivalente Perforadora 14.***

Para el circuito equivalente de Perforadora 14 se consideró un escenario donde el consumo de energía sea mayor, esto sucede cuando esta Perforadora esta funcionando en modo DRILL, además que se encuentren trabajando los siguientes componentes:

- Un motor de Hoist/Pulldown con una potencia instalada de 150HP y un consumo de 0.124 MVA
- Un motor de Rotary con una potencia total instalada de 135HP y un consumo total de 0.126 MVA
- Un motor de Principal con una potencia instalada de 600HP y un consumo de 0.585MVA

Finalmente, en la barra ACB Perforadora 14 de 7.2kV está conectado un transformador principal con una potencia instalada de 450kVA y un consumo de 0.248MVA, así como un transformador auxiliar con una potencia instalada de 250kVA y un consumo de 0.166MVA



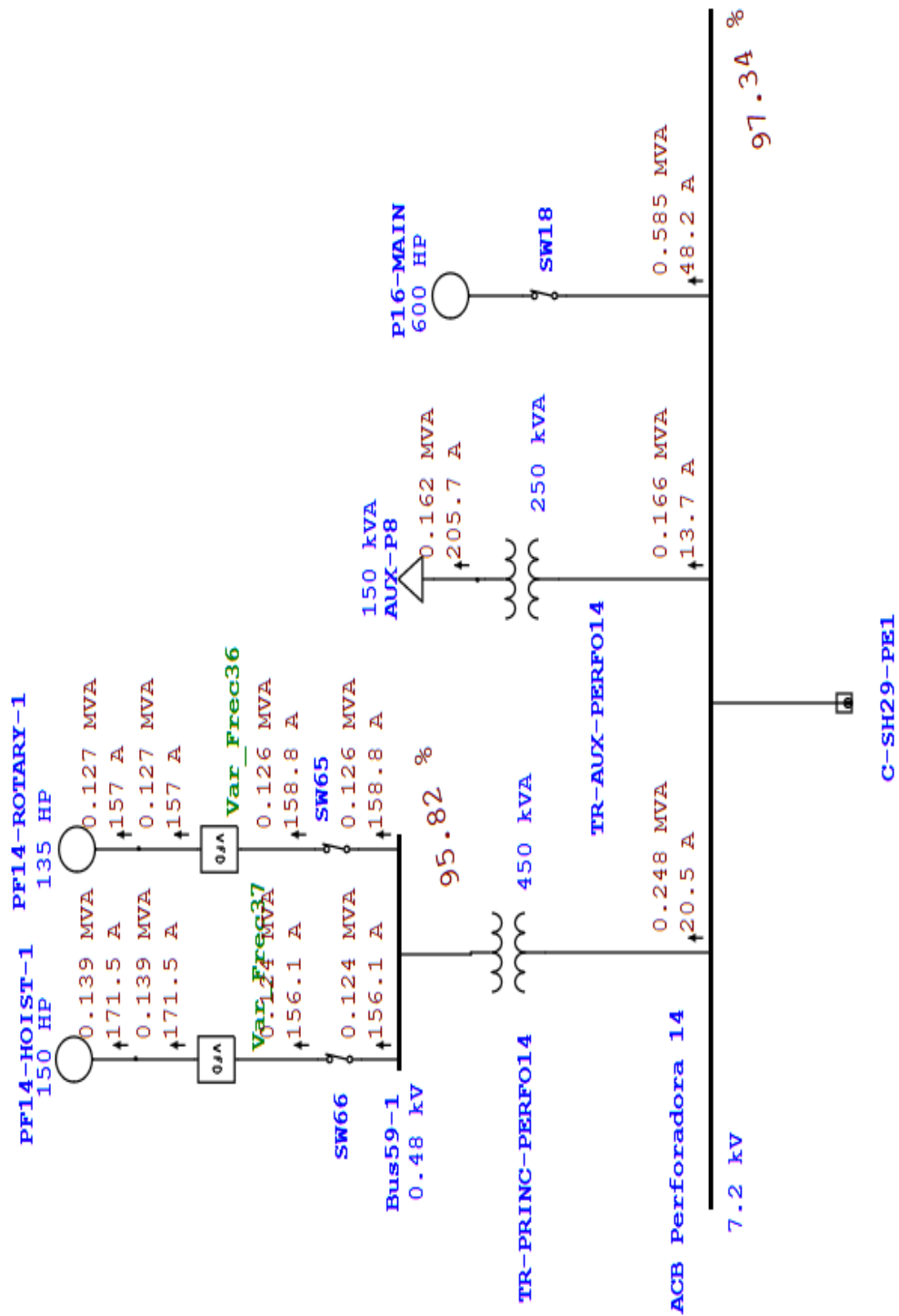


Figura 56. Imagen digitalizada del circuito equivalente de Perforadora 14

#### ***4.1.1.10. Circuito Equivalente Perforadora 16.***

Para el circuito equivalente de Perforadora 16 se consideró un escenario donde el consumo de energía sea mayor, esto sucede cuando esta Perforadora esta funcionando en modo DRILL, además que se encuentren trabajando los siguientes componentes:

- Un motor de Hoist/Pulldown con una potencia instalada de 135HP y un consumo de 0.114 MVA
- Dos motores de Rotary con una potencia total instalada de 270HP y un consumo total de 0.236 MVA
- Un motor de Principal con una potencia instalada de 1000HP y un consumo de 0.975MVA
- Finalmente, en la barra ACB PERFO 16 de 7.2kV está conectado un transformador principal con una potencia instalada de 650kVA y un consumo de 0.429MVA



#### ***4.1.1.11. Circuito Equivalente Perforadora 17.***

Para el circuito equivalente de Perforadora 17 se consideró un escenario donde el consumo de energía sea mayor, esto sucede cuando esta Perforadora esta funcionando en modo DRILL, además que se encuentren trabajando los siguientes componentes:

- Un motor de Hoist/Pulldown con una potencia instalada de 135HP y un consumo de 0.125 MVA
- Dos motores de Rotary con una potencia total instalada de 270HP y un consumo total de 0.25MVA
- Un motor de Principal con una potencia instalada de 1000HP y un consumo de 0.975MVA

Finalmente, en la barra ACB PERFO #17 de 7.2kV está conectado un transformador principal con una potencia instalada de 650kVA y un consumo de 0.465MVA

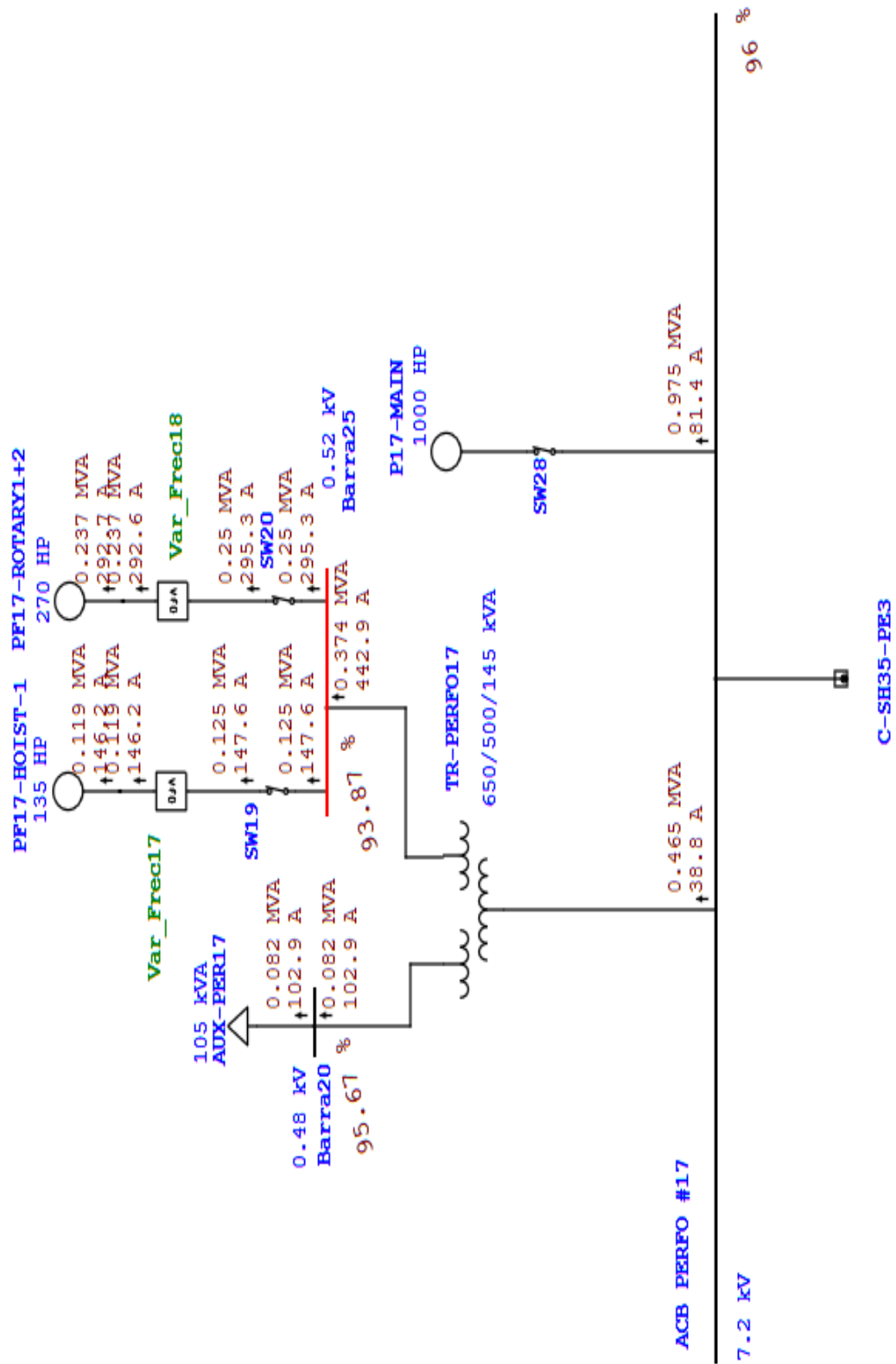


Figura 58. Imagen digitalizada del circuito equivalente de Perforadora 17

#### ***4.1.1.12. Circuito Equivalente Perforadora 18.***

Para el circuito equivalente de Perforadora 18 se consideró un escenario donde el consumo de energía sea mayor, esto sucede cuando esta Perforadora esta funcionando en modo DRILL, además que se encuentren trabajando los siguientes componentes:

- Un motor de Hoist/Pulldown con una potencia instalada de 150HP y un consumo de 0.124 MVA
- Un motor de Rotary con una potencia total instalada de 135HP y un consumo total de 0.126 MVA
- Un motor de Principal con una potencia instalada de 600HP y un consumo de 0.585MVA

Finalmente, en la barra ACB Perforadora 18 de 7.2kV está conectado un transformador principal con una potencia instalada de 450kVA y un consumo de 0.248MVA, así como un transformador auxiliar con una potencia instalada de 250kVA y un consumo de 0.166MVA

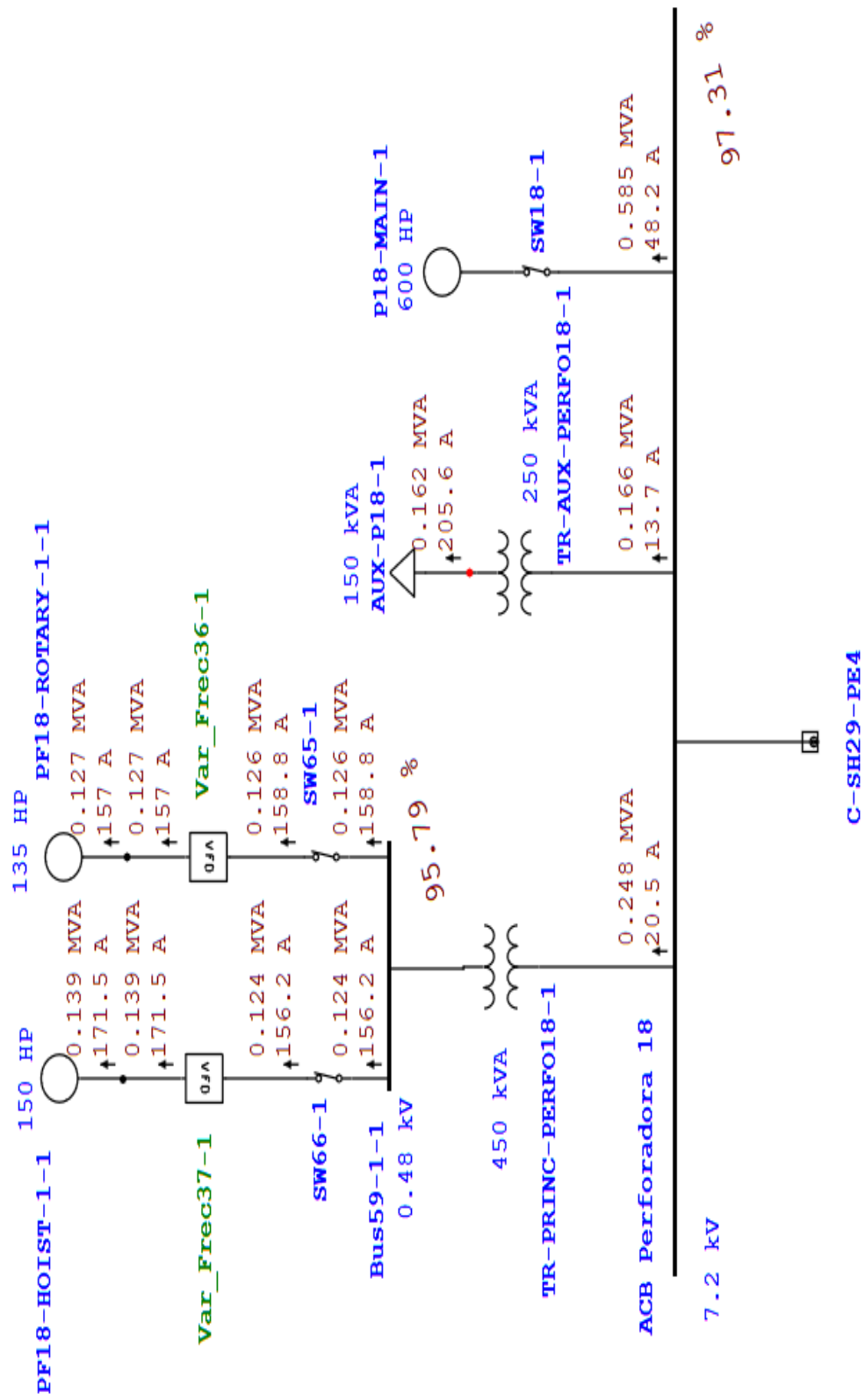


Figura 59. Imagen digitalizada del circuito equivalente de Perforadora 18

#### 4.1.1.13. Circuito Equivalente Switch House 29 y Subestación 14.

Para el caso de los diagramas equivalentes de los Switch House y Subestaciones, también cuentan con varios símbolos en común cuyo significado detallaremos a continuación.

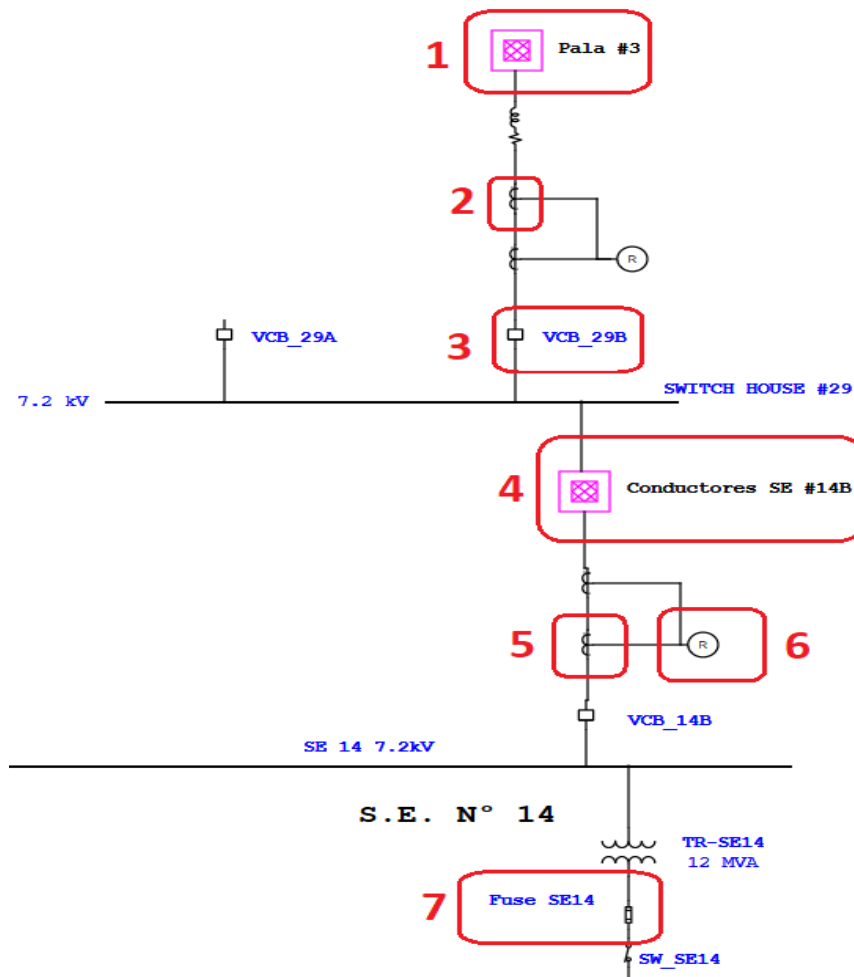


Figura 60. Imagen referencial digitalización switch house y subestaciones

Leyenda:

1. Símbolo de red compuesta en este caso de Pala 3, en su interior se detalla toda la circuitería digitalizada de los componentes de dicha Pala. Esta codificado como Pala #3



2. Símbolo de los CT de fase (relación de 600:5), para este caso registran los valores de corriente de Pala 3 y los envían al relé de protección del Feeder B del Switch House 29
3. Símbolo del interruptor de vacío del Feeder B instalado en el interior del Switch House 29, esta codificado como VCB\_29B
4. Símbolo de red compuesta en este caso del conjunto de cables entre el Feeder B de la Subestación 14 y el Switch House 29, en su interior se detalla toda la circuitería digitalizada de los diferentes tramos de conductores. Esta codificado como Conductores SE #14B
5. Símbolo del CT de neutro (relación de 50:5), para este caso registra el valor de corriente de Pala 3 y los envía al relé de protección del Feeder B de la Subestación 14
6. Símbolo del relé de protección del Feeder B de la Subestación 14
7. Símbolo del fusible del transformador de potencia de la Subestación 14, codificado como Fuse SE14

Definidos los símbolos de uso común, a continuación, detallaremos los diagramas equivalentes en ETAP de un Switch House y una Subestación.

El circuito equivalente muestra un consumo de 2.42MVA en la barra denominada SWITCH HOUSE #29 que a su vez está conectada a Pala 3, así mismo se puede observar que esta barra tiene un 93.58% de la tensión nominal (7.2kV). Por otro lado, la barra denominada SE 14 correspondiente al Feeder B también tiene el mismo consumo de energía, a su vez dicha barra tiene un 93.84% de la tensión nominal (7.2kV)

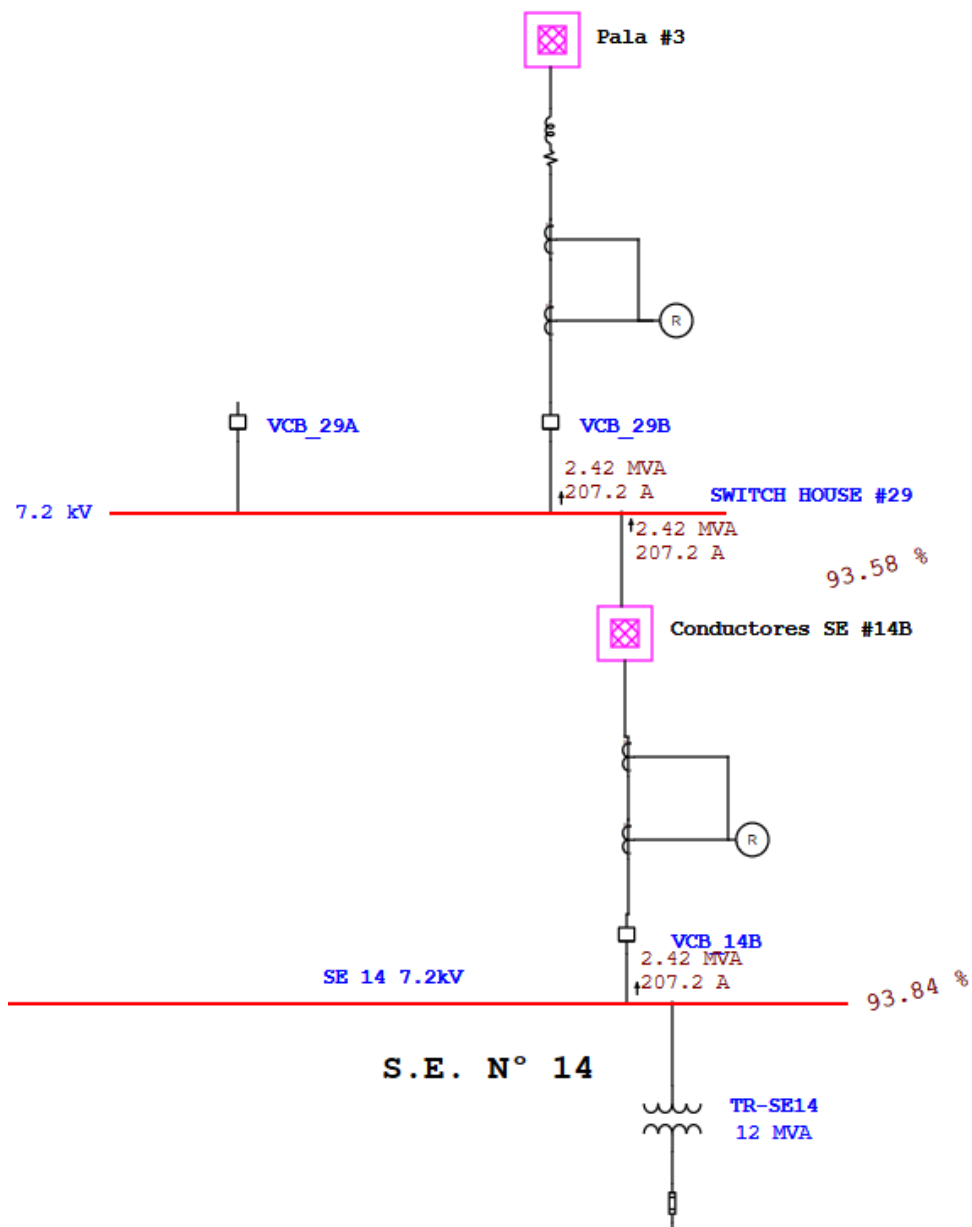


Figura 61. Imagen digitalizada del circuito equivalente de switch house 29 y subestación 14

#### 4.1.2. Caracterización de los resultados de la simulación de la digitalización.

Luego de la digitalización de los circuitos equivalentes de los equipos de Palas y Perforadoras, así como los switch house y subestaciones involucradas se procedió a la simulación de fallas eléctricas en fases y con respecto a tierra para cada uno de los equipos.

Ello permitió obtener nuevas curvas de coordinación de protección para cada uno de los equipos teniendo en cuenta que solo se consideró las protecciones 50 y 51 según la norma ANSI

Analizando las fallas de fases y en todos los casos podemos observar que las curvas de los relés de protección 50 y 51 se encuentran fuera de la zona de cobertura del fusible de alta tensión lo que nos garantizara una adecuada coordinación. Así mismo podemos observar una adecuada secuencia de despeje de falla entre el switch house, quien actuara primero, para ser seguido por su subestación correspondiente.

De la misma manera, analizando las fallas con respecto a tierra y en todos los casos podemos observar en las curvas de los relés de protección 50 y 51 una adecuada secuencia de despeje de falla entre el switch house, quien actuara primero, para ser seguido por su subestación correspondiente.

Todas estas curvas de coordinación de protección obtenidas se detallan en el anexo 5:

### 4.1.3. Obtención de los nuevos grupos de ajuste.

Tabla 23

Nuevos grupos ajuste equipos de Palas y Perforadoras mina Cujajone

Ajuste	Pickup	Curva	Tap dial
51P	0.6 In	Very inverse	1
51G	0.1 In	Very inverse	1
50P	1.9 In	-	-
50G	0.5 In	-	-

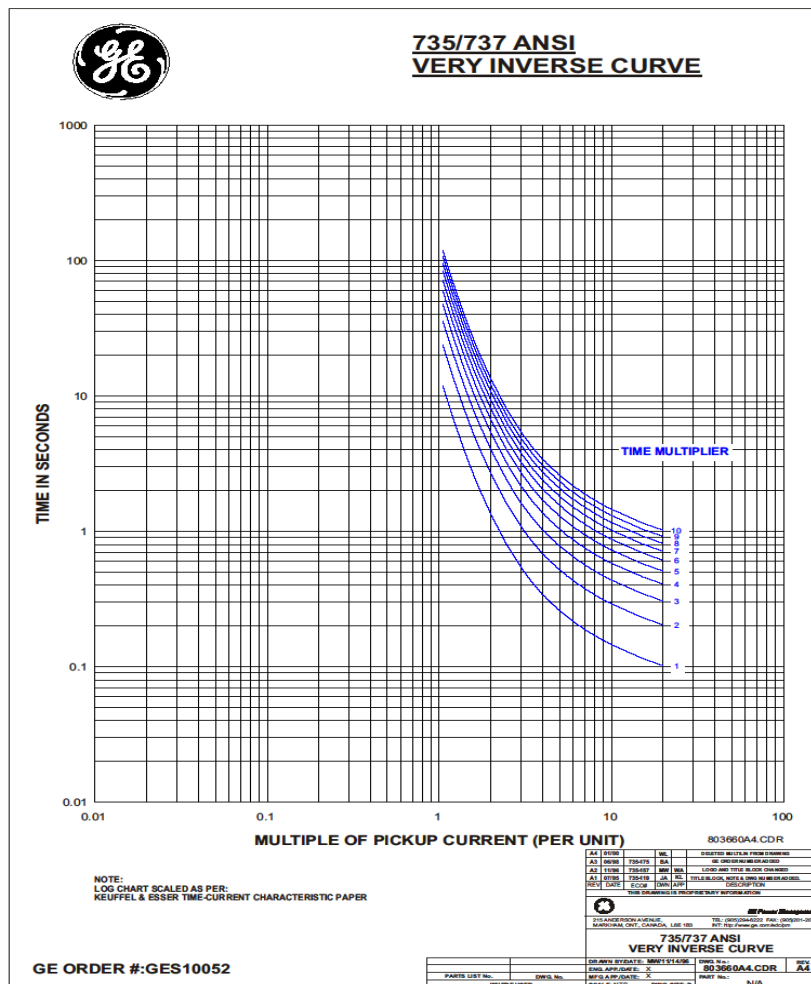


Figura 62. Imagen curva Very Inverse General Electric

Fuente: General Electric, 2021

#### **4.1.4. Caracterización del performance de la población y muestra en el año 2019.**

Primeramente, cabe mencionar que el presente trabajo de investigación considera el uso de la data de los equipos de Palas y Perforadoras tal como fue generada en los sistemas de adquisición de datos de los equipos.

En ese sentido los tiempos originalmente están expresados en minutos, por lo que se respetara dicha unidad de tiempo con el objetivo de reflejar lo más precisa posible la realidad que involucra el proceso de producción representado en los estados de demora asignados por la minera los cuales son:

“Demora”, estado que contiene los tiempos de parada de los equipos generados ineludiblemente por el propio proceso producción como son los cambios de guardia, horarios de refrigerios, uso de servicios higiénicos, etc.

“Malogrado”, estado que contiene los tiempos de parada de los equipos generados por el mantenimiento de los mismos, ya sea programado o no programado.

“Operativo”, estado que contiene los tiempos de los equipos directamente relacionados con la extracción de mineral.

“Standby”, estado que contiene los tiempos de inutilización de los equipos por motivos propios del proceso productivo, es decir no generan ingresos ni egresos a la minera.

Para una adecuada interpretación de la base de datos obtenida en el año 2019 se seleccionó a toda la población y muestra, esto con la finalidad de comparar los resultados de una hipotética mejora de los indicadores de performance posterior al estudio de coordinación, luego de implementar los nuevos grupos de ajuste.

Podemos observar en la tabla y grafico siguiente el resumen de todos los estados de los equipos de Palas y Perforadoras expresados en minutos. Cabe mencionar que los tiempos de mantenimiento programado y no programado se encuentran dentro del estado definido como “malogrado”

**Tabla 24**

*Estados equipos de Palas y Perforadoras año 2019*

<b>Equipo</b>	<b>Demora (min)</b>	<b>Malogrado (min)</b>	<b>Operativo (min)</b>	<b>Standby (min)</b>
Pala 1	35910.9	29424.66	307759.8	107864.5
Pala 3	63196.75	50528.08	359282.29	7952.55
Pala 4	45581.35	162408.5	269091.36	3878.78004
Pala 5	52947.26	38161.76	361648.53	28202.28
Pala 6	59922.35	49174.15	366945.58	4917.95
Pala 7	62355.66	55276.71	360136.1	3191.9
Perforadora 11	95010.47	51811.97	322390.19	11747.17
Perforadora 13	89005.96	41807.05	313165.28	36982.03
Perforadora 14	97318.46	32862.69	336348.14	14430.61
Perforadora 16	90381.89	41297.91	323369.06	25911.03
Perforadora 17	88070.8	48832.51	302613.25	41443.45
Perforadora 18	92664.25	35372.11	298093.13	54830.33

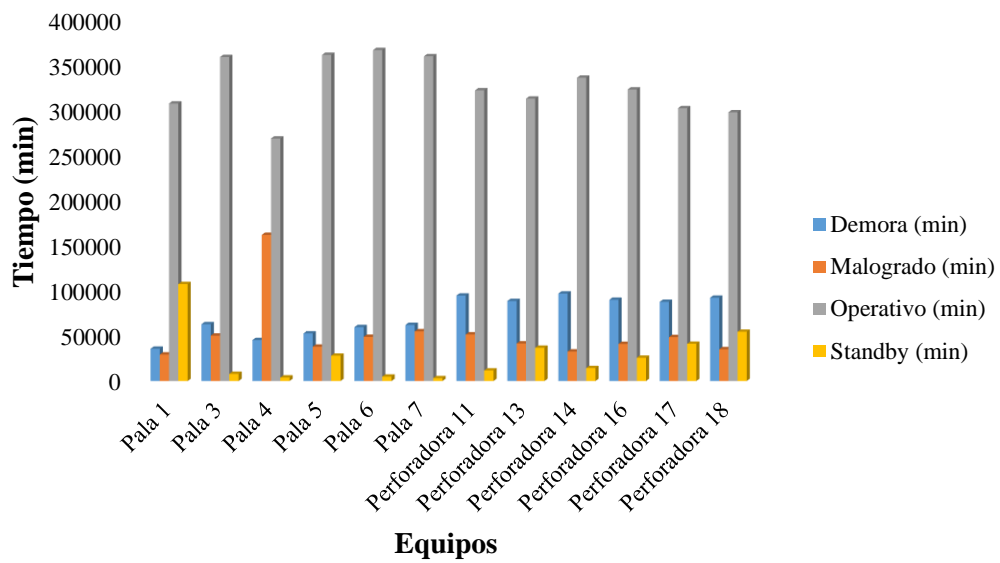


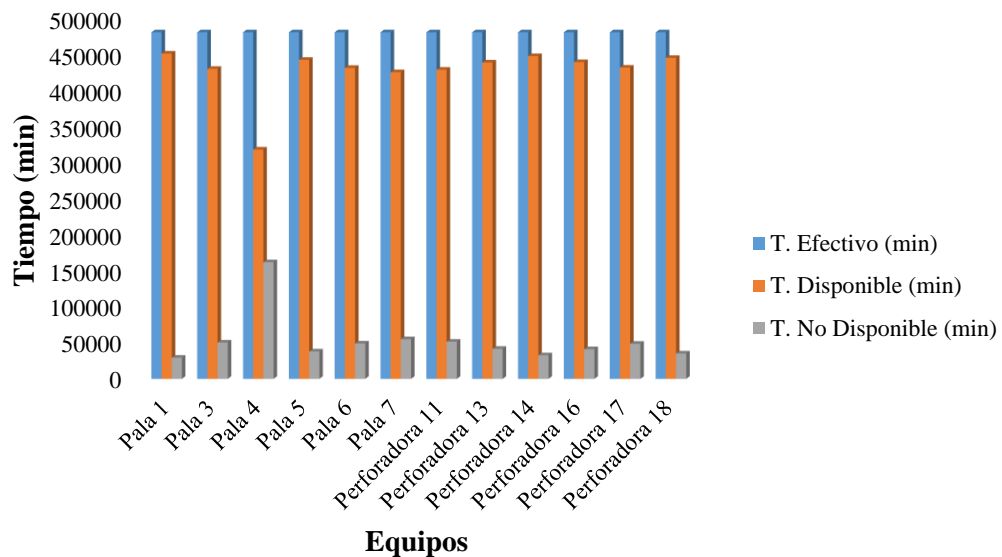
Figura 63. Gráfica estados equipos Palas y Perforadoras año 2019

Con esta información podemos calcular los tiempos de trabajo efectivo de los equipos de Palas y Perforadoras, así como los tiempos disponibles y no disponibles, todos expresados en minutos. El tiempo efectivo nos indica los minutos que trabajo cada equipo directamente en el proceso de producción durante el año 2019. El tiempo disponible nos indica que el equipo estuvo operativo, pero no necesariamente produciendo en la mina, como por ejemplo los cambios de guardia, horas de refrigerio, etc. El tiempo no disponible está relacionado a las paradas de mantenimiento tanto programadas como no programadas, esto se puede apreciar en la tabla y grafico siguiente:

**Tabla 25**

*Cálculo tiempos equipos de Palas y Perforadoras año 2019*

<b>Equipo</b>	<b>T. Efectivo (min)</b>	<b>T. Disponible (min)</b>	<b>T. No Disponible (min)</b>
Pala 1	480959.86	451535.2	29424.66
Pala 3	480959.67	430431.59	50528.08
Pala 4	480959.9901	318551.4901	162408.5
Pala 5	480959.83	442798.07	38161.76
Pala 6	480960.03	431785.88	49174.15
Pala 7	480960.37	425683.66	55276.71
Perforadora 11	480959.8	429147.83	51811.97
Perforadora 13	480960.32	439153.27	41807.05
Perforadora 14	480959.9	448097.21	32862.69
Perforadora 16	480959.89	439661.98	41297.91
Perforadora 17	480960.01	432127.5	48832.51
Perforadora 18	480959.82	445587.71	35372.11



*Figura 64. Gráfica tiempos calculados equipos Palas y Perforadoras año 2019*



Finalmente podemos calcular los indicadores de performance de los equipos de Palas y Perforadoras como son la disponibilidad física, disponibilidad mecánica, el uso de la disponibilidad física y el uso total, todos expresados en porcentaje para el año 2019

Observamos que el valor de la disponibilidad mecánica es el indicador que refleja con mayor efectividad una posterior comparación que nos lleve a medir un hipotético incremento del performance de los equipos. Esto podemos observarlo en la tabla y grafico siguiente.

**Tabla 26**

*Cálculos indicadores de performance equipos de Palas y Perforadoras año 2019*

<b>Equipo</b>	<b>D.F.</b>	<b>D.M.</b>	<b>U.D.F.</b>	<b>U.T.</b>
Pala 1	93.88%	91.27%	68.16%	63.99%
Pala 3	89.49%	87.67%	83.47%	74.70%
Pala 4	66.23%	62.36%	84.47%	55.95%
Pala 5	92.07%	90.46%	81.67%	75.19%
Pala 6	89.78%	88.18%	84.98%	76.29%
Pala 7	88.51%	86.69%	84.60%	74.88%
Perforadora 11	89.23%	86.15%	75.12%	67.03%
Perforadora 13	91.31%	88.22%	71.31%	65.11%
Perforadora 14	93.17%	91.10%	75.06%	69.93%
Perforadora 16	91.41%	88.68%	73.55%	67.23%
Perforadora 17	89.85%	86.11%	70.03%	62.92%
Perforadora 18	92.65%	89.39%	66.90%	61.98%

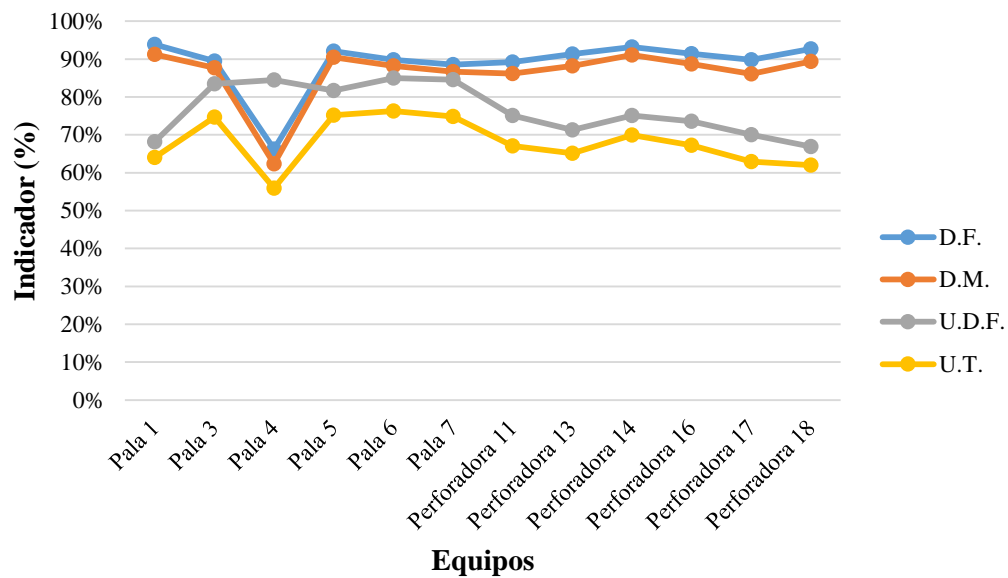


Figura 65. Gráfica indicadores calculados equipos Palas y Perforadoras año 2019

#### 4.1.5. Caracterización del performance de la población y muestra posterior al estudio de coordinación.

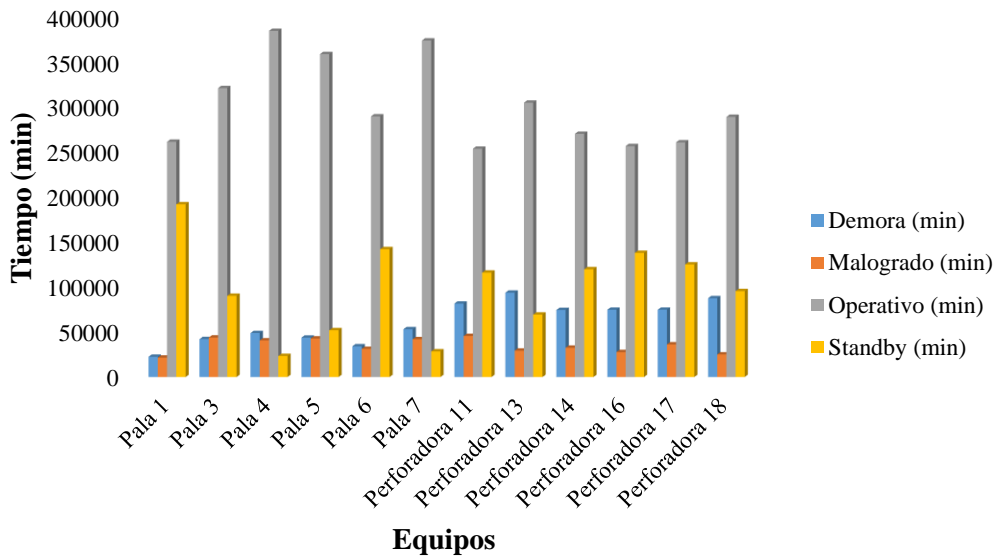
Para una adecuada interpretación de la base de datos obtenida posterior al estudio de coordinación se seleccionó a toda la población y muestra, esto con la finalidad de comparar los resultados de una hipotética mejora de los indicadores de performance con respecto al año anterior 2019.

Podemos observar en la tabla y gráfico siguiente el resumen de todos los estados de los equipos de Palas y Perforadoras expresados en minutos. Cabe mencionar que los tiempos de mantenimiento programado y no programado se encuentran dentro del estado definido como “malgrado”

**Tabla 27**

*Estados equipos de Palas y Perforadoras posterior al estudio de coordinación*

<b>Equipo</b>	<b>Demora (min)</b>	<b>Malogrado (min)</b>	<b>Operativo (min)</b>	<b>Standby (min)</b>
Pala 1	22520.89	21556.18	260985.44	191825.02
Pala 3	42146.96	43949.22	320439.46	90352
Pala 4	48929.96	40780.55	383759.2	23417.86
Pala 5	43816.12	42889.97	358111.9	52069.26
Pala 6	34194.66	31282.46	289170.69	142239.36
Pala 7	53169.6	42100.08	373084.44	28533.3
Perforadora 11	81684	45710.13	253359.57	116133.62
Perforadora 13	93817.31	29296.17	304356.62	69417.48
Perforadora 14	74555.56	32532.57	269890.61	119908.75
Perforadora 16	74833.83	27744.77	256243.57	138065.28
Perforadora 17	74892.8	36291.45	260393.39	125309.41
Perforadora 18	87630.93	25135.87	288542.19	95578.09



*Figura 66. Gráfica estados equipos Palas y Perforadoras posterior al estudio de coordinación.*

De la misma manera, con esta información podemos calcular los tiempos de trabajo efectivo de los equipos de Palas y Perforadoras, así como los tiempos disponibles y no disponibles, todos expresados en minutos. El tiempo efectivo nos indica los minutos que trabajo cada equipo directamente en el proceso de producción posterior al estudio de coordinación. El tiempo disponible nos indica que el equipo estuvo operativo, pero no necesariamente produciendo en la mina, como por ejemplo los cambios de guardia, horas de refrigerio, etc. El tiempo no disponible está relacionado a las paradas de mantenimiento tanto programadas como no programadas, esto se puede apreciar en la tabla y grafico siguiente:

**Tabla 28**

*Cálculo tiempos equipos de Palas y Perforadoras posterior al estudio de coordinación*

<b>Equipo</b>	<b>T. Efectivo (min)</b>	<b>T. Disponible (min)</b>	<b>T. No Disponible (min)</b>
Pala 1	496887.53	475331.35	21556.18
Pala 3	496887.64	452938.42	43949.22
Pala 4	496887.57	456107.02	40780.55
Pala 5	496887.25	453997.28	42889.97
Pala 6	496887.17	465604.71	31282.46
Pala 7	496887.42	454787.34	42100.08
Perforadora 11	496887.32	451177.19	45710.13
Perforadora 13	496887.58	467591.41	29296.17
Perforadora 14	496887.49	464354.92	32532.57
Perforadora 16	496887.45	469142.68	27744.77
Perforadora 17	496887.05	460595.6	36291.45
Perforadora 18	496887.08	471751.21	25135.87

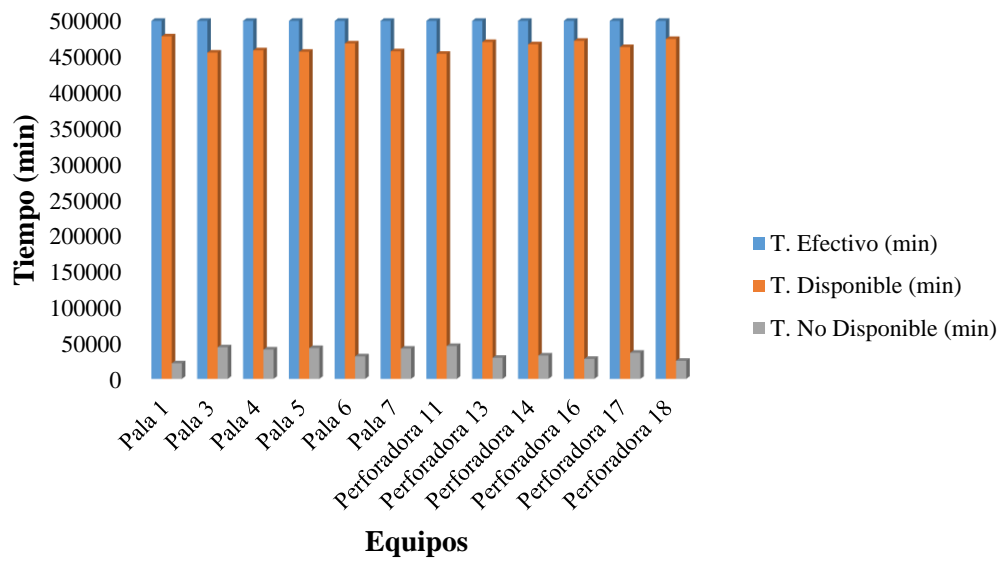


Figura 67. Gráfica tiempos calculados equipos Palas y Perforadoras posterior al estudio de coordinación.

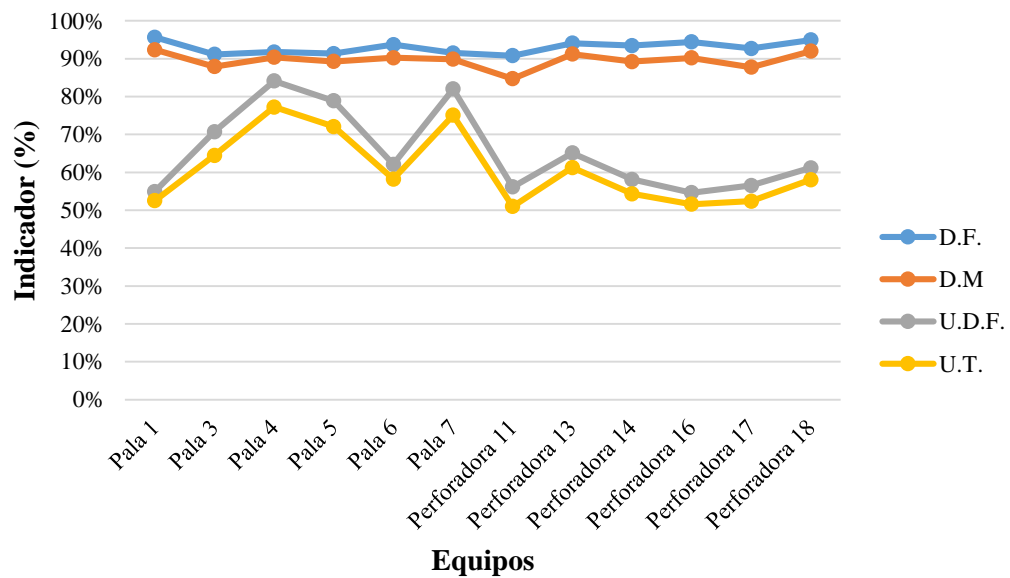
Finalmente podemos calcular los indicadores de performance de los equipos de Palas y Perforadoras como son la disponibilidad física, disponibilidad mecánica, el uso de la disponibilidad física y el uso total, todos expresados en porcentaje.

Observamos que el valor de la disponibilidad mecánica es el indicador que refleja con mayor efectividad una posterior comparación que nos lleve a medir un hipotético incremento del performance de los equipos. Esto podemos observarlo en la tabla y grafico siguiente.

**Tabla 29**

*Cálculos indicadores de performance equipos de Palas y Perforadoras posterior al estudio de coordinación*

<b>Equipo</b>	<b>D.F.</b>	<b>D.M</b>	<b>U.D.F.</b>	<b>U.T.</b>
Pala 1	95.66%	92.37%	54.91%	52.52%
Pala 3	91.16%	87.94%	70.75%	64.49%
Pala 4	91.79%	90.39%	84.14%	77.23%
Pala 5	91.37%	89.30%	78.88%	72.07%
Pala 6	93.70%	90.24%	62.11%	58.20%
Pala 7	91.53%	89.86%	82.03%	75.08%
Perforadora 11	90.80%	84.72%	56.16%	50.99%
Perforadora 13	94.10%	91.22%	65.09%	61.25%
Perforadora 14	93.45%	89.24%	58.12%	54.32%
Perforadora 16	94.42%	90.23%	54.62%	51.57%
Perforadora 17	92.70%	87.77%	56.53%	52.40%
Perforadora 18	94.94%	91.99%	61.16%	58.07%



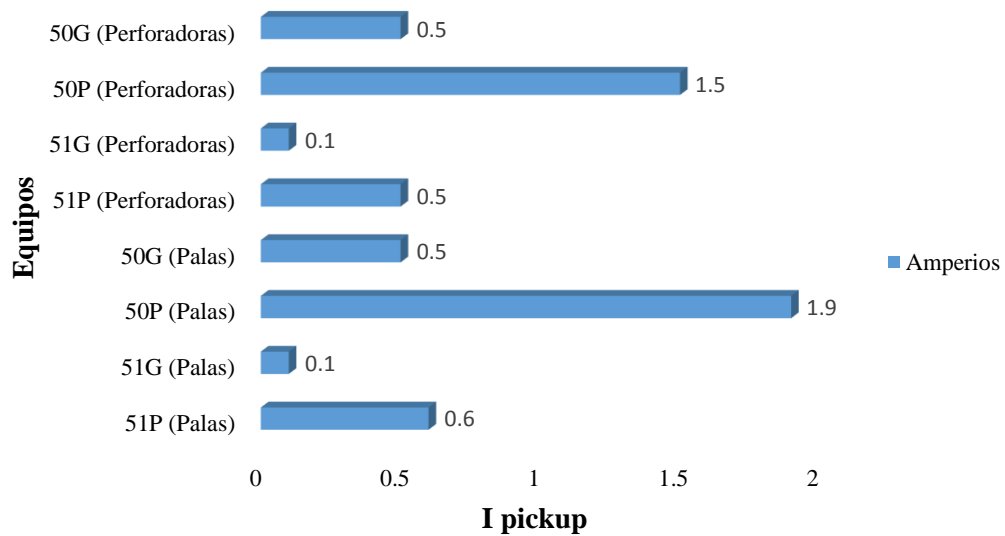
*Figura 68. Gráfica indicadores calculados equipos Palas y Perforadoras posterior al estudio de coordinación.*

#### 4.1.6. Presentación de los esquemas de protección especial.

**Tabla 30**

*Nuevos esquemas de protección especial*

Ajuste	Pickup	Curva	Tap dial
51P (Palas)	0.6 In	Very inverse	1
51G (Palas)	0.1 In	Very inverse	1
50P (Palas)	1.9 In	-	-
50G (Palas)	0.5 In	-	-
51P (Perforadoras)	0.5 In	Very inverse	1
51G (Perforadoras)	0.1 In	Very inverse	1
50P (Perforadoras)	1.5 In	-	-
50G (Perforadoras)	0.5 In	-	-



*Figura 69. Gráfica nuevos esquemas de protección especiales*

## **4.2. Contrastación de hipótesis**

Dados los enunciados planteados para las hipótesis del estudio, el proceso de contrastación de hipótesis se ha desarrollado asumiendo el criterio de contrastar en primer lugar las hipótesis específicas, como parte del proceso de validación de la hipótesis general.

### **4.2.1. Primera hipótesis específica.**

El enunciado de la primera hipótesis específica es el siguiente:

El circuito eléctrico equivalente del estudio de coordinación de protección eléctrica incrementa la disponibilidad de las Palas y Perforadoras en la mina Cuajone.

Enunciados operacionales:

La hipótesis se operacionaliza en los siguientes enunciados:

- H0: La caída de tensión nominal en las barras principales de los equipos de Palas y Perforadoras supera el 10%
- H1: La caída de tensión nominal en las barras principales de los equipos de Palas y Perforadoras no supera el 10%

Prueba:

De las figuras de digitalización (figura 48 a la figura 59) se observa los valores de caída de tensión en porcentaje de las barras principales de los equipos de Palas y Perforadoras, para todos los casos no supera en 10%

Conclusión:

Por lo tanto, se acepta la hipótesis propuesta, H1, y se rechaza la hipótesis nula, H0. Esto es: La caída de tensión nominal en las barras principales de los equipos de Palas y Perforadoras no supera el 10%. En conclusión, el circuito



eléctrico equivalente del estudio de coordinación de protección eléctrica incrementa la disponibilidad de las Palas y Perforadoras.

#### **4.2.2. Segunda hipótesis específica.**

El enunciado de la segunda hipótesis específica es el siguiente:

Los grupos de ajuste final del estudio de coordinación de protección eléctrica incrementa la disponibilidad de las Palas y Perforadoras en la mina Cuajone.

Enunciados operacionales:

La hipótesis se operacionaliza en los siguientes enunciados:

- H0: Los grupos de ajuste final del estudio de coordinación de protección eléctrica no incrementa la disponibilidad de las Palas y Perforadoras.
- H2: Los grupos de ajuste final del estudio de coordinación de protección eléctrica incrementa la disponibilidad de las Palas y Perforadoras.

Prueba:

De la tabla 31 (Indicadores calculados equipos de Palas y Perforadoras año 2019 y posterior al estudio de coordinación), se observa el incremento en porcentaje de la disponibilidad física de los equipos de Palas y Perforadoras posterior al estudio de coordinación de protección eléctrica.

Conclusión:

Por lo tanto, se acepta la hipótesis propuesta, H2, y se rechaza la hipótesis nula, H0. Esto es: Los grupos de ajuste final del estudio de coordinación de protección eléctrica incrementa la disponibilidad de las Palas y Perforadoras. En conclusión, los grupos de ajuste final luego de ser implementados incrementan la disponibilidad de las Palas y Perforadoras en la mina Cuajone.

#### **4.2.3. Tercera hipótesis específica.**

El enunciado de la tercera hipótesis específica es el siguiente:

Los esquemas especiales de protección del estudio de coordinación de protección eléctrica incrementan la disponibilidad de las Palas y Perforadoras en la mina Cuajone.

Enunciados operacionales:

La hipótesis se operacionaliza en los siguientes enunciados:

- H0: Los esquemas especiales de protección del estudio de coordinación de protección eléctrica no incrementan la disponibilidad de las Palas y Perforadoras en la mina Cuajone.
- H3: Los esquemas especiales de protección del estudio de coordinación de protección eléctrica incrementan la disponibilidad de las Palas y Perforadoras en la mina Cuajone.

Prueba:

No se implementó esquemas especiales de protección del estudio de coordinación de protección eléctrica a los alimentadores y subestaciones de las Palas y Perforadoras en la mina Cuajone.

Conclusión:

Por lo tanto, se rechaza la hipótesis propuesta, H3, y se acepta la hipótesis nula,

H0. Esto es: Los esquemas especiales de protección del estudio de coordinación de protección eléctrica no incrementan la disponibilidad de las Palas y Perforadoras en la mina Cuajone. Solo se puede inferir que existirá un incremento debido a los resultados obtenidos con los nuevos grupos de ajuste final.

#### **4.2.4. Hipótesis general.**

El enunciado de la hipótesis general es el siguiente:

El óptimo estudio de coordinación de protección eléctrica incrementa la disponibilidad de las Palas y Perforadoras en la mina Cuajone.

Enunciados operacionales:

La hipótesis se operacionaliza en los siguientes enunciados:

- HG0: El óptimo estudio de coordinación de protección eléctrica no incrementa la disponibilidad de las Palas y Perforadoras en la mina Cuajone.
- HG1: El óptimo estudio de coordinación de protección eléctrica incrementa la disponibilidad de las Palas y Perforadoras en la mina Cuajone.

Prueba:

De la tabla 32 (Comparación de la disponibilidad mecánica año 2019 y posterior al estudio de coordinación), se observa el incremento de la media aritmética en porcentaje de la disponibilidad mecánica de los equipos de Palas y Perforadoras. Se obtuvo 83.86% en el año 2019 vs 89.61% posterior al estudio de coordinación.

Conclusión:

Por lo tanto, se acepta la hipótesis propuesta, HG1, y se rechaza la hipótesis nula, HG0. Esto es: El óptimo estudio de coordinación de protección eléctrica incrementa la disponibilidad de las Palas y Perforadoras en la mina Cuajone. En conclusión, la disponibilidad mecánica de incremento de 83.86% a 89.61%

### **4.3. Discusión de resultados**

Aunque la compañía minera Southern Peru Copper Corporation cuenta con altos estándares de mantenimiento que viene demostrando durante los años de funcionamiento de la unidad productiva de Cuajone, siempre va a existir la posibilidad de mejorar estos índices como parte del proceso de mejora continua de las empresas mineras de calidad mundial. Por ello es que el presente trabajo de investigación ha analizado toda la base de datos de estados asignados a los equipos de Palas y Perforadoras de Cuajone con la finalidad de identificar las oportunidades de mejora referidas a la coordinación de protección eléctrica.

El proceso de recopilación de información de los equipos previos a la digitalización de los circuitos equivalentes, entiéndase por circuito equivalente a todos los componentes y dispositivos eléctricos y/o electrónicos que contienen las Palas y Perforadoras; es muy importante debido a que permitirá evaluar objetivamente nuestras hipótesis específicas y posteriores resultados.

Al ingresar estos datos, el software “Electrical Transient and Analysis Program” de siglas ETAP nos permite validar dicha objetividad con la ejecución del flujo de carga, la cual consiste en calcular automáticamente el flujo de potencia y caídas de tensión en la totalidad del circuito equivalente correspondiente a un solo escenario considerado en la digitalización del presente trabajo de investigación; entiéndase como un solo escenario al proceso productivo desarrollado con normalidad por los equipos de Palas y Perforadoras en la mina.

De esta manera diseñando adecuadamente el circuito eléctrico equivalente garantizaremos un buen desempeño eléctrico de los componentes identificados como se menciona en primera hipótesis específica.

Todo este análisis y trabajo previo nos permitirá realizar una adecuada simulación de fallas de naturaleza eléctrica en los equipos de Palas y Perforadoras, lo que arroja como resultado una serie de graficas logarítmicas de coordinación descritas anteriormente. Esto nos permitió obtener un nuevo grupo de ajuste de coordinación, el cual se implementó en diciembre del 2019 para corroborar posteriormente su efectividad.

Por ende, al realizar una adecuada digitalización y simulación podemos establecer los grupos de ajuste final con el objetivo de garantizar la protección de los circuitos eléctricos de los equipos de Palas y Perforadoras como se menciona en nuestra segunda hipótesis específica.

Los nuevos grupos de ajuste obtenidos en nuestros resultados fueron ingresados periódicamente a los relés de protección de los switch house durante el mes de diciembre del 2019, esto con la finalidad de evaluar su desempeño posterior al estudio de coordinación.

Para fallas instantáneas en fase (50P) según la norma ANSI consideramos 1.9 veces la corriente nominal registrada por los transformadores de corriente de al menos una de las fases, mientras que para fallas a tierra (50G) según la norma ANSI consideramos 0.5 veces la corriente nominal registrada por el transformador se secuencia homopolar.

Para fallas temporizadas en fase (51P) según la norma ANSI consideramos 0.6 veces la corriente nominal registrada por los transformadores de corriente de al menos una de las fases, mientras que para fallas temporizadas a tierra (51G) según la norma ANSI consideramos 0.1 veces la corriente nominal registrada por el

transformador se secuencia homopolar. En ambos casos se consideró la primera curva de característica muy inversa.

Los equipos de Palas y Perforadoras trabajaron con estos nuevos ajustes de protección posterior al estudio de coordinación, luego del cual se procedió a analizar la nueva data obtenida de los equipos con el objetivo de cuantificar una hipotética mejora. En la tabla siguiente se simplifico dicho análisis por cada uno de los equipos considerando las disponibilidades física y mecánica de los años 2019 y posterior al estudio de coordinación.

**Tabla 31**

*Indicadores calculados equipos de Palas y Perforadoras año 2019 y posterior al estudio de coordinación*

<b>Equipo</b>	<b>D.F. 2019</b>	<b>D.M 2019</b>	<b>D.F. posterior al estudio de coordinación</b>	<b>D.M posterior al estudio de coordinación</b>
Pala 1	93.88%	91.27%	95.66%	92.37%
Pala 3	89.49%	87.67%	91.16%	87.94%
Pala 4	66.23%	62.36%	91.79%	90.39%
Pala 5	92.07%	90.46%	91.37%	89.30%
Pala 6	89.78%	88.18%	93.70%	90.24%
Pala 7	88.51%	86.69%	91.53%	89.86%
Perforadora 11	89.23%	86.15%	90.80%	84.72%
Perforadora 13	91.31%	88.22%	94.10%	91.22%
Perforadora 14	93.17%	91.10%	93.45%	89.24%
Perforadora 16	91.41%	88.68%	94.42%	90.23%
Perforadora 17	89.85%	86.11%	92.70%	87.77%
Perforadora 18	92.65%	89.39%	94.94%	91.99%

Podemos observar un ligero incremento de la disponibilidad física y mecánica posterior al estudio de coordinación con respecto al año 2019, lo que

ratifica el correcto desempeño de los nuevos grupos de ajuste instalados en los relés de protección. Cabe mencionar que en el presente trabajo de investigación se consideró como indicador de comparación de performance a la disponibilidad mecánica por ser la que relaciona directamente el tiempo total efectivo con el tiempo malogrado de cada uno de los equipos de Palas y Perforadoras. Este incremento podemos apreciarlo en la siguiente figura.

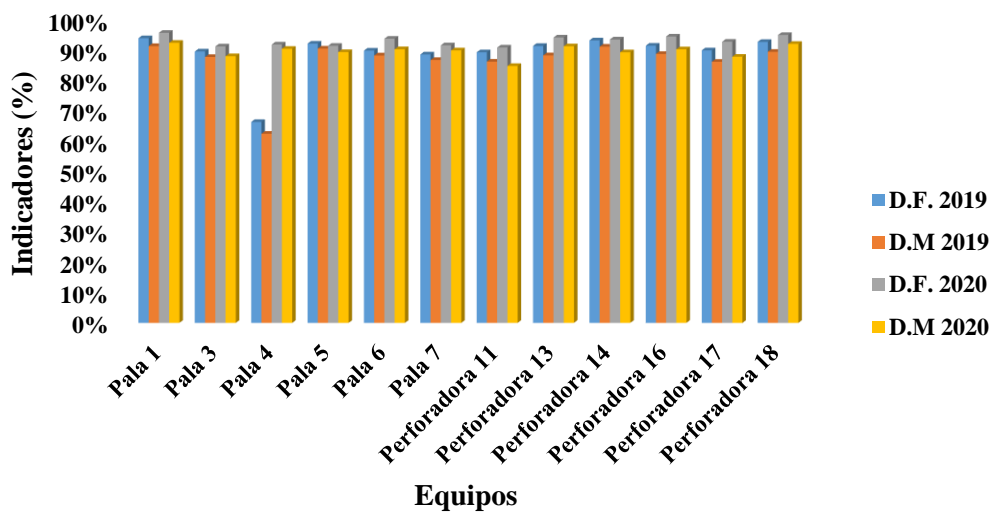


Figura 70. Gráfica indicadores calculados equipos Palas y Perforadoras año 2019 y posterior al estudio de coordinación.

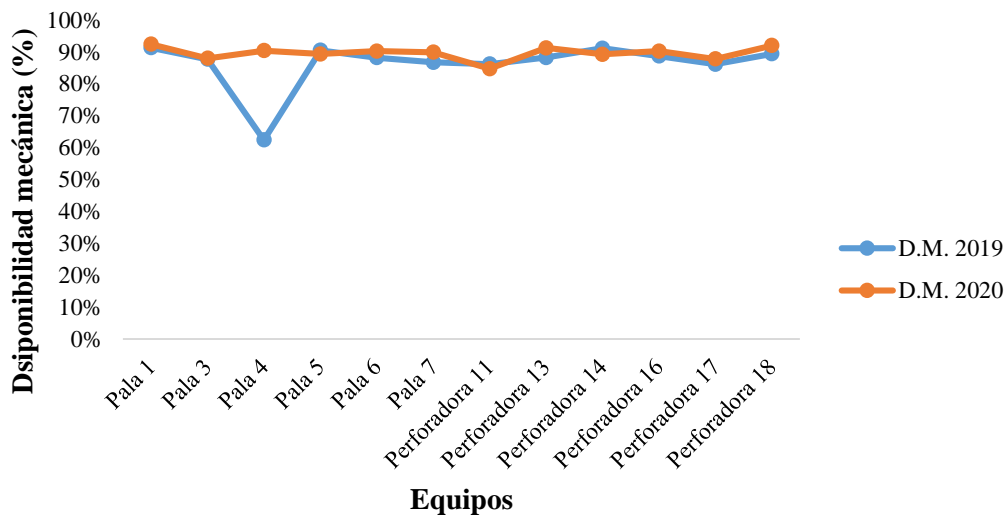
Finalmente, para una mejor comprensión podemos representar el incremento o mejora obtenida en función de la disponibilidad mecánica de los equipos de Palas y Perforadoras de la mina Cuajone. Año 2019 vs lo obtenido posterior al estudio de coordinación, lo que confirma positivamente nuestra hipótesis general, la cual señala textualmente que “Elaborando el estudio de coordinación se garantiza la óptima protección eléctrica de los equipos de Palas y Perforadoras mejorando su disponibilidad en la Mina Cuajone.

Este detalle se aprecia en la tabla y grafica siguiente:

**Tabla 32**

*Comparación D.M. año 2019 y posterior al estudio de coordinación*

<b>Equipo</b>	<b>Disponibilidad mecánica 2019</b>	<b>Disponibilidad mecánica posterior al estudio de coordinación</b>
Pala 1	91.27%	92.37%
Pala 3	87.67%	87.94%
Pala 4	62.36%	90.39%
Pala 5	90.46%	89.30%
Pala 6	88.18%	90.24%
Pala 7	86.69%	89.86%
Perforadora 11	86.15%	84.72%
Perforadora 13	88.22%	91.22%
Perforadora 14	91.10%	89.24%
Perforadora 16	88.68%	90.23%
Perforadora 17	86.11%	87.77%
Perforadora 18	89.39%	91.99%
<b>MEDIA ARITMÉTICA</b>	<b>83.86%</b>	<b>89.61%</b>



*Figura 71. Gráfica D.M. año 2019 y posterior al estudio de coordinación.*



Otro de los hallazgos interesantes encontrados y que vale la pena mencionar es que al bajar el índice de tiempo no disponible de los equipos producto de la mejora generada por los nuevos grupos de ajustes encontrados, se genera el incremento del tiempo de trabajo efectivo lo que conlleva también al incremento del uso de la disponibilidad física. Esto se reflejaría en el aumento en la producción lo que puede cuantificarse conociendo los costos de producción por equipo o las rentas de producción por equipo. Dejamos sobre la mesa este tema para futuros análisis de tesis que deseen usar el presente trabajo como información preliminar.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. Conclusiones

**Primera.** Se determinó que un óptimo estudio de coordinación de protección eléctrica incrementa la disponibilidad de los equipos de Palas y Perforadoras de la mina Cuajone SPCC en Moquegua, en ese sentido se validó dichos resultados comparando el valor de la media aritmética de la disponibilidad mecánica del año 2019, la cual es de 83.86% vs la media aritmética obtenida posterior a la implementación del estudio de coordinación, la cual es de 89.61%

**Segunda.** Se determinó que el incremento de la disponibilidad de los equipos de Palas y Perforadoras fue posible gracias a la elaboración de adecuados circuitos eléctricos equivalentes. Esto se refleja en la validación del flujo de carga a través del software ETAP representada en los porcentajes de caída de tensión. Los mismos no superan el 10% de la tensión nominal en las barras principales de los equipos de Palas y Perforadoras. Los porcentajes de tensión de barra hallados son: Pala 1 con 97.69% de caída de tensión en la barra de 7.2 kV, Pala 3 con 93.2% de caída de tensión en la barra de 7.2 kV, Pala 4 con 94.63% de caída

de tensión en la barra de 7.2 kV, Pala 5 con 95.22% de caída de tensión en la barra de 7.2 kV, Pala 6 con 92.49% de caída de tensión en la barra de 7.2 kV, Pala 7 con 98.04% de caída de tensión en la barra de 7.2 kV, Perforadora 11 con 96.48% de caída de tensión en la barra de 7.2 kV, Perforadora 13 con 97.32% de caída de tensión en la barra de 7.2 kV, Perforadora 14 con 97.34% de caída de tensión en la barra de 7.2 kV, Perforadora 16 con 96% de caída de tensión en la barra de 7.2 kV, Perforadora 17 con 96% de caída de tensión en la barra de 7.2 kV, Perforadora 18 con 97.31% de caída de tensión en la barra de 7.2 kV

**Tercera.** Se determinó que los nuevos grupos de ajuste del estudio de coordinación de protección eléctrica incrementan la disponibilidad de Palas y Perforadoras de la mina Cuajone SPCC en Moquegua. Esto se reflejó con la obtención de grupos de ajustes congruentes y similares para todos los equipos de Palas y Perforadoras. Estos nuevos grupos de ajuste son: Protección 51P, con un ajuste de 0.6 In y usando una curva muy inversa, Protección 51G, con un ajuste de 0.1 In y usando una curva muy inversa, Protección 50P, con un ajuste de 1.9 In, Protección 50G, con un ajuste de 0.5 In, En ese sentido fueron ingresados a todos los switch house de la mina Cuajone.

**Cuarta.** Se puede inferir que nuevos esquemas especiales de protección del estudio de coordinación de protección eléctrica podrían incrementar aún más la disponibilidad de las Palas y Perforadoras en la mina Cuajone SPCC en Moquegua. Estos nuevos esquemas especiales de

protección propuestos son: Protección 51P para Palas, con un ajuste de 0.6 In y usando una curva muy inversa, Protección 51G para Palas, con un ajuste de 0.1 In y usando una curva muy inversa, Protección 50P para Palas, con un ajuste de 1.9 In, Protección 50G para Palas, con un ajuste de 0.5 In, Protección 51P para Perforadoras, con un ajuste de 0.5 In y usando una curva muy inversa, Protección 51G para Perforadoras, con un ajuste de 0.1 In y usando una curva muy inversa, Protección 50P para Perforadoras, con un ajuste de 1.5 In, Protección 50G para Perforadoras, con un ajuste de 0.5 In, En ese sentido se propone corroborar su eficacia con la finalidad de verificar si también pueden contribuir al incremento de la disponibilidad mecánica y por ende aumentar el rendimiento de los equipos de Palas y Perforadoras en la mina Cuajone.

## 5.2. Recomendaciones

- Primera.** Se debe implementar o actualizar los estudios de coordinación de protección eléctrica cuando varíe la estructura de los circuitos equivalentes digitalizados en el software ETAP, así como cuando se incremente alguna de las flotas de Palas y Perforadoras. Esto con la finalidad de mantener el adecuado proceso de producción de una minera.
- Segunda.** Es necesario dilucidar, diseñar e implementar procesos de mejora continua, no solo con la finalidad de obtener mejoras en las empresas, sino también para seguir los lineamientos de las empresas de clase mundial.
- Tercera.** Diseñar estrategias de mantenimiento predictivo usando los resultados obtenidos con la finalidad de mejorar los KPI's de los equipos de Palas y Perforadoras de las mineras que tengan inconvenientes similares a los mencionados en el presente trabajo de investigación.
- Cuarta.** Cuantificar los resultados obtenidos en el presente trabajo de investigación con la finalidad de hallar la factibilidad de la implementación de estrategias de mejora de este tipo en otros procesos productivos como por ejemplo plantas de Concentrado, plantas de procesos alimenticios, manufacturas, etc.

## BIBLIOGRAFÍA

- Acuña, F. A., & Monroy, C. V. (2016). *Estudio de Coordinación de Protecciones en Planta Eléctrica Típica* (Seminario de titulación). Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile.
- Amador, R. T. (2007). *Protecciones Eléctricas*. Colombia: Ingeniería de Protecciones .
- Cuevas, A., & Hernández, J. E. (2013). *Coordinación de protecciones de un Sistema de Distribución* (Tesis de pregrado). Instituto Politécnico Nacional, México D.F., México.
- Galván, R., Rosas, F. J., & Santana, J. (2009). *Coordinación de Protecciones para un Sistema Eléctrico Industrial* (Tesis de pregrado). Instituto Politécnico Nacional, México D.F., México.
- General Electric. (2021). *Welcone to a New Era of Healthcare*. Recuperado el 14 de Octubre de 2022, de <https://www.ge.com/>
- Line Power. (2021). *Power Center Line Power*. Recuperado el 14 de Octubre de 2022, de <https://linepower.com/>
- Paucar, J. M., & Huarhua, W. (2018). *Estudio de Coordinación del sistema de protección de alimentadores de media tensión con generación distribuida ante fallas en redes adyacentes en Cusco y Apurímac* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de San Antonio Abad delo Cusco, Cusco, Perú.
- Sánchez, E. R. (2018). *Diseño de redes de distribución subterránea, subestaciones eléctricas, estudio de coordinación de protecciones de un sistema de*

*distribución radial* (Trabajo de suficiencia profesional). Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, Perú.

SETISA. (21 de mayo de 2019). *Estudio de Coordinación de Protecciones*. Recuperado de <https://www.setisa.com.sv/index.php/estudios-de-coordinacion-de-protecciones>

SPCC. (2019). *Southern Copper Corporation*. Recuperado el 14 de Octubre de 2022, de <https://southerncoppercorp.com/>

Zuñiga, A. J. (2015). *Estudio de coordinación de protecciones de la subestación Qumpac Nueva 60kV* (Informe de suficiencia). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.