Universidad Nacional de Ingeniería

Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Diseño eléctrico en un lote petrolero para facilidades de extracción de crudo y reinyección de agua

Para obtener el Título Profesional de Ingeniero Electricista.

Elaborado por

Darwin Paul Avila Vilela

0009-0005-2798-1210

Asesor

Dr. Ing. Dinau Velazco Lorenzo

0000-0003-4363-6204

LIMA – PERÚ

2025

Citar/How to cite	Avila Vilela [1]
Referencia/Reference Estilo/Style: IEEE (2020)	[1] D. Avila Vilela, "*Diseño eléctrico en un lote petrolero para facilidades de extracción de crudo y reinyección de agua*" [Trabajo de suficiencia profesional]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2025.

Citar/How to cite	(Avila, 2025)
Referencia/Reference Estilo/Style: APA (7ma ed.)	Avila, D. (2025). *Diseño eléctrico en un lote petrolero para facilidades de extracción de crudo y reinyección de agua*. [Trabajo de suficiencia profesional, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.

Dedicatoria

Dedicado a mis adorados padres Flor Vilela y Rafael Avila.

Dios me dio todo con su presencia, amor, sacrificio, tiempo y trabajo, los amo.

Dedicado a mi hermana Yorka Avila.

Por ser mi constante ejemplo, te quiero hermana.

Dedicado a mi esposa Jessy Támara e hijos Allyz y Rafael Avila.

Gracias por completar mi felicidad, siempre serán mi norte.

Agradecimientos

En primera instancia agradezco a Dios, por sus constantes demostraciones de cuidado y amor, no hay forma de demostrar el agradecimiento a todas sus bendiciones.

A mi madre Flor María Vilela Carreño y mi padre Rafael Avelino Avila Medina, por darme la vida, amor, tiempo, dedicación, enseñanza, alimento, cuidado, comprensión, trabajo, ejemplo, etc. Ustedes son el modelo de vida que cualquier hijo de este mundo, debería tener, estoy convencido que el mundo sería distinto con vuestro ejemplo. Todo fue más fácil con vuestra ayuda.

A mi hermana Yorka Zulema Avila Vilela, por ser la hermana mayor que necesitaba, fuiste una de mis primeras profesoras y me encuentro totalmente agradecido por eso.

A mi esposa Jessy Mijanuv Támara Romero, por ser mi amor, amiga, compañera, la extensión de mi memoria, el complemento de las habilidades que carezco, gracias. Este logro también es tuyo, te amo.

A mis hijos Allyz Laila y Rafael Darío Avila Támara, gracias, son la fuente inacabable de la energía que me motiva día a día, independientemente de mi ubicación, estado de ánimo o salud, ustedes se encuentran en mi pensamiento y corazón, gracias por sus demostraciones de amor, por su tiempo, paciencia, entendimiento, juegos, ternura y madurez. Este logro también es de ustedes, los amo.

Finalmente, agradezco al Dr. Dinau Velazco, por ser el guía que necesitaba para poder iniciar y culminar este trabajo, gracias por compartir su conocimiento, por su paciencia y tiempo. Estaré eternamente agradecido con usted.

Resumen

El trabajo de suficiencia profesional se desarrolla en un campo petrolero de la selva peruana, localidad que por el momento no cuenta con redes de transmisión interconectadas al SEIN. Por ello, se implementó un sistema eléctrico aislado, cuya generación inicialmente fue dada por dos grupos electrógenos, los cuales alimentaban mediante configuración radial, las facilidades tempranas de extracción y procesamiento de crudo. El objetivo es diseñar las ampliaciones necesarias para incluir facilidades de extracción de crudo y reinyección de agua, basados en normativas vigentes del sector de hidrocarburos, nacionales e internacionales. Para efectos del diseño, se utilizarán métodos de cálculo convencionales que serán complementados mediante el uso de las simulaciones de flujo de carga y cortocircuito del software Power Factory. Con dichas herramientas, se especificarán y seleccionarán cables, barras, switchgears y transformadores, cuya función será la distribución y transformación de energía eléctrica desde el punto de generación hasta las cargas eléctricas, adoptando una configuración de secundario selectivo, para contar con un sistema robusto y confiable.

Palabras clave — Sistema aislado, campo petrolero, secundario selectivo, diseño eléctrico.

Abstract

The professional proficiency work is carried out in an oil field in the Peruvian jungle, a location that currently does not have transmission networks interconnected to the SEIN. Therefore, an isolated electrical system was implemented, initially powered by two generator sets, which fed the early facilities for crude oil extraction and processing using a radial configuration. The objective is to design the necessary expansions to include crude oil extraction and water reinjection facilities, based on current national and international hydrocarbon sector regulations. For design purposes, conventional calculation methods will be used and complemented by load flow and short-circuit simulations using the Power Factory software. With these tools, cables, busbars, switchgears, and transformers will be specified and selected to distribute and transform of electrical energy from the generation point to the electrical loads, adopting a selective secondary configuration to ensure a robust and reliable system.

Keywords — Isolated system, oil field, selective secondary, electrical design.

Tabla de Contenido

Pág.

Resumen v

Abstract vi

Introducción xvi

Capítulo I. Parte introductoria del trabajo 1

1.1 Generalidades 1

1.2 Descripción del problema de investigación 3

1.2.1 Situación problemática 3

1.2.2 Problema a resolver 4

1.3 Objetivos del estudio 5

1.3.1 Objetivo general 5

1.3.2 Objetivos específicos 5

1.3.3 Indicadores de logro de los objetivos 5

1.4 Antecedentes investigativos 20

1.4.1 Evaluación de confiabilidad en sistemas eléctricos de distribución 20

1.4.2 Diseño de instalaciones eléctricas de una planta Merril&Crowe cumpliendo con la norma NFPA70 21

1.4.3 Diseño de instalaciones eléctricas para la ampliación de una plataforma petrolera ubicada en el bloque 66 23

Capítulo II. Marco teórico y conceptual 26

2.1 Marco teórico 26

2.1.1 Marco legal.....26

2.1.2 Núcleo teórico 29

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación 65

3.1 Análisis del problema 65

3.1.1 Metodología 67

3.1.2 Aspectos de gestión 77

3.1.3 Relación entre Objetivos Específicos con los requerimientos preliminares obtenidos 77

3.2 Diseño de la solución 78

3.2.1 Escenario preliminar.....78

3.2.2 Selección de barras.....81

3.2.3 Selección de transformadores.....83

3.2.4 Selección de conductores 84

3.2.5 Modelamiento de la problemática.....92

3.2.6 Simulación.....97

3.3 Simulación de cortocircuito y especificación técnica de equipos.....104

3.3.1 Simulación de cortocircuito.....104

3.3.2 Hoja de datos del Switchgear 1 112

3.3.3 Hoja de datos del Switchgear 2 118

3.3.4 Hoja de datos del Switchgear 3 124

3.3.5 Hoja de datos de MCC-1 y MCC-2 130

3.3.6 Hoja de datos de TR-MCC1 y TR-MCC2 132

3.4 Diseños complementarios 133

3.4.1 Banco de condensadores 133

3.4.2 Rechazo de carga 135

3.4.3 Protecciones eléctricas 150

3.5 Análisis final de filosofía de operación 163

Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados 165

Conclusiones 167

Recomendaciones 169

Referencias bibliográficas 170

Anexos 172

Lista de Tablas

Pág.

Tabla 1: Relación global entre el nivel de referencia y su significado 5

Tabla 2: Identificación de variables de objetivo específico #1 7

Tabla 3: Identificación de variables de objetivo específico #2 9

Tabla 4: Identificación de variables de objetivo específico #3 11

Tabla 5: Identificación de variables de objetivo específico #4 13

Tabla 6: Identificación de variables de objetivo específico #5 14

Tabla 7: Tabla de objetivos, indicadores y fórmulas 15

Tabla 8: Valorización de variables de objetivo específico #1 17

Tabla 9: Tabla de resultados de métricas.....19

Tabla 10: Tabla de datos técnicos del motor de la BES 33

Tabla 11: Tabla de datos técnicos del motor de las HPS 34

Tabla 12: Especificaciones técnicas principales del conductor de media tensión.....43

Tabla 13: Especificaciones técnicas principales del conductor de baja tensión.....44

Tabla 14: Especificaciones técnicas principales del transformador 46

Tabla 15: Especificaciones técnicas principales.....49

Tabla 16: Especificaciones técnicas principales del interruptor 50

Tabla 17: Especificaciones técnicas principales del seccionador de puesta a tierra....51

Tabla 18: Datos de placa del motor de HPS 67

Tabla 19: Equipos 68

Tabla 20: Barras 69

Tabla 21: Cables.....69

Tabla 22: Cargas 69

Tabla 23: Contratos en fase de explotación 76

Tabla 24: Contratos en fase de exploración 76

Tabla 25: Tabla de relación entre objetivos específicos y requerimientos 78

Tabla 26: Características de cargas de procesos preliminares 80

Tabla 27: Consumo de potencia en barra del SW2 81

Tabla 28: Consumo de potencia en barra MCC-1 o MCC-2 82

Tabla 29: Consumo de potencia en barra SW3.....82

Tabla 30: Consumo de potencia en barra SW1.....83

Tabla 31: Selección de transformador TR-ESP-1 o TR-ESP-2.....84

Tabla 32: Tabla de datos técnicos del motor de las HPS 84

Tabla 33: Tabla de datos técnicos del motor de las BES 86

Tabla 34: Tabla de datos técnicos del generador.....93

Tabla 35: Tabla de datos técnicos de la barra de baja tensión LV1 y LV2.....94

Tabla 36: Tabla de datos técnicos del transformador elevador 94

Tabla 37: Tabla de datos técnicos de la barra de media tensión SW1 95

Tabla 38: Tabla de datos técnicos del conductor de $400\mathrm{mm}^2$ de media tensión 95

Tabla 39: Tabla de datos técnicos de la barra de media tensión SW2 96

Tabla 40: Tabla de datos técnicos de la barra de media tensión SW3 96

Tabla 41: Tabla de datos técnicos del motor HPS.....97

Tabla 42: Niveles de tensión en barras (Escenario 1) 98

Tabla 43: Niveles de cargas en cables (Escenario 1).....99

Tabla 44: Niveles de cargas en transformadores (Escenario 1) 99

Tabla 45: Niveles de cargas en motores (Escenario 1) 100

Tabla 46: Niveles de cargas en generadores (Escenario 1) 101

Tabla 47: Niveles de tensión en barras (Escenario 2) 101

Tabla 48: Niveles de cargas en cables (Escenario 2).....102

Tabla 49: Niveles de cargas en transformadores (Escenario 2) 102

Tabla 50: Niveles de cargas en motores (Escenario 2) 103

Tabla 51: Niveles de cargas en generadores (Escenario 2) 104

Tabla 52: Corrientes de cortocircuito monofásico en barras (Escenario 1).....105

Tabla 53: Corrientes de cortocircuito bifásico a tierra en barras (Escenario 1).....106

Tabla 54: Corrientes de cortocircuito bifásico en barras (Escenario 1).....107

Tabla 55: Corrientes de cortocircuito trifásico en barras (Escenario 1).....108

Tabla 56: Corrientes de cortocircuito monofásico en barras (Escenario 2).....109

Tabla 57: Corrientes de cortocircuito bifásico a tierra en barras (Escenario 2).....110

Tabla 58: Corrientes de cortocircuito bifásico en barras (Escenario 2).....111

Tabla 59: Corrientes de cortocircuito trifásico en barras (Escenario 2).....112

Tabla 60: Parte a: Tabla de datos técnicos switchgear 1 113

Tabla 61: Parte b: Tabla de datos técnicos switchgear 1 114

Tabla 62: Parte c: Tabla de datos técnicos switchgear 1.....115

Tabla 63: Parte d: Tabla de datos técnicos switchgear 1 116

Tabla 64: Parte e: Tabla de datos técnicos switchgear 1 117

Tabla 65: Parte f: Tabla de datos técnicos switchgear 1 118

Tabla 66: Parte a: Tabla de datos técnicos Switchgear 2.....119

Tabla 67: Parte b: Tabla de datos técnicos switchgear 2 120

Tabla 68: Parte c: Tabla de datos técnicos switchgear 2.....121

Tabla 69: Parte d: Tabla de datos técnicos switchgear 2 122

Tabla 70: Parte e: Tabla de datos técnicos switchgear 2 123

Tabla 71: Parte f: Tabla de datos técnicos switchgear 2 124

Tabla 72: Parte a: Tabla de datos técnicos switchgear 3 125

Tabla 73: Parte b: Tabla de datos técnicos switchgear 3 126

Tabla 74: Parte c: Tabla de datos técnicos switchgear 3.....127

Tabla 75: Parte d: Tabla de datos técnicos switchgear 3 128

Tabla 76: Parte e: Tabla de datos técnicos switchgear 3 129

Tabla 77: Parte f: Tabla de datos técnicos switchgear 3 130

Tabla 78: Parte a: Tabla de datos técnicos MCC1 y MCC2.....131

Tabla 79: Parte b: Tabla de datos técnicos MCC1 y MCC2.....132

Tabla 80: Tabla de datos técnicos TR-MCC1 y TR-MCC2 133

Tabla 81: Tabla de datos técnicos del banco de condensadores 134

Tabla 82: Tabla resumen de eventos de salida intempestiva de generadores 146

Tabla 83: Esquema de rechazo de carga recomendado 147

Tabla 84: Capacidad de barra de Switchgear 1.....150

Tabla 85: Ajuste de protecciones en el lado primario de MVU-SW1.....150

Tabla 86: Ajuste de protecciones en el lado secundario de MVU-SW1 150

Tabla 87: Capacidad de HPS.....151

Tabla 88: Ajuste de protecciones en el lado primario de SW2-HPS 152

Tabla 89: Ajuste de protecciones en el lado secundario de SW2-HPS.....152

Tabla 90: Capacidad de barra de SW2 152

Tabla 91: Ajuste de protecciones en el lado primario de SW1-SW2.....153

Tabla 92: Ajuste de protecciones en el lado secundario de SW1-SW2 153

Tabla 93: Capacidad de TR-MCC1 153

Tabla 94: Ajuste de protecciones en el lado primario de SW3-TRMCC1.....154

Tabla 95: Ajuste de protecciones en el lado secundario de SW3-TRMCC1 154

Tabla 96: Capacidad de SW3 154

Tabla 97: : Ajuste de protecciones en el lado primario de SW1-SW3.....155

Tabla 98: Ajuste de protecciones en el lado secundario de SW1-SW3 155

Lista de Figuras

Pág.

Figura 1: Tendencia de hidrocarburos en América del Sur -1 2

Figura 2: Tendencia de hidrocarburos en América del Sur - 2..... 4

Figura 3: Planteamiento de la confiabilidad 20

Figura 4: Planteamiento de la planta de procesos.....22

Figura 5: Ubicación del bloque 66 24

Figura 6: Comparativo entre crudo liviano, pesado y demanda 29

Figura 7: Representación topológica del diagrama unifilar en etapas tempranas 31

Figura 8: Cable Redalead 32

Figura 9: Conjunto motor-BES 65

Figura 10: Datos de placa del motor de BES 66

Figura 11: Conjunto motor y bombas horizontal de HPS.....66

Figura 12: Topología de la red aislada 68

Figura 13: Diagrama de bloques de cumplimiento de objetivos específicos 73

Figura 14: Gobernador de tensión en generadores.....135

Figura 15: Gobernador de frecuencia en generadores 136

Figura 16: Tensión en barra A (p.u.) luego de la desconexión de un generador 137

Figura 17: Frecuencia en barra A (p.u.) luego de la desconexión de un generador..138

Figura 18: Tensión en barra A SW1 (p.u.) luego de la desconexión de dos generadores.....139

Figura 19: Frecuencia en barra A (p.u.) luego de la desconexión de dos generadores.....139

Figura 20: Tensión en barra A SW1 (p.u.) luego de la desconexión de tres generadores.....140

Figura 21: Frecuencia en barra A (p.u.) luego de la desconexión de tres generadores.....141

Figura 22: Tensión en barra A SW1 (p.u.) luego de la desconexión de una HPS.....142

Figura 23: Frecuencia en barra A (p.u.) luego de la desconexión de una HPS 142

Figura 24: Tensión en barra A SW1 (p.u.) luego de la desconexión de dos HPS.....143

Figura 25: Frecuencia en barra A (p.u.) luego de la desconexión de dos HPS.....144

Figura 26: Tensión en barra A SW1 (p.u.) luego de la desconexión de tres HPS.....145

Figura 27: Frecuencia en barra A SW1 (p.u.) luego de la desconexión de tres HPS 145

Figura 28: Tensión SW1 BA luego que actúe la etapa I del ERACMF.....147

Figura 29: Frecuencia SW1 BA luego que actúa la etapa I del ERACMF.....148

Figura 30: Tensión SW1 BA luego que actúa la etapa II del ERACMF.....149

Figura 31: Frecuencia SW1 BA luego que actúe la etapa II del ERACMF.....149

Figura 32: Cortocircuito trifásico en barra de SW1 156

Figura 33: Cortocircuito bifásico en barra de SW1 157

Figura 34: Cortocircuito trifásico en barra de SW2.....158

Figura 35: Cortocircuito bifásico en barra de SW2 159

Figura 36: Cortocircuito trifásico en barra de SW3.....160

Figura 37: Cortocircuito bifásico en barra de SW3 161

Figura 38: Cortocircuito trifásico en barra de MCC-1 162

Figura 39: Cortocircuito bifásico en barra de MCC-1.....163

Introducción

La generación y distribución de energía eléctrica en áreas remotas, como la selva peruana, enfrenta desafíos significativos debido a la ausencia de infraestructura de transmisión interconectada con el Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN). Este proyecto se desarrolla en un campo petrolero ubicado en la selva peruana, donde la dependencia de un sistema eléctrico aislado es esencial para asegurar el funcionamiento ininterrumpido de las operaciones de extracción y procesamiento de crudo.

Inicialmente, el suministro de energía en el campo petrolero dependía de dos grupos electrógenos que abastecían a las instalaciones tempranas a través de una configuración radial. Sin embargo, el aumento en la demanda de energía para nuevas instalaciones de extracción de crudo y reinyección de agua ha generado la necesidad de diseñar una ampliación del sistema eléctrico existente.

El objetivo principal de este proyecto es diseñar y especificar las ampliaciones necesarias para asegurar un suministro de energía robusto y confiable, que sea capaz de satisfacer las crecientes demandas operativas del campo petrolero. El diseño se fundamentará en las normativas vigentes del sector hidrocarburos, tanto a nivel nacional como internacional, y se complementará con métodos de cálculo convencionales y simulaciones avanzadas de flujo de carga y cortocircuito mediante el software Power Factory.

La selección óptima de cables, barras, switchgears y transformadores, así como la implementación de una configuración de secundario selectivo, son aspectos críticos para lograr un sistema eficiente y fiable. Los resultados de este proyecto no solo contribuirán al desarrollo sostenible del campo petrolero, sino que también ofrecerán una solución práctica y replicable en otros proyectos ubicados en áreas remotas que enfrentan desafíos similares.

Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

1.1 Generalidades

En el presente estudio se pretende dar a conocer los lineamientos para diseñar y modelar futuros proyectos de extracción de crudo y reinyección de agua en pozos petroleros en el país, teniendo en cuenta las últimas herramientas computacionales, normatividad vigente y experiencia en el rubro.

La región de Loreto fue seleccionada para plantear el diseño de ingeniería y es escogida por sus características, donde sabemos que se encuentra una gran reserva de crudo en sus profundidades, sin embargo, dada su geografía, por ahora, no se puede suministrar energía mediante la interconexión a la red eléctrica del SEIN, razón por la cual se debe optar por diseñar un sistema aislado.

El proyecto, cuenta con ciertos desafíos. En cuanto a su ubicación se puede mencionar a las descargas atmosféricas, altas temperaturas, traslados fluviales, precipitaciones de lluvias intensas, diversidad de flora y fauna, entre otras. En cuanto a la actividad industrial, se debe tener en cuenta principalmente el ambiente explosivo, ocasionado por la presencia de gases inflamables, por lo que se debe considerar el uso de áreas clasificadas, para diseñar los subsistemas eléctricos.

Es materia de este estudio, obtener un estándar de diseño para el sistema aislado del lote petrolero, el cual cumpla no tan solo con las normas referidas al sector de hidrocarburos, si no también, incluir estándares más exigentes, software de diseño eléctrico y nuevas tecnologías; los cuales nos generen un proyecto de gran calidad, salvaguardando la seguridad del personal y el medio ambiente de la zona de afluencia.

Figura 1:
Tendencia de hidrocarburos en América del Sur - 1.

Nota: Perupetro

1.2 Descripción del problema de investigación

1.2.1 Situación problemática

La empresa petrolera, que iniciará operaciones de extracción de crudo, debe contar con un sistema eléctrico aislado, al no poder conectarse al sistema eléctrico interconectado, dada las condiciones geográficas de su ubicación, en dicho sistema aislado, la empresa debe proyectar sus mayores esfuerzos para generar, transformar y distribuir energía eléctrica; teniendo como consigna el asegurar su propia calidad de energía eléctrica y seguridad.

La empresa que extrae crudo en el lote petrolero, para lograr lo antes mencionado, sabe que el sistema aislado debe ser muy eficiente y confiable. Se debe buscar los altos estándares, con los que deben contar sus diferentes equipos, para realizar el proceso de extracción de crudo, separación de crudo, agua y gases y reinyección de agua.

El motivo por el cual se deben contar con diferentes equipos y procesos es debido a que, el crudo que se extrae en su mayoría, en el territorio nacional, es pesado, entiéndase con un nivel bajo °API, crudo pesado, el cual debe ser refinado con mayor exigencia a un crudo liviano, aumentando así, las exigencias de sus estándares.

A esto, se suma, que no existen normas obligatorias, que regulen la generación o distribución de la energía eléctrica en un sistema eléctrico aislado, por lo que el crecimiento de la planta debe ser ordenado y debe obedecer a un estándar predefinido o un sistema integrado.

Por lo antes mencionado, se evidencian dos grandes problemas como, diversidad tecnológica y de soluciones, y alto riesgo eléctrico, en caso no se defina un estándar de diseño preliminar. El primer problema genera necesidad de diversos especialistas, extensión de plazos de entrega, dificultad para encontrar repuestos e inconveniente de coordinación interdisciplinaria; por lo que, en líneas generales, se proyecta una disminución en la eficiencia y seguridad del proyecto.

Este estudio, pretende controlar dichos efectos, mediante el adecuado diseño de la planta de extracción de crudo y reinyección de agua, generando a su vez un estándar de

alto nivel, que brinde las herramientas tecnológicas, normativas y computacionales, para dicho fin.

Figura 2:
Tendencia de hidrocarburos en América del Sur - 2

Region	2008 (Actual)		2030 (Projected)	
	Gravity (°API)	Sulfur (wt%)	Gravity (°API)	Sulfur (wt%)
North America	31.2	1.21	28.7	1.66
Latin America	25.1	1.59	23.5	1.57
Europe	37.1	0.37	37.4	0.38
Commonwealth of Independent States	32.5	1.09	35.1	0.97
Asia-Pacific	35.4	0.16	35.7	0.16
Middle East	34.0	1.75	33.9	1.84
Africa	36.5	0.31	37.1	0.26
World Average	33.0	1.1	32.9	1.3

Nota: ICCT,2011

1.2.2 Problema a resolver

Inadecuado diseño del crecimiento del sistema eléctrico de una planta de extracción de crudo y reinyección de agua en un lote petrolero.

a) Problema general

¿Cómo se generará un diseño eficiente de un sistema eléctrico de una planta de extracción de crudo y reinyección de agua en un lote petrolero?

b) Problemas específicos

¿Cómo es el diseño eléctrico tradicional para la planta de extracción de crudo y reinyección de agua, en un lote petrolero?

¿Cuál es el diseño preliminar del sistema eléctrico de la planta de extracción de crudo y reinyección de agua, en un lote petrolero y cuál es su viabilidad?

¿Cómo son las especificaciones técnicas de los equipos eléctricos y diseños finales del sistema eléctrico?

¿Cómo es el estudio pre operativo que garantizará el desempeño y seguridad?

¿Cómo es la evaluación del sistema eléctrico de la planta de extracción de crudo y reinyección de agua en un lote petrolero?

1.3 Objetivos del estudio

1.3.1 Objetivo general

Diseñar un sistema eléctrico eficiente de una planta de extracción de crudo y reinyección de agua en un lote petrolero.

1.3.2 Objetivos específicos

- Caracterizar el diseño eléctrico tradicional de la planta de extracción de crudo y reinyección de agua, en un lote petrolero.
- Detallar el diseño preliminar.
- Especificar técnicamente los equipos eléctricos y realizar los diseños finales del sistema eléctrico.
- Realizar el estudio preoperativo, garantizando desempeño y seguridad.
- Evaluar el diseño del sistema eléctrico de la planta de extracción de crudo y reinyección de agua en un lote petrolero.

1.3.3 Indicadores de logro de los objetivos

La validación del diseño del crecimiento del sistema eléctrico de extracción de crudo y reinyección de agua, en un lote petrolero, se dará a través de la calificación de los indicadores seleccionados, con la finalidad de justificar el cumplimiento de nuestros objetivos específicos. En la tabla 1, se presenta el rango que garantiza la calificación del indicador de nivel:

Tabla 1:
Relación global entre el nivel de referencia y su significado

Nivel	Rango	Valor medio	Significado
5	75-100%	87.5%	Muy Bueno
4	60-74%	67%	Bueno
3	55-59%	57%	Regular
2	40-54%	47%	Malo
1	0-39%	19.5%	Muy malo

Nota: Tabla propia

A continuación, procedemos a identificar las variables necesarias, para el cumplimiento de cada objetivo específico.

a) Objetivo 1: Caracterizar el diseño eléctrico inicial de la planta de extracción de crudo y reinyección de agua, en un lote petrolero.

Durante las facilidades tempranas de producción, se evidencia la energización de la planta, a través de dos grupos electrógenos, sincronizados a través de un tablero de sincronización y el sistema eléctrico aislado es radial. El sistema eléctrico, no cuenta con un estudio de coordinación de protecciones, rechazo de carga, flujo de carga y cortocircuito.

En la siguiente Tabla 2, se procede a mencionar las variables y sus principales indicadores, los cuales nos brindan la ponderación, que garantiza, la necesidad de un diseño sólido y eficiente.

Tabla 2:
Identificación de variables de objetivo específico #1

Variables	Indicadores	Nivel	Rango	Descripción
X1.1 Topología	Secundario selectivo con reserva de generación y equipos eléctricos	5	75-100%	Muy bueno
	Secundario selectivo con reserva de generación	4	60-74%	Bueno
	Secundario selectivo en generación y radial en cargas	3	55-59%	Regular
	Radial con reserva de generación	2	40-54%	Malo
	Radial sin reserva de generación	1	0-39%	Muy malo
X1.2 Combustible del generador	Auto sostenible mediante la planta petrolera y a bajo costo	5	75-100%	Muy bueno
	Auto sostenible mediante la planta petrolera y a costo medio	4	60-74%	Bueno
	Auto sostenible mediante la planta petrolera y a costo alto	3	55-59%	Regular
	Compra a terceros con costo medio	2	40-54%	Malo
	Compra a terceros con costo alto	1	0-39%	Muy malo
X1.3 Estudios eléctricos de flujo de potencia, cortocircuito, protecciones y rechazo de carga	Cuenta con estudio de flujo de potencia, corto circuito, coordinación de protecciones y arranque de motores	5	75-100%	Muy bueno
	Cuenta con estudio de flujo de potencia, corto circuito y coordinación de protecciones	4	60-74%	Bueno
	Cuenta con estudio de flujo de potencia y corto circuito	3	55-59%	Regular
	Cuenta con estudio de flujo de potencia	2	40-54%	Malo
	No cuenta con estudios	1	0-39%	Muy malo
X1.4 Cumple con la filosofía de operación	Diseño cumple con las expectativas de la filosofía de operación	5	75-100%	Muy bueno
	Diseño cumple parcialmente con las expectativas de la filosofía de operación	4	60-74%	Bueno
	Parte del diseño se acerca a la expectativa de la filosofía	3	55-59%	Regular
	El diseño no cumple las expectativas de la filosofía de operación	2	40-54%	Malo
	El diseño va en contra de la filosofía de operación	1	0-39%	Muy malo

Nota: Tabla propia

b) Objetivo 2: Desarrollar el diseño eléctrico preliminar

Los criterios que verifican el logro del objetivo 2, resultan luego de realizar el modelado en el software Power Factory, ingresar parámetros eléctricos y ejecutar el flujo de potencia. Al realizar el flujo de potencia, debemos verificar los parámetros de nivel de tensión en barras, nivel de carga de cables, nivel de carga en transformadores, nivel de carga en motores, nivel de carga en generadores y frecuencia.

El Procedimiento técnico del comité de operación económica del SEIN, PR-09: “Coordinación de la operación en tiempo real del SEIN”, da nociones de valores idóneos, de los parámetros eléctricos, bajo condición normal, los cuales fueron tomados como referencia. Sin embargo, dado que estamos en un sistema aislado, se está ampliando el rango de operación normal, según la Tabla 3, el cual da nociones de la condición de los parámetros eléctricos, los cuales deben ponderar una calificación para nuestro objetivo.

Tabla 3:
Identificación de variables de objetivo específico #2

Variables	Indicadores	Nivel	Rango	Descripción
X2.1 Nivel de tensión en barra (pu)	Tensión ha aumentado hasta el 1.5% o disminuido hasta el 1.5%	5	75-100%	Muy bueno
	Tensión ha aumentado hasta el 2.5% o disminuido hasta el 2.5%	4	60-74%	Bueno
	Tensión ha aumentado hasta el 5% o disminuido hasta el 5%	3	55-59%	Regular
	Tensión ha aumentado hasta el 7.5% o disminuido hasta el 7.5%	2	40-54%	Malo
	Tensión ha aumentado hasta el 10% o disminuido hasta el 10%	1	0-39%	Muy malo
X2.2 Nivel de carga en cable	Carga de conductor de 40 a 60%	5	75-100%	Muy bueno
	Carga de conductor de 60 a 80%	4	60-74%	Bueno
	Carga de conductor de 80 a 100%	3	55-59%	Regular
	Carga de conductor menor a 40%	2	40-54%	Malo
	Carga de conductor mayor a 100%	1	0-39%	Muy malo
X2.3 Nivel de carga en transformador	Carga de transformador de 60 a 80%	5	75-100%	Muy bueno
	Carga de transformador de 80 a 100%	4	60-74%	Bueno
	Carga de transformador de 40 a 60%	3	55-59%	Regular
	Carga de transformador de 20 a 40%	2	40-54%	Malo
	Carga de transformador menor a 20%	1	0-39%	Muy malo
X2.4 Nivel de carga en motor	Carga de motor de 60 a 80%	5	75-100%	Muy bueno
	Carga de motor de 80 a 100%	4	60-74%	Bueno
	Carga de motor de 40 a 60%	3	55-59%	Regular
	Carga de motor de 20 a 40%	2	40-54%	Malo
	Carga de motor menor a 20%	1	0-39%	Muy malo
X2.5 Nivel de carga en generador	Carga de generador de 60 a 80%	5	75-100%	Muy bueno
	Carga de generador de 80 a 100%	4	60-74%	Bueno
	Carga de generador de 40 a 60%	3	55-59%	Regular
	Carga de generador de 20 a 40%	2	40-54%	Malo
	Carga de generador menor a 20%	1	0-39%	Muy malo
X2.6 Frecuencia	Frecuencia del sistema menor al nominal, hasta al 0.2%	5	75-100%	Muy bueno
	Frecuencia del sistema menor que 0.2% al 0.4%	4	60-74%	Bueno
	Frecuencia del sistema menor a 0.4% al 0.6%	3	55-59%	Regular
	Frecuencia del sistema menor que 0.6% hasta 1%	2	40-54%	Malo
	Frecuencia del sistema menor que 1%	1	0-39%	Muy malo

Nota: Tabla propia

c) Objetivo 3: Especificar técnicamente los equipos eléctricos

Luego de conseguir la aprobación del análisis de flujo de potencia, podemos conseguir parámetros eléctricos nominales de los principales equipos eléctricos que debemos especificar, como potencia, tensión, relación de transformación, capacidad de corriente y frecuencia.

Para lograr la especificación de equipos, se debe complementar el análisis de flujo de carga con el análisis de cortocircuito del sistema eléctrico aislado.

Dentro de los equipos que se especificarán, está el transformador, centro de control de motores y Switchgear; quedando fuera de especificación, equipos que vienen garantizados por fabricantes propios del rubro de generación y procesos.

Partiendo de los parámetros nominales, los indicadores de logro que garantizarán el desarrollo óptimo del objetivo 3, son las normas internacionales, vigentes y relacionadas al equipo que se debe especificar.

En la siguiente Tabla 4, se pretende mostrar, las principales referencias de normas internacionales, las cuales sirven de bases de diseño, para elaborar la especificación técnica y los diseños finales, teniendo en cuenta el nivel de cumplimiento de estas, se procede a ponderar una calificación para nuestro objetivo.

Tabla 4:
Identificación de variables de objetivo específico #3

Variables	Indicadores	Nivel	Rango	Descripción
X3.1 Nivel de cumplimiento de la norma: IEEE C57.12 "Estándar IEEE para requisitos generales para transformadores de distribución, potencia y regulación, sumergidos en aceite"	Norma técnica, analizada y comprendida. Especificación técnica, organizada en base a dicha norma.	5	75-100%	Muy bueno
	Norma técnica de referencia. Especificación técnica, organizada en base a extractos puntuales de la norma.	4	60-74%	Bueno
	Especificación técnica, elaborada con información de terceros, los cuales usan de referencia la norma.	3	55-59%	Regular
	Especificación técnica, elaborada en base a los resultados del objetivo 1 y experiencias personales.	2	40-54%	Malo
	Especificación técnica, elaborada sin conocimiento de la norma en referencia.	1	0-39%	Muy malo
X3.2 Nivel de cumplimiento de la norma: IEC 6271 "Estándar IEC para el control y maniobra en alta tensión con envolvente metálica, para tensiones nominales de 1kV hasta 52kV inclusive"	Norma técnica, analizada y comprendida. Especificación técnica, organizada en base a dicha norma.	5	75-100%	Muy bueno
	Norma técnica de referencia. Especificación técnica, organizada en base a extractos puntuales de la norma.	4	60-74%	Bueno
	Especificación técnica, elaborada con información de terceros, los cuales usan de referencia la norma.	3	55-59%	Regular
	Especificación técnica, elaborada en base a los resultados del objetivo 1 y experiencias personales.	2	40-54%	Malo
	Especificación técnica, elaborada sin conocimiento de la norma en referencia.	1	0-39%	Muy malo

Nota: Tabla propia

d) Objetivo 4: Realizar el estudio preoperativo, garantizando desempeño y seguridad

Hasta el momento se han evaluado variables que sirven para ponderar el desempeño de nuestro diseño, en estado de operación normal, sin embargo, para fines de realizar un estudio preoperativo que garantice el buen estado del sistema aislado, en todo momento, debemos evaluar momentos en los que el sistema se encuentre en un límite considerado con nivel 2 y 3, y que, pese a ello, pueda tener la propiedad de volver a un estado de operación normal.

Por lo tanto, en el objetivo 4, evaluaremos contingencias de tensión y frecuencia, los cuales completarán nuestro análisis sobre nuestro sistema.

En caso se presente caída de tensión en nuestras barras, se deberá evaluar la consideración de un banco de condensadores, el cual corrija la tensión en barras, hasta un nivel óptimo 1 p.u., sin descuidar, que, al generador no debe ingresar potencia reactiva.

En caso se presente la salida intempestiva de un generador, la teoría indica que se originaría una sub-frecuencia, motivo por el cual, para no permitir el colapso de la planta petrolera, se propone como solución, la instalación de un sistema de rechazo de carga. La carga escogida para el rechazo de carga, serán las bombas horizontales, dado que su parada temporal, no perjudica la producción de crudo, en un determinado tiempo.

En caso se presenten fallas en equipos eléctricos, debemos contar con ajustes de protecciones, que cumplan con la función de aislar la falla y evitar una parada de planta total, para este fin se propone la función de sobre corriente entre fases, no direccional. La protección de sobre corriente homopolar sensitiva, se evaluará para futuros etapas de crecimiento, luego de evaluar el comportamiento de la planta.

La totalidad de estos estudios, son alcances del Informe de Suficiencia y sirven a manera de verificación para el Objetivo 4. A continuación, en la Tabla 5, mostraremos los indicadores de logro relacionado, a lo antes mencionado.

Tabla 5:
Identificación de variables de objetivo específico #4

Variables	Indicadores	Nivel	Rango	Descripción
X4.1 Implementación de banco de condensadores	Tensión ha aumentado, luego de la implementación, entre el rango de 97.5% hasta el 102.5%	5	75-100%	Muy bueno
	Tensión ha aumentado, luego de la implementación, hasta el 97.5%	4	60-74%	Bueno
	Tensión ha aumentado, luego de la implementación, entre el 95% hasta el 97.5%	3	55-59%	Regular
	Tensión ha aumentado, luego de la implementación, entre el 92.5% hasta el 95%	2	40-54%	Malo
	Tensión ha aumentado, luego de la implementación, por debajo de 92.5%	1	0-39%	Muy malo
X4.2 Implementación de rechazo de carga	Actuación del sistema de rechazo de carga (I etapa), por frecuencia del sistema menor al 97%	5	75-100%	Muy bueno
	Actuación del sistema de rechazo de carga (II etapa), por frecuencia del sistema menor al 96%	4	60-74%	Bueno
	Actuación del sistema de rechazo de carga (III etapa), por frecuencia del sistema menor al 95%	3	55-59%	Regular
	No actuación del sistema de rechazo de carga (I etapa), por frecuencia del sistema menor al 97%	2	40-54%	Malo
	No actuación del sistema de rechazo de carga (II etapa), por frecuencia del sistema menor al 96%	1	0-39%	Muy malo
X4.3 Implementación de ajustes de protecciones	Correcta operación del relé en módulo y tiempo	5	75-100%	Muy bueno
	Correcta operación del relé en módulo, con desviación del 10% del tiempo	4	60-74%	Bueno
	Correcta operación del relé en tiempo, con desviación del 10% del modulo	3	55-59%	Regular
	Incorrecta operación por tiempo o módulo	2	40-54%	Malo
	Incorrecta operación por tiempo y módulo	1	0-39%	Muy malo

Nota: Tabla propia

e) Objetivo 5: Evaluar el diseño del sistema eléctrico de la planta de extracción de crudo y reinyección de agua en un Lote Petrolero.

En el presente objetivo, debemos verificar que todo el diseño, cumpla con las necesidades de producción de petróleo, esto se debe verificar en la filosofía de operación de la planta.

Tabla 6:
Identificación de variables de objetivo específico #5

Variables	Indicadores	Nivel	Rango	Descripción
X5.1 Verificación con Filosofía de Operación	Diseño cumple con las expectativas de la filosofía de operación	5	75-100%	Muy bueno
	Diseño cumple parcialmente con las expectativas de la filosofía de operación	4	60-74%	Bueno
	Parte del diseño se acerca a la expectativa de la filosofía	3	55-59%	Regular
	El diseño no cumple las expectativas de la filosofía de operación	2	40-54%	Malo
	El diseño va en contra de la filosofía de operación	1	0-39%	Muy malo

Nota: Tabla propia

Finalmente, en la Tabla 7, se presentarán los objetivos, indicadores y fórmulas de las métricas correspondientes. Donde “n”, es la cantidad de indicadores de logro por objetivo específico y se considerará que todos los indicadores de logro, por objetivo, cuentan con el mismo valor de importancia.

Tabla 7:
Tabla de objetivos, indicadores y fórmulas

Objetivo Específico	Indicador de logro	Fórmula Métrica
O1) Caracterizar el diseño eléctrico tradicional de la planta de extracción de crudo y reinyección de agua, en un lote petrolero	X1.1 Topología X1.2 Combustible del generador X1.3 Balance de cargas X1.4 Cumple con la filosofía de operación	M.O1= (∑X1i)/n
O2) Desarrollar el diseño eléctrico preliminar y determinar su viabilidad técnica y económica	X2.1 Nivel de tensión en barra (pu) X2.2 Nivel de carga en cable X2.3 Nivel de carga en transformador X2.4 Nivel de carga en motor X2.5 Nivel de carga en generador X2.6 Frecuencia	M.O2= (∑X2i)/n
O3) Especificar técnicamente los equipos eléctricos y realizar los diseños finales del sistema eléctrico	X3.1 Nivel de cumplimiento de la norma IEEE C57.12 X3.2 Nivel de cumplimiento de la norma IEC 6271 X3.3 Nivel de cumplimiento de la norma IEC 60228	M.O3= (∑X3i)/n
O4) Realizar el estudio preoperativo, garantizando desempeño y seguridad	X4.1 Implementación de banco de condensadores X4.2 Implementación de rechazo de carga X4.3 Implementación de ajustes de protecciones	M.O4= (∑X4i)/n
O5) Evaluar el diseño del sistema eléctrico de la planta de extracción de crudo y reinyección de agua en un Lote Petrolero.	X5.1 Verificación con Filosofía de Operación	M.O5= (∑X5i)/n

Nota: Tabla propia

En cuanto al Objetivo 1, “caracterizar el diseño eléctrico tradicional de la planta de extracción de crudo y reinyección de agua, en un lote petrolero”, podemos mencionar que este se realizó de forma empírica, durante las etapas tempranas de extracción de crudo.

En base a lo antes mencionado, evidenciamos que el sistema era consistente, a un estudio de flujo de potencia, el cual tiene como límite, el estado estacionario. Cabe mencionar que, el sistema contaba con las siguientes limitaciones y problemas:

El combustible que necesitaban los grupos electrógenos ocasionaba un costo considerable por su adquisición y transporte mediante barcazas, en vez de aprovechar el mismo crudo extraído y procesado del lote petrolero.

Dada cualquier falla en el generador o alimentador principal, el sistema caía por completo, debido a que, se contaba con un sistema radial.

Si se suscitaba alguna falla, era muy probable que, sus protecciones no cuenten con selectividad, debido a que, no se contaba con un estudio de coordinación de protecciones.

La secuencia de energización era en base a experiencias de ensayo y error, sin planificación de la supervisión de parámetros de tensión y frecuencia, debido a que, no se contaba con un estudio de arranque de motores, lo que ocasionaba oscilaciones e incluso el colapso del sistema.

El mal dimensionamiento de barras, interruptores, conductores y otros, ocasionaban eventos ante cortocircuitos de mayor magnitud, ocasionado por la falta de estudio de cortocircuito.

Finalmente, dada la poca planificación en el sistema eléctrico aislado, se acostumbraba a reubicar componentes eléctricos, ocasionando que los diagramas unifilares, queden obsoletos en corto tiempo, dejando al personal sin planos referenciales para intervenir equipos y generando mayor riesgo eléctrico, debido a que, no siempre los equipos eléctricos, eran reubicados en un lugar que justifique su diseño.

Mencionado esto, podemos realizar la valorización del objetivo 1:

Tabla 8:
Valorización de variables de objetivo específico #1

Variables	Indicadores	Nivel	Rango	Valor	Descripción
X1.1 Topología	Radial con reserva de generación	2	40-54%	47%	Malo
X1.2 Combustible del generador	Compra a terceros con costo medio	2	40-54%	47%	Malo
X1.3 Balance de cargas	Cuenta con estudio de flujo de potencia	2	40-54%	47%	Malo
X1.5 Cumple con la filosofía de operación	El diseño no cumple las expectativas de la filosofía de operación	2	40-54%	47%	Malo

Nota: Tabla propia

$$M.O_1 = \frac{\sum X_{1i}}{n} = \frac{47\% + 47\% + 47\% + 47\% + 47\%}{5} = 47\% \ (MALO)$$

En el Objetivo 2, “desarrollar el diseño eléctrico preliminar y determinar la viabilidad técnica y económica”, se realizó el flujo de potencia, en donde los valores de tensión se mantuvieron en un rango +-2.5%Vn, potencia entre el 60-80%Pn y la frecuencia disminuyó entre 0.2-0.4%fn. Consiguiendo como resultado, un nivel de indicadores del 80.6%, “Muy Bueno”. Ver detalle en Anexo C.

En el Objetivo 3, “especificar técnicamente los equipos eléctricos y realizar los diseños finales del sistema eléctrico”, se logró especificar los transformadores, tren de celdas y conductores; en base a las normas ya mencionadas. Ver detalle en Anexo C.

En el Objetivo 4, “realizar el estudio preoperativo, garantizando desempeño y seguridad”, se han evidenciado que, gracias a los estudios de flujo de carga, rechazo de carga y coordinación de protecciones; el circuito se mantiene estable, aún después de alguna contingencia. Ver detalles en Anexo C.

En el Objetivo 5, “evaluar el diseño del sistema eléctrico de la planta de extracción de crudo y reinyección de agua en un Lote Petrolero”, se verificó que el sistema eléctrico aislado, sea lo suficientemente robusto, como para evitar paradas de planta intempestivas, ocasionadas por diversos fenómenos eléctricos, los cuales vayan en dirección opuesta, a

los requerimientos ya planteados por la filosofía de operación. Se debe de tener en cuenta que, lo más importante es mantener la producción al más alto rendimiento posible, de esta manera se conseguirá seguir despachando crudo, sin tener alguna limitación en alguno de sus componentes. Cabe mencionar que, si la energización de la planta de procesos sufre un desperfecto, la extracción de crudo no se puede realizar, dado que es parte del circuito cerrado de vuestros procesos. De la misma forma sucede, en el sistema de bombeo de extracción de crudo, respecto a las demás etapas, pese a que se puedan contar con más pozos, se limita la producción, suceso no recomendable. Así mismo ocurre, con algún desperfecto en el sistema de bombeo de agua, dado que los tanques de agua solo soportarán una cierta cantidad de horas, posterior a ello, se deberá ejecutar la parada de planta total.

Para fines prácticos, se procederá a mostrar el cuadro resumen de los indicadores de logro del presente proyecto.

Tabla 9:
Tabla de resultados de métricas

Objetivo Específico	Indicador de logro	Métrica
O1) Caracterizar el diseño eléctrico tradicional de la planta de extracción de crudo y reinyección de agua, en un lote petrolero	X1.1 Topología X1.2 Combustible del generador X1.3 Balance de cargas X1.4 Cumple con la filosofía de operación	47%
O2) Desarrollar el diseño eléctrico preliminar y determinar su viabilidad técnica y económica	X2.1 Nivel de tensión en barra (pu) X2.2 Nivel de carga en cable X2.3 Nivel de carga en transformador X2.4 Nivel de carga en motor X2.5 Nivel de carga en generador X2.6 Frecuencia	80.6%
O3) Especificar técnicamente los equipos eléctricos y realizar los diseños finales del sistema eléctrico	X3.1 Nivel de cumplimiento de la norma IEEE C57.12 X3.2 Nivel de cumplimiento de la norma IEC 6271	67%
O4) Realizar el estudio preoperativo, garantizando desempeño y seguridad	X4.1 Implementación de banco de condensadores X4.2 Implementación de rechazo de carga X4.3 Implementación de ajustes de protecciones	76.6%
O5) Evaluar el diseño del sistema eléctrico de la planta de extracción de crudo y reinyección de agua en un Lote Petrolero.	X5.1 Verificación con Filosofía de Operación	90%

Nota: Tabla propia

1.4 Antecedentes investigativos

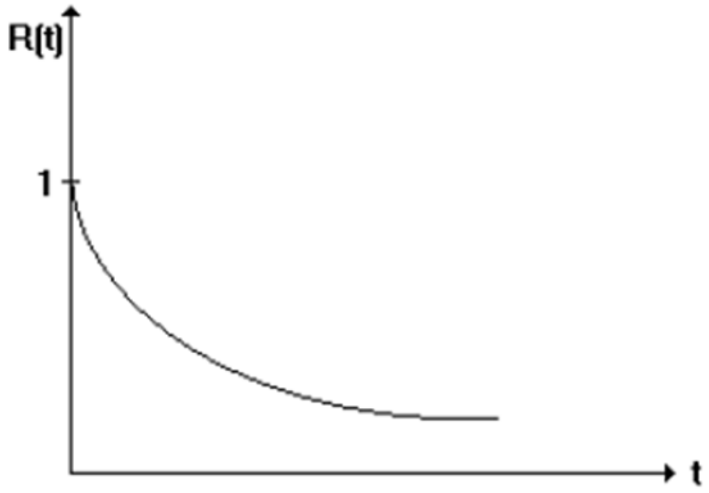
En el presente capítulo, se realiza una vista en el tiempo, acerca de investigaciones relacionadas con el presente estudio, en donde se evidencia que siempre se intentará optimizar procesos, ya sea en la etapa de diseño inicial, operación comercial o en una ampliación.

1.4.1 Evaluación de confiabilidad en sistemas eléctricos de distribución

Tesis para optar el grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería, desarrollado por Aldo Garay Arriagada Mass en la Pontificia Universidad Católica de Chile, en el año 1994.

En dicha Tesis, se evidencia la necesidad de contar con sistemas de distribución confiables en Chile, entiéndase por confiable, el minimizar los cortes de energía o maximizar la continuidad de suministro. Por tal motivo, define la variable dependiente "confiabilidad", en base a la variable independiente "tiempo", teniendo como premisa, que, al inicio de la operación, no es usual el tener fallas que generen la perdida de suministro, estas son más representativas a medida que pasa el tiempo. Véase la representación de lo antes mencionado en la siguiente figura.

Figura 3:
Planteamiento de la confiabilidad



Nota: : Aldo Garay

El autor, opta por escoger la Técnica de frecuencia y duración, luego de descartar el método de simulación estocástica de Monte Carlo y el método de análisis de Markov, debido a que solo se aplican para pocos estados en la red eléctrica, lo cual no sería apropiada para una red de distribución. La técnica de frecuencia y duración, en cambio, proporciona un modelo matemático, que brinda información de lo confiable que es un sistema eléctrico de distribución radial, con elementos como cables, interruptores y fusibles.

Sin embargo, al ser un modelo radial e ideal, cuenta con bastantes restricciones, tal y como lo menciona el autor en su Tesis.

Para efecto, propiamente del análisis de confiabilidad del diseño de la planta de extracción de crudo y reinyección de agua en el lote petrolero, nos basaremos en:

a) Topología con secundario selectivo, la cual brindará en caso de falla en un alimentador o barra, otro camino por el que, de forma automática, pueda ser transmitida la energía, sin provocar un corte de energía por contingencia y a su vez, brinde los tiempos que sean necesarios, para que el personal de mantenimiento intervenga la falla.

b) Uso de equipos eléctricos, como reserva. Dichas compras, son indudablemente justificadas, dado que la producción de crudo es altamente rentable y no podemos generar tiempos muertos.

1.4.2 Diseño de instalaciones eléctricas de una planta Merril&Crowe cumpliendo con la norma NFPA70

Trabajo de suficiencia profesional para optar el Título Profesional de Ingeniero Electricista, desarrollado por Martín Américo Rojas Enciso en la Universidad Nacional de Ingeniería, en el año 2019.

El alcance del diseño eléctrico de la planta Merril&Crowe, la cual sería usada en la minera de Tantahuatay, Cajamarca, tendría como protagonistas a la selección de conductores, bandejas y tubería conduit; bajo la norma NFPA70. La norma NFPA 70, Código Eléctrico Nacional, es una de las mejores herramientas en el diseño eléctrico, enfocado en la seguridad.

El autor, en su trabajo de suficiencia, muestra detalles del proceso de la minera Tantahuatay, brinda un concepto teórico de cómo se realizarán los cálculos de los elementos eléctricos, en base a la normativa NFPA 70, posterior a ello, enumera todas las cargas a alimentar, para a su vez iniciar con el procedimiento de cálculo y selección de conductores, bandejas y tuberías conduit.

Figura 4:
Planteamiento de la planta de procesos

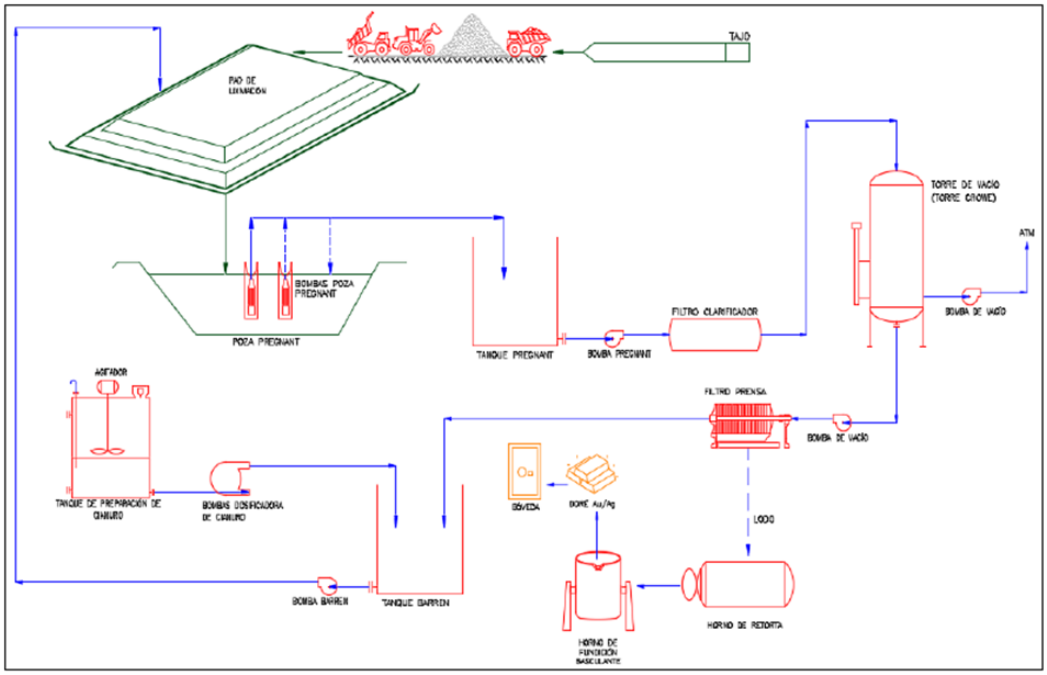


Fig.1.2 - Diagrama de flujo simplificado de planta de procesos Merrill & Crowe

Nota: : Martín Rojas Enciso

El trabajo de suficiencia es útil, debido a ciertos criterios de nuestro diseño del sistema eléctrico de la planta de extracción de crudo y reinyección de agua. Como se mencionó en nuestra problemática, se busca que, el rubro de hidrocarburos cuente con un estándar, dicho esto se puede tomar de ejemplo y emular estándares de otros sectores, como el sector minero, con la finalidad de encontrar mayor exigencia en cuanto a seguridad, las cuales salvaguarden al personal y a los equipos involucrados en el proyecto.

La información del trabajo de suficiencia será referencial, puesto que se contrastará, con las demás normas involucradas del sector de hidrocarburos, además, hay que tener en cuenta que, solo están referidas a conductores de baja tensión y canalización. Por lo

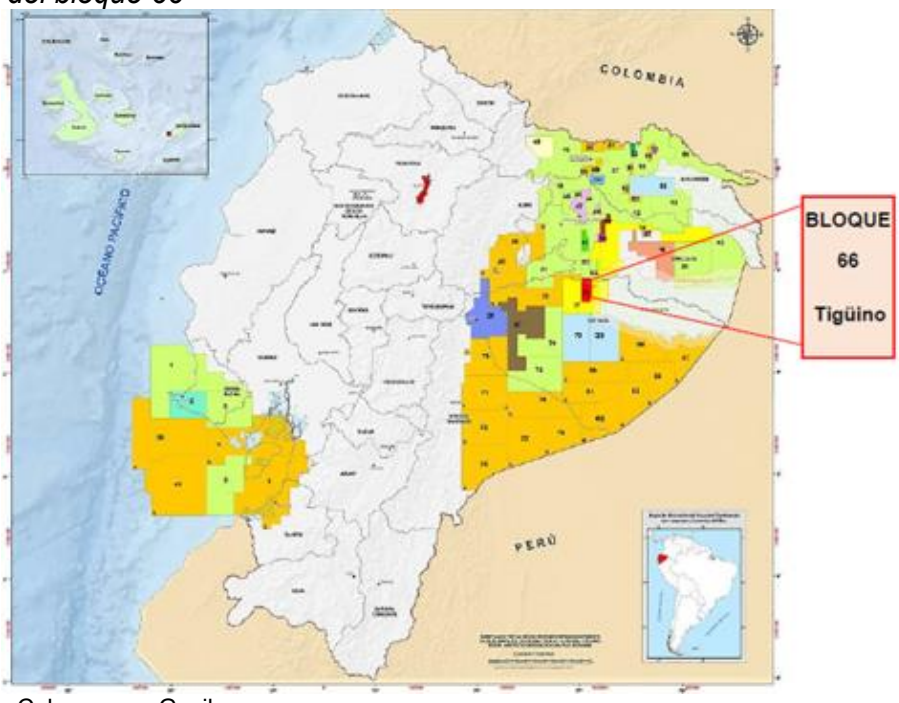
que, en el presente estudio, se deberá profundizar en otros temas como conductores de media tensión, estudios de preoperatividad y operatividad, etc.

1.4.3 Diseño de instalaciones eléctricas para la ampliación de una plataforma petrolera ubicada en el bloque 66

Trabajo de Titulación previo a la obtención del Título de Ingeniería Eléctrica, desarrollado por Leslie Estefanía Cabascango Gavilanes en la Escuela Politécnica Nacional de Quito, Ecuador, en el año 2020.

En el presente trabajo de titulación, se hace referencia a dos pozos de extracción de crudo existentes en el bloque 66 y al proyecto de ampliación de las facilidades eléctricas de cinco pozos de extracción de crudo adicionales, los cuales serán puestos en marcha en dos etapas, durante toda la ampliación. Bajo este contexto, el autor, analiza si la generación existente, es capaz de suministrar energía a los siete pozos que operarán, incluso de manera continua y simultánea, cabe recordar que, dada la ubicación en la selva ecuatoriana, el sistema eléctrico es aislado. Posterior al análisis, con resultados positivos, expone el marco teórico necesario, para el dimensionamiento de cables, transformadores, iluminación interna de salas eléctricas, iluminación exterior y puesta a tierra; apoyándose en las normas API-RP-500 y API-RP-540, para luego proceder con los cálculos justificativos.

Figura 5:
Ubicación del bloque 66



Nota: , Leslie Cabascango Gavilanes

En cuanto al modelado computacional, los softwares escogidos por el autor, son ETAP, para el diseño del sistema de puesta a tierra, flujo de potencia y cortocircuito, y el Dialux, para el diseño de iluminación interior y exterior.

Para fines del desarrollo del diseño del sistema eléctrico de la planta de extracción de crudo y reinyección de agua en un lote petrolero, se utilizará el software de simulación Power Factory, además, este trabajo sirve de referencia, dado que presenta una ingeniería básica de una ampliación de las facilidades eléctricas para la extracción de crudo, bajo normas del sector de hidrocarburos.

Es preciso mencionar, que dicho trabajo, cuenta con ciertas diferencias al presente estudio, las cuales presento a continuación:

a) El trabajo de suficiencia profesional, solo cuenta con las facilidades eléctricas de bombas de extracción de crudo (bombas electro sumergibles), a diferencia de nuestro proyecto de investigación, el cual adicional a lo antes mencionado, también presenta las facilidades eléctricas de bombas de reinyección de agua (bombas horizontales). Este punto es muy importante, dado que, por el tamaño de producción y

tiempo de operación, la tendencia en la proporción de crudo (disminuye) y agua (aumenta), motivo por el cual se debe proyectar ambas facilidades desde la etapa inicial.

b) El trabajo de suficiencia profesional, propone un sistema radial, a diferencia de nuestro proyecto de investigación, el cual propone como ya se mencionó antes, un sistema de secundario selectivo, con fines de aumentar la confiabilidad del sistema.

c) El trabajo de suficiencia profesional, propone una ampliación, a diferencia de nuestro proyecto de investigación, el cual propone un diseño desde cero.

d) El trabajo de suficiencia profesional, propone una ingeniería básica, a diferencia de nuestro proyecto de investigación, el cual propone un diseño de ingeniería básico extendido, el cual, adicional a los entregables que presenta el Trabajo de Suficiencia Profesional, mostrará un análisis para el sistema de rechazo de carga (con la finalidad de evitar un colapso del sistema por mínima frecuencia), estudio de coordinaciones (con la finalidad de tener un sistema con una adecuada coordinación y selectividad de los disparos por fallas eléctricas) y especificaciones técnicas de equipos (con la ayuda de los estudios de flujo de carga y cortocircuito).

e) El trabajo de suficiencia profesional, utiliza los softwares de ETAP y Dialux, a diferencia de nuestro proyecto de investigación, el cual utilizará el software Power Factory.

Capítulo II. Marco teórico y conceptual

2.1 Marco teórico

2.1.1 Marco legal

- **DS 052-93-EM: Reglamento de seguridad para el almacenamiento de hidrocarburos.**

  Decreto supremo, aprobado en el año 1993, el cual brinda lineamientos generales para el almacenamiento de hidrocarburos en todo el territorio peruano.

  En cuanto a instalaciones eléctricas, hace referencia al uso de la norma NFPA 70.

  En cuanto a áreas clasificadas, hace referencia al uso de la norma API-RP-500.

  En cuanto a corrientes estáticas y puestas a tierra, hace referencia al uso de la norma NFPA 77.

- **API RP-500: Práctica recomendada para la clasificación de ubicaciones para instalaciones eléctricas en instalaciones petroleras clasificadas como Clase I, División 1 y División 2.**

  Norma que detalla, la clasificación de áreas de una instalación petrolera, como el Lote Petrolero que se propone en el presente estudio. La clasificación se basará en estudiar los gases y líquidos inflamables y/o explosivos, que se pueden presentar en diferentes áreas de las instalaciones, en situaciones normales de operación y contingencias. A su vez, teniendo en cuenta que, según el triángulo del fuego, requerimos de oxígeno o aire y un foco de ignición, para generar fuego u explosión en las instalaciones, se pretende evitar la misma, diseñando y adquiriendo componentes eléctricos que eviten brindar la energía para dicho fin, en base a la clasificación de áreas, originada por lo antes mencionado.

- **NFPA 70: Código Eléctrico Nacional**

  Código Eléctrico Nacional Estadounidense, NEC 2023, aprobada su uso, para todos los trabajos eléctricos que se requieran; teniendo en cuenta la protección de instalaciones ante el riesgo de incendio.

  Para efectos de nuestro diseño, el código se utilizará en toda su extensión, para efectos de diseño del cableado, canalización, celdas, etc. Cabe mencionar también que, se utilizará el Capítulo 5, “Ocupaciones Especiales”, en donde se detalla las áreas clasificadas en locaciones peligrosas, Clase I, Clase II, Clase III, División 1 y División 2.

- **NFPA 70E: Norma para la seguridad eléctrica en lugares de trabajo**

  El diseño en estudio estará basado en dicha norma, la cual brinda lineamientos orientados a la seguridad eléctrica. Dentro de los principios de seguridad eléctrica elementales y básicos para nuestro diseño, se tomarán los siguientes: métodos de control de riesgo según jerarquía, protección de fallas a tierra, estandarización de equipos para reducción de errores humanos por mala operación en la maniobra, bloqueo y etiquetado, actualización de unifilares y establecimiento y verificación de condiciones de trabajo eléctricamente seguras.

  Mención aparte, merece el Anexo Informativo O, “Requerimiento de seguridad relacionados al diseño”, el cual brinda detalles a considerar en el diseño, para asegurar la integridad del sistema y personal operativo.

- **CNE Suministro 2011: Código Eléctrico Nacional, Suministro**

  El Código Eléctrico Peruano, brinda lineamientos de construcción, operación y mantenimiento, del equipamiento eléctrico requerido, para suministrar de energía eléctrica, a ciertas cargas. Dicho código nos brinda nociones del diseño eléctrico que se plantea en el presente estudio, las cuales se detallan en la sección 1, sección 2, sección 3, Parte 1 (Reglas para la instalación y mantenimiento de estaciones de suministro eléctrico y equipos), Parte 2 (Reglas de seguridad para la instalación y mantenimiento de líneas aéreas de suministro eléctrico y comunicaciones) y Parte

3 (Reglas de seguridad para la instalación y mantenimiento de líneas subterráneas de suministro eléctrico y comunicaciones).

- **IEC 62271: Switchgear de maniobra y control de alta tensión.**

  Normativa IEC 62271, Parte 200, la cual brinda detalles del diseño de Switchgear de maniobra y control de corriente alterna con envolvente metálica, para tensiones nominales superiores a 1kV y hasta 52kV inclusive.

  Cabe mencionar que, en nuestro diseño, la tensión de generación será en 480V y será transformada a 4160V para su distribución. La distribución se realizará mediante Switchgear en media tensión, basados en la normativa en mención.

  Se considerarán por los menos tres Switchgear, uno principal que distribuirá a los dos siguientes, en cuanto a los dos siguientes, alimentarán a las BES (bombas electrosumergibles) y HPS (bombas horizontales).

- **IEEE C57.12: Requisitos generales para transformadores de distribución, regulación y potencia, inmersos en aceite**

  Norma que brinda lineamientos para la elaboración de las especificaciones técnicas de los transformadores.

  Se sabe que, se utilizarán transformadores en la zona de los equipos de superficie para las bombas electro sumergibles, esto para reducir de media a baja tensión y alimentar el centro de control de motores, que a su vez alimentará las cajas de venteo.

- **IEC 60228: Conductores de cables aislados**

  Norma para conductores de cables aislados, el cual nos ayudará a especificar técnicamente al conductor y modelar en el software Power Factory, verificando el modelado, en base a la sección del conductor, resistencia óhmica y tipo de clase.

- **IEEE 399: Práctica recomendada para el análisis de sistemas de energía industriales y comerciales**

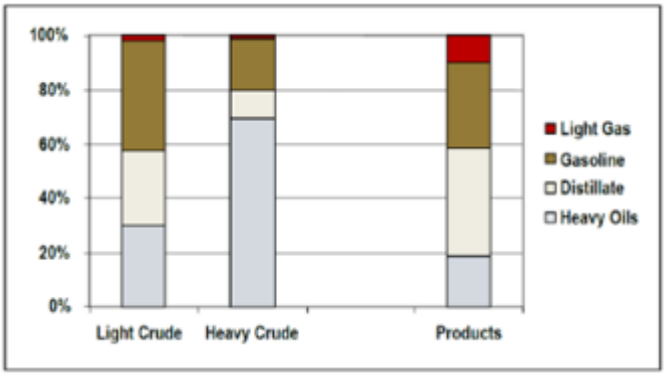
  Normativa que brinda nociones de cálculo de selección de conductor eléctrico. Mediante el análisis de temperatura, nos da factores de corrección por temperatura, por capacidad térmica del suelo y por agrupamiento.

2.1.2 Núcleo teórico

a) Filosofía de operación de las facilidades tempranas de producción

Cuando un lote petrolero, inicia operaciones, requiere de ciertas facilidades tempranas que brinden la posibilidad de extraer el crudo, con los mínimos recursos posibles, a manera de prueba. La calidad del crudo que se va a extraer en esta etapa inicial es de 20°API, no se espera encontrar gran proporción de agua (por un corto periodo), respecto al petróleo y gas. Cabe mencionar, que 20°API, es considerado un crudo pesado, razón por la cual, debe de pasar por un proceso de separación, calentamiento y deshidratación. En el siguiente gráfico de barras, podemos ver un comparativo entre crudo liviano, crudo pesado y la demanda de sus productos, en donde se evidencia que la mayor producción proveniente del crudo pesado cuenta con menor demanda en el mercado; a diferencia del crudo liviano.

Figura 6:
Comparativo entre crudo liviano, pesado y demanda



Nota: Ministerio del ambiente y desarrollo sostenible del Gobierno de Colombia

Ahora que conocemos la dinámica de producción y demanda del mercado, podemos deducir que el crudo pesado, cuenta con un proceso complejo para conseguir el aprovechamiento de sus productos, estos se dan, mediante los siguientes equipos y sistemas: bomba electro sumergible, separador trifásico, calentador, tanque de lavado de crudo, sistema de almacenamiento y despacho de crudo, sistema de venteo y mechero, sistema de almacenamiento y bombeo de diluyente, tanque de almacenamiento de diluyente, sistema de almacenamiento y bombeo de diésel, sistema de almacenamiento de agua de producción y agua industrial, sistema de tratamiento de agua fresca, planta de generación de nitrógeno, sistema de inyección de químicos, sistema de drenajes y sistema contra incendio.

En un inicio, el crudo es extraído a través de las bombas electro sumergibles, hasta el cabezal de pozo, desde ese punto es transmitido hacia el separador trifásico, el cual tiene la función de separar los gases, crudo y agua, que provienen desde el pozo.

En el separador trifásico, direcciona el gas hacia el quemador o mechero, donde se produce su combustión, direcciona el agua producida, hacia los tanques de almacenamiento de agua de producción y direcciona el crudo hacia el mezclador estático.

En el mezclador estático, se agrega diluyente al crudo, con la finalidad de mejorar su fluidez, posterior a ello, se envía el crudo al calentador.

En el calentador, se incrementa su temperatura, hasta conseguir liberar las partículas de agua que llevan sal y posterior a ello, se procede a enviar al tanque de lavado, donde, en caso el crudo aún cuente con sal, es deshidratado.

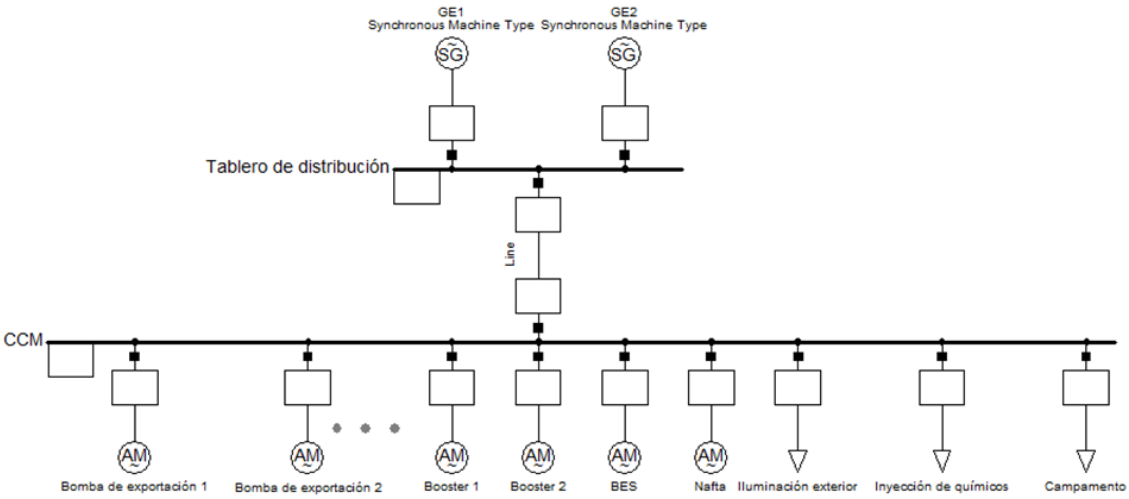
Finalmente, el crudo es enviado a los tanques, donde a través de una bomba de exportación, se dirige a las barcazas. Cabe mencionar, que, en los tanques de crudo, se realizan muestreos para verificar la especificación, antes del despacho, en caso, no cumpla con la especificación, el crudo retorna hacia la entrada del calentador, para volver a pasar por el proceso, hasta que, cumpla con la especificación.

En cuanto al abastecimiento de energía a todas las bombas que permiten el movimiento del crudo y equipos en general, se puede mencionar que es a través de grupos

electrógenos, uno principal y otro de reserva, con transferencia manual, un centro de control de motores (CCM), que distribuye a todas las cargas, además, es importante mencionar que, cada carga que ejerce una función viene en par, uno principal y otro de respaldo.

Con fines netamente informativos, se presenta la siguiente imagen, donde se recrea la topología del diagrama unifilar de las etapas tempranas.

Figura 7:
Representación topológica del diagrama unifilar en etapas tempranas



Nota: Elaboración propia

b) Sistema de bombas electro sumergibles

El sistema de bombeo electro sumergible será a través de bombas de tipo compresoras, el cual permite tener un amplio rango de operación y flexibilidad. En cuanto a los motores eléctricos, serán del tipo asíncronos trifásicos de inducción, más conocido como jaula de ardilla, dos polos, potencia variable por tensión y capaces de operar en un amplio rango de frecuencias de 20 a 90 HZ.

En base a lo último mencionado, los motores eléctricos que alimentarán las bombas electro sumergibles tienen la capacidad de operar variando su frecuencia, por lo que deben tener dentro de su arranque al variador de frecuencia.

Así mismo, dado que normalmente la tensión de operación del sistema eléctrico aislado no suele tener el mismo nivel de tensión que los motores eléctricos, también se suele incluir un transformador elevador, dentro del circuito.

Cabe mencionar que en el circuito, se suele tener un tablero intermedio llamado caja de venteo, en cuanto al conductor que se empalma en dicha caja de venteo, podemos mencionar que, aguas arriba en el variador y transformador, se utilizan cables convencionales que estén de acuerdo a las normas, sin embargo, aguas abajo del transformador elevador, caja de venteo y motor de la bomba electro sumergible, es necesario utilizar un cable especial que pueda evitar que los gases combustibles penetre dentro del conductor y genere una explosión; este conductor es del tipo Redalead, el cual logra su función, gracias a una cubierta final de plomo, tal y como muestra la siguiente figura.

Figura 8:
Cable Redalead

Nota: Schlumberger

En cuanto a los equipos de superficie (variador y transformador elevador), caja de venteo, cable de tipo Redalead, motor de bomba electro sumergible y demás cableado de control y supervisión de instrumentos, podemos indicar que son diseñados en base a criterios de temperatura, presión, propiedades corrosivas, proporción de gas y petróleo, entre otros. Dado que, existen empresas especializadas con patentes de estas tecnologías, el diseño de estos equipos eléctricos queda fuera del alcance del proyecto.

Por otro lado, quedaría dentro del alcance, el dimensionamiento aguas arriba del variador de velocidad, llámese conductor de baja tensión, centro de control de motores, transformador reductor y Switchgear.

Para fines de diseño, se debe tener en cuenta la siguiente tabla con datos del motor de la bomba electro sumergible:

Tabla 10:
Tabla de datos técnicos del motor de la BES

Parámetros eléctricos	Valores
Potencia	490kVA
Tensión	2028V
Frecuencia	60Hz
Corriente	157A
Factor de potencia	0.8

Nota: Tabla extraída de fabricante Schlumberger

c) Sistema de bombas horizontales

El sistema de HPS, consta de los siguientes componentes: bomba centrífuga multi-etapas, cámara de empuje (HTC), admisión y descarga de fluido, instrumentación y motor.

Dentro del funcionamiento podemos mencionar, el agua producida pasa a través de la zona de admisión de fluido, ubicada en la base de la bomba.

En el interior de la bomba, atraviesa por todas sus etapas, para salir por la zona de descarga de fluido, ubicada en la cabeza de la bomba.

La cámara de empuje cuenta con aceite como lubricante, así mismo, tiene las siguientes funciones principales: transmite el torque del motor a la bomba, absorbe las cargas generadas por el fluido en la bomba y sellado del fluido, respecto al medio ambiente.

En cuanto a la instrumentación, cuenta con diversos sensores distribuidos en el motor, cámara de empuje y bomba. Los instrumentos del motor son sensores de temperatura del bobinado del motor, los instrumentos de la cámara de empuje son sensores de vibración, temperatura y nivel de aceite y los instrumentos asociados a la admisión y descarga de la bomba son sensores de presión. Normalmente, estas señales de instrumentación se dirigen a un tablero que contiene un PLC, el cual opera en base a la necesidad de producción de agua, el cual envía las señales al variador de velocidad o arrancador suave, cualquiera sea el tipo de arranque que se provea. Se recomienda el uso de variadores de velocidad, dada su flexibilidad en el arranque y operación.

Respecto al motor eléctrico, suelen ser de dos polos y tener una velocidad de giro de 3600 RPM.

Todo este sistema, al igual que el sistema BES, quedará fuera del alcance de diseño. Respecto al alcance de este diseño, podemos mencionar que será el Switchgear y el cable de alimentación que atraviesa los Switchgear, variador y motor.

Para fines de diseño, se debe tener en cuenta la siguiente tabla con datos del motor de las HPS:

Tabla 11:
Tabla de datos técnicos del motor de las HPS

Parámetros eléctricos	Valores
Potencia	1000HP
Tensión	4160V
Frecuencia	60Hz
Corriente	125A
Factor de potencia	0.9

Nota: Tabla extraída de fabricante Baker Hugues, WEG y Triol

d) Criterio de diseño de cables

La metodología para escoger y verificar la sección de conductores se realizará mediante el método por capacidad de corriente y se analiza su capacidad térmica y caída

de tensión; excepto en cables de media tensión, donde se omitirá el concepto de caída de tensión, debido que son imperceptibles para ese nivel de tensión, considerando los tramos cortos del lote petrolero. Se omitirá el cálculo de cortocircuito en conductores, dado que serán conductores estándar para estas instalaciones.

En el siguiente análisis, se mencionarán tablas de normativas vigentes, los cuales se detallan en el Anexo B.

El método por capacidad de corriente consiste en calcular la corriente de diseño que se transmitirá a través del conductor. En primera instancia, se deben saber los parámetros eléctricos de la carga, a la cual el conductor le suministrará energía, en caso se desconozca la corriente nominal de la carga, se puede calcular a través de las siguientes fórmulas, conociendo si es un sistema trifásico o monofásico, tensión, potencia aparente y factor de potencia.

Considerando un sistema monofásico:

$$S = V.I_n \qquad (2.1)$$

$$P = V.I_n.cos\,\emptyset \qquad (2.2)$$

$$Q = V.I_n.sin\,\emptyset \qquad (2.3)$$

Considerando un sistema trifásico:

$$S = \sqrt{3}.V.I_n \qquad (2.4)$$

$$P = \sqrt{3}.V.I_n.cos\,\emptyset \qquad (2.5)$$

$$Q = \sqrt{3}.V.I_n.sin\,\emptyset \qquad (2.6)$$

En tal sentido, la corriente nominal, es la corriente que requiere la carga, para un funcionamiento en estado normal, sin embargo, es prudente y requerido por la norma NEC, artículo 210.19(A) de la NFPA 70-2023, seleccionar un conductor cuya sección mínima cuente con una ampacidad del 125% de la corriente a plena carga, por tal motivo la corriente de diseño, cumpliría la siguiente relación:

$$I_d = 1.25.I_n \qquad (2.7)$$

Donde:

S: Potencia aparente (VA)

P: Potencia activa (W)

Q: Potencia reactiva (Var)

V: Tensión de línea (V)

In: Corriente de línea nominal (A)

Id: Corriente de diseño (A)

Encontrada la corriente de diseño, se procede a plantear el tipo de conductor y cantidad de cables por fase, posterior a ello se verifica su capacidad térmica y su caída de tensión, en los siguientes métodos.

Para efectos de selección de conductor, se verifica la Tabla 310.18 NFPA 70. En relación con el trabajo de suficiencia profesional, se procederá a seleccionar las capacidades de corriente mostrados en las tablas de los vendedores de cables.

Evaluación por capacidad térmica, indica que la capacidad de corriente en el conductor escogido en el método anterior se debe multiplicar por ciertos factores que disminuye su capacidad, en base a ciertos criterios.

En la tabla 13-4 de la norma IEEE 399, nos menciona que el conductor que debería de trabajar en una temperatura ambiente debe ser corregido a la temperatura de trabajo en la locación y considerando también, la temperatura de trabajo del conductor, el cual suele ser 90°; nos permite saber el factor de corrección por temperatura.

Así mismo, la NEC también brinda nociones de los factores de corrección por temperatura.

Para cables de BT se basa en la tabla 310.15(B)(1)(1) del NEC, la cual aplica para conductores con ampacidades indicadas en la tabla 310.17.

Para cables de MT, se basa en la tabla 315.60(D)(4) del NEC.

Para efectos de selección de factor de corrección por agrupamiento de cables en BT, se verifica el artículo 392.80(A)(1), 392.80(A)(2) y 392.80(B) del NEC. Así mismo, para cables de MT se basa en la tabla 310.15(C)(1) del NEC.

En la tabla 13-5 de la norma IEEE 399 y en base a la resistividad térmica del suelo, se obtiene un factor de corrección por capacidad térmica del suelo.

Para efecto del trabajo de suficiencia profesional la canalización de todos los cables de baja y media tensión será mediante bandejas eléctricas, ningún cable se intentará canalizar mediante banco ductos, esto por las condiciones climatológicas de temperatura y densas lluvias, que complican las funciones de operación y mantenimiento; por tal motivo el factor de corrección por resistividad térmica del suelo es igual a uno.

Según la NFPA 70, la corriente nominal del cable escogido debe ser corregido, multiplicándolo por el factor de corrección por temperatura, agrupamiento y resistividad térmica, teniendo en cuenta la canalización, si va por bandeja, ducto o directamente enterrado, y teniendo en cuenta también, la configuración del conexionado.

$$I_{dc} = I_c x\ FCT\ x\ FCRT\ x\ FCA \qquad (2.8)$$

Donde:

Idc: Corriente de diseño de conductor (A)

Ic: Capacidad de corriente del conductor seleccionado (A)

FCT: Factor de corrección por temperatura

FCRT: Factor de corrección por capacidad térmica del suelo

FCA: Factor de corrección por agrupamiento

La evaluación por caída de tensión, basado en el Código Eléctrico Nacional – Utilización, las acometidas principales deben tener como máximo una caída de tensión del 2.5%, los conductores derivados deben tener como máximo una caída de tensión del 2.5% y la totalidad del circuito, desde la fuente hasta la carga, no debe contar con una caída de tensión, que sobre pase el 4%.

La evaluación de la caída de tensión se regirá en base a las siguientes ecuaciones:

Considerando un sistema monofásico:

$$\%\Delta V = \frac{2.(R.\cos\emptyset + X.\sin\emptyset)}{10.V}.\sum L_i.I_d \qquad (2.9)$$

Considerando un sistema trifásico:

$$\%\Delta V = \frac{\sqrt{3}.(R.\cos\emptyset + X.\sin\emptyset)}{10.V}.\sum L_i.I_d \qquad (2.10)$$

Donde:

%ΔV: Caída de tensión (%)

Id: Corriente de diseño de la carga (A)

R: Resistencia AC del conductor (Ω/km) a temperatura de operación

X: Reactancia inductiva del conductor (Ω/km)

Li: Longitud del conductor (m)

V: Nivel de tensión (V)

e) Criterio de diseño de barras

El diseño de barras se analizará en dos etapas, la primera bajo el concepto de capacidad de corriente en estado normal de operación y el segundo bajo el concepto de capacidad de corriente de cortocircuito en estado de contingencia.

Para el cálculo de la capacidad de corriente en estado normal de operación, se realiza el análisis de las cargas asociadas. En base a su potencia nominal, se calcula la corriente nominal, obtenidos todos esos datos, se realizará la suma de todas las corrientes nominales y luego se considerará una sobrecarga del 20%.

Considerada la capacidad de corriente más sobrecarga, se debe verificar las corrientes nominales existentes en el mercado.

Luego de seleccionar la capacidad de corriente de la barra, se ingresarán los ajustes y se verificará el flujo de carga, mediante el software Power Factory. Cuando se obtengan los datos del flujo de carga, se debe verificar que, la corriente del cable que ingresa a la barra sea menor que el valor de la capacidad de corriente de la barra, de no ser así, se debe escoger un nivel superior de capacidad de corriente de la barra.

Para el cálculo de la capacidad de cortocircuito en estado de contingencia, se debe realizar un análisis de cortocircuito en cada barra del sistema, para ayuda en este punto se utilizará el software Power Factory, el cual en base al método IEC 60909, calcula una corriente de cortocircuito monofásico, bifásico, bifásico a tierra o trifásico, según se requiera; considerando un porcentaje adicional por seguridad.

Se debe tener en cuenta que todas las corrientes de cortocircuito deben ser menores que, la capacidad de cortocircuito de la barra; por ende, se debe escoger un nivel superior existente en el mercado.

f) Criterio de selección de transformadores

La selección de los parámetros eléctricos del transformador, se calculan, en base a los niveles de tensión de operación de los generadores, sistema y cargas.

Los criterios de tensión de los generadores, generalmente se basa, a la tecnología con la que cuenten en el mercado.

En cuanto al criterio de tensión del sistema, generalmente se basa por la distancia que recorrerá el conductor, dado que, si escogemos un conductor de baja tensión en un recorrido largo, tendremos mucha caída de tensión; en cambio, si escogemos un conductor de media tensión en un recorrido largo, su caída de tensión será insignificante comparado con el caso anterior.

En cuanto al criterio de tensión de las cargas, son basadas por el requerimiento de uso en el proceso y la tecnología con la que cuente el mercado.

Bajo el análisis anterior, se obtiene la relación de transformación de tensión, la cual es una relación entre la tensión primaria y la tensión secundaria. Si, la tensión primaria es mayor que la tensión secundaria, se considera un transformador reductor, y si el caso es opuesto se le denomina transformador elevador.

En cuanto a la potencia, se puede calcular, teniendo en cuenta las cargas que alimentarán, así mismo, se debe tener en cuenta que la potencia total calculada, se le debe considerar una reserva del 20% de la capacidad del transformador, para poder conectar cargas futuras, en caso sea necesario.

La potencia escogida del transformador debe ser mayor a la calculada, en base a las capacidades existentes en el mercado.

En cuanto al grupo de conexión del transformador, se planteará un conexionado Delta y Estrella con neutro aterrado, en transformadores que serán ubicados en generación y con transformadores de distribución de subsistemas eléctricos.

En cuanto al aislamiento del transformador, hay que tener en cuenta que existen dos tipos: líquido (aceite) y seco (resina). El primero, suele tener como requisito, un mantenimiento periódico, ya sea preventivo, predictivo o correctivo. El segundo, por el contrario, prácticamente no suelen requerir mantenimiento e incluso son conocidos por tener cero mantenimientos. Pese a las bondades de la segunda opción, se escogerá la primera, se mantendrán los controles necesarios en el tiempo y se escogerá comprar un transformador adicional como reserva.

g) Flujo de potencia

El flujo de potencia es un análisis de los parámetros eléctricos de un sistema en estado estacionario, llámese un estado el cual no cuenta con contingencias. Dentro de los parámetros que se pueden registrar están la tensión, corriente, potencia activa, potencia reactiva, potencia aparente y frecuencia.

No es análisis de este estudio, ahondar en cálculos matemáticos, para la resolución de este problema, al contrario, se utilizarán herramientas computacionales eficientes, como el software Power Factory.

Dentro de las condiciones eléctricas, a verificar en el flujo de potencia, se tienen los siguientes alcances:

Los generadores eléctricos deben entregar potencia activa y reactiva, no está permitido que alguno de los generadores, reciba energía del sistema al generador.

Los generadores eléctricos no trabajarán sobre cargados, los niveles recomendados de carga oscilan al 80%, niveles óptimos para no dañar su vida útil del generador, de no poder cumplir dicho criterio, se aceptarán niveles inferiores por corto periodo de horas en el día.

Se debe considerar un generador de reserva, con la finalidad que entre en servicio, ante una salida intempestiva de otro generador y no logre volver a ingresar en servicio o cuando otro generador salga de servicio por mantenimiento. La intención es asegurar el suministro requerido para alimentar la totalidad de cargas.

Las barras del sistema eléctrico aislado deberán contar con una variación de tensión del +-2.5%, de no poder cumplir dicho criterio, se procederá a dar como tolerancia máxima el +-5%, de no poder cumplir dicho criterio, se iniciará la consideración de un banco de condensadores que supere dicha observación a valores idóneos. Este punto es muy importante, teniendo en cuenta que los motores eléctricos del Lote Petrolero, suele ser arrancados mediante arrancadores suaves o variadores y estas son cargas sensibles a las variaciones considerables de tensión.

Los cables eléctricos deben contar con una carga máxima del 80%, considerando el 20% de reserva, en caso exista un mayor crecimiento a futuro.

Los transformadores deben contar con una carga máxima del 80%, considerando el 20% de reserva, en caso exista un mayor crecimiento a futuro o se designe alimentar una carga temporal, esta es una buena práctica, dado la complejidad del proceso.

En cuanto a los motores se debe considerar que, sean cargados a su corriente nominal en estado estacionario, según ficha técnica del fabricante, dado que debemos asegurar que, en base al dimensionamiento del resto de equipos, el motor, pueda funcionar a plena carga.

De esta manera, podemos obtener resultados que nos servirán para elaborar la especificación técnica de los equipos eléctricos y confirmar los valores obtenidos mediante fórmulas recomendadas por la normativa vigente:

- Capacidad de los interruptores de los Switchgear.
- Capacidad de los seccionadores de los Switchgear, en caso los hubiese.
- Confirmar capacidad de conductor.
- Confirmar capacidad de las barras de los Switchgear.
- Confirmar capacidad y relaciones de transformación de los transformadores, en caso cuenten con conmutador bajo carga o sin carga.

h) Áreas clasificadas

Las áreas clasificadas sirven para identificar zonas cuyos elementos propios del proceso, puedan significar un riesgo de explosión, al ser combinados con agentes como el medio ambiente y energías existentes como la electricidad.

En cuanto a los procesos del lote petrolero, se identifican dos tipos de combustibles que pueden existir en la planta: gases o vapores inflamables presentes en el aire y líquidos volátiles inflamables presentes en contenedores cerrados.

La NFPA 70E y la API RP 500, clasifica dichos tipos de combustibles, en Clase I Div 1 y Clase I Div 2, cabe mencionar que, la Clase I contempla los lugares donde se pueden encontrar gases o vapores inflamables, que puedan ocasionar una explosión o incendio.

En la Clase I Div 1, la presencia de gases o vapores inflamables puede ser causado en condiciones normales de operación del proceso, por reparaciones o fugas y durante fallas del sistema.

En la Clase I Div 2, la presencia de gases o vapores inflamables puede ser causado en lugares donde se manipulan, procesan o utilizan líquidos volátiles inflamables, confinados en contenedores cerrados, los cuales se escapan al medio ambiente, debido a fallas o roturas del sistema o contenedores. En base a la clasificación presentada en la norma NFPA 70E, se debe documentar todas las áreas que comprenden las instalaciones, según el riesgo de ignición o explosión existente.

En los planos de áreas clasificadas, se presentan no tan solo los equipos que forman parte del proceso, si no también, la delimitación de su entorno, el cual también debe ser considerado como área clasificada.

Cabe mencionar que, todo límite interior de las zonas achuradas, las cuales representan las áreas clasificadas, debe contener equipamiento intrínsecamente seguro; cabe mencionar que tanto las redes de media tensión, los equipos de superficie y sistema de reinyección de agua se encuentran en áreas no clasificadas.

i) Especificación técnica de conductores

Las especificaciones técnicas de los conductores de media y baja tensión presentan características similares entre sí, dada la ubicación de la planta, la cual tiene como punto de investigación, la selva peruana; específicamente en Iquitos. En cuanto a las diferentes características, se dan en su mayoría por propiedades eléctricas del sistema, donde se van a conectar. El lote petrolero cuenta con dos niveles de tensión, 4160V y 480V, en media tensión se escogerán conductores unipolares y en baja tensión se escogerán conductores unipolares o multipolares.

En las siguientes tablas, se mostrarán a manera referencial, las principales características, que deberán contar los cables en media y baja tensión.

Tabla 12:
Especificaciones técnicas principales del conductor de media tensión

Item	Unidad	Parámetro
Temperatura del medio ambiente	°C	30
Humedad relativa	%	80
Altitud sobre el nivel del mar	m.s.n.m	1000
Nivel de polución exterior		Alto
Nivel de polución interior		Bajo
Material del conductor		Cobre electrolítico
Clase		2
Configuración		Unipolar
Temperatura de trabajo	°C	90
Temperatura en sobrecarga	°C	130
Temperatura en cortocircuito	°C	250
Tensión máxima de diseño	kV	5
Aislamiento		XLPE-TR
Cubierta exterior		PVC
Canalizado		Bandeja
Exposición		Lluvia y luz solar
Tipo		N2XSY

Nota: Tabla de fuente propia

Tabla 13:
Especificaciones técnicas principales del conductor de baja tensión

Item	Unidad	Parámetro
Temperatura del medio ambiente	°C	30
Humedad relativa	%	80
Altitud sobre el nivel del mar	m.s.n.m	1000
Nivel de polución exterior		Alto
Nivel de polución interior		Bajo
Material del conductor		Cobre electrolítico
Clase		5
Configuración		Unipolar o Tripolar
Temperatura de trabajo	°C	90
Temperatura en sobrecarga	°C	130
Temperatura en cortocircuito	°C	250
Tensión máxima de diseño	kV	1
Aislamiento		XLPE
Cubierta exterior		PVC
Canalizado		Bandeja
Exposición		Lluvia y luz solar
Tipo		N2XY

Nota: Tabla de fuente propia

j) Especificación técnica del transformador eléctrico

El transformador eléctrico inmerso en aceite, debe ser fabricado, en base a las condiciones medio ambientales del Lote Petrolero, teniendo en cuenta que, será instalado en la intemperie. Además, se debe tener en cuenta que, dado los trabajos de construcción y operaciones constantes, se debe considerar características importantes para soportar el polvo.

Teniendo en cuenta las cargas que alimenta, como motores, variadores o arrancadores suaves, se debe considerar la demanda del transformador, en base a la máxima potencia de los equipos y a la mayor frecuencia del variador, con la finalidad de evitar sobre calentamientos y reducción de la vida útil del transformador.

Así mismo, se debe diseñar el transformador, bajo las consideraciones de armónicos del sistema.

El transformador debe contar con un conmutador en vacío, el cual ayude a regular, los cambios de tensiones en el sistema, con la finalidad de mantener constante, la tensión en el devanado secundario.

Debe contar con los siguientes componentes: tanque conservador, bornes, aceite, radiadores, núcleo, arrollamiento, conmutador en vacío, cableado de control, cableado de alarma, protecciones propias, entre otros.

El tanque conservador debe ser de planchas de acero soldado, en una de sus tapas laterales, debe contar con un indicador de nivel de aceite, el cual manda las señales de alarma y disparo, en caso aplique. Así mismo, debe contar con un conducto que derive a un deshumedecedor.

Los bornes deben ser del tipo condensador y deben contar con su identificación, plasmados en una placa o pintados sobre la cuba del transformador.

El aceite será del tipo mineral y se debe suministrar aceite en demasía, a manera de reserva. Así mismo, el transformador debe ser capaz de proporcionar muestras de aceite, para efectuar análisis físico químico, cromatográfico, furanos, entre otros.

Los radiadores disiparán el calor generado por la inducción electromagnética desde la zona superior hacia la zona inferior del transformador, los radiadores deben ser conectados a través de bridas y empaques; así mismo deben contar con válvulas de admisión de aceite.

En cuanto a las protecciones propias, estas deben ser como mínimo: relé buchholz, indicador de temperatura, indicador de nivel y relé de presión súbita.

En la siguiente tabla, se presentan datos técnicos recomendados para la compra de los transformadores, inmersos en aceite.

Tabla 14:
Especificaciones técnicas principales del transformador

Item	Unidad	Parámetro
Temperatura del medio ambiente	°C	30
Humedad relativa	%	80
Altitud sobre el nivel del mar	m.s.n.m	1000
Nivel de polución exterior		Alto
Lugar de instalación		Selva
Material del conductor de media tensión		Cobre
Material del conductor de baja tensión		Cobre
Bornes Primario: Cajuela con conexión preformada	mm^2	<=400
Bornes Secundario: Cajuela con conexión preformada	mm^2	<=120
Indice de polarización (IP)		>=2
Tensión de cortocircuito aproximado		5%
Regulación de tensión	%	-5/-2.5/0/2.5/5
Sistema de enfriamiento		ONAN
Potencia	MVA	Según estudio
Tensión primaria	V	Según estudio
Tensión secundaria	V	Según estudio
Corriente primaria	A	Según estudio
Corriente secundaria	A	Según estudio
Pérdidas en el núcleo	kW	Por fabricante
Pérdidas en el cobre	kW	Por fabricante
Frecuencia	Hz	60
Factor “k”		Según estudio

Nota: Tabla de fuente propia

k) Especificación técnica del Switchgear

El Switchgear es un conjunto de equipos ensamblados, los cuales cumplen la función de, conmutación, medición, protección y control de la energía eléctrica. A través de su estructura, se recibe y transmite la energía.

Las normas internacionales vigentes, más utilizadas en nuestro país, que sirven para elaborar la especificación técnica del Switchgear, están basadas en la norma americana ANSI/IEEE C.37.20.3 y la europea IEC 62271-200. En líneas generales, se utilizará la norma IEC 62271-200; dada su amplio uso en la industria y el nivel de tensión de la planta.

Existen dos tipos de celdas en el mercado, las celdas del tipo Metal Clad y las celdas del tipo Metal Enclosed. Se procederá a brindar alcances generales, respecto a cada uno de ellos, con la finalidad de ver sus ventajas y desventajas:

La celda del tipo Metal Clad es basada por la normativa americana ANSI/IEEE C.37.20.3, el cual es un estándar de dicho producto, utilizado para sistemas de nivel de tensión desde 4.16kV hasta 38kV. Utilizan interruptores extraíbles y compartimientos separados por planchas metálicas conectadas a tierra; esto con la finalidad de poder tener acceso a ciertos compartimientos, aun cuando el resto esté energizado. Contiene bloqueos mecánicos por seguridad y mangas termo contraíbles instaladas en barras y acoples.

En cuanto a las celdas del tipo Metal Enclosed, son basadas por las normativas americana ANSI/IEEE C.37.20.3 y europea IEC 62271-200, vienen en diferentes tipos, GIS (Switchgear con aislamiento de gas) y AIS (Switchgear con aislamiento de aire), con compartimientos mínimos y máximos, barras desnudas o aisladas e interruptores fijos o extraíbles. En el caso de la normativa europea, su nivel de tensión oscila desde 1kV hasta 52kV.

Dado estos dos tipos de celdas, se puede indicar que la Celda del Tipo Metal Clad, está contenida en el criterio de Celda del Tipo Metal Enclosed; específicamente la celda Metal Enclosed LSC2B es similar a las Celdas Metal Clad.

Los compartimentos de las celdas seleccionadas se dividen en compartimentos para barras, protección y control, interruptor y cables. Cada compartimento de media tensión, debe considerar un relé anti arco y un bloqueo mecánico para abrir sus puertas, en caso estén energizadas.

En el compartimento de barras, las barras deben estar suspendidas por aisladores y distanciadas en base a las distancias mínimas de seguridad, según el nivel de tensión de fabricación, adicional a ello, deben contar con mangas termo contraíbles, plancha posterior de protección, en caso algún operador abra la puerta posterior y planchas desmontables a sus costados, en caso se requiera acoplar barras en sus caras laterales.

En el compartimento de protección y control, se ubica el relé de protección, borneras de prueba, controladores del interruptor, medidores, selectores manual y remoto e indicadores de interruptor abierto, cerrado o extraído.

En el compartimento de interruptor, se debe contar con las facilidades, para empotrar el carro extractor y poder retirar el interruptor.

En el compartimento de cables, por lo general, también van los transformadores toroidales, los cuales van en el ingreso de las celdas.

A manera descriptiva, se procederá a detallar los diversos componentes principales con los que cuenta un Switchgear, para facilitar su elección, luego del análisis de los cálculos justificativos. Dentro de los componentes tenemos: barra, interruptores, seccionador de puesta a tierra, transformador de corriente, transformador de tensión, pararrayos, relé, sistema de comunicación, medidor de energía, detectores capacitivos de presencia de tensión y puesta a tierra.

k.1) Barras:

Las barras deben ser de cobre electrolítico de alta conductividad, serán montadas a través de aisladores de soporte y fijadas a través de pernos M12x45 en los acoples de barra y con pernos M16x70 en las entradas de línea de celda. Además, se debe considerar la instalación de mangas termo contraíbles, para el correcto aislamiento entre barras.

En cuanto a las características eléctricas de la barra, estas deben estar en base a los diagramas unifilares aprobados, del sistema eléctrico aislado. En cuanto a los parámetros eléctricos de barras existentes en el mercado, podemos destacar los siguientes:

Tabla 15:
Especificaciones técnicas principales

Item	Unidad	Parámetro
Voltaje	kV	7.2kV, 12kV, 17.5kV, 24kV
Frecuencia	Hz	50/60
Corriente nominal de barra	A	630,1250,1600,2000,2500,3150,4000
Tensión a frecuencia industrial (1min)	kV	38kV, 48kV
Tensión de impulso	kV	75
Corriente nominal de cortocircuito (pico)	kA	40/50/63/80/100
Corriente de cortocircuito (4s)	kA	20/25/31.5/40
Tipo de protección	-	IP4X para interior

Nota: Tabla extraída de "Manual de uso Farady"

k.2) Interruptores:

Los interruptores son los equipos que conectarán y desconectarán, la carga o alimentador, del Switchgear, la operación tripolar debe ser bajo carga y debe contar con la posibilidad de poder ser extraíble; en caso se requiera por mantenimiento. En cuanto a la extracción del interruptor, debe ser a través de un carro de extracción, el cual brinde la posibilidad de tener cuatro estados del interruptor: posición conectada, posición extraído, posición de prueba y posición seccionado.

El medio de extinción del arco debe ser en vacío, con la finalidad de reducir costos, dado que las celdas con extinción mediante SF6 (hexafloruro de azufre) son más costosas. Así mismo, el fabricante debe indicar los tiempos muertos para la secuencia apertura, cierre y apertura; con la finalidad de tener una idea concreta, en la emisión del estudio de protecciones.

La operación debe poder realizarse de manera local y remota, a través de bobinas de cierre y disparo, de manera local a través directamente por el interruptor y el relé y de manera remota a través de un scada. En cualquier escenario, en la parte frontal de la celda, se debe contar con indicadores, que brinden la posición del interruptor.

Así mismo, la celda del interruptor debe contar con accesorios relacionados a este, como contadores de maniobra, ventana de inspección y datos de placa del interruptor.

Es preciso mencionar que, los valores nominales, que se escogerán, serán producto del estudio de flujo de potencia y cortocircuito, los cuales se resumirán en el diagrama unifilar del proyecto.

En cuanto a los parámetros eléctricos existentes en el mercado, se presentan los siguientes:

Tabla 16:
Especificaciones técnicas principales del interruptor

Item	Unidad	Parámetro
Voltaje	kV	12kV, 24kV
Frecuencia	Hz	50/60
Corriente nominal de barra	A	630, 800, 1250,1600,2000,2500,3150,4000
Tensión a frecuencia industrial (1min)	kV	38kV, 48kV
Tensión de impulso	kV	75
Corriente nominal de cortocircuito (pico)	kA	63/80/100
Corriente de cortocircuito (4s)	kA	20/25/31.5
Vida del mecanismo		10000 maniobras

Nota: Tabla extraída de "Manual de uso Farady"

Al momento de recepcionar el interruptor, se debe contar con evidencia que garantice su buen estado, por tal motivo se debe solicitar que se hagan las siguientes pruebas, como mínimo:

- Inspección constructiva.
- Medición de la resistencia de contactos en el circuito principal.
- Prueba de operación mecánica.
- Prueba de operación eléctrica.
- Prueba de tiempos de apertura y cierre de interruptor.
- Prueba de resistencia de aislamiento.
- Ensayo de tensión soportada a frecuencia industrial.

k.3) Seccionador de puesta a tierra:

La construcción del seccionador de puesta a tierra deberá ser basado en base a la norma IEC 62271-102 "Seccionadores para transporte y conmutadores de puesta a tierra".

El seccionador de puesta a tierra, deberá ser ubicado entre la salida del interruptor y conductor. Cumple con la función de aterrar el conductor y equipamiento relacionado, luego de abrir el interruptor de línea. Esto se ejecuta por motivos de seguridad, con la finalidad de evitar falsas maniobras de cierre en el interruptor y descargas eléctricas al personal en caso se encuentre realizando un mantenimiento.

En base a lo expuesto, se deduce que, existe un bloqueo entre la maniobra del seccionador e interruptor, si el interruptor se encuentra cerrado no se puede cerrar el seccionador y si el interruptor se encuentra abierto si se puede abrir o cerrar el seccionador.

El accionamiento del seccionador de puesta a tierra será a través del giro de una manivela, que debe ser introducida en la celda.

En cuanto a los parámetros eléctricos, existentes en el mercado, encontramos:

Tabla 17:
Especificaciones técnicas principales del seccionador de puesta a tierra

Item	Unidad	Parámetro
Voltaje	kV	12kV
Corriente térmica 4s	kA	31.5/40
Corriente estabilidad dinámica	kA	80/100
Corriente de corto circuito	kA	80/100
Tensión soportada de frecuencia industrial 1 min	kV	42
Tensión soportada de impulso de rayo	kV	75
Distancia entre centros	mm	210, 230, 250, 275

Nota: Tabla extraída de “Manual de uso Farady”

Antes de la entrega del producto se deben realizar pruebas mecánicas y eléctricas, que avalen el buen estado del seccionador de puesta a tierra:

- Inspección dimensional externa
- Ensayo de tensión soportada a frecuencia industrial
- Medición de la resistencia del circuito principal
- Características mecánicas
- Manual de operación mecánica
- Inspección de apariencia: capa de revestimiento, soldadura, piezas aislantes, placa de identificación, conexión a tierra, fijación de piezas, entre otros.

k.4) Transformador de corriente:

El transformador de corriente deberá ser construido en base a la norma IEC 61869-2 “Requisitos adicionales para los transformadores de intensidad”, alcance también aplica para transformadores toroidales.

Los transformadores de corriente serán unipolares, encapsulados en resina epóxica, contendrán doble relación de transformación, se ubicarán en el interior del compartimento de cables, específicamente en la celda de salida o entrada del Switchgear.

Para su diseño, nos basaremos en la corriente nominal obtenida en los resultados del flujo de potencia, con lo cual podemos tener nociones de la corriente primaria del transformador de corriente.

En cuanto a la corriente del secundario o terciario, estará basado en la corriente admisible de los equipos de llegada, llámese relés o medidores de energía.

En cuanto a la clase de aislamiento, precisión y errores; se recibirán valores recomendados por el fabricante.

Se debe considerar borneras cortocircuitables en el lado secundario del transformador de corriente.

Antes de la entrega del producto, se deben considerar las siguientes pruebas eléctricas, como mínimo:

- Prueba de error de corriente por núcleo.
- Prueba de error de ángulo por núcleo.
- Verificación de polaridad.
- Verificación de bornes.
- Prueba de tensión de ensayo BT por 1 minuto a frecuencia industrial.
- Prueba de tensión de ensayo AT por 1 minuto a frecuencia industrial.
- Prueba de descargas parciales.

k.5) Transformador de tensión:

El transformador de tensión deberá ser construido en base a la norma IEC 61869-3, “Transformadores de medida. Parte 3: Requisitos adicionales para los transformadores de tensión inductivos”.

Los transformadores de tensión serán unipolares, encapsulados en resina epóxica, contendrán doble relación de transformación, se ubican en el interior del compartimento de cables, específicamente en la celda de salida o entrada del Switchgear; teniendo en cuenta que, en ocasiones puede ir acoplado a la barra, para tener referencia de la tensión en tiempo real de la barra del Switchgear.

Para su diseño, tendremos en cuenta la tensión nominal del sistema, en el punto de conexión, en el devanado primario, para el devanado secundario, se debe tener en cuenta el nivel de tensión de los equipos como relés o medidores de energía.

Antes de la entrega del producto, se deben considerar las siguientes pruebas eléctricas, como mínimo:

- Prueba de error de tensión por núcleo.
- Prueba de error de ángulo por núcleo.
- Verificación de polaridad.
- Verificación de bornes.
- Prueba de tensión de ensayo BT por 1 minuto a frecuencia industrial.
- Prueba de tensión de ensayo AT por 1 minuto a frecuencia industrial.
- Prueba de descargas parciales.

k.6) Pararrayos:

Los pararrayos serán construidos en base a la norma IEC 60099-4, “Descargadores de sobretensión- Parte 4: Descargadores de sobretensión de óxido metálico para sistemas de corriente alterna”, su función principal es proteger los componentes eléctricos del Switchgear de las sobretensiones originadas por descargas atmosféricas que se transmiten

por los conductores y las originadas por maniobras de equipos como transformadores o motores de gran potencia.

Dentro de la información que debe entregar el proveedor, en su placa de características, se pueden mencionar: fabricante, tipo de pararrayo, número de serie, año de fabricación, peso, tensión máxima de red, tensión de operación continua (COV), máxima tensión de operación continua (MCOV), frecuencia nominal, tensión nominal, corriente de descarga, corriente del limitador, entre otros.

En cuanto a las pruebas que garantizarán el buen estado del pararrayo, se pueden mencionar las siguientes pruebas:

- Inspección visual.
- Prueba de sellado.
- Prueba de voltaje de referencia (kV) de corriente continua de 1mA.
- 75% veces la corriente de fuga de tensión DC de referencia en micro amperios.
- Prueba de voltaje de referencia (kV) a frecuencia industrial con 1mA.
- Prueba de descargas parciales en pico faradios.
- Voltaje residual pico de descargas atmosféricas kV (8/20us-5kA).
- Resistencia de aislamiento en MΩ.
- Prueba de corriente continua en μA.

k.7) Relé:

El relé digital, cumple con la función de proteger la celda o Switchgear, de fallas eléctricas en el sistema, aísla los elementos en falla, mandando una señal de apertura del interruptor en cuestión.

Su recopilación de datos del sistema deberá venir mediante cableado desde el transformador de corriente y tensión, según sea la aplicación.

Todo conexionado del relé debe estar situado en la zona posterior del relé, en su zona frontal, estará ubicada una pantalla transparente y botones para desplazarse en el relé.

Los ajustes recomendados para este sistema eléctrico aislado son la función de sobre corriente entre fases y la función de rechazo automático de carga para las bombas HPS.

Adicional a lo antes mencionado, el relé debe ser configurado para cerrar el interruptor de acoplamiento, ante alguna falla en alguno de los alimentadores.

k.8) Sistema de comunicación:

El sistema de comunicación escogido debe ser pensando en la comunicación de los relés o medidores, a un equipo portátil para configuración de ajustes o a un sistema SCADA para monitoreo de parámetros, en tiempo real o para un historial pasado.

Los protocolos de comunicación escogidos podrán ser: IEC 61850, Modbus RTU y Ethernet TCP. Deberán contar con los puertos de comunicación RS232 y RS485.

k.9) Medidor de energía:

Los medidores de energía deben ser electrónicos y digitales.

Van conectados directamente a las borneras del secundario, de los transformadores de corriente y tensión, del Switchgear.

Los medidores de energía clase 0.5s, deben ser suministrados, con las siguientes características mínimas: nombre del fabricante, lugar de fabricación, fecha de calibración, diagrama de conexionado, número de fases, número de hilos, número de serie, voltaje nominal, corriente nominal, frecuencia, clase de precisión, placa de datos, entre otra información recomendada por el fabricante.

Los valores que deben medir, deberán ser valores eficaces, con actualización automática mínima de 5 segundos, entre los principales valores, se recomienda incluir:

- Potencia activa (W)
- Potencia reactiva (VAR)
- Factor de potencia (CosØ)
- Voltaje (V)
- Corriente (I)

- Ángulo de desfase entre tensión y corriente (Ø)
- Frecuencia (f)
- Fecha y hora
- Energía activa (Wh)
- Energía reactiva (VARh)
- Energía aparente (VAh)
- Máxima demanda con hora y fecha
- Registro de armónicos

k.10) Detectores capacitivos de presencia de tensión:

El switchgear debe contar con detectores capacitivos de presencia de tensión, los cuales emitan luz roja intermitente o continua, con lo cual quede en evidencia, el riesgo eléctrico existente por la presencia de tensión.

k.11) Puesta a tierra:

El tren de celdas deberá contar con una unión de barra de tierra, en la cual se debe conectar todas las planchas metálicas del switchgear, tierra de los conductores a conectar, neutro del circuito de control, etc.

Así mismo, sobre ella se debe conectar el cable de tierra de $70mm^2$, la cual irá conectada a la malla de la planta.

l) Corto circuito

El estudio de cortocircuito de nuestro sistema eléctrico aislado se realizará con el software Power Factory, el cual calcula las corrientes de cortocircuito bajo la norma IEC 60909.

El método de ejecución es el siguiente:

- Se debe proyectar el crecimiento total de la planta.
- Teniendo en cuenta los parámetros eléctricos de cargas y generadores y valores obtenidos mediante fórmulas detalladas en este capítulo, para el cálculo de sección

de conductores y capacidad de barras, se debe realizar un análisis de flujo y verificar la correcta especificación técnica de los equipos.

- Analizar el cortocircuito monofásico, bifásico, bifásico a tierra y trifásico, mediante el método IEC 60909, de todas las barras y en diferentes escenarios, dado el sistema con secundario selectivo que presenta el sistema eléctrico aislado.
- Se debe recopilar mediante tablas, la totalidad de corrientes de cortocircuito por fallas monofásicas, bifásicas, bifásicas a tierra y trifásicas.
- Verificar las mayores corrientes, las cuales deben ser utilizadas como patrón, para el diseño de barras.

Luego del procedimiento mencionado, se debe tener en cuenta las siguientes premisas:

- Dado que todos nuestros motores de alta potencia cuentan con un equipo de arranque llamado variador de velocidad, no se considerará el aporte de corriente de corriente de cortocircuito de los motores al sistema, debido a su electrónica interna.
- El valor de corriente de cortocircuito que soportan las barras del sistema eléctrico aislado, debe ser mayor que todas las corrientes de cortocircuito obtenidas en el modelo, esto con la finalidad que, aunque sucediese cualquier tipo de cortocircuito, las barras de los Switchgear soportarían esas condiciones, sin registrarse daños en los materiales.

m) Banco de condensadores

Los bancos de condensadores son componentes cuya función es almacenar energía reactiva y entregarla al sistema eléctrico en la medida que se requieran.

Estos equipos son utilizados para corregir valores bajos de tensión y factor de potencia en los sistemas eléctricos, durante la operación normal.

Para identificar los sistemas eléctricos que requieren de dicho equipo, se debe ejecutar una simulación de flujo de carga, así mismo, identificar las barras que cuenten con

una caída de tensión que supere el 5% del valor nominal, en ellas se debe conectar un banco de condensadores con diferentes valores representativos y realizar nuevos flujos de carga.

Los nuevos flujos de carga deben ser estudiados, con la finalidad de saber cuál es el valor de reactivos que deben ser conectados en la barra.

Cabe mencionar que, según la operación del sistema eléctrico aislado, se deben generar diversos escenarios donde, se evalúe la necesidad de reactivos para cada caso.

El control del banco de condensadores debe ser ajustado a un valor nominal de tensión o factor de potencia y debe actuar de forma automática. El controlador automático debe ingresar o retirar pasos de condensadores en base a la proyección del estudio.

n) Rechazo de carga por mínima frecuencia

El estudio de rechazo de carga, forma parte de un análisis de fenómenos eléctricos transitorios, donde, registra el comportamiento del sistema al ejecutarse una salida intempestiva de generadores.

No se debe de confundir con el análisis al momento de registrarse una salida intempestiva de cargas, en el cuales los generadores sufren un aumento en la frecuencia y las barras un aumento en la tensión; este fenómeno es solucionado por los reguladores o gobernadores de las unidades de generación, solución que será planteada por el mismo proveedor de la planta de generación.

Para nuestro caso en particular, nos apoyaremos en el software Power Factory, en el cual simularemos escenarios donde salgan de servicio las unidades generadoras; lo cual a su vez va a generar una caída en la frecuencia.

Cuando la caída de la frecuencia esté por debajo del 5% del valor de la frecuencia nominal, se optará por implementar el rechazo automático de carga por mínima frecuencia.

En tal sentido y dada la experiencia en el Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN), se recomienda ajustar un relé de frecuencia de la siguiente forma:

- Relé de umbral: Fija un valor de frecuencia mínimo, en el cual luego de un determinado tiempo, actúa el relé, dejando fuera de servicio la carga escogida, para nivelar la frecuencia; según el rango escogido.
- Relé de derivada: Fija un valor de frecuencia mínimo como arranque, luego se ajustan valores de reducción de frecuencia por tiempo, para dejar fuera de servicio la carga escogida en un determinado tiempo; con la finalidad de nivelar la frecuencia según el rango escogido.

Estas dos opciones, suelen ser ajustadas en el relé de frecuencia, por etapas, siendo la primera etapa la menos crítica respecto a niveles mínimos de frecuencia y la última etapa la más crítica respecto a niveles mínimos de frecuencia.

La carga que debe ser rechazada debe tener las siguientes características:

- Su ausencia no debe significar mayor inconveniente para el proceso y el sistema eléctrico, en un determinado tiempo de acción.
- La potencia de la carga, debe ser suficiente, para poder estabilizar el sistema, al ser rechazado.

Para efectos de nuestro estudio, la carga escogida, serán las HPS, por las siguientes razones:

- Pese a que es necesaria la inyección de agua en el pozo, para mantener el ciclo de producción de petróleo, su parada en tiempos regularmente cortos, no significan mayor inconveniente, dado que, el agua producida puede ser almacenada en los tanques de agua (skimmer y reposo) y además, existen otras bombas HPS que seguirán bombeando el agua a interior de pozo.
- Dentro del sistema eléctrico aislado, los motores HPS cuentan con la mayor potencia consumida del sistema, por lo que al retirar oportunamente una de ellas o dos, el sistema subirá sus niveles de frecuencia a valores óptimos.

o) Protecciones eléctricas

El estudio de protecciones eléctricas se da con la finalidad de proteger a las instalaciones eléctricas de un sistema, de fallas monofásicas, bifásicas, trifásicas o combinaciones entre ellas.

La metodología de su operación no es de eliminar la causa de la falla, sino aislar el equipo en falla, mediante el disparo de un contacto, que genera la apertura del interruptor.

Las protecciones eléctricas deben contar con las siguientes virtudes:

- Sensibilidad: Propiedad que asegura la actuación del relé, en base a los ajustes que se le han dado, por el estudio de coordinación de protecciones, esto incluye a los ajustes mínimos.
- Velocidad: Propiedad que nos da la seguridad de que el relé apertura el interruptor en un tiempo de 200-500ms aproximadamente, este tiempo incluye el tiempo que demora el relé en sensar la falla y enviar la señal al interruptor y el tiempo que demora el interruptor en abrir el circuito en falla.
- Selectividad: Propiedad que se gana, luego de un correcto estudio de coordinación, brinda la función de solo aislar, como prioridad, el equipo en falla. En tal sentido, el relé que debe actuar en primera instancia es el relé que está conectado de manera adyacente al equipo en falla.
- Fiabilidad: Esta propiedad se obtiene luego de instalar un respaldo aguas arriba, al relé principal, llamado relé secundario o respaldo.

En líneas generales, todo equipo eléctrico debe contar con dos protecciones asociadas, principal y secundaria. Esto con la finalidad de salvaguardar la integridad del equipo, aunque el relé principal falle, con la actuación del relé secundario.

En nuestro sistema eléctrico aislado, se debe tener en cuenta que cada conjunto motor y variador o motor y arrancador suave, tienen protecciones eléctricas propias asociadas, por lo que la protección en cada celda de salida del Switchgear, que se dirige

al conjunto antes mencionado, sería un respaldo de la protección propia; por lo que se debe considerar dicho criterio en la coordinación.

Como criterio adicional, la curva de los ajustes de las protecciones, deben quedar por debajo de la curva de daño de equipos, llámese transformadores y motores; con la intención de aislar la falla antes que genere algún daño crítico al equipo. Además, la curva de los ajustes de protecciones, debe quedar por encima de la curva de operación en estado normal, con la finalidad de evitar falsas operaciones.

Es preciso mencionar que, dada la potencia instalada del proyecto, el tamaño de la red aislada y las cargas a proteger; solo se contará con la protección por sobre corriente entre fases. En cuanto a la protección de sobrecorriente fase neutro sensitiva, se considerará en una siguiente etapa de crecimiento.

El desarrollo de este estudio se realizará con la ayuda del software Power Factory, la cual nos brinda un procedimiento dinámico, para fijar curvas de daño, de arranque, ajustes de protecciones y coordinaciones de estas. Sin embargo, es preciso conocer ciertos criterios relacionados al cálculo de fondo en este asunto, según el equipo a proteger, estos fueron tomados en base al documento “Criterios de ajuste y coordinación de protecciones”, recomendación generada por el COES y en base a la práctica en el rubro:

- Transformadores reductores: La corriente de arranque de la función de sobre corriente entre fases de tiempo definido e instantáneo (50/51), se ajusta al 120% de la corriente nominal primaria de los transformadores, la cual queda por debajo de la curva de arranque (inrush).
- Motores: La corriente de arranque de la función de sobre corriente entre fases de tiempo definido e instantáneo (50/51), se ajusta al 150% de la corriente nominal del motor. Con esta consideración, nos aseguramos que la gráfica de despeje de fallas, quede por encima de la gráfica de sobre carga, la cual suele tener incorporado en el variador o arrancador suave del motor asociado.

- Barras y cables: La corriente de arranque de la función de sobre corriente entre fases de tiempo definido e instantáneo (50/51), de la celda de alimentación de la barra y cable, se ajusta al 120% de la corriente nominal de la barra.

p) Filosofía de operación final

El proceso de producción de la planta de extracción de crudo, se resume en tres etapas: extracción de crudo, separación de crudo, agua y gas, y producción de agua.

En base a los diagramas unifilares y el desarrollo del estudio, se puede apreciar que, el mayor análisis se realizará en las áreas de bombas electro sumergibles y bombas horizontales. En cuanto a las facilidades de producción, las cuales proporcionan la separación de crudo, agua y gas, se mencionarán solo superficialmente, dado que, por su baja potencia, no son de interés del presente proyecto.

Cabe mencionar que, el proceso se inicia con la extracción de crudo, mediante las bombas electro sumergibles, el crudo extraído se traslada mediante tuberías y manifolds, a los separadores trifásicos.

El ingreso del crudo en el separador trifásico es el inicio de las facilidades de producción, el cual es el responsable de separar el crudo en gas, agua producida y crudo.

Pese a que, los separadores trifásicos, cuentan con la función de separar crudo, agua y gas, el crudo aún cuenta con un porcentaje de agua y sales; por tal motivo debe ser enviado a un tratador térmico, junto con agua producida desde los desaladores.

Mediante el aumento de temperatura del crudo, en el tratador térmico, se logra romper con la emulsión dura del crudo, reduciendo los porcentajes de agua que contiene el crudo.

El crudo proveniente del producto del tratador térmico, se dirige al desalador, el cual, mezclado con agua fresca, que viene del intercambiador de calor, ayuda a reducir los niveles de agua y sal del crudo.

El crudo producido debe ser almacenado en tanques crudo y el agua producida debe ser almacenada en tanques de agua.

El gas producido, debe ser direccionado al colector de gas, el cual es quemado en el flare.

En cuanto al crudo almacenado en tanques, deben ser analizados, para verificar si cumplen los estándares mínimos requeridos. En caso no cumple los estándares, se reenvía a la planta de procesos, para que vuelva a ser procesado, mediante bombas de rechazo. En caso si cumpla los estándares, se envía para su despacho, mediante bombas de exportación.

En cuanto al agua producida, debe ser reinyectada en pozos de agua, para cerrar el ciclo y evitar que los tanques se llenen y no se tenga capacidad para seguir el proceso.

Como bien se mencionó, la mayor carga se acumula entre las bombas de extracción de crudo y reinyección de agua, por lo que ahí es donde se centrará el estudio.

El sistema eléctrico cumplirá la función de evitar cortes de energía a las cargas más importantes, por lo que se implementará el sistema de secundario selectivo, el cual nos dará las fortalezas de un sistema con doble barra.

El diseño del sistema permitirá la duplicidad de barras, alimentadores y transformadores.

El sistema contará con dos tipos de modos operativos: manual y automático.

- El modo manual, resulta luego de liberar el enclavamiento entre barras, el cual nos da el modo de operar el sistema como un sistema doble barra, pudiendo cerrar o abrir el interruptor de enlace y repartir carga a dos alimentadores o hacer que asuma la totalidad de carga un solo alimentador; de tal manera que no se pierda el suministro en ningún momento. Las maniobras deben de hacerse directamente en el interruptor por personal calificado, cabe mencionar que, el modo manual suele utilizarse en mantenimientos o fallas de equipos eléctricos.
- En modo automático, el interruptor de enlace trabajará normalmente abierto, cada barra será alimentado por su propio alimentador, en caso suceda algún tipo de falla en alguno de los alimentadores, el relé de protección apertura al alimentador y el

sistema en modo automático cerrará el interruptor de enlace, volviendo a energizar la barra mediante el otro alimentador sin falla; dejando a la barra energizada y lista, para la reposición de cargas en el sistema.

En líneas generales, lo descrito es parte de los criterios de diseño y su cumplimiento es de carácter obligatorio.

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

3.1 Análisis del problema

Como se mencionó en capítulos anteriores, dada la ubicación, difícil acceso y falta de redes interconectadas en la zona de influencia, se prevé contar con un sistema eléctrico aislado. Donde, el objetivo principal es diseñar un sistema eléctrico eficiente de una planta de extracción de crudo y reinyección de agua en un lote petrolero.

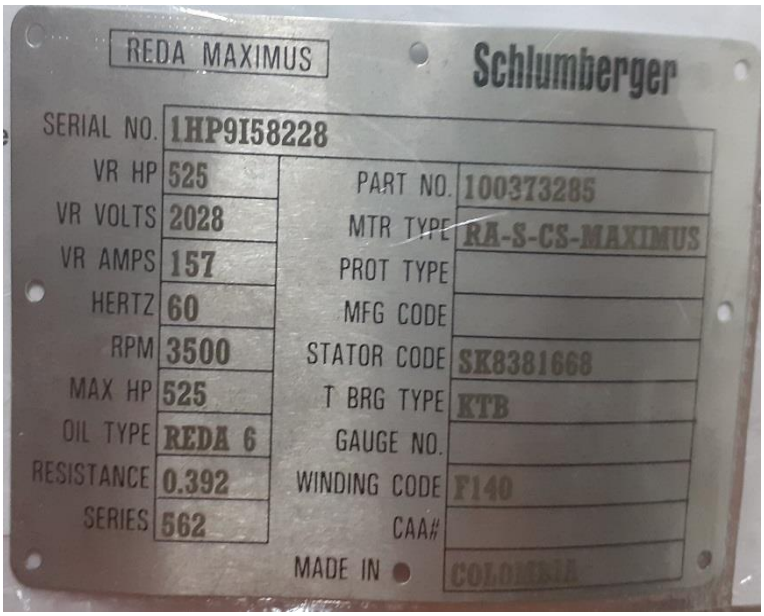
El sistema aislado cuenta con dos tipos de cargas de alta potencia, las cuales son predominantes para los análisis y servirán de referencia en todo el modelado y ejecución de cálculos justificativos.

La primera carga predominante es la que alimentará al motor del sistema de bombeo de extracción de crudo, en las siguientes figuras, se muestran detalles del equipo motor-bomba y datos de placa del motor.

Figura 9:
Conjunto motor-BES

Nota: página web de ProMotor

Figura 10:
Datos de placa del motor de BES



Nota: Schlumberger

La segunda carga predominante es la que alimentará al motor del sistema de inyección de agua, en las siguientes figuras se evidencia el conjunto motor bomba horizontal y datos de placa del motor de HPS.

Figura 11:
Conjunto motor y bombas horizontal de HPS

Nota: Baker Hugues

Tabla 18:
Datos de placa del motor de HPS

HOJA DE DATOS

Motor Trifásico de Inducción - Rotor de Jaula

Cliente	:
Línea del producto	: W50 Classe I Divisão II - AT - 1.2kV a 5.0kV

Carcasa	: W50 7008/09	Tiempo de rotor bloqueado	: 25 s (caliente) 45 s (frío)
Potencia	: 1000 HP (750 kW)	Elevación de temperatura[4]	: 105 K
Polos	: 2	Régimen de servicio	: Cont.(S1)
Frecuencia	: 60 Hz	Temperatura ambiente	: -20 °C hasta +40 °C
Tensión nominal	: 4160 V	Altitud	: 1000 m
Corriente nominal	: 121 A	Grado de protección	: IP55
Corriente de arranque	: 823 A	Método de enfriamiento	: IC411 - TEFC
Ia/In (p.u.)	: 6.8 Cód. G	Forma constructiva	: F-1
Corriente en vacío	: 23.4 A	Sentido de giro[1]	: Antihorario
Rotación nominal	: 3588 rpm	Nivel de ruido[2]	: 82.0 dB(A)
Deslizamiento	: 0.33 %	Método de arranque	: Convertidor
Par nominal	: 202 kgfm	Masa aproximada[3]	: 5270 kg
Par de arranque	: 80 %		
Par máximo	: 250 %		
Clase de aislamiento	: F		
Factor de servicio	: 1.00		
Momento de inercia (J)	: 26.4 kgm²		

Potencia	Empezar	50%	75%	100%
Rendimiento (%)	-	95.4	95.8	95.8
Factor de potencia	0.17	0.88	0.89	0.90

Tipo de carga	: Par parabólico
Par de la carga	: 200 kgfm
Inercia de la carga (J=GD²/4)	: 26.4 kgm²

Límite de funcionamiento con el convertidor	Tensión de Pico Fase-Tierra <= 6000 V
30 Hz hasta 60 Hz (Par variable): 200 kgfm	Tensión de pico fase-fase máxima <= 10300 V
	dV/dt <= 2700 V/µs

	Delantero	Trasero
Tipo de rodamiento	6220-C3	6220-C3
Intervalo de lubricación	2223 h	2223 h
Cantidad de lubricante	31 g	31 g
Tipo de lubricante	MOBIL POLYREX EM	

Nota: WEG

3.1.1 Metodología

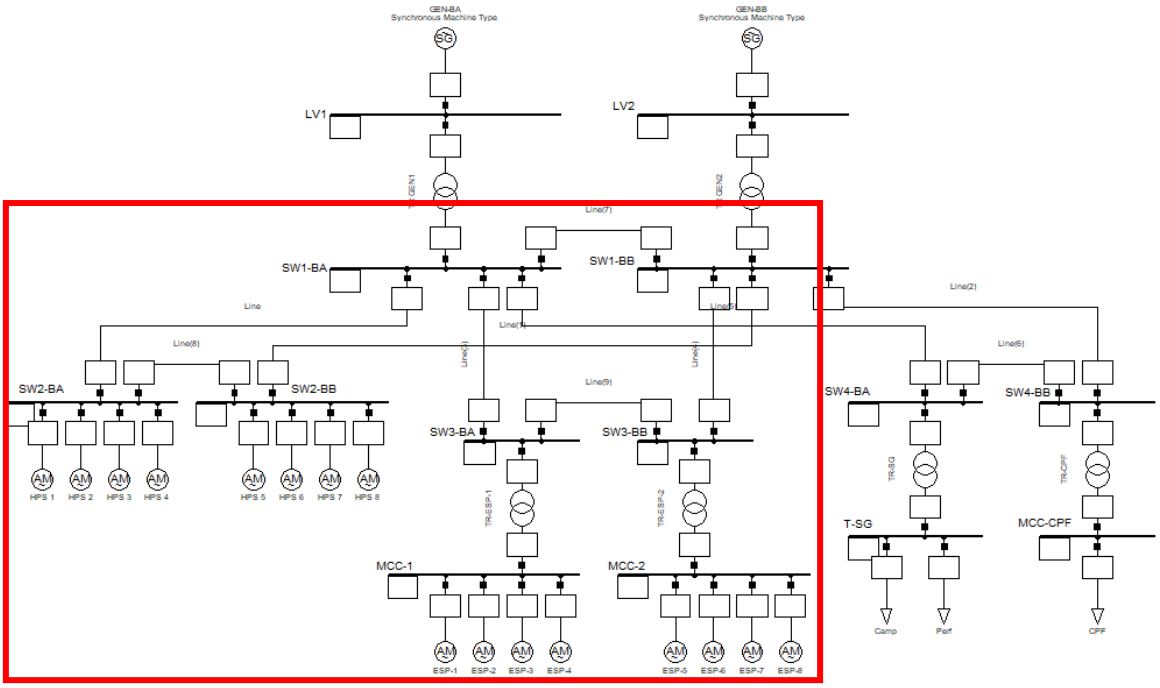
a) Tipo de investigación

Nuestro sistema eléctrico aislado, tiene una composición de secundario selectivo, el cual brinda las facultades de continuar despachando energía, pese a que, una acometida presente fallas monofásicas, bifásicas o trifásicas; mediante el uso de una acometida que puede trabajar como respaldo o de manera conjunta con la principal.

En tal sentido, es necesario incluir una barra de reserva y unas celdas de acoplamiento, para cada Switchgear de media tensión.

En la siguiente figura, se muestra la topología básica que tendrá el sistema y se procederá a describir cada elemento del sistema. Cabe mencionar que, el área delimitada por el rectángulo de color rojo, es materia de estudio del presente informe.

Figura 12:
Topología de la red aislada



Nota: Elaboración propia

Tabla 19:
Equipos

Equipo	Descripción
GEN-BA	Generadores acoplados a la barra A
GEN-BB	Generadores acoplados a la barra B
TR-GEN1	Transformador elevador del grupo de generación asociados a la barra A
TR-GEN2	Transformador elevador del grupo de generación asociados a la barra B
TR-ESP-1	Transformador reductor asociado a la barra A y bombas electrosumergibles
TR-ESP-2	Transformador reductor asociado a la barra B y bombas electrosumergibles
TR-SG	Transformador reductor de servicios generales
TR-CPF	Transformador reductor de facilidades de producción

Nota: Elaboración propia

Tabla 20:
Barras

Equipo	Descripción
LV1	Barra de generación en baja tensión, asociada a la Barra A
LV2	Barra de generación en baja tensión, asociada a la Barra B
SW1-BA	Barra A del Switchgear 1
SW1-BB	Barra B del Switchgear 1
SW2-BA	Barra A del Switchgear 2
SW2-BB	Barra B del Switchgear 2
SW3-BA	Barra A del Switchgear 3
SW3-BB	Barra B del Switchgear 3
MCC-1	Centro de control de motores 1
MCC-2	Centro de control de motores 2
SW4-BA	Barra A del Switchgear 4
SW4-BB	Barra B del Switchgear 4
T-SG	Barra del tablero de servicios generales
MCC-CPF	Centro de control de motores de facilidades de producción

Nota: Elaboración propia

Tabla 21:
Cables

Equipo	Descripción
Line	Desde SW1-BA hasta SW2-BA
Line(1)	Desde SW1-BB hasta SW2-BB
Line(2)	Desde SW1-BB hasta SW4-BB
Line(3)	Desde SW1-BA hasta SW3-BA
Line(4)	Desde SW1-BB hasta SW3-BB
Line(5)	Desde SW1-BA hasta SW4-BA
Line(6)	Desde SW4-BA hasta SW4-BB
Line(7)	Desde SW1-BA hasta SW1-BB
Line(8)	Desde SW2-BA hasta SW2-BB
Line(9)	Desde SW3-BA hasta SW3-BB

Nota: Elaboración propia

Tabla 22:
Cargas

Equipo	Descripción
HPS	Motores de inducción para bombas horizontales de inyección de agua
ESP	Motores de inducción para bombas electrosumergibles
Camp	Campamento
Perf	Perforación
CPF	Facilidades de producción centrales

Nota: Elaboración propia

b) Diseño de investigación

Para efectos de la investigación aplicada, se realizará un enfoque cuantitativo, el cual empezaremos a detallar paso a paso, en base a cada objetivo; partiendo desde el objetivo principal, objetivos específicos y culminando con un diagrama de bloques que servirá a manera de resumen de lo antes expuesto.

Las actividades que se deben desarrollar para conseguir el objetivo general: "Diseñar un sistema eléctrico eficiente de una planta de extracción de crudo y reinyección de agua en un lote petrolero", son los siguientes:

- Calcular los parámetros eléctricos de ciertos conductores, barras y transformadores, los cuales serán nuestras variables dependientes; en base a variables conocidas como cargas y generadores. El enfoque estará basado en diversas ecuaciones matemáticas, sustentadas en normas y validadas en la experiencia del día a día, del rubro.
- Se iniciará evaluando las máximas demandas de las cargas, desde los alimentadores de las cargas hacia aguas arriba, el cual será un análisis en estado estacionario; para culminar dicho análisis con la capacidad de barras y transformadores.
- Modelado de sistema eléctrico aislado, mediante el uso del software Power Factory.
- Ejecución de flujo de carga del sistema eléctrico aislado, mediante el uso del software Power Factory.
- Posterior a ello, se debe evaluar las capacidades de cortocircuito de las barras, las cuales servirán para complementar las especificaciones técnicas de las mismas.
- En base a todo lo antes calculado, se procederá a realizar estudios complementarios como son el estudio de protecciones eléctricas y rechazo de carga.
- La consigna de realizar dichos pasos, es lograr tener un sistema eléctrico aislado, eficiente.

Las actividades que se deben desarrollar para conseguir el primer objetivo específico, “Caracterizar el diseño eléctrico tradicional de la planta de extracción de crudo y reinyección de agua en un lote petrolero”, son los siguientes:

- Descripción de la planta sin consideraciones de optimización.
- La consigna de realizar dicho paso, es contrastar el antiguo estudio con el estudio optimizado.

Las actividades que se deben desarrollar para conseguir el segundo objetivo específico, “Desarrollar el diseño preliminar y determinar la viabilidad técnica y económica”, son los siguientes:

- Modelado de sistema eléctrico aislado, mediante el uso del software Power Factory.
- Ejecución de flujo de carga del sistema eléctrico aislado, mediante el uso del software Power Factory y elaboración de estudio de flujo de carga.

Las actividades que se deben desarrollar para conseguir el tercer objetivo específico, “Especificar técnicamente los equipos eléctricos y realizar los diseños finales del sistema eléctrico”, son los siguientes:

- Elaboración de especificaciones técnicas de transformadores de distribución.
- Elaboración de especificaciones técnicas de Switchgear.

Las actividades que se deben desarrollar para conseguir el cuarto objetivo específico, “Realizar el estudio pre operativo, garantizando desempeño y seguridad”, son los siguientes:

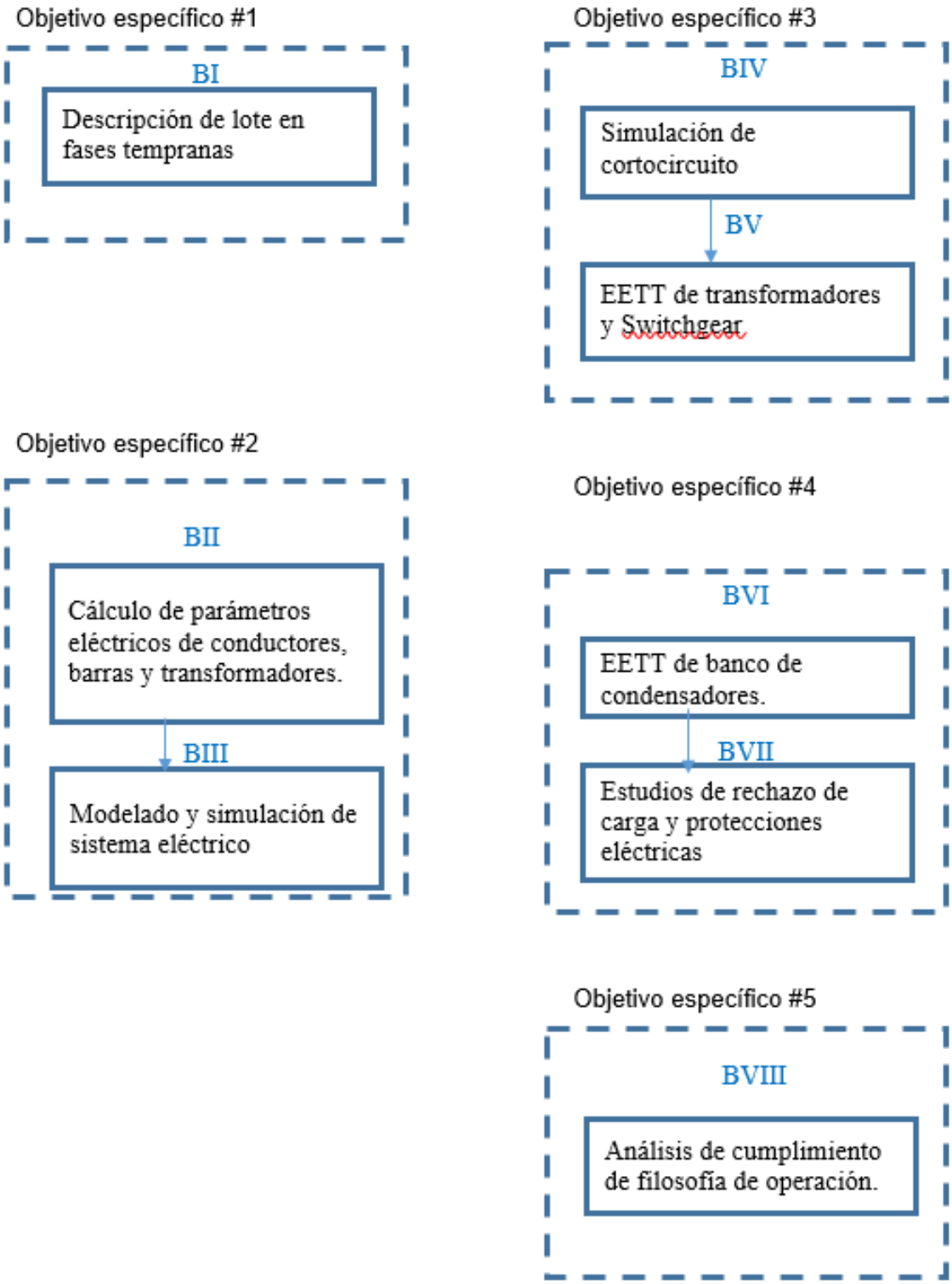
- Elaboración de especificaciones técnicas de banco de condensadores.
- Elaboración de estudio de rechazo de carga.
- Elaboración de estudio de protecciones eléctricas.

Las actividades que se deben desarrollar para conseguir el quinto objetivo específico, “Evaluar el diseño del sistema eléctrico de la planta de extracción de crudo y reinyección de agua en un lote petrolero”, son los siguientes:

- Análisis de cumplimiento de filosofía de operación.

A manera de resumen, se procederá a elaborar un diagrama de bloques, que se presente lo antes expuesto:

Figura 13:
Diagrama de bloques de cumplimiento de objetivos específicos



Nota: Elaboración propia

La resolución de los objetivos se realizará en orden secuencial, al igual que cada bloque, correspondiente al diagrama presentado en la figura 13, a continuación, se procederá a dar explicación del desarrollo de cada bloque:

En el bloque I, correspondiente a la resolución del objetivo específico 1, se procederá a realizar un análisis de la planta existente; antes de su ampliación y mejoramiento, esto con la finalidad de verificar la poca demanda eléctrica que existía en comparación con la nueva planta. En base al poco consumo, se infiere, las pocas facilidades de la red aislada y el uso de grupos electrógenos pequeños, sistema radial, falta de redundancia en los equipos, planeamiento manual y empírico en ocasiones, etc. Este punto es importante, porque a su vez, justifica el planteamiento de los siguientes objetivos.

En el bloque II, correspondiente a la resolución del objetivo específico 2, se procederá a resolver cálculos justificativos que, brinden información de ciertos parámetros eléctricos, como tensión, corriente, potencia, etc., de conductores, barras y transformadores; dicha información de la nueva planta mejorada y ampliada, es necesaria, para la solución de los próximos bloques.

En el bloque III, correspondiente a la resolución del objetivo específico 2, se procederá a elaborar el modelado y su correspondiente simulación de flujo de carga, en base a los parámetros obtenidos en el bloque II, de esta manera se verificará la viabilidad técnica del proyecto y se sabrá a su vez, si son necesarios adicionar otros equipos como el banco de condensadores.

En el bloque IV, correspondiente a la resolución del objetivo específico 3, se procederá a elaborar la simulación de corto circuito, en base al bloque III, de esta manera se verificará la capacidad de cortocircuito que deberán soportar los equipos eléctricos, esto a su vez, junto con el bloque III, ayudarán a elaborar las especificaciones técnicas de los equipos; correspondientes al siguiente bloque V.

En el bloque V, correspondiente a la resolución del objetivo específico 3, se procederá a elaborar las especificaciones técnicas de equipos como, Switchgear, transformadores, entre otros necesarios.

En el bloque VI, correspondiente a la resolución del objetivo específico 4, se elaborará la especificación técnica del banco de condensadores, en caso aplique, en base al bloque III.

En el bloque VII, correspondiente a la resolución del objetivo específico 4, se elaborarán estudios de rechazo de carga y protecciones; con la finalidad de complementar la confiabilidad de la planta. El análisis del rechazo de carga tendrá como punto de aplicación, a las bombas HPS, dado que la planta puede prescindir de dicha carga por un determinado tiempo y seguir operando. El análisis de las protecciones eléctricas, se realizará solo en la zona de influencia del proyecto, dejando fuera de alcance la zona tipificada en el bloque I.

En el bloque VIII, correspondiente a la resolución del objetivo específico 5, se analizará el desarrollo de todo el estudio, contrastándolo con la filosofía de operación de la planta; con la finalidad de dar la conformidad del cumplimiento del desarrollo de todos los objetivos.

c) Población

Dentro del sector interesado, se cuenta con:

- Empresas petroleras en fase de explotación.
- Empresas petroleras en fase de exploración.
- Inversionistas mundiales del sector de hidrocarburos.
- Especialistas en diseño de sistemas eléctricos para pozos petroleros.
- Estudiantes y público en general del sector de hidrocarburos.
- Profesionales de industrias en general, que deseen optar por el método de diseño.

En cuanto a los dos primeros puntos, podemos mencionar los existentes en el país, hasta la fecha de 31 de diciembre del 2021, información actualizada por Perupetro:

Tabla 23:
Contratos en fase de explotación

CONTRATOS EN FASE DE EXPLOTACION AL 31.12.2021						
ZONA	**LOTE**	**OPERADOR**	**FECHA DE SUSCRIPCION**	**FECHA DE TERMINO**	**AREA (ha)**	**MODALIDAD DE CONTRATOS**
SELVA NORTE	8	PLUSPETROL NORTE	19-May-94	19-May-24	182,348.210	LICENCIA
	39	PARENCO	9-Set-99	7-Ago-39	79,164.497	LICENCIA
	64	PETROPERU	7-Dic-95	14-Jun-39	761,501.001	LICENCIA
	67	PERENCO	13-Dic-95	25-Jun-33	101,931.686	LICENCIA
	95	PETROTAL	7-Abr-05	30-Nov-41	345,281.667	LICENCIA
SELVA CENTRAL	31-C	AGUAYTIA	30-Mar-94	29-Mar-34	16,630.000	LICENCIA
	131	CEPSA	21-Nov-07	18-Ene-38	15,483.733	LICENCIA
SELVA SUR	56	PLUSPETROL	7-Set-44	6-Set-44	58,500.000	LICENCIA
	88	PLUSPETROL	9-Dic-00	8-Dic-40	82,803.521	LICENCIA
	57	REPSOL	27-Ene-04	28-Ene-44	28,028.750	LICENCIA
	58	CNPC	12-Jul-05	8-Set-45	340,133.717	LICENCIA
NOROESTE	I	PETROPERU	27-Dic-21	21-Oct-23	6,943.250	LICENCIA
	II	PETROMONT	5-Ene-96	4-Ene-26	7,691.420	LICENCIA
	III	GMP	31-Mar-15	4-Abr-45	35,799.305	LICENCIA
	IV	GMP	31-Mar-15	4-Abr-45	29,521.990	LICENCIA
	V	GMP	8-Oct-93	5-Oct-23	9,026.032	SERVICIOS
	VII/VI	SAPET	22-Oct-93	21-Oct-23	32,434.113	LICENCIA
	IX	UNIPETRO ABC	16-Jun-15	16-Jun-45	2,754.133	LICENCIA
	X	CNPC	20-May-94	19-May-24	46,952.342	LICENCIA
	XIII	OLYMPIC	30-May-96	29-May-36	273,357.845	LICENCIA
	XV	PETROMONT	26-May-98	25-May-28	9,498.904	LICENCIA
	XX	PETROMONT	19-Ene-06	18-Ene-36	6,124.207	LICENCIA
ZOCALO	Z-2B	SAVIA	16-Nov-93	15-Nov-23	130,315.659	OPERACIONES
	Z-1	FRONTERA OFF SHORE	30-Nov-01	28-Ene-32	25,294.597	LICENCIA
	Z-63	SAVIA	20-Mar-02	19-Mar-32	528,116.614	LICENCIA
TOTAL		25			3,155,637.193	

(*) Terminaron los siguientes Contratos: Lotes (s) / Último día de vigencia:
Lote 192(FRONTERA)/ 05.02.2021.
Lote I (GMP)/ 26.12.2021
(**) El 27.12.2021 inició el Contrato de Licencia Temporal para la Explotación de Hidrocarburos en Lote I con PETROPERU
Nota: Perupetro

Tabla 24:
Contratos en fase de exploración

CONTRATO EN FASE DE EXPLORACION AL 31.12.2021				
ZONA	LOTE	OPERADOR	AREA (ha)	MODALIDAD DE CONTRATO
SELVA CENTRAL	107	PETROLIFERA	252,232.329	LICENCIA
	XXI	GOLD OIL	240,755.063	LICENCIA
	XXIII	UPLAND GIL & GAS	93,198.956	LICENCIA
	XXVIII	PETROP BAYOBAR	49,821.139	LICENCIA
	Z-61	ANADARKI	680,519.430	LICENCIA
	Z-62	ANADARKI	656,356.153	LICENCIA
	Z-63	ANADARKI	548,049.976	LICENCIA
TOTAL		7	2,520,933.046	

(*)Terminaron los siguientes contratos: Lote (s)/ Ultimo día de vigencia
- Lote XXIX / 30.04.2021
- Lote Z-64/ 30.06.2021
- Lote Z-38/ 27.07.2021
- Lote Z-67/ 22.12.2021
- Lote Z-68/ 22.12.2021
Nota: Perupetro

d) Métodos y técnicas de obtención de datos

La información utilizada en esta investigación proviene de empresas asociadas al rubro de extracción de petróleo, llámese empresas que tiene contrato de explotación, contratistas, EPC, consultores, fabricantes y generadores de energía.

Las cuales sirvieron de ejemplo y referencia, para la elaboración de la presente propuesta, en base a criterios de mejora presentados en normativas vigentes y trabajos realizados en el sector.

3.1.2 Aspectos de gestión

a) Recursos

Los principales recursos que se requieren para la elaboración del informe provienen de:

- Normativas detalladas en el punto 2.1.1. Marco Legal.
- Software Power Factory.
- Experiencia profesional.

3.1.3 Relación entre Objetivos Específicos con los requerimientos preliminares obtenidos

En la siguiente tabla, se muestran los requerimientos que se deben buscar, para alcanzar los objetivos específicos:

Tabla 25:
Tabla de relación entre objetivos específicos y requerimientos

Objetivo específico	Requerimientos
O1) Caracterizar el diseño eléctrico tradicional de la planta de extracción de crudo y reinyección de agua en un lote petrolero	• Descripción de fase temprana
O2) Desarrollar el diseño eléctrico preliminar y determinar su viabilidad técnica y económica.	• Estudio de flujo de carga
O3) Especificar técnicamente los equipos eléctricos y realizar los diseños finales del sistema eléctrico	• Estudio de cortocircuito • EETT de transformadores, Switchgear.
O4) Realizar el estudio pre operativo, garantizando desempeño y seguridad.	• EETT banco de condensadores. • Estudio de rechazo de carga • Estudio de protecciones
O5) Evaluar el diseño del sistema eléctrico de la planta de extracción de agua en un lote petrolero.	• Análisis de cumplimiento de filosofía de operación.

Nota: Elaboración propia

3.2 Diseño de la solución

3.2.1 Escenario preliminar

En sus inicios, la planta petrolera, cuenta con cargas eléctricas que se van a mantener en el tiempo, las cuales se procederán a detallar en la tabla 17.

El análisis de dichas cargas no estará en el análisis de diseño de las cargas de extracción de crudo y reinyección de agua, por corresponder a facilidades de producción y por ser de baja potencia, respecto a las otras cargas, ya mencionadas.

En el modelado se llegará a representar estas cargas, con su transformador reductor que lo alimenta y con el valor total de la carga, la cual la representa.

Los datos presentados en la siguiente tabla 17, fueron tomados de instalaciones reales de lotes petroleros.

Teniendo en cuenta que, la nueva alimentación de la planta, será en media tensión, 4160V, se debe considerar un transformador reductor de relación de transformación 4160/480V, 500 kVA, el cual alimentará al centro de control de motores, antiguo.

El antiguo centro de control de motores, alimenta cargas específicas, que, según la filosofía de operación, interactúan en el funcionamiento de la planta de procesos.

Internamente, en la sala eléctrica que contiene al centro de control de motores, se encuentra un transformador reductor 480/240V, 45kVA., el cual suministrará de energía a todas las cargas en 220V, como: iluminación interior, tomacorrientes, aire acondicionado, sistema de presurización, iluminación de emergencia y transformador/rectificador del sistema de protección catódica.

En cuanto a las cargas del campamento y perforación, se considerará un transformador reductor 4160/480V, 500kVA.

El campamento tendrá las facilidades de iluminación, tomacorriente y aire acondicionado y será utilizado por personal de operación y mantenimiento.

La carga de perforación considerará las cargas para perforar nuevos pozos de crudo y agua, hasta llegar a la cantidad final proyectada, adicional a ello, debe considerar las cargas de talleres, oficinas, etc.

El dimensionamiento de estas cargas, por ser existentes, están fuera del alcance del proyecto de suficiencia.

Tabla 26:
Características de cargas de procesos preliminares

DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO	HP	KVA	Nº F	Vn [V]
Transformador reductor		500.00	3	4160
Centro de control de motores		500.00	3	480
Bomba de exportación de crudo “A”	75		3	480
Bomba de exportación de crudo “B”	75		3	480
Bomba de rechazo de crudo “A”	15		3	480
Bomba de rechazo de crudo “B”	15		3	480
Bomba booster de agua “A”	100		3	480
Bomba booster de agua “B”	100		3	480
Bomba de diluyente “A”	3		3	480
Bomba de diluyente “B”	3		3	480
Panel de fuerza - quemador (heater/treater) “A”		15.00	3	480
Panel de fuerza - quemador (heater/treater) “B”		15.00	3	480
Transformador de desalador electrostático		50.00	3	480
Bomba de recirculación de agua producida	5		3	480
Bomba de recirculación de agua producida “A”	5		3	480
Bomba de recirculación de agua producida “B”	5		3	480
Bomba de sumidero	7 1/2		3	480
Transformador de servicios generales		45.00	3	480
Tablero de iluminación exterior		8.92	3	480
Panel de inyección de químicos		11.97	3	480
Circuito de iluminación exterior C-1		3.12	2	480
Circuito de iluminación exterior C-2		2.34	2	480
Circuito de iluminación exterior C-3		0.74	2	480
Circuito de iluminación exterior C-4		2.73	2	480
Tablero de servicios generales		45.00	3	240
Circuito de iluminación interior C-1		0.28	2	240
Circuito de iluminación interior C-2		0.28	2	240
Circuito de iluminación exterior C-3		0.19	2	240
Circuito de tomacorrientes C-1		1.44	2	240
Circuito de tomacorrientes C-2		1.44	2	240
Circuito de aire acondicionado tipo mochila (48.000 btu)		4.00	2	240
Circuito para sistema de presurización		2.50	2	240
Circuito de aire acondicionado tipo split (24.000 btu)		5.00	2	240
Circuito de iluminación de emergencia		0.01	2	240
Transformador/rectificador (protección catódica)		4.29	2	240
Transformador/rectificador (protección catódica)		3.57	2	240
Transformador/rectificador (protección catódica)		0.14	2	240

Nota: Elaboración propia por experiencia profesional

3.2.2 Selección de barras

a) Barra A o Barra B de Switchgear 2

En base a la potencia conocida de las HPS 1000HP y en base a la información que muestra el diagrama unifilar que se presenta en la Figura 12, se sabe que, las barras del Switchgear 2, deberán alimentar como máximo ocho HPS; en caso el interruptor de acoplamiento se encuentre cerrado.

En la siguiente tabla, se muestra la información técnica que deberá contar la barra del Switchgear 2:

Tabla 27:
Consumo de potencia en barra del SW2

Parámetros eléctricos	Valores
Potencia de un circuito HPS	746kW
Tensión	4160V
Frecuencia	60Hz
Corriente nominal de un circuito HPS	129.57A
Corriente de diseño de un circuito HPS	161.96A
Capacidad de interruptor de un circuito HPS y acoplamiento	630A
Consumo total de barra Switchgear 2	1068.95A
Capacidad de corriente seleccionada en barra Switchgear 2	1250A

Nota: Elaboración propia

b) Barra de MCC-1 o MCC-2

Dado que se conoce que, la potencia a plena carga de cada circuito BES es 391kW y que se instalarán cuatro circuitos BES por cada barra de MCC-1 o MCC-2, podemos inferir que la potencia de la barra en mención debe soportar la potencia de los cuatro circuitos BES conectados e incluso soportar alguna posible sobre carga de uno de ellos; en la siguiente tabla se mostrará el detalle de consumo que debe soportar la barra del MCC-1 o MCC-2.

Tabla 28:
Consumo de potencia en barra MCC-1 o MCC-2

Parámetros eléctricos	Valores
Potencia de un circuito BES	391kW
Tensión	480V
Frecuencia	60Hz
Corriente nominal de un circuito BES (Factor de potencia 0.98)	480A
Corriente de diseño de un circuito BES	600A
Capacidad de corriente de interruptor de un circuito BES	1000A
Consumo total de barra MCC-1 o MCC-2	2040A
Capacidad de corriente seleccionada en barra MCC-1 o MCC-2	3150A

Nota: Elaboración propia

c) Barra A o Barra B de Switchgear 3

En base a la potencia de los transformadores que van conectadas aguas abajo del Switchgear 3, 2.5MVA cada uno, se puede calcular la demanda total en barras del Switchgear 3. En dicho cálculo, se debe usar el mismo criterio para el cálculo total de la capacidad de barra del Switchgear 2, la cual se da con el acoplamiento cerrado, la barra deberá alimentar a dos transformadores de 2.5MVA cada uno.

En la siguiente Tabla, se apreciará el análisis de los datos y cálculo de capacidad de barra del Switchgear 3:

Tabla 29:
Consumo de potencia en barra SW3

Parámetros eléctricos	Valores
Potencia de un transformador	2.5MVA
Tensión	4160V
Frecuencia	60Hz
Corriente nominal de un transformador	347.37A
Corriente en sobrecarga del 25%	434.22A
Capacidad de corriente de interruptor de un transformador	630A
Consumo total de barra Switchgear 3	781.59
Capacidad de corriente seleccionada en barra de Switchgear 3	1250A

Nota: Elaboración propia

d) Barra A o Barra B de Switchgear 1

En base a las capacidades obtenidas en las barras del Switchgear 2 y Switchgear 3, se calculará la capacidad de corriente que deberá soportar la barra del Switchgear 1, además, se debe tener en cuenta que, hay otras cargas conectadas a dicha barra; para lo cual se considerará una potencia promedio de consumo, dado que no son materia de estudio.

Dentro del análisis, también se debe considerar el escenario más desfavorable, el cual se da cuando el interruptor de acoplamiento se encuentre cerrado.

Tabla 30:
Consumo de potencia en barra SW1

Parámetros eléctricos	Valores
Potencia de cargas fuera de estudio	1.5MVA
Tensión	4160V
Frecuencia	60Hz
Corriente nominal de barra Switchgear 2	1068.95A
Corriente nominal de barra Switchgear 3	781.59A
Corriente nominal de cargas fuera de estudio	208.42A
Consumo total de barra Switchgear 1	2058.96A
Capacidad de corriente seleccionada en barra Switchgear 1	2500A

Nota: Elaboración propia

3.2.3 Selección de transformadores

a) TR-ESP-1 o TR-ESP-2

En base al punto 3.2.2.b, “selección de barras MCC-1 o MCC-2”, se puede deducir la potencia nominal del transformador TR-ESP-1 o TR-ESP-2, utilizando la fórmula (2.4).

Donde:

V=480V

I=2040A

S=1694 kVA

En base a la potencia calculada, se procede a seleccionar un valor superior y comercial, que pueda incluso alimentar crecimientos futuros, si se requiere.

Tabla 31:
Selección de transformador TR-ESP-1 o TR-ESP-2

Parámetros eléctricos	Valores
Potencia del transformador	2500kVA
Tensión primaria	4160V
Tensión secundaria	480V
Frecuencia	60Hz
Grupo de conexión	Dyn5
Aislamiento	Aceite mineral
Impedancia de cortocircuito	5%

Nota: Elaboración propia

3.2.4 Selección de conductores

a) Alimentador HPS

Se procede a mostrar la Tabla 32, en donde se indican las características técnicas del motor HPS, con la finalidad de iniciar cálculos que determinen el conductor ideal para utilizar en nuestro proyecto:

Tabla 32:
Tabla de datos técnicos del motor de las HPS

Parámetros eléctricos	Valores
Potencia	1000HP
Tensión	4160V
Frecuencia	60Hz
Corriente	121A
Factor de potencia	0.9

Nota: WEG

La capacidad de corriente se calcula mediante las fórmulas (2.4) y (2.5), posterior a ello se debe multiplicar por 1.25, dado que el conductor debe contar con una carga del 80% y reserva del 20%.

$$I_n = 115A$$

Conociendo la corriente nominal, se procede a calcular la corriente de diseño, en base a la fórmula (2.7).

$$I_d = 143.9\ A$$

Con la corriente de diseño, se debe escoger el tipo de conductor que se instalará para alimentar a la carga correspondiente, dado que, a través de la bomba, se transmitirá agua producida, el área y por ende el conductor no deben ser para áreas clasificadas.

Para la alimentación del motor de las bombas de las HPS, se consideró una terna unipolar de $50mm^2$ N2XSY, 7.2kV, cobre electrolítico de 99.99%, clase 2, blindaje compuesto por XLPE semiconductor extruido, aislamiento de polietileno reticulado retardante a la arborescencia (XLPE-TR), pantalla metálica y cubierta exterior de PVC.

El cable se instalará en bandeja y la disposición de los conductores serán separados entre sí, en base a ello, su capacidad de corriente es 286 A, para más información, revisar la Tabla 102 correspondiente al Anexo B.

Conocido el valor de corriente y dado sus criterios de montaje, se debe corregir su capacidad, multiplicando una serie de factores de corrección, basados en el criterio de capacidad térmica, se utiliza la fórmula (2.8).

El factor de corrección por temperatura debe ser considerando la alta temperatura de la ciudad de Iquitos, la que en promedio alcanza los 30°C.

$$FCT = 0.93$$

El factor de corrección por capacidad térmica del suelo se omite, dado que el conductor se canalizará a través de bandejas. Es preciso mencionar que las canalizaciones en la selva peruana son de preferencia al aire libre, para conseguir los beneficios de máxima capacidad por ventilación natural y un fácil mantenimiento al evitar contactos con

las posibles inundaciones que se podrían generar por las fuertes lluvias, que se pueden acumular en bancoductos.

$$FCRT = 1$$

El factor de corrección por agrupamiento contemplará la configuración en triángulo considerada en la Tabla 103., la cual consiste en dos circuitos por bandeja.

$$FCA = 0.98$$

Reemplazando en la ecuación inicial (2.8):

$$I_{dc} = 216.91\ A$$

En conclusión, se infiere que, aun considerando los factores de corrección, la capacidad de corriente del conductor seguirá siendo superior al valor de la capacidad de corriente en base a la carga, por lo que se puede concluir que el conductor ha sido bien seleccionado.

En cuanto a la caída de tensión, no se evalúa por ser despreciable a distancias cortas en media tensión.

b) Alimentador BES

Se procede a mostrar la Tabla 33, en donde se indican las características técnicas del motor BES, con la finalidad de iniciar cálculos que determinen el conductor ideal para utilizar en nuestro trabajo de suficiencia:

Tabla 33:
Tabla de datos técnicos del motor de las BES

Parámetros eléctricos	Valores
Potencia	490kVA
Tensión	2028V
Frecuencia	60Hz
Corriente	157A
Factor de potencia	0.8

Nota: Schlumberger

De la misma forma que el caso anterior, se procede a calcular la capacidad de corriente de la carga, cabe mencionar que la bomba electro sumergible es alimentada por

un nivel de tensión de 2028V, luego de pasar por un transformador elevador 480/2028V, para efectos de nuestro estudio, se calculará el conductor que está antes del transformador elevador, dado que el conductor que se ubica después del transformador elevador, es de características especiales y lo provee el mismo proveedor de la bomba electro sumergible; por lo que para efectos de cálculo utilizaremos el nivel de tensión de 480V, utilizando la ecuación (2.4).

$$I_n = 590A$$

Cabe mencionar que, en la práctica no se llegan a dichos valores, sin embargo, para efectos de diseño se debe contemplar el valor nominal e incluso una sobre carga, por lo que el valor de diseño será en base a la ecuación (2.7).

$$I_d = 737.5\ A$$

Conociendo la corriente de diseño, se procede a escoger el conductor idóneo, para este caso se escogerán tres ternas monopolares de 350kcmil de sección circular.

Se verifica que su capacidad es 1050A, cuando es tendido al aire libre. Véase la Tabla 104, correspondiente al Anexo B.

Luego de conocer el tipo de canalización, la capacidad del cable que soportaría bajo los criterios detallados en la Tabla 104 del Anexo B, procedemos a verificar su capacidad en base a las condiciones que se conocen del campo, mediante la corrección de su capacidad térmica, en base a la ecuación (2.8).

El factor de corrección por temperatura será teniendo en cuenta el valor promedio de temperatura en Iquitos y en base al valor de temperatura de operación del conductor, indicado en la Tabla 104 del Anexo B.

$$FCT = 1\ (30°C)$$

El factor de corrección por capacidad térmica del suelo se omite, dado que la canalización será a través de bandejas.

$$FCRT = 1$$

El factor de corrección por agrupamiento se omitirá dado que contamos con la capacidad propia de los conductores en paralelo.

$$FCA = 1$$

Por lo que se concluye que, la capacidad de corriente del conductor sigue siendo mayor que la capacidad de corriente de la carga, lo cual es aceptable.

$$I_{dc} = 1050A$$

El criterio de caída de tensión debe ser tenido en cuenta, dado que estamos en un nivel de tensión bajo. En este escenario, se considerará una distancia de 100 m, lo cual es un valor relativamente grande, considerando el tamaño de la planta.

En cuanto a los valores como resistencia y reactancia, son considerados de la Tabla 104, ubicada en el Anexo B.

Además, se utilizará la ecuación (2.10).

Donde:

R= 0.0301

Cosø=0.8

X=0.0263

Li=100

Id=737.5

$$\%\Delta V = 1.06\%$$

Por lo que se verifica que la caída de tensión es inferior al 2.5%, recomendado en el Código Nacional Eléctrico.

c) Alimentador Switchgear 2 Barra A o B

En base a la corriente seleccionada en barra del Switchgear 2, detallada en la Tabla 27, la cual será base de diseño del conductor de alimentación, la cual ya tendría en su capacidad, el posible crecimiento futuro de la zona de pozos de reinyección de agua.

$$I_n = 1250A$$

Considerando un 25% de sobrecarga a esas cargas futuras, se obtiene la corriente de diseño:

$$I_d = 1562.5A$$

En base a la Tabla 102 del Anexo B, se escoge tentativamente el conductor unipolar de $400mm^2$, el cual brinda una capacidad de corriente de 938A, si es tendido mediante bandeja y con una separación de una distancia igual al de un diámetro de un conductor; lo cual nos permite validar que la capacidad de corriente del conductor sigue siendo mayor que la capacidad de corriente de la carga, lo cual es aceptable.

Para la alimentación del Switchgear 2, se consideraron dos ternas unipolares de $400mm^2$ N2XSY, 7.2kV, cobre electrolítico de 99.99%, clase 2, blindaje compuesto por XLPE semiconductor extruido, aislamiento de polietileno reticulado retardante a la arborescencia (XLPE-TR), pantalla metálica y cubierta exterior de PVC.

Como en casos anteriores, la evaluación de la caída de tensión se omite, dado que estamos en media tensión y son distancias cortas.

d) Alimentador MCC-1 o MCC-2

En base a la corriente nominal de la barra del MCC-1 o MCC-2, presentados en la Tabla 28, cuyo valor nominal es de 3150A, se inician los cálculos de dimensionamiento de conductor que se conectará en la acometida.

Cabe mencionar que, se tomará como referencia dicho valor, teniendo en cuenta que a futuro puede incrementarse la demanda en dicha barra y el conductor debe ser capaz de soportar los nuevos valores.

En base a lo antes mencionado, la corriente de diseño del conductor deberá ser tal que, pueda soportar una sobre carga del 25% de la carga futura, esto se realiza en función de la fórmula (2.7).

$$I_d = 3937.5A$$

Conocida la corriente de diseño, se debe seleccionar el conductor (400mm2), que se instalará para alimentar a la barra del CCM-1 o CCM-2, en base a la Tabla 105, perteneciente al Anexo B, cuyo valor es 1127A, en un recorrido por bandeja y separados entre sí por la misma distancia numérica que su diámetro. El conductor triple N2XY considerado es de cobre electrolítico de 99.99% de pureza, suave cableado clase 2, cuenta

con aislamiento de polietileno reticulado (XLPE), cubierta exterior con capa extruida con cloruro de polivinilo (PVC), no propaga la llama, resistente a la abrasión, radiación solar (UV). Dada la capacidad mencionada, se procederá a determinar su valor corregido, en base a los factores de corrección por temperatura, capacidad térmica del suelo y agrupamiento; detallados en las Tablas 105 del Anexo B y en base a la fórmula (2.8).

Donde:

FCT=1, FCRT=1, FCA=1

$$I_{dc} = 1127A$$

Sabiendo además que, la corriente de diseño del conductor, llega a valores de 3937.5 A, es necesario que se conecten cuatro ternas, llegando a valores de 4508A; los cuales son idóneos para que se cumpla que la capacidad de corriente del conductor siga siendo mayor que la capacidad de corriente de la carga, lo cual es aceptable.

En cuanto a la caída de tensión, se puede mencionar que es despreciable, dado que el transformador de 2.5MVA y el MCC-1 o MCC-2, se encuentran a distancias cortas y ubicadas sobre la misma plataforma; sin embargo, se evaluará como en otros casos, una distancia tentativa de 20m, con la finalidad de verificar que se mantenga dentro del rango recomendado por el Código Nacional Eléctrico, el cual debe ser menor a 2.5%. Cabe mencionar que los datos, son tomados de la Tabla 106 del Anexo B y en base a la fórmula (2.10).

Donde:

R= 0.0366, Cosø=0.8, X=0.0275, Li=20, Id=3937.5

$$\%\Delta V = 1.3\%$$

e) Alimentador TR-ESP-1 o TR-ESP-2

Sabiendo que la potencia del transformador es de 2.5MVA, se procede a calcular la corriente nominal en el devanado primario, utilizando la fórmula (2.4).

Donde:

S=2.5MVA, V=4160V

$$I_n = 347.37A$$

Considerando una sobre carga del 25%, se obtiene la corriente de diseño del conductor que alimentará a dicho transformador:

$$I_d = 434.22A$$

En base a la Tabla 102 del anexo B, se escoge el conductor de 120mm^2, cuya capacidad por bandeja y separación de conductores entre si es de un diámetro de conductor de 500A, cumpliendo así que la capacidad de corriente del conductor siga siendo mayor que la capacidad de corriente de la carga, lo cual es aceptable.

En cuanto a la caída de tensión, se desprecia dado que estamos en media tensión y las distancias son cortas.

f) Alimentador Switchgear 3 Barra A o B

En base a la corriente seleccionada en barra del Switchgear 3, detallada en la Tabla 29, la cual será base de diseño del conductor de alimentación, la cual ya tendría en su capacidad, el posible crecimiento futuro de la zona de pozos.

$$I_n = 1250A$$

Considerando un 25% de sobrecarga a esas cargas futuras, se obtiene la corriente de diseño, en base a la fórmula (2.7):

$$I_d = 1562.5A$$

En base a la Tabla 102 del Anexo B, se escoge tentativamente el conductor unipolar de 400mm^2, el cual brinda una capacidad de corriente de 938A, si es tendido mediante bandeja y con una separación de una distancia igual al de un diámetro de un conductor.

Para la alimentación del Switchgear 3, se consideraron dos ternas unipolares de 400mm^2 N2XSY, 7.2kV, cobre electrolítico de 99.99%, clase 2, blindaje compuesto por XLPE semiconductor extruido, aislamiento de polietileno reticulado retardante a la arborescencia (XLPE-TR), pantalla metálica y cubierta exterior de PVC. Como en casos anteriores, la evaluación de la caída de tensión se omite, dado que estamos en media tensión y son distancias cortas.

g) Alimentador Switchgear 1 Barra A o B

En base a la corriente seleccionada en barra del Switchgear 1, detallada en la Tabla 30, la cual será base de diseño del conductor de alimentación, la cual ya tendría en su capacidad, el posible crecimiento futuro de la planta.

$$I_d = 2500A$$

En base a la Tabla 102 del Anexo B, se escoge tentativamente el conductor unipolar de 400mm^2, el cual brinda una capacidad de corriente de 938A, si es tendido mediante bandeja y con una separación de una distancia igual al de un diámetro de un conductor; lo cual nos permite validar que la capacidad de corriente del conductor sigue siendo mayor que la capacidad de corriente de la carga, lo cual es aceptable.:

Para la alimentación del Switchgear 1, se consideraron tres ternas unipolares de 400mm^2 N2XSY, 7.2kV, cobre electrolítico de 99.99%, clase 2, blindaje compuesto por XLPE semiconductor extruido, aislamiento de polietileno reticulado retardante a la arborescencia (XLPE-TR), pantalla metálica y cubierta exterior de PVC.

Como en casos anteriores, la evaluación de la caída de tensión se omite, dado que estamos en media tensión y son distancias cortas.

3.2.5 Modelamiento de la problemática

El modelamiento de la planta, objeto de estudio, se realizará mediante el software Power Factory, en este software, se deben ingresar los parámetros eléctricos del equipamiento que se usará; dichos datos fueron recopilados en base a la experiencia y recomendaciones de fabricantes. Cabe mencionar que se utilizarán los datos, presentados en capítulos anteriores y en el presente capítulo.

a) Generadores

Tabla 34:
Tabla de datos técnicos del generador

Parámetros eléctricos	Valores
Potencia	1.828MVA
Tensión	480V
Frecuencia	60Hz
Conexión	YN
Factor de potencia	0.8
Reactancia síncrona Xd (p.u.)	2.16
Reactancia síncrona Xq (p.u.)	1.23
Límite mínimo Q (p.u.)	-0.3
Límite máximo Q (p.u.)	0.8
Reactancia de secuencia cero x0 (p.u.)	0.0894
Resistencia de secuencia cero r0 (p.u.)	0
Reactancia de secuencia negativa x2 (p.u.)	1.85
Resistencia de secuencia negativa r2 (p.u.)	0
Reactancia subtransitoria xd''sat (p.u.)	0.181
Reactancia subtransitoria xq''sat (p.u.)	0.189
Tipo de máquina IEC909/IEC60909	Polos salientes serie 1
Reactancia transitoria xd' (p.u.)	0.312
Corriente estado estacionario (p.u.)	1.2
Constante tiempo aceleración (s)	10
Constante de tiempo transitoria Td0' (s)	2.492308
Constante de tiempo subtransitoria Td0'' (s)	0.0603315
Constante de tiempo subtransitoria Tq0'' (s)	0.3253969
Corriente pico inrush Ip/In (p.u.)	10
Tiempo máximo inrush (s)	0.02
Tiempo de parada en frío (s)	20
Tiempo de parada en caliente (s)	10

Nota: Elaboración propia

b) Barra de baja tensión LV1 y LV2

Tabla 35:
Tabla de datos técnicos de la barra de baja tensión LV1 y LV2

Parámetros eléctricos	Valores
Tipo de sistema	AC
Tensión	480V
Frecuencia	60Hz
Límite de tensión máximo	5%
Límite de tensión mínimo	-5%
Tensión (p.u.)	1
Límite de tensión máximo estado estacionario	1.05
Límite de tensión mínimo estado estacionario	0
Material	Cobre

Nota: Elaboración propia

c) Transformador elevador de generación

Tabla 36:
Tabla de datos técnicos del transformador elevador

Parámetros eléctricos	Valores
Potencia	2.5MVA
Tensión HV/LV	4.16/0.48kV
Frecuencia	60Hz
Grupo de conexión	Dyn1
Impedancia secuencia positiva	5.86%
Impedancia secuencia cero	5.86%
Distribución de las reactancias de fuga HV (p.u.)	0.5
Distribución de las reactancias de fuga LV (p.u.)	0.5
Distribución de las resistencia de fuga HV (p.u.)	0.5
Distribución de las resistencia de fuga LV (p.u.)	0.5
Tipo de transformador	Inmerso en aceite
Corriente pico Inrush Ip/In (p.u.)	25
Tiempo máximo inrush (s)	0.01
Límite máximo de carga térmica	100%

Nota: Elaboración propia

d) Barra de media tensión SW1

Tabla 37:
Tabla de datos técnicos de la barra de media tensión SW1

Parámetros eléctricos	Valores
Tipo de sistema	AC
Tensión	4.16kV
Frecuencia	60Hz
Límite de tensión máximo/mínimo	+-5%
Tensión (p.u.)	1
Límite de tensión máximo estado estacionario	1.05
Límite de tensión mínimo estado estacionario	0
Corriente de cortocircuito térmica a 1s	20kA
Corriente de corto circuito pico	40kA

Nota: Elaboración propia

e) Conductores de 400$\mathrm{m}m^2$ media tensión

La Tabla 38, se realizó en función de la Tabla 107 del Anexo B y en base a los cálculos justificativos.

Tabla 38:
Tabla de datos técnicos del conductor de 400mm^2 de media tensión

Parámetros eléctricos	Valores
Tipo de cable	N2XSY
Tensión	6kV
Frecuencia	60Hz
Sección	400mm^2
Capacidad de bandeja	938A
Fases	3
Resistencia AC R'(20°C) ohm/km	0.0661
Reactancia X' ohm/km	0.177
Temperatura operación máxima (°C)	90
Material conductor	Cobre
Material aislante	PVC

Nota: Elaboración propia

f) Barra de media tensión SW2

Tabla 39:
Tabla de datos técnicos de la barra de media tensión SW2

Parámetros eléctricos	Valores
Tipo de sistema	AC
Tensión	4.16kV
Frecuencia	60Hz
Límite de tensión máximo	5%
Límite de tensión mínimo	-5%
Tensión (p.u.)	1
Límite de tensión máximo estado estacionario	1.05
Límite de tensión mínimo estado estacionario	0
Corriente de cortocircuito térmica a 1s	20kA
Corriente de corto circuito pico	40kA

Nota: Elaboración propia

g) Barra de media tensión SW3

Tabla 40:
Tabla de datos técnicos de la barra de media tensión SW3

Parámetros eléctricos	Valores
Tipo de sistema	AC
Tensión	4.16kV
Frecuencia	60Hz
Límite de tensión máximo	5%
Límite de tensión mínimo	-5%
Tensión (p.u.)	1
Límite de tensión máximo estado estacionario	1.05
Límite de tensión mínimo estado estacionario	0
Corriente de cortocircuito térmica a 1s	20kA
Corriente de corto circuito pico	40kA

Nota: Elaboración propia

h) Motor HPS

Tabla 41:
Tabla de datos técnicos del motor HPS

Parámetros eléctricos	Valores
Tipo de sistema	AC
Tensión	4.16kV
Potencia activa	746kW
Frecuencia	60Hz
Número de pares de polos	1
Conexión	D
Momento de inercia (kgm2)	26.4
Corriente de arranque (Ip/In) (p.u.)	6.8
Factor de potencia	0.9
Eficiencia	95.8%
Velocidad	3588rpm
Torque arranque (p.u.)	0.8
Torque máximo (p.u.)	2.5

Nota: Elaboración propia

3.2.6 Simulación

La simulación del flujo de potencia se desarrolló en el software Power Factory, en base a los datos recopilados y calculados en líneas arriba del presente texto.

Cabe mencionar que, en este capítulo se mostrarán los cuadros que indiquen los valores de tensión de barra y carga de los transformadores, generadores y cables. Las tablas se dividirán en dos escenarios, la primera es con dos conductores en paralelo entre dos switchgear y la segunda es con un solo alimentador entre ambos switchgear.

Así mismo, las vistas de flujo de carga, generadas por el software, se mostrarán en el Anexo D.

Tabla 42:
Niveles de tensión en barras (Escenario 1)

Barra	Nivel de tensión (V)	Tensión real (V)	Tensión (p.u.)	Error máx (%)	Estado
MVU-BA	4160	4148.7	1	+-5%	Muy bueno
MVU-BB	4160	4149.5	1	+-5%	Muy bueno
SW1-BA	4160	4143.8	1	+-5%	Muy bueno
SW1-BB	4160	4145.6	1	+-5%	Muy bueno
SW2-BA	4160	4139.7	1	+-5%	Muy bueno
SW2-BB	4160	4140.6	1	+-5%	Muy bueno
SW3-BA	4160	4139	0.99	+-5%	Muy bueno
SW3-BB	4160	4134.2	0.99	+-5%	Muy bueno
SW4-BA	4160	4143.6	1	+-5%	Muy bueno
SW4-BB	4160	4143.9	1	+-5%	Muy bueno
MCC-1	480	472.7	0.98	+-5%	Bueno
MCC-2	480	472.1	0.98	+-5%	Bueno
T-SG	480	475.7	0.99	+-5%	Muy bueno
MCC-CPF	480	472.6	0.98	+-5%	Bueno

Nota: Elaboración propia

Tabla 43:
Niveles de cargas en cables (Escenario 1)

Cables	Potencia activa (kW)	Potencia reactiva (kVAr)	Corriente (A)	Carga (%)	Estado
SW1BA-M01	4936.4	1363.8	712.6	25.3	Aceptable
SW1BB-M01	4552.4	1293.6	658.6	23.4	Aceptable
SW2BA-M01	2822.2	1068.0	420.8	22.4	Aceptable
SW2BB-M01	2777.8	1073.7	415.3	22.1	Aceptable
SW3BAM01	1586.2	536.6	233.4	12.4	Aceptable
SW3BB-M01	1541.8	542.2	227.8	12.1	Aceptable
SW4BA-M01	477.8	227.1	73.7	17.3	Aceptable
SW4BB-M01	272.2	135.7	42.4	15.4	Aceptable

Nota: Elaboración propia

Tabla 44:
Niveles de cargas en transformadores (Escenario 1)

Transformador	Relación de tensión (V)	Potencia (MVA)	Carga (%)	Estado
TR-GEN1	480/4160	2.5	29.5	Malo
TR-GEN2	480/4160	2.5	61	Muy bueno
TR-GEN3	480/4160	2.5	61	Muy bueno
TR-GEN4	480/4160	2.5	61	Muy bueno
TR-GEN5	480/4160	2.5	61	Muy bueno
TR-GEN6	480/4160	2.5	61	Muy bueno
TR-GEN7	480/4160	2.5	61	Muy bueno
TR-GEN8	480/4160	2.5	F/S	F/S
TR-MCC1	4160/480	2.5	66.5	Muy bueno
TR-MCC2	4160/480	2.5	66.5	Muy bueno
TR-SG	4160/480	1	53	Regular
TR-CPF	4160/480	0.5	63.5	Muy bueno

Nota: Elaboración propia

Tabla 45:
Niveles de cargas en motores (Escenario 1)

Motor	Nivel de tensión (V)	Potencia (kW)	Carga (%)	Estado
HPS 1	4160	746	86.6	Bueno
HPS 2	4160	746	86.6	Bueno
HPS 3	4160	746	86.6	Bueno
HPS 4	4160	746	86.6	Bueno
HPS 5	4160	746	86.6	Bueno
HPS 6	4160	746	86.6	Bueno
HPS 7	4160	746	86.6	Bueno
HPS 8	4160	746	86.6	Bueno
ESP-1	480	391	60.6	Muy bueno
ESP-2	480	391	60.6	Muy bueno
ESP-3	480	391	60.6	Muy bueno
ESP-4	480	391	60.6	Muy bueno
ESP-5	480	391	60.6	Muy bueno
ESP-6	480	391	60.6	Muy bueno
ESP-7	480	391	60.6	Muy bueno
ESP-8	480	391	60.6	Muy bueno

Nota: Elaboración propia

Tabla 46:
Niveles de cargas en generadores (Escenario 1)

Generador	Nivel de tensión (V)	Potencia (MVA)	Carga (%)	Estado
GEN 1	480	1.828	40.4	Regular
GEN 2	480	1.828	84.1	Bueno
GEN 3	480	1.828	84.1	Bueno
GEN 4	480	1.828	84.1	Bueno
GEN 5	480	1.828	84.1	Bueno
GEN 6	480	1.828	84.1	Bueno
GEN 7	480	1.828	84.1	Bueno
GEN 8	480	1.828	F/S	F/S

Nota: Elaboración propia

En cuanto al Escenario 2, se tiene la siguiente información.

Tabla 47:
Niveles de tensión en barras (Escenario 2)

Barra	Nivel de tensión (V)	Tensión real (V)	Tensión (p.u.)	Error máx (%)	Estado
MVU-BA	4160	4144.2	1	+-5%	Muy bueno
MVU-BB	4160	4156.6	1	+-5%	Muy bueno
SW1-BA	4160	4135.4	0.99	+-5%	Muy bueno
SW1-BB	4160	4137.4	0.99	+-5%	Muy bueno
SW2-BA	4160	4126.3	0.99	+-5%	Muy bueno
SW2-BB	4160	4117.2	0.99	+-5%	Muy bueno
SW3-BA	4160	4130.6	0.99	+-5%	Muy bueno
SW3-BB	4160	4125.8	0.99	+-5%	Muy bueno
SW4-BA	4160	4134.3	0.99	+-5%	Muy bueno
SW4-BB	4160	4134.1	0.99	+-5%	Muy bueno
MCC-1	480	471.7	0.98	+-5%	Bueno
MCC-2	480	471.1	0.98	+-5%	Bueno
T-SG	480	474.6	0.99	+-5%	Muy bueno
MCC-CPF	480	471.5	0.98	+-5%	Bueno

Nota: Elaboración propia

Tabla 48:
Niveles de cargas en cables (Escenario 2)

Cables	Potencia activa (kW)	Potencia reactiva (kVAr)	Corriente (A)	Carga (%)	Estado
SW1BA-M01	9491	2652	1375.9	48.9	Muy bueno
SW1BB-M01	F/S	F/S	F/S	F/S	F/S
SW2BA-M01	5603	2139	839.3	44.7	Muy bueno
SW2BB-M01	F/S	F/S	F/S	F/S	F/S
SW3BAM01	3129	1075	462.5	24.7	Malo
SW3BB-M01	F/S	F/S	F/S	F/S	F/S
SW4BA-M01	750	362.9	116.4	27.3	Malo
SW4BB-M01	F/S	F/S	F/S	F/S	F/S

Nota: Elaboración propia

Tabla 49:
Niveles de cargas en transformadores (Escenario 2)

Transformadores	Relación de tensión (V)	Potencia (MVA)	Carga (%)	Estado
TR-GEN1	480/4160	2.5	30.8	Malo
TR-GEN2	480/4160	2.5	61.1	Muy bueno
TR-GEN3	480/4160	2.5	61.1	Muy bueno
TR-GEN4	480/4160	2.5	61.1	Muy bueno
TR-GEN5	480/4160	2.5	60.9	Muy bueno
TR-GEN6	480/4160	2.5	60.9	Muy bueno
TR-GEN7	480/4160	2.5	60.9	Muy bueno
TR-GEN8	480/4160	2.5	F/S	F/S
TR-MCC1	4160/480	2.5	66.6	Muy bueno
TR-MCC2	4160/480	2.5	66.7	Muy bueno
TR-SG	4160/480	1	53.1	Regular
TR-CPF	4160/480	0.5	63.6	Muy bueno

Nota: Elaboración propia

Tabla 50:
Niveles de cargas en motores (Escenario 2)

Motor	Nivel de tensión (V)	Potencia (kW)	Carga (%)	Estado
HPS 1	4160	746	86.6	Bueno
HPS 2	4160	746	86.6	Bueno
HPS 3	4160	746	86.6	Bueno
HPS 4	4160	746	86.6	Bueno
HPS 5	4160	746	86.5	Bueno
HPS 6	4160	746	86.5	Bueno
HPS 7	4160	746	86.5	Bueno
HPS 8	4160	746	86.5	Bueno
ESP-1	480	391	60.6	Muy bueno
ESP-2	480	391	60.6	Muy bueno
ESP-3	480	391	60.6	Muy bueno
ESP-4	480	391	60.6	Muy bueno
ESP-5	480	391	60.6	Muy bueno
ESP-6	480	391	60.6	Muy bueno
ESP-7	480	391	60.6	Muy bueno
ESP-8	480	391	60.6	Muy bueno

Nota: Elaboración propia

Tabla 51:
Niveles de cargas en generadores (Escenario 2)

Generador	Nivel de tensión (V)	Potencia (MVA)	Carga (%)	Estado
GEN 1	480	1.828	42.2	Regular
GEN 2	480	1.828	84.1	Bueno
GEN 3	480	1.828	84.1	Bueno
GEN 4	480	1.828	84.1	Bueno
GEN 5	480	1.828	84.1	Bueno
GEN 6	480	1.828	84.1	Bueno
GEN 7	480	1.828	84.1	Bueno
GEN 8	480	1.828	F/S	F/S

Nota: Elaboración propia

3.3 Simulación de cortocircuito y especificación técnica de equipos

3.3.1 Simulación de cortocircuito

La simulación de cortocircuito, se realiza mediante el software Power Factory, bajo la norma IEC60909, en base a los escenarios de operación mencionados en el capítulo anterior, en el escenario 1 se realizará con la redundancia selectiva y en el escenario 2 se realizará con un sistema radial.

Se simularán fallas monofásicas, bifásicas, bifásicas a tierra y trifásicas; teniendo como valor de diseño de cortocircuito, el mayor valor entre ellos.

Tabla 52:
Corrientes de cortocircuito monofásico en barras (Escenario 1)

Barra	Nivel de tensión (V)	Sk´´ (kVA)	Ik´´ (A)	Ip (A)
MVU-BA	4160	0.4	0.148	0.357
MVU-BB	4160	0.4	0.148	0.357
SW1-BA	4160	0.4	0.148	0.357
SW1-BB	4160	0.4	0.148	0.357
SW2-BA	4160	0.4	0.148	0.355
SW2-BB	4160	0.4	0.148	0.355
SW3-BA	4160	0.4	0.148	0.355
SW3-BB	4160	0.4	0.148	0.355
SW4-BA	4160	0.4	0.148	0.353
SW4-BB	4160	0.4	0.148	0.353
MCC-1	480	9435	34045	88470
MCC-2	480	9434.1	34042	88449
T-SG	480	6956.5	25102	66825
MCC-CPF	480	4391.5	15846	43180

Nota: Elaboración propia

Tabla 53:
Corrientes de cortocircuito bifásico a tierra en barras (Escenario 1)

Barra	Nivel de tensión (V)	Ikss A (A)	Ikss B (A)	Ikss C (A)
MVU-BA	4160	0	4215.8	4215.8
MVU-BB	4160	0	4210.4	4210.4
SW1-BA	4160	0	4219.8	4219.8
SW1-BB	4160	0	4218.1	4218.1
SW2-BA	4160	0	4192	4192
SW2-BB	4160	0	4191.2	4191.1
SW3-BA	4160	0	4187.2	4187.1
SW3-BB	4160	0	4186.3	4186.3
SW4-BA	4160	0	4205.1	4205.1
SW4-BB	4160	0	4204.3	4204.3
MCC-1	480	0	42624	43601
MCC-2	480	0	42617	43593
T-SG	480	0	29652	30220
MCC-CPF	480	0	17102	17386

Nota: Elaboración propia

Tabla 54:
Corrientes de cortocircuito bifásico en barras (Escenario 1)

Barra	Nivel de tensión (V)	Ikss A (A)	Ikss B (A)	Ikss C (A)
MVU-BA	4160	0	4215.9	4215.9
MVU-BB	4160	0	4210.4	4210.4
SW1-BA	4160	0	4219.8	4219.8
SW1-BB	4160	0	4218.1	4218.1
SW2-BA	4160	0	4192	4192
SW2-BB	4160	0	4191.2	4191.2
SW3-BA	4160	0	4187.2	4187.2
SW3-BB	4160	0	4186.3	4186.3
SW4-BA	4160	0	4205.1	4205.1
SW4-BB	4160	0	4204.3	4204.3
MCC-1	480	0	23752	23752
MCC-2	480	0	23749	23749
T-SG	480	0	17994	17994
MCC-CPF	480	0	12130	12130

Nota: Elaboración propia

Tabla 55:
Corrientes de cortocircuito trifásico en barras (Escenario 1)

Barra	Nivel de tensión (V)	Skss (MVA)	Ikss (kA)	Ip (kA)
MVU-BA	4160	75.5	10.472	25.283
MVU-BB	4160	75.1	10.429	25.149
SW1-BA	4160	75.1	10.427	25.137
SW1-BB	4160	75	10.413	25.091
SW2-BA	4160	73.7	10.227	24.530
SW2-BB	4160	73.6	10.221	24.508
SW3-BA	4160	73.6	10.215	24.493
SW3-BB	4160	73.6	10.209	24.472
SW4-BA	4160	74.5	10.344	24.683
SW4-BB	4160	74.5	10.339	24.626
MCC-1	480	33.6	40.373	104.91
MCC-2	480	33.6	40.363	104.87
T-SG	480	23.8	28.655	76.284
MCC-CPF	480	14.3	17.192	46.849

Nota: Elaboración propia

Tabla 56:
Corrientes de cortocircuito monofásico en barras (Escenario 2)

Barra	Nivel de tensión (V)	Sk´´ (kVA)	Ik´´ (A)	Ip (A)
MVU-BA	4160	0.2	0.090	0.218
MVU-BB	4160	0.2	0.090	0.216
SW1-BA	4160	0.2	0.090	0.217
SW1-BB	4160	0.2	0.090	0.213
SW2-BA	4160	0.2	0.090	0.215
SW2-BB	4160	0.2	0.090	0.212
SW3-BA	4160	0.2	0.090	0.215
SW3-BB	4160	0.2	0.090	0.212
SW4-BA	4160	0.2	0.090	0.214
SW4-BB	4160	0.2	0.090	0.212
MCC-1	480	9403	33930	87868
MCC-2	480	9280.2	33487	85798
T-SG	480	6929.3	25003	66291
MCC-CPF	480	4377	15794	42871

Nota: Elaboración propia

Tabla 57:
Corrientes de cortocircuito bifásico a tierra en barras (Escenario 2)

Barra	Nivel de tensión (V)	Ikss A (kA)	Ikss B (kA)	Ikss C (kA)
MVU-BA	4160	0	4.21	4.21
MVU-BB	4160	0	4.13	4.13
SW1-BA	4160	0	4.20	4.20
SW1-BB	4160	0	4.07	4.07
SW2-BA	4160	0	4.17	4.17
SW2-BB	4160	0	4.07	4.07
SW3-BA	4160	0	4.16	4.16
SW3-BB	4160	0	4.05	4.05
SW4-BA	4160	0	4.17	4.17
SW4-BB	4160	0	4.15	4.15
MCC-1	480	0	42.37	43.35
MCC-2	480	0	41.59	42.6
T-SG	480	0	29.49	30.07
MCC-CPF	480	0	17.03	17.32

Nota: Elaboración propia

Tabla 58:
Corrientes de cortocircuito bifásico en barras (Escenario 2)

Barra	Nivel de tensión (V)	Ikss A (kA)	Ikss B (kA)	Ikss C (kA)
MVU-BA	4160	0	4.21	4.21
MVU-BB	4160	0	4.13	4.13
SW1-BA	4160	0	4.20	4.20
SW1-BB	4160	0	4.07	4.07
SW2-BA	4160	0	4.17	4.17
SW2-BB	4160	0	4.07	4.07
SW3-BA	4160	0	4.16	4.16
SW3-BB	4160	0	4.05	4.05
SW4-BA	4160	0	4.17	4.17
SW4-BB	4160	0	4.15	4.15
MCC-1	480	0	23.65	23.65
MCC-2	480	0	23.28	23.28
T-SG	480	0	17.91	17.91
MCC-CPF	480	0	12.08	12.08

Nota: Elaboración propia

Tabla 59:
Corrientes de cortocircuito trifásico en barras (Escenario 2)

Barra	Nivel de tensión (V)	Skss (MVA)	Ikss (kA)	Ip (kA)
MVU-BA	4160	75.3	10.445	25.205
MVU-BB	4160	73.6	10.212	24.475
SW1-BA	4160	74.2	10.300	24.762
SW1-BB	4160	69.2	9.610	22.662
SW2-BA	4160	72.3	10.029	23.935
SW2-BB	4160	68.1	9.453	22.213
SW3-BA	4160	72.1	10.007	23.865
SW3-BB	4160	67.8	9.412	22.089
SW4-BA	4160	72.8	10.108	23.921
SW4-BB	4160	72.3	10.032	23.600
MCC-1	480	33.3	40.026	103.65
MCC-2	480	32.4	38.992	99.903
T-SG	480	23.6	28.439	75.398
MCC-CPF	480	14.2	17.092	46.394

Nota: Elaboración propia

3.3.2 Hoja de datos del Switchgear 1

En la siguiente tabla, se muestran los datos garantizados. Las demás características del switchgear, deben ser propuestos por el fabricante.

Tabla 60:
Parte a: Tabla de datos técnicos switchgear 1

TABLA DE DATOS TÉCNICOS DE SWITCHGEAR 1 – CELDA DE LLEGADA			
ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR
1	CELDA METAL CLAD BARRA AISLADA EN AIRE		
1.1	Frecuencia	Hz	60
1.2	Tensión nominal	kV	4.16
1.3	Tensión de diseño	kV	7.2
1.4	Tensión de impulso de onda 1.2/50 us	kVp	75
1.5	Tensión de descarga en seco 60Hz 1min	kV	38
1.6	Corriente nominal de barras	A	2500
1.7	Corriente nominal de llegada	A	2500
1.8	Corriente nominal de cierre	kA	16
1.9	Corriente de interrupción simétrica	kA	40
1.10	Tensión continua nominal para mandos y control	V DC	48
1.11	Tensión alterna para calefacción e iluminación	V AC	220
1.12	Ancho máximo	mm	1000
1.13	Altura máxima	mm	2700
1.14	Profundidad máxima	mm	2100
1.15	Tipo de aislamiento		Aire
1.16	A prueba de arco interno		SI
1.17	Duración mínima de ensayo de falla por arco interno	s	1
1.18	Posibilidad de montaje y ampliación		Si
1.19	Grado de protección		IP4X
1.20	Enclavamiento de seguridad para apertura de puerta		Si
1.21	Construcción autosoportados, individuales y acoplables		Si

Nota: Elaboración propia

Tabla 61:
Parte b: Tabla de datos técnicos switchgear 1

TABLA DE DATOS TÉCNICOS DE SWITCHGEAR 1 – CELDA DE LLEGADA			
ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR
2	INTERRUPTOR EXTRAÍBLE		
2.1	Frecuencia	Hz	60
2.2	Tensión nominal	kV	4.16
2.3	Tensión de diseño	kV	7.2
2.4	Tensión de impulso de onda 1.2/50 us	kVp	75
2.5	Tensión de descarga en seco 60Hz 1min	kV	38
2.6	Corriente nominal	A	2500
2.7	Corriente nominal de cierre	kA	16
2.8	Corriente de interrupción simétrica	kA	40
2.9	Tensión de operación	V DC	48
2.10	Tensión alterna para calefacción	V AC	220
2.11	Cámara de extinción		Vacío
2.12	Número de contactos auxiliares disponibles NO		>=6
2.13	Número de contactos auxiliares disponibles NC		>=6
2.14	Mando motorizado (local y remoto)		Si
3	TRANSFORMADOR DE CORRIENTE		
3.1	Frecuencia	Hz	60
3.2	Tensión nominal	kV	4.16
3.3	Tensión de diseño	kV	7.2
3.4	Relación de transformación	A	2000/5/5/5
3.5	Arrollamientos para protección		
	Número		2
	Potencia	VA	10
	Clase		5P20
3.6	Arrollamientos para medición		
	Número		1
	Potencia	VA	10
	Clase		0.2

Nota: Elaboración propia

Tabla 62:
Parte c: Tabla de datos técnicos switchgear 1

TABLA DE DATOS TÉCNICOS DE SWITCHGEAR 1 – CELDA DE LLEGADA			
ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR
4	SECCIONADORES		
4.1	Frecuencia	Hz	60
4.2	Tensión nominal	kV	4.16
4.3	Tensión de diseño	kV	7.2
4.4	Tensión de aislamiento	kVp	75
4.5	Corriente nominal	A	2500
5	TRANSFORMADOR DE TENSIÓN		
5.1	Frecuencia	Hz	60
5.2	Tensión nominal	kV	4.16
5.3	Tensión de diseño	kV	7.2
5.4	Relación de transformación	kV	4.16:√3/0.1: √3/0.1: √3
5.5	Arrollamientos para protección		
	Número		1
	Potencia	VA	10
	Clase		3P
5.6	Arrollamientos para medición		
	Número		1
	Potencia	VA	10
	Clase		0.2

Nota: Elaboración propia

Tabla 63:
Parte d: Tabla de datos técnicos switchgear 1

TABLA DE DATOS TÉCNICOS DE SWITCHGEAR 1 – CELDA DE SALIDA			
ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR
1	CELDA METAL CLAD BARRA AISLADA EN AIRE		
1.1	Frecuencia	Hz	60
1.2	Tensión nominal	kV	4.16
1.3	Tensión de diseño	kV	7.2
1.4	Tensión de impulso de onda 1.2/50 us	kVp	75
1.5	Tensión de descarga en seco 60Hz 1min	kV	38
1.6	Corriente nominal de barras	A	2500
1.7	Corriente nominal de derivaciones	A	1250
1.8	Corriente nominal de cierre	kA	16
1.9	Corriente de interrupción simétrica	kA	40
1.10	Tensión continua nominal para mandos y control	V DC	48
1.11	Tensión alterna para calefacción e iluminación	V AC	220
1.12	Ancho máximo	mm	1000
1.13	Altura máxima	mm	2700
1.14	Profundidad máxima	mm	2100
1.15	Tipo de aislamiento		Aire
1.16	A prueba de arco interno		SI
1.17	Duración mínima de ensayo de falla por arco interno	s	1
1.18	Posibilidad de montaje y ampliación		Si
1.19	Grado de protección		IP4X
1.20	Enclavamiento de seguridad para apertura de puerta		Si
1.21	Construcción autosoportados, individuales y acoplables		Si

Nota: Elaboración propia

Tabla 64:
Parte e: Tabla de datos técnicos switchgear 1

TABLA DE DATOS TÉCNICOS DE SWITCHGEAR 1 – CELDA DE SALIDA			
ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR
2	INTERRUPTOR EXTRAÍBLE		
2.1	Frecuencia	Hz	60
2.2	Tensión nominal	kV	4.16
2.3	Tensión de diseño	kV	7.2
2.4	Tensión de impulso de onda 1.2/50 us	kVp	75
2.5	Tensión de descarga en seco 60Hz 1min	kV	38
2.6	Corriente nominal	A	1250
2.7	Corriente nominal de cierre	kA	16
2.8	Corriente de interrupción simétrica	kA	40
2.9	Tensión de operación	V DC	48
2.10	Tensión alterna para calefacción	V AC	220
2.11	Cámara de extinción		Vacío
2.12	Número de contactos auxiliares disponibles NO		>=6
2.13	Número de contactos auxiliares disponibles NC		>=6
2.14	Mando motorizado (local y remoto)		Si
3	TRANSFORMADOR DE CORRIENTE		
3.1	Frecuencia	Hz	60
3.2	Tensión nominal	kV	4.16
3.3	Tensión de diseño	kV	7.2
3.4	Relación de transformación	A	1250/5/5/5
3.5	Arrollamientos para protección		
	Número		2
	Potencia	VA	10
	Clase		5P20
3.6	Arrollamientos para medición		
	Número		1
	Potencia	VA	10
	Clase		0.2

Nota: Elaboración propia

Tabla 65:
Parte f: Tabla de datos técnicos switchgear 1

TABLA DE DATOS TÉCNICOS DE SWITCHGEAR 1 – CELDA DE SALIDA			
ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR
4	SECCIONADORES		
4.1	Frecuencia	Hz	60
4.2	Tensión nominal	kV	4.16
4.3	Tensión de diseño	kV	7.2
4.4	Tensión de aislamiento	kVp	75
4.5	Corriente nominal	A	1250

Nota: Elaboración propia

3.3.3 Hoja de datos del Switchgear 2

En la siguiente tabla, se muestran los datos garantizados. Las demás características del switchgear, deben ser propuestos por el fabricante.

Tabla 66:
Parte a: Tabla de datos técnicos Switchgear 2

TABLA DE DATOS TÉCNICOS DE SWITCHGEAR 2 – CELDA DE LLEGADA			
ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR
1	CELDA METAL CLAD BARRA AISLADA EN AIRE		
1.1	Frecuencia	Hz	60
1.2	Tensión nominal	kV	4.16
1.3	Tensión de diseño	kV	7.2
1.4	Tensión de impulso de onda 1.2/50 us	kVp	75
1.5	Tensión de descarga en seco 60Hz 1min	kV	38
1.6	Corriente nominal de barras	A	1250
1.7	Corriente nominal de llegada	A	1250
1.8	Corriente nominal de cierre	kA	16
1.9	Corriente de interrupción simétrica	kA	40
1.10	Tensión continua nominal para mandos y control	V DC	48
1.11	Tensión alterna para calefacción e iluminación	V AC	220
1.12	Ancho máximo	mm	1000
1.13	Altura máxima	mm	2700
1.14	Profundidad máxima	mm	2100
1.15	Tipo de aislamiento		Aire
1.16	A prueba de arco interno		SI
1.17	Duración mínima de ensayo de falla por arco interno	s	1
1.18	Posibilidad de montaje y ampliación		Si
1.19	Grado de protección		IP4X
1.20	Enclavamiento de seguridad para apertura de puerta		Si
1.21	Construcción autosoportados, individuales y acoplables		Si

Nota: Elaboración propia

Tabla 67:
Parte b: Tabla de datos técnicos switchgear 2

TABLA DE DATOS TÉCNICOS DE SWITCHGEAR 2 – CELDA DE LLEGADA			
ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR
2	INTERRUPTOR EXTRAÍBLE		
2.1	Frecuencia	Hz	60
2.2	Tensión nominal	kV	4.16
2.3	Tensión de diseño	kV	7.2
2.4	Tensión de impulso de onda 1.2/50 us	kVp	75
2.5	Tensión de descarga en seco 60Hz 1min	kV	38
2.6	Corriente nominal	A	1250
2.7	Corriente nominal de cierre	kA	16
2.8	Corriente de interrupción simétrica	kA	40
2.9	Tensión de operación	V DC	48
2.10	Tensión alterna para calefacción	V AC	220
2.11	Cámara de extinción		Vacío
2.12	Número de contactos auxiliares disponibles NO		>=6
2.13	Número de contactos auxiliares disponibles NC		>=6
2.14	Mando motorizado (local y remoto)		Si
3	TRANSFORMADOR DE CORRIENTE		
3.1	Frecuencia	Hz	60
3.2	Tensión nominal	kV	4.16
3.3	Tensión de diseño	kV	7.2
3.4	Relación de transformación	A	1250/5/5/5
3.5	Arrollamientos para protección		
	Número		2
	Potencia	VA	10
	Clase		5P20
3.6	Arrollamientos para medición		
	Número		1
	Potencia	VA	10
	Clase		0.2

Nota: Elaboración propia

Tabla 68:
Parte c: Tabla de datos técnicos switchgear 2

TABLA DE DATOS TÉCNICOS DE SWITCHGEAR 2 – CELDA DE LLEGADA			
ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR
4	SECCIONADORES		
4.1	Frecuencia	Hz	60
4.2	Tensión nominal	kV	4.16
4.3	Tensión de diseño	kV	7.2
4.4	Tensión de aislamiento	kVp	75
4.5	Corriente nominal	A	1250
5	TRANSFORMADOR DE TENSIÓN		
5.1	Frecuencia	Hz	60
5.2	Tensión nominal	kV	4.16
5.3	Tensión de diseño	kV	7.2
5.4	Relación de transformación	kV	4.16:√3/0.1: √3/0.1: √3
5.5	Arrollamientos para protección		
	Número		1
	Potencia	VA	10
	Clase		3P
5.6	Arrollamientos para medición		
	Número		1
	Potencia	VA	10
	Clase		0.2

Nota: Elaboración propia

Tabla 69:
Parte d: Tabla de datos técnicos switchgear 2

TABLA DE DATOS TÉCNICOS DE SWITCHGEAR 2 – CELDA DE SALIDA			
ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR
1	CELDA METAL CLAD BARRA AISLADA EN AIRE		
1.1	Frecuencia	Hz	60
1.2	Tensión nominal	kV	4.16
1.3	Tensión de diseño	kV	7.2
1.4	Tensión de impulso de onda 1.2/50 us	kVp	75
1.5	Tensión de descarga en seco 60Hz 1min	kV	38
1.6	Corriente nominal de barras	A	1250
1.7	Corriente nominal de derivaciones	A	630
1.8	Corriente nominal de cierre	kA	16
1.9	Corriente de interrupción simétrica	kA	40
1.10	Tensión continua nominal para mandos y control	V DC	48
1.11	Tensión alterna para calefacción e iluminación	V AC	220
1.12	Ancho máximo	mm	1000
1.13	Altura máxima	mm	2700
1.14	Profundidad máxima	mm	2100
1.15	Tipo de aislamiento		Aire
1.16	A prueba de arco interno		SI
1.17	Duración mínima de ensayo de falla por arco interno	s	1
1.18	Posibilidad de montaje y ampliación		Si
1.19	Grado de protección		IP4X
1.20	Enclavamiento de seguridad para apertura de puerta		Si
1.21	Construcción autosoportados, individuales y acoplables		Si

Nota: Elaboración propia

Tabla 70:
Parte e: Tabla de datos técnicos switchgear 2

TABLA DE DATOS TÉCNICOS DE SWITCHGEAR 2 – CELDA DE SALIDA			
ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR
2	INTERRUPTOR EXTRAÍBLE		
2.1	Frecuencia	Hz	60
2.2	Tensión nominal	kV	4.16
2.3	Tensión de diseño	kV	7.2
2.4	Tensión de impulso de onda 1.2/50 us	kVp	75
2.5	Tensión de descarga en seco 60Hz 1min	kV	38
2.6	Corriente nominal	A	630
2.7	Corriente nominal de cierre	kA	16
2.8	Corriente de interrupción simétrica	kA	40
2.9	Tensión de operación	V DC	48
2.10	Tensión alterna para calefacción	V AC	220
2.11	Cámara de extinción		Vacío
2.12	Número de contactos auxiliares disponibles NO		>=6
2.13	Número de contactos auxiliares disponibles NC		>=6
2.14	Mando motorizado (local y remoto)		Si
3	TRANSFORMADOR DE CORRIENTE		
3.1	Frecuencia	Hz	60
3.2	Tensión nominal	kV	4.16
3.3	Tensión de diseño	kV	7.2
3.4	Relación de transformación	A	630/5/5/5
3.5	Arrollamientos para protección		
	Número		2
	Potencia	VA	10
	Clase		5P20
3.6	Arrollamientos para medición		
	Número		1
	Potencia	VA	10
	Clase		0.2

Nota: Elaboración propia

Tabla 71:
Parte f: Tabla de datos técnicos switchgear 2

TABLA DE DATOS TÉCNICOS DE SWITCHGEAR 2 – CELDA DE SALIDA			
ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR
4	SECCIONADORES		
4.1	Frecuencia	Hz	60
4.2	Tensión nominal	kV	4.16
4.3	Tensión de diseño	kV	7.2
4.4	Tensión de aislamiento	kVp	75
4.5	Corriente nominal	A	630

Nota: Elaboración propia

3.3.4 Hoja de datos del Switchgear 3

En la siguiente tabla, se muestran los datos garantizados. Las demás características del switchgear, deben ser propuestos por el fabricante.

Tabla 72:
Parte a: Tabla de datos técnicos switchgear 3

TABLA DE DATOS TÉCNICOS DE SWITCHGEAR 3 – CELDA DE LLEGADA			
ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR
1	CELDA METAL CLAD BARRA AISLADA EN AIRE		
1.1	Frecuencia	Hz	60
1.2	Tensión nominal	kV	4.16
1.3	Tensión de diseño	kV	7.2
1.4	Tensión de impulso de onda 1.2/50 us	kVp	75
1.5	Tensión de descarga en seco 60Hz 1min	kV	38
1.6	Corriente nominal de barras	A	1250
1.7	Corriente nominal de llegada	A	1250
1.8	Corriente nominal de cierre	kA	16
1.9	Corriente de interrupción simétrica	kA	40
1.10	Tensión continua nominal para mandos y control	V DC	48
1.11	Tensión alterna para calefacción e iluminación	V AC	220
1.12	Ancho máximo	mm	1000
1.13	Altura máxima	mm	2700
1.14	Profundidad máxima	mm	2100
1.15	Tipo de aislamiento		Aire
1.16	A prueba de arco interno		SI
1.17	Duración mínima de ensayo de falla por arco interno	s	1
1.18	Posibilidad de montaje y ampliación		Si
1.19	Grado de protección		IP4X
1.20	Enclavamiento de seguridad para apertura de puerta		Si
1.21	Construcción autosoportados, individuales y acoplables		Si

Nota: Elaboración propia

Tabla 73:
Parte b: Tabla de datos técnicos switchgear 3

TABLA DE DATOS TÉCNICOS DE SWITCHGEAR 3 – CELDA DE LLEGADA			
ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR
2	INTERRUPTOR EXTRAÍBLE		
2.1	Frecuencia	Hz	60
2.2	Tensión nominal	kV	4.16
2.3	Tensión de diseño	kV	7.2
2.4	Tensión de impulso de onda 1.2/50 us	kVp	75
2.5	Tensión de descarga en seco 60Hz 1min	kV	38
2.6	Corriente nominal	A	1250
2.7	Corriente nominal de cierre	kA	16
2.8	Corriente de interrupción simétrica	kA	40
2.9	Tensión de operación	V DC	48
2.10	Tensión alterna para calefacción	V AC	220
2.11	Cámara de extinción		Vacío
2.12	Número de contactos auxiliares disponibles NO		>=6
2.13	Número de contactos auxiliares disponibles NC		>=6
2.14	Mando motorizado (local y remoto)		Si
3	TRANSFORMADOR DE CORRIENTE		
3.1	Frecuencia	Hz	60
3.2	Tensión nominal	kV	4.16
3.3	Tensión de diseño	kV	7.2
3.4	Relación de transformación	A	1250/5/5/5
3.5	Arrollamientos para protección		
	Número		2
	Potencia	VA	10
	Clase		5P20
3.6	Arrollamientos para medición		
	Número		1
	Potencia	VA	10
	Clase		0.2

Nota: Elaboración propia

Tabla 74:
Parte c: Tabla de datos técnicos switchgear 3

TABLA DE DATOS TÉCNICOS DE SWITCHGEAR 3 – CELDA DE LLEGADA			
ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR
4	SECCIONADORES		
4.1	Frecuencia	Hz	60
4.2	Tensión nominal	kV	4.16
4.3	Tensión de diseño	kV	7.2
4.4	Tensión de aislamiento	kVp	75
4.5	Corriente nominal	A	1250
5	TRANSFORMADOR DE TENSIÓN		
5.1	Frecuencia	Hz	60
5.2	Tensión nominal	kV	4.16
5.3	Tensión de diseño	kV	7.2
5.4	Relación de transformación	kV	4.16:√3/0.1: √3/0.1: √3
5.5	Arrollamientos para protección		
	Número		1
	Potencia	VA	10
	Clase		3P
5.6	Arrollamientos para medición		
	Número		1
	Potencia	VA	10
	Clase		0.2

Nota: Elaboración propia

Tabla 75:
Parte d: Tabla de datos técnicos switchgear 3

TABLA DE DATOS TÉCNICOS DE SWITCHGEAR 3 – CELDA DE SALIDA			
ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR
1	CELDA METAL CLAD BARRA AISLADA EN AIRE		
1.1	Frecuencia	Hz	60
1.2	Tensión nominal	kV	4.16
1.3	Tensión de diseño	kV	7.2
1.4	Tensión de impulso de onda 1.2/50 us	kVp	75
1.5	Tensión de descarga en seco 60Hz 1min	kV	38
1.6	Corriente nominal de barras	A	1250
1.7	Corriente nominal de derivaciones	A	630
1.8	Corriente nominal de cierre	kA	16
1.9	Corriente de interrupción simétrica	kA	40
1.10	Tensión continua nominal para mandos y control	V DC	48
1.11	Tensión alterna para calefacción e iluminación	V AC	220
1.12	Ancho máximo	mm	1000
1.13	Altura máxima	mm	2700
1.14	Profundidad máxima	mm	2100
1.15	Tipo de aislamiento		Aire
1.16	A prueba de arco interno		SI
1.17	Duración mínima de ensayo de falla por arco interno	s	1
1.18	Posibilidad de montaje y ampliación		Si
1.19	Grado de protección		IP4X
1.20	Enclavamiento de seguridad para apertura de puerta		Si
1.21	Construcción autosoportados, individuales y acoplables		Si

Nota: Elaboración propia

Tabla 76:
Parte e: Tabla de datos técnicos switchgear 3

TABLA DE DATOS TÉCNICOS DE SWITCHGEAR 3 – CELDA DE SALIDA			
ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR
2	INTERRUPTOR EXTRAÍBLE		
2.1	Frecuencia	Hz	60
2.2	Tensión nominal	kV	4.16
2.3	Tensión de diseño	kV	7.2
2.4	Tensión de impulso de onda 1.2/50 us	kVp	75
2.5	Tensión de descarga en seco 60Hz 1min	kV	38
2.6	Corriente nominal	A	630
2.7	Corriente nominal de cierre	kA	16
2.8	Corriente de interrupción simétrica	kA	40
2.9	Tensión de operación	V DC	48
2.10	Tensión alterna para calefacción	V AC	220
2.11	Cámara de extinción		Vacío
2.12	Número de contactos auxiliares disponibles NO		>=6
2.13	Número de contactos auxiliares disponibles NC		>=6
2.14	Mando motorizado (local y remoto)		Si
3	TRANSFORMADOR DE CORRIENTE		
3.1	Frecuencia	Hz	60
3.2	Tensión nominal	kV	4.16
3.3	Tensión de diseño	kV	7.2
3.4	Relación de transformación	A	630/5/5/5
3.5	Arrollamientos para protección		
	Número		2
	Potencia	VA	10
	Clase		5P20
3.6	Arrollamientos para medición		
	Número		1
	Potencia	VA	10
	Clase		0.2

Nota: Elaboración propia

Tabla 77:
Parte f: Tabla de datos técnicos switchgear 3

TABLA DE DATOS TÉCNICOS DE SWITCHGEAR 3 – CELDA DE SALIDA			
ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR
4	SECCIONADORES		
4.1	Frecuencia	Hz	60
4.2	Tensión nominal	kV	4.16
4.3	Tensión de diseño	kV	7.2
4.4	Tensión de aislamiento	kVp	75
4.5	Corriente nominal	A	630

Nota: Elaboración propia

3.3.5 Hoja de datos de MCC-1 y MCC-2

En la siguiente tabla, se muestran los datos garantizados. Las demás características del centro de control de motores, deben ser propuestos por el fabricante.

Tabla 78:
Parte a: Tabla de datos técnicos MCC1 y MCC2

TABLA DE DATOS TÉCNICOS DE MCC1 Y MCC2 – CELDA DE LLEGADA			
ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR
1	CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS		
1.1	Frecuencia	Hz	60
1.2	Tensión nominal	V	480
1.3	Fases/ Cantidad de polos		3
1.4	Corriente nominal de barra	A	3150
1.5	Corriente de cortocircuito	kA	65
2	CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS		
2.1	Grado de protección		NEMA 1
2.2	Unidades		Extraíbles
2.3	Diseño a prueba de		Arco interno
2.4	Disposición de barras		Simétricas
2.5	Elementos de izaje		Requerido
2.6	Futuras ampliaciones		Requerido
2.7	Gabinetes con bloqueo mecánico		Requerido
2.8	Ingreso y salida de cables		Superior
2.9	Barras		Cobre
3	CUBÍCULO DE LLEGADA		
3.1	Tipo		Termomagnético
3.2	Ajustable		Si
3.3	Capacidad	A	3150
3.4	Capacidad de cortocircuito	kA	65
3.5	Tensión nominal	V	480
3.6	Frecuencia	Hz	60

Nota: Elaboración propia

Tabla 79:
Parte b: Tabla de datos técnicos MCC1 y MCC2

4	CUBÍCULO DE SALIDA		
4.1	Tipo		Termomagnético
4.2	Ajustable		Si
4.3	Capacidad	A	1000
4.4	Capacidad de cortocircuito	kA	65
4.5	Tensión nominal	V	480
4.6	Frecuencia	Hz	60
4.7	Cantidad de polos		3

Nota: Elaboración propia

3.3.6 Hoja de datos de TR-MCC1 y TR-MCC2

En la siguiente tabla, se muestran los datos garantizados. Las demás características del transformador deben ser propuestos por el fabricante.

Tabla 80:
Tabla de datos técnicos TR-MCC1 y TR-MCC2

TABLA DE DATOS TÉCNICOS DE LOS TRANSFORMADORES TR-MCC1 Y TR-MCC2			
ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR
1	CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS		
1.1	Frecuencia	Hz	60
1.2	Tensión primaria	V	4160
1.3	Tensión secundaria	V	480
1.4	Fases		3
1.5	Potencia	MVA	2.5
1.6	Porcentaje de impedancia	%	5
1.7	Grupo de conexión		Dyn5
1.8	Clase de aislamiento de devanado primario	kV	5
1.9	Nivel básico de aislamiento de devanado primario	kV	75
1.10	Clase de aislamiento de devanado secundario	kV	0.6
1.11	Nivel básico de aislamiento de devanado secundario	kV	45
2	CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS		
2.1	Neutro sólidamente puesto a tierra		Si
2.2	Cambiador de tomas en devanado primario		5(+-2x2.5%)
2.3	Tipo de aislamiento		Aceite mineral
2.4	Altura de instalación		1000msnm
2.5	Sistema de enfriamiento		ONAN
2.6	Lugar de instalación		Selva peruana
2.7	Material del conductor		Cobre
2.8	Indice de polarización		>=2

Nota: Elaboración propia

3.4 Diseños complementarios

3.4.1 Banco de condensadores

En base a las simulaciones de flujo de carga, se evidencia que, es necesaria la implementación de un banco de condensadores en media tensión, el cual mantenga niveles de tensión óptimos, durante la operación normal.

Por tal motivo se procederá a realizar la hoja de datos, que servirá en la gestión de compra del banco de condensadores de media tensión.

Tabla 81:
Tabla de datos técnicos del banco de condensadores

TABLA DE DATOS TÉCNICOS DEL BANCO DE CONDENSADORES DE MEDIA TENSIÓN			
ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR
1	CARACTERÍSTICAS GENERALES		
1.1	Norma		IEC
1.2	Norma de requerimientos sísmicos		IEEE Std. 693
1.3	Instalación		Exterior
1.4	Montaje		Metal Clad
1.5	Grado de protección		IP 42
1.6	Lugar de instalación		Selva peruana
1.7	Construcción		Autosoportados
1.8	Cubículos		Extraíbles
1.9	Temperatura ambiente	°C	30
2	CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS		
2.1	Frecuencia	Hz	60
2.2	Tensión	V	4160
2.3	Potencia	MVAr	1
2.4	Fases		3
2.5	Tensión de control monofásica AC	V	220
2.6	Tensión del fusible del capacitor	kV	7.2
2.7	Tensión nominal del capacitor (Interruptor)	kV	4.16
2.8	Accionamiento		Tripolar
2.9	Extinción de arco		Vacío
2.10	Número de operaciones garantizadas		100000
2.11	Controlador de capacitor por factor de potencia		Si
2.12	Controlador de capacitor por tensión		Si
2.13	Controlador de capacitor por corriente		Si
2.14	Reactor limitador de corriente de inserción		Si
2.15	Pararrayo		Si
2.16	Número de pasos		4
2.17	Potencia de pasos	kVAr	250

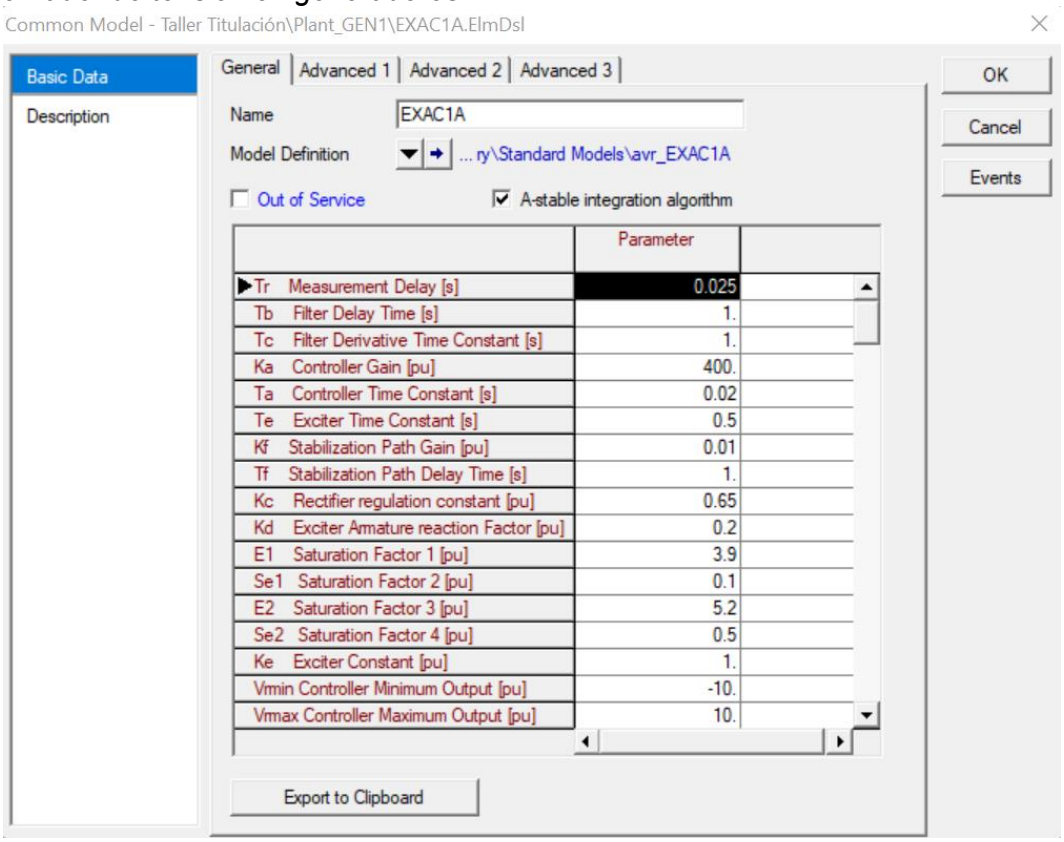
Nota: Elaboración propia

3.4.2 Rechazo de carga

En la práctica, se ve necesaria, la implementación de un sistema de rechazo de carga por mínima frecuencia, ante la salida intempestiva de uno o más generadores eléctricos.

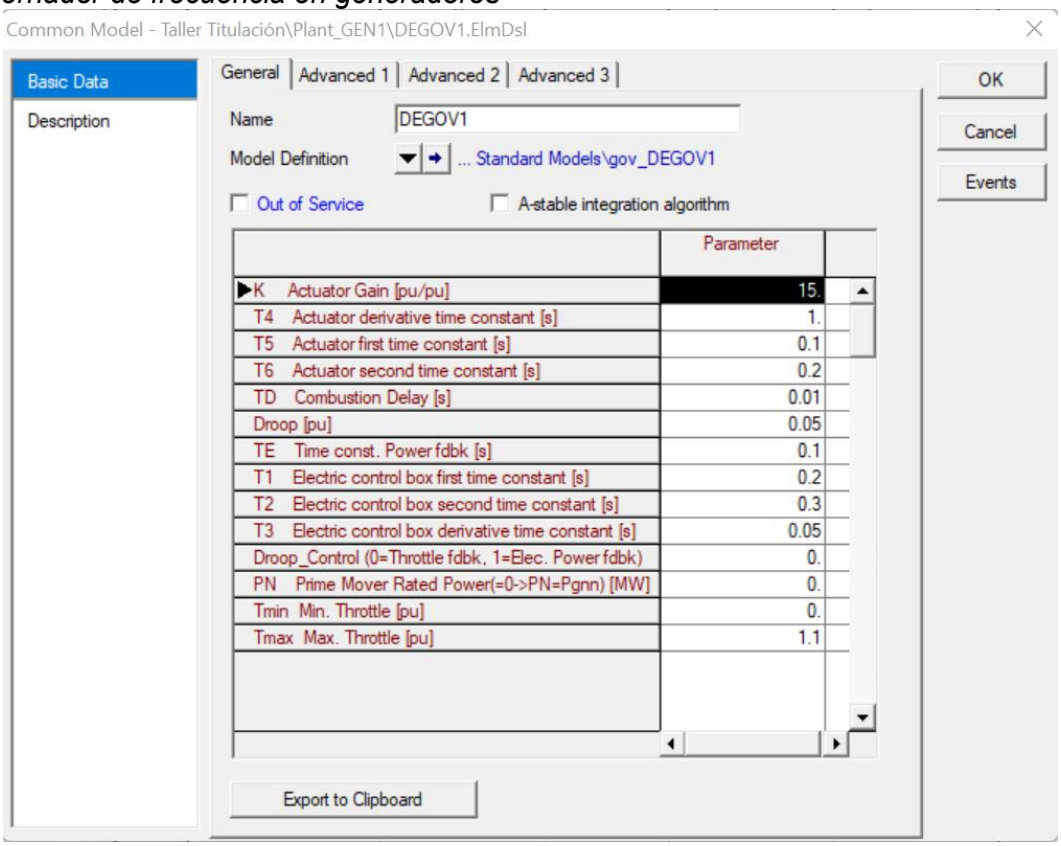
Para ello se procedió a modelar los sistemas de regulación de tensión y frecuencia de los generadores, en el software Power Factory, los valores fueron escogidos en base a la experiencia en campo y fueron extraídos de la galería del software Power Factory.

Figura 14:
Gobernador de tensión en generadores



Nota: Elaboración propia

Figura 15:
Gobernador de frecuencia en generadores



Nota: Elaboración propia

Para el análisis, se procederá a simular el evento de desconexión de uno o más generadores, finalmente se elaborará una tabla resumen con los datos obtenidos y las gráficas generadas por el software de simulación Power Factory.

Así mismo, también se aprovechará, a ver el comportamiento de los generadores, cuando exista una salida intempestiva de servicio de las cargas HPS, con la finalidad de ver el comportamiento de los gobernadores de tensión y frecuencia.

Cabe mencionar que, como se mencionara líneas arriba, las únicas cargas con la potencia suficiente, para salvar el sistema aislado, ante la pérdida de generación, son las bombas de reinyección de agua (HPS).

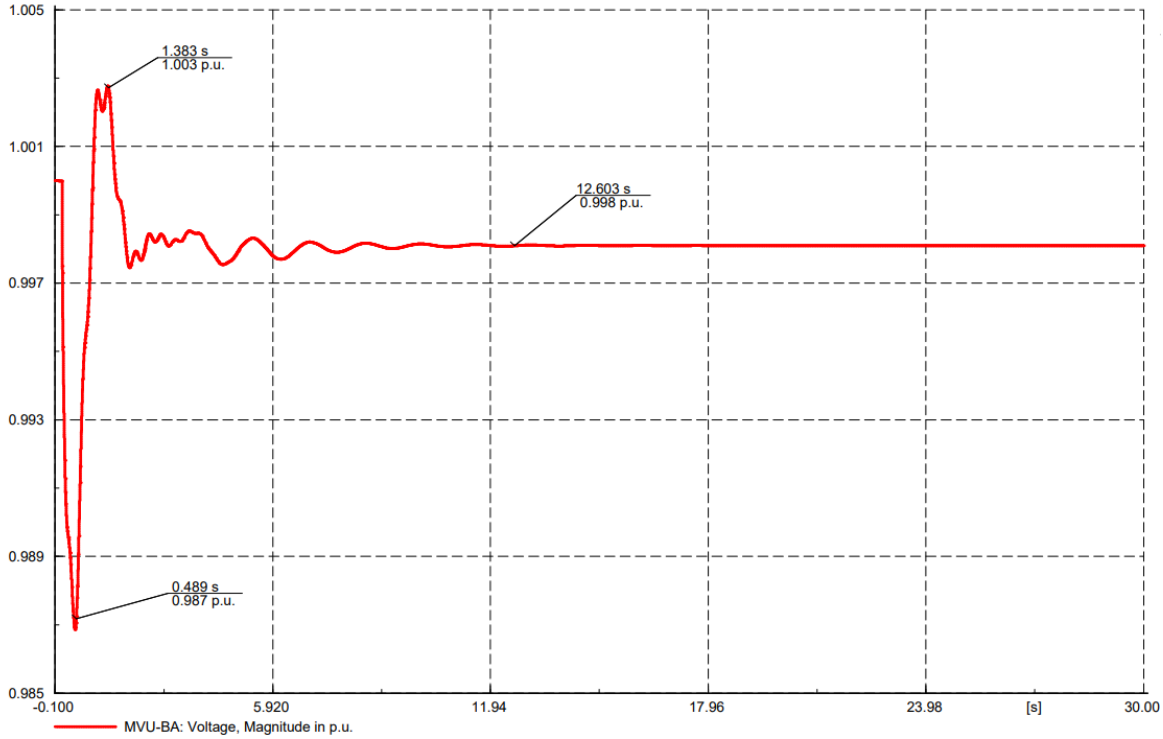
Los resultados de flujo de carga, luego de los eventos, se presentará en el Anexo D.

a) Evento de desconexión de un generador

La programación de desconexión de un generador, se modelará a partir de 0.1s.

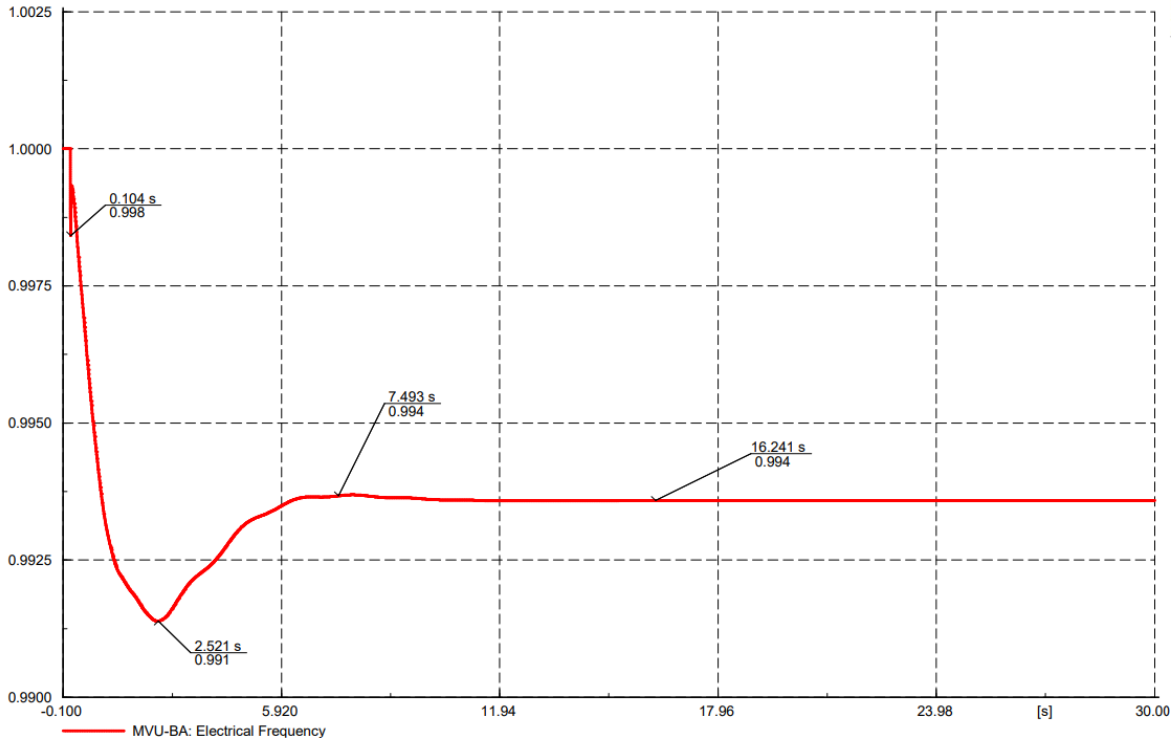
Se procede a presentar las gráficas obtenidas:

Figura 16:
Tensión en barra A (p.u.) luego de la desconexión de un generador



Nota: Elaboración propia

Figura 17:
Frecuencia en barra A (p.u.) luego de la desconexión de un generador



Nota: Elaboración propia

Como se puede apreciar, las gráficas de tensión y frecuencia se muestran dentro de los valores normales, los gobernadores de tensión y frecuencia de los generadores, logran estabilizar el sistema por si solos.

En cuanto a los valores obtenidos en el flujo de carga, se puede evidenciar que los generadores se sobrecargan, sin embargo, se mantienen en valores aceptados, que fácilmente pueden ser regulados en instantes posteriores al evento.

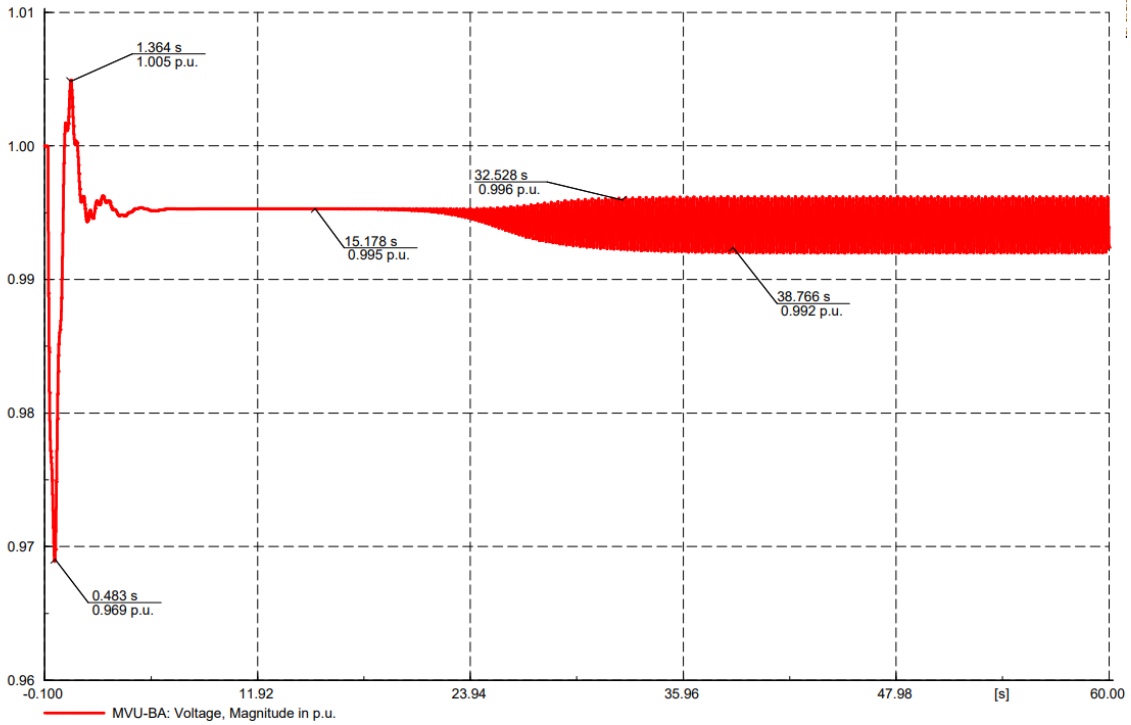
Por tal motivo, se concluye que, en la salida intempestiva de un generador, no será necesario activar el sistema de rechazo por mínima frecuencia.

b) Evento de desconexión de dos generadores

La programación de desconexión de dos generadores se modelará a partir de 0.1s.

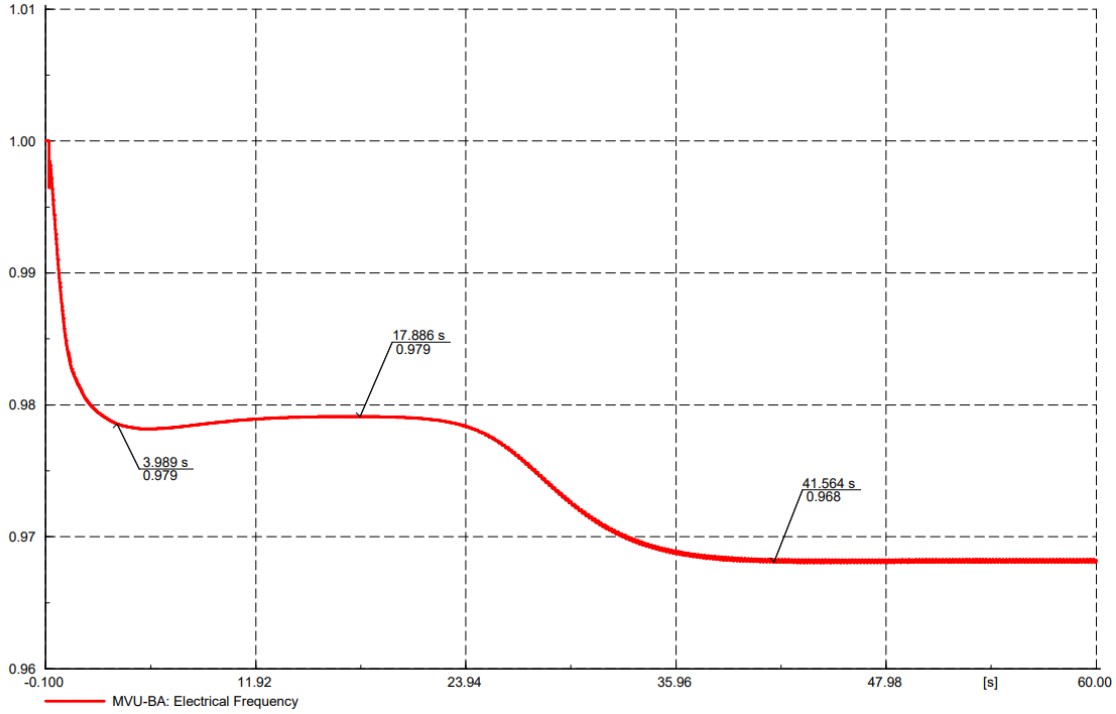
Se procede a presentar las gráficas obtenidas:

Figura 18:
Tensión en barra A SW1 (p.u.) luego de la desconexión de dos generadores



Nota: Elaboración propia

Figura 19:
Frecuencia en barra A (p.u.) luego de la desconexión de dos generadores



Nota: Elaboración propia

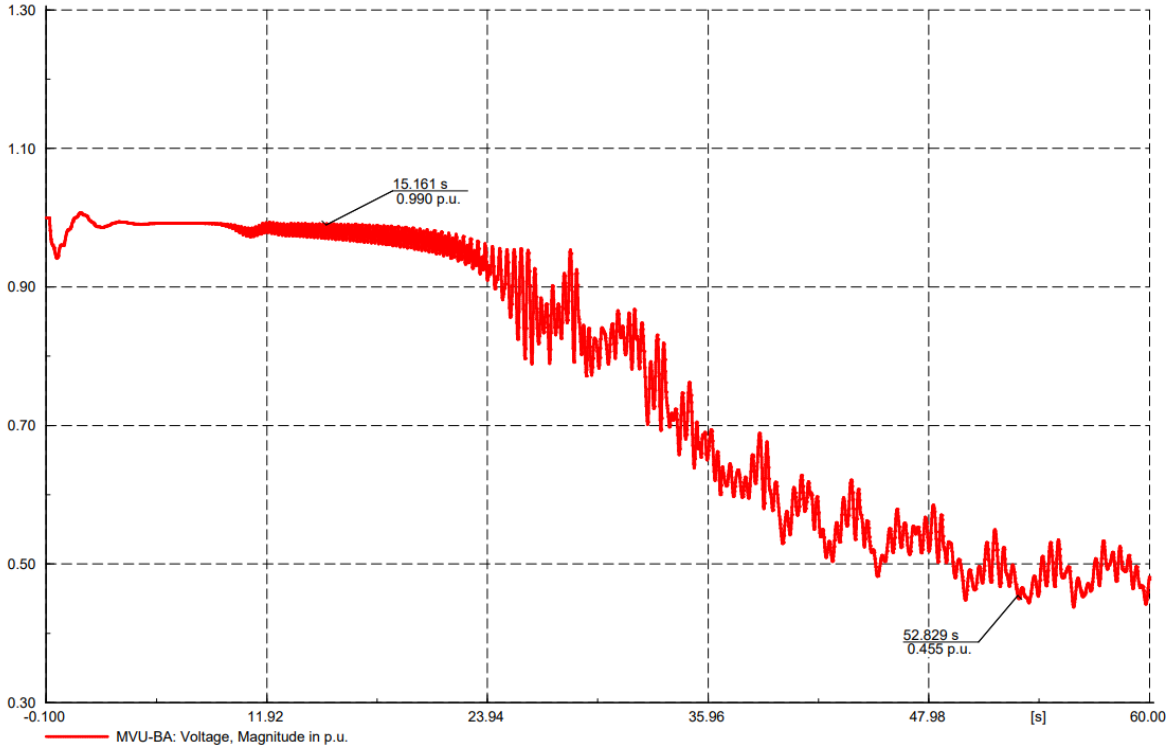
En cuanto al evento de desconexión de dos generadores, se puede verificar que es necesario activar el sistema de rechazo por mínima frecuencia, así que en este caso se programará la desconexión de HPS, hasta estabilizar el sistema.

c) Evento de desconexión de tres generadores

La programación de desconexión de tres generadores se modelará a partir de 0.1s.

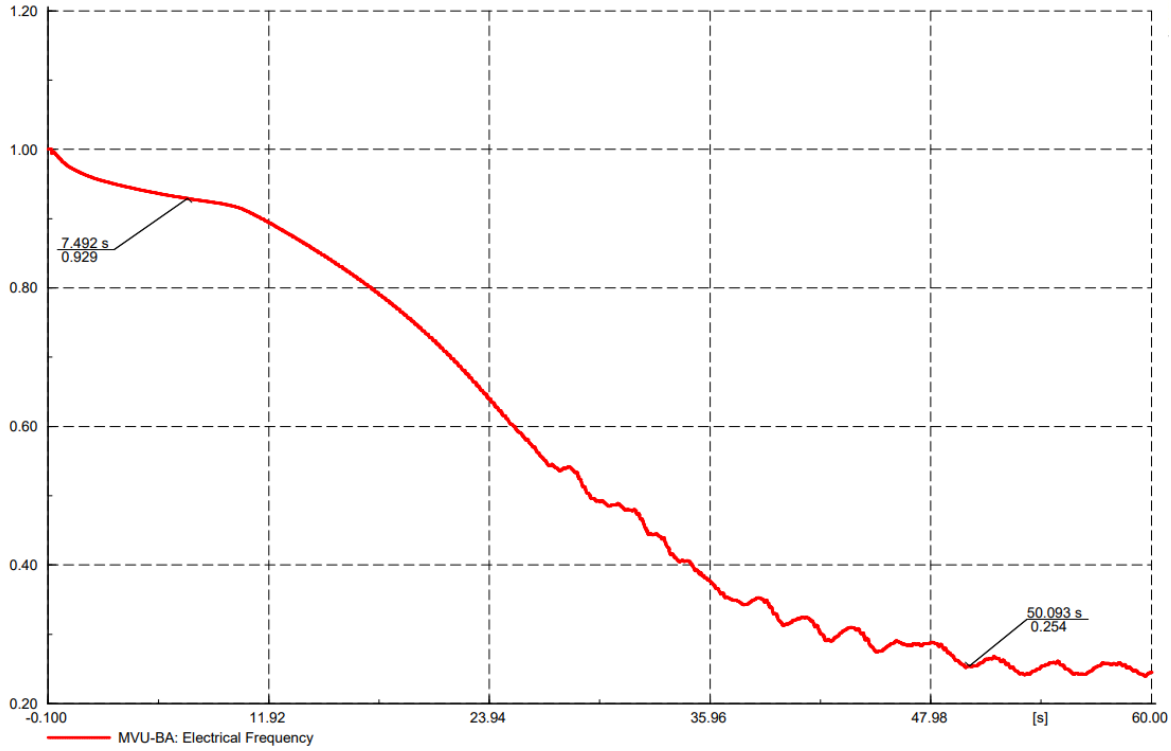
Se procede a presentar las gráficas obtenidas:

Figura 20:
Tensión en barra A SW1 (p.u.) luego de la desconexión de tres generadores



Nota: Elaboración propia

Figura 21:
Frecuencia en barra A (p.u.) luego de la desconexión de tres generadores



Nota: Elaboración propia

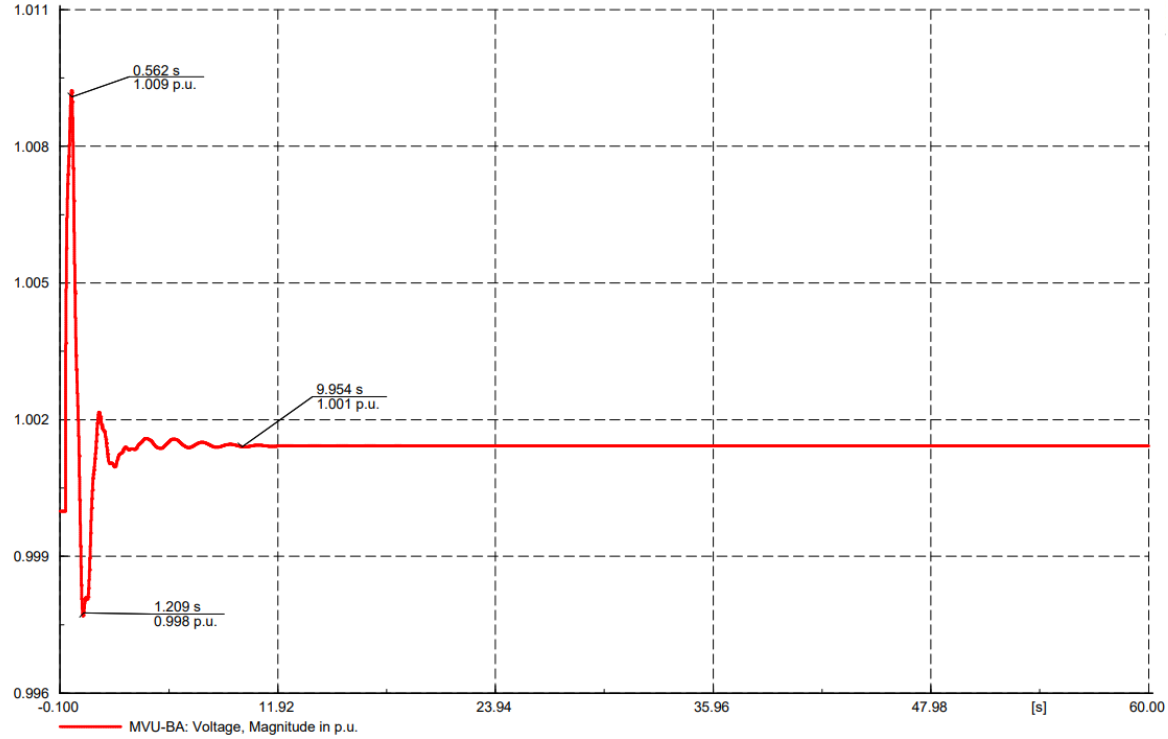
En cuanto al evento de desconexión de tres generadores, se puede verificar que es necesario activar el sistema de rechazo por mínima frecuencia, así que en este caso se programará la desconexión de HPS, hasta estabilizar el sistema.

d) Evento de desconexión de una bomba HPS

La programación de desconexión de una bomba de reinyección de agua se modelará a partir de 0.2s.

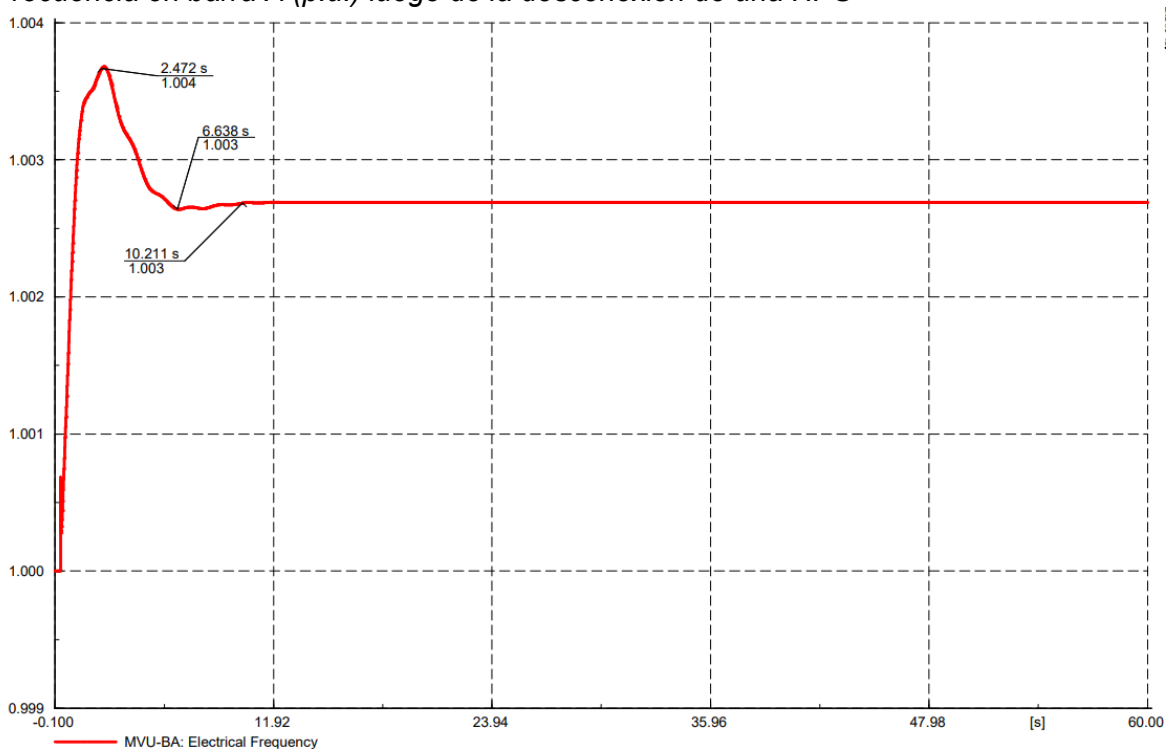
Se procede a presentar las gráficas obtenidas:

Figura 22:
Tensión en barra A SW1 (p.u.) luego de la desconexión de una HPS



Nota: Elaboración propia

Figura 23:
Frecuencia en barra A (p.u.) luego de la desconexión de una HPS



Nota: Elaboración propia

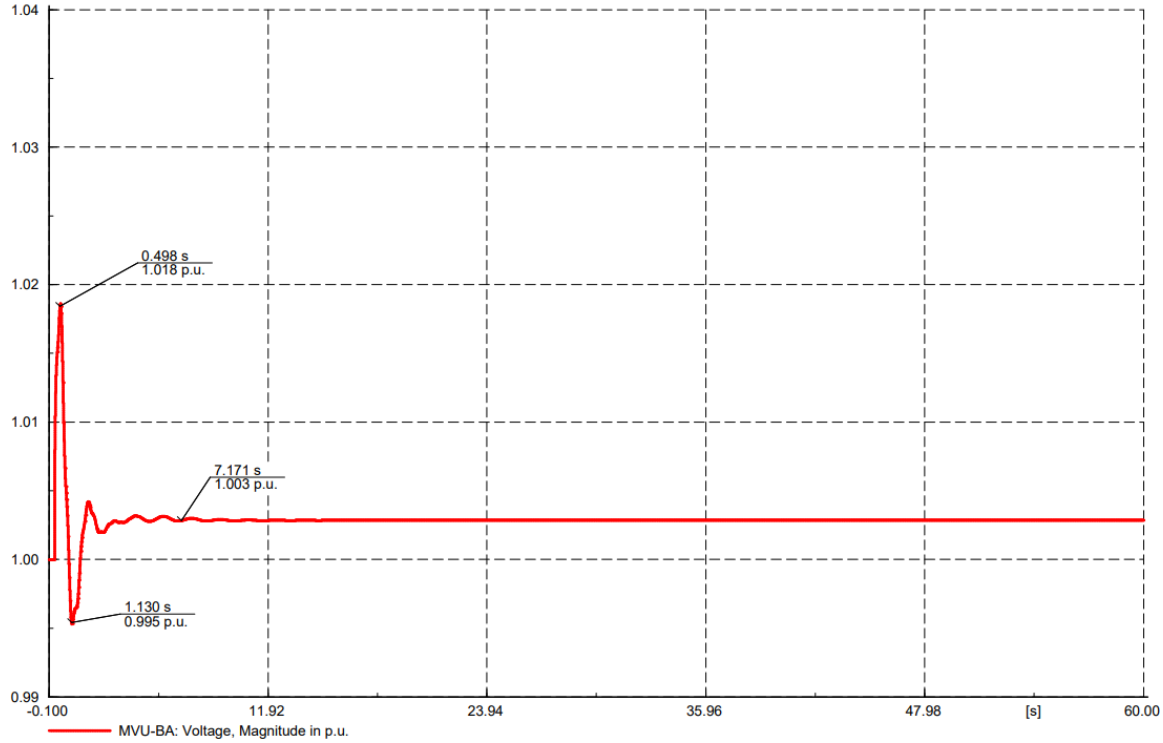
De las figuras mostradas, se puede evidenciar que, los gobernadores de tensión y frecuencia, de los generadores, son suficientes para soportar tal evento intempestivo.

e) Evento de desconexión de dos bombas HPS

La programación de desconexión de dos bombas de reinyección de agua, se modelará a partir de 0.2s.

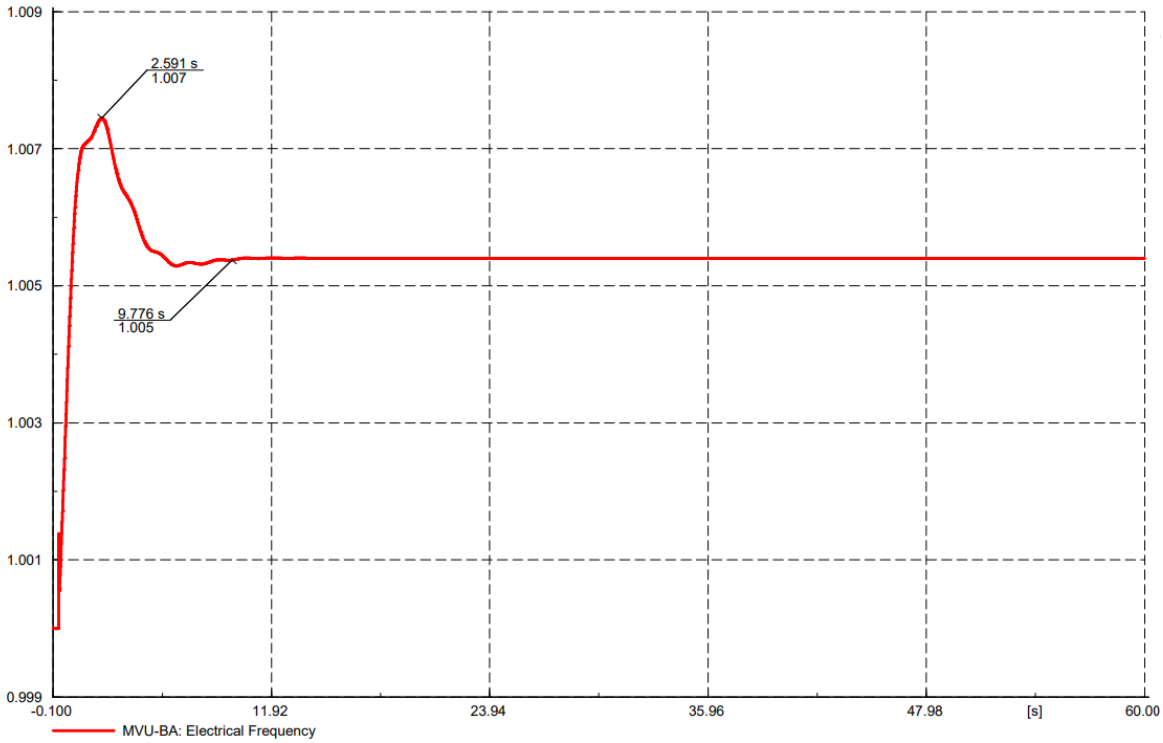
Se procede a presentar las gráficas obtenidas:

Figura 24:
Tensión en barra A SW1 (p.u.) luego de la desconexión de dos HPS



Nota: Elaboración propia

Figura 25:
Frecuencia en barra A (p.u.) luego de la desconexión de dos HPS



Nota: Elaboración propia

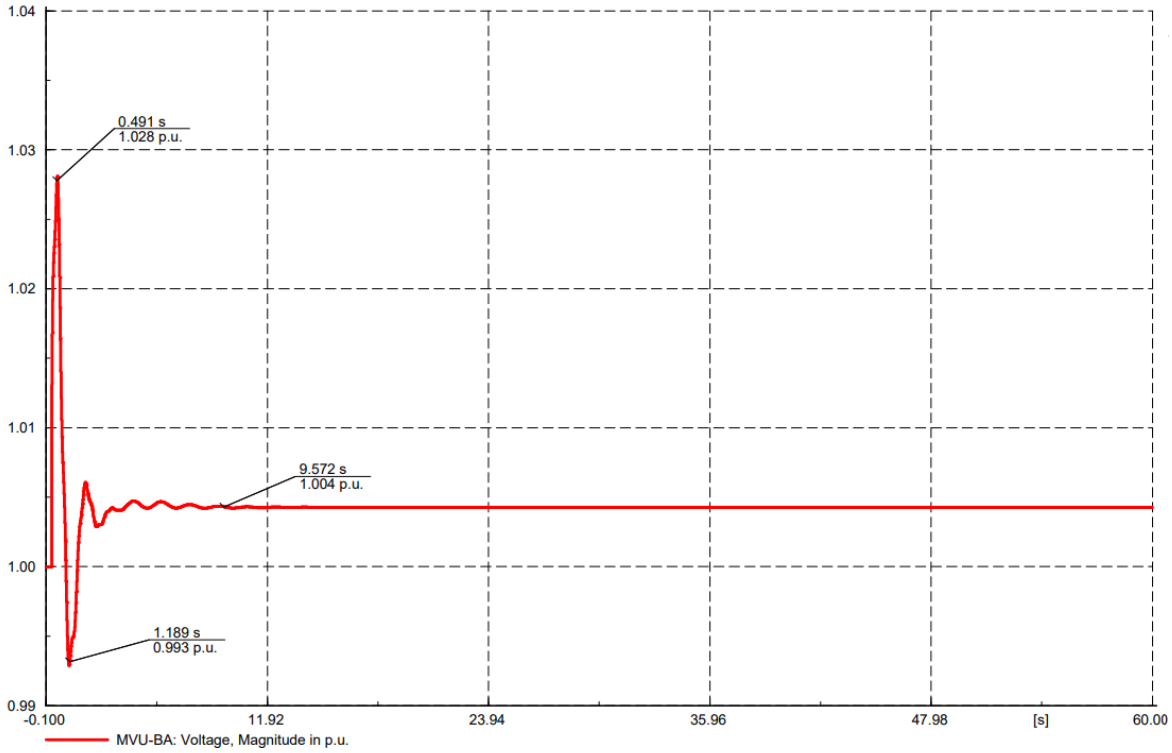
De las figuras mostradas, se puede evidenciar que, los gobernadores de tensión y frecuencia, de los generadores, son suficientes para soportar tal evento intempestivo.

f) Evento de desconexión de tres bombas HPS

La programación de desconexión de tres bombas de reinyección de agua se modelará a partir de 0.2s.

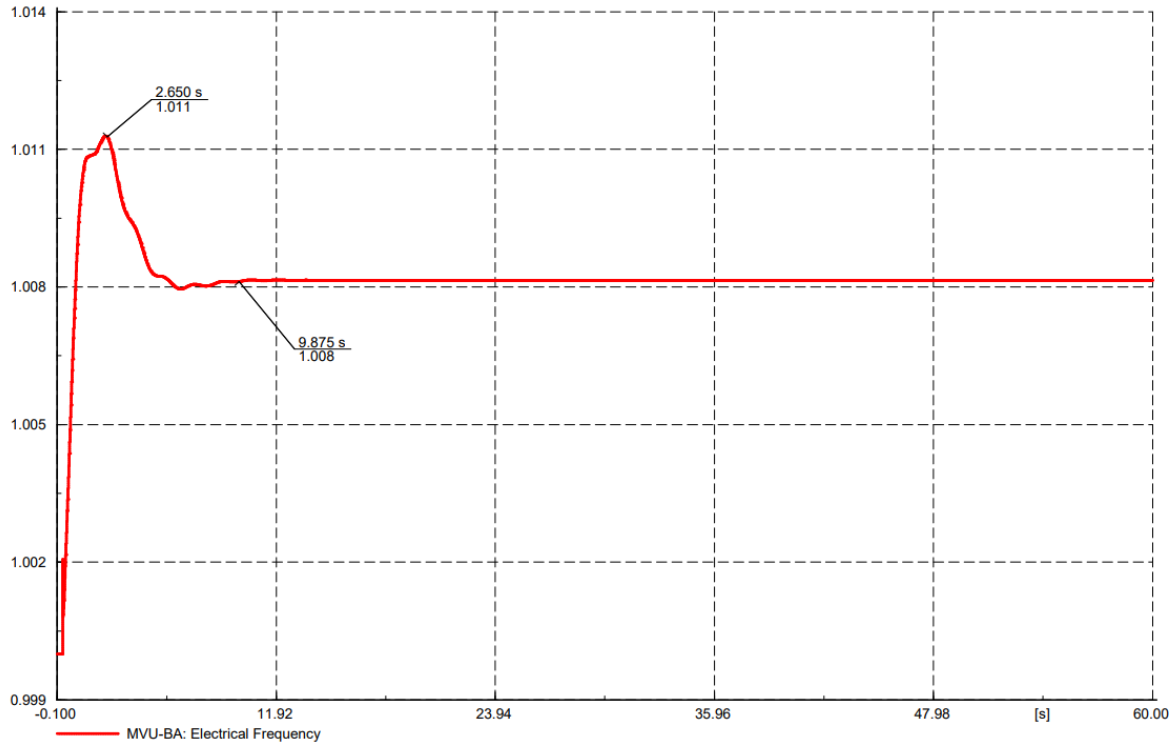
Se procede a presentar las gráficas obtenidas:

Figura 26:
Tensión en barra A SW1 (p.u.) luego de la desconexión de tres HPS



Nota: Elaboración propia

Figura 27:
Frecuencia en barra A SW1 (p.u.) luego de la desconexión de tres HPS



Nota: Elaboración propia

De las figuras mostradas, se puede evidenciar que, los gobernadores de tensión y frecuencia, de los generadores, son suficientes para soportar tal evento intempestivo y no es necesario sacar de servicio un generador.

g) Tablas resumen de eventos de salida intempestiva de generación

En base a las gráficas obtenidas por cada evento, se procederá a resumir las gráficas con pérdida de dos y tres generadores, dado que estos no pueden ser recuperados a diferencia del caso de pérdida intempestiva de un generador.

Tabla 82:
Tabla resumen de eventos de salida intempestiva de generadores

			Frecuencia del sistema		Tensión del sistema	
ITEM	**Contingencia**	**Generación**	**Gradiente inicial (Hz/s)**	**Valor final (Hz)**	**Tensión inicial (kV)**	**Tensión final (kV)**
b	Desconexión de dos generadores	G6 y G7	-0.77	58.08	4.16	No definida
c	Desconexión de tres generadores	G5, G6 y G7	-1.02	15.06	4.16	Colapso

Nota: Elaboración propia

h) Esquema recomendado de desconexión de carga por mínima frecuencia

Como bien se sabe, la carga HPS es la carga existente con mayor carga, lo que implica que, al ser energizada, se presentará la mayor caída de tensión y frecuencia.

En la práctica, esta carga se puede energizar mediante arrancador suave o variador, mediante arrancador suave se suelen tener valores de corriente de arranque de hasta 4.5 veces la corriente nominal y mediante variador se suele tener valores de corriente de arranque de hasta 1.2 veces la corriente nominal de la HPS.

Para fines de este proyecto, se presentará el umbral de frecuencia, por debajo del valor obtenido en la práctica, al energizar una carga HPS, mediante arrancador suave. En la práctica se llega a tener valores de 59.39Hz, por lo que el umbral de frecuencia escogido será de 59Hz.

Tabla 83:
Esquema de rechazo de carga recomendado

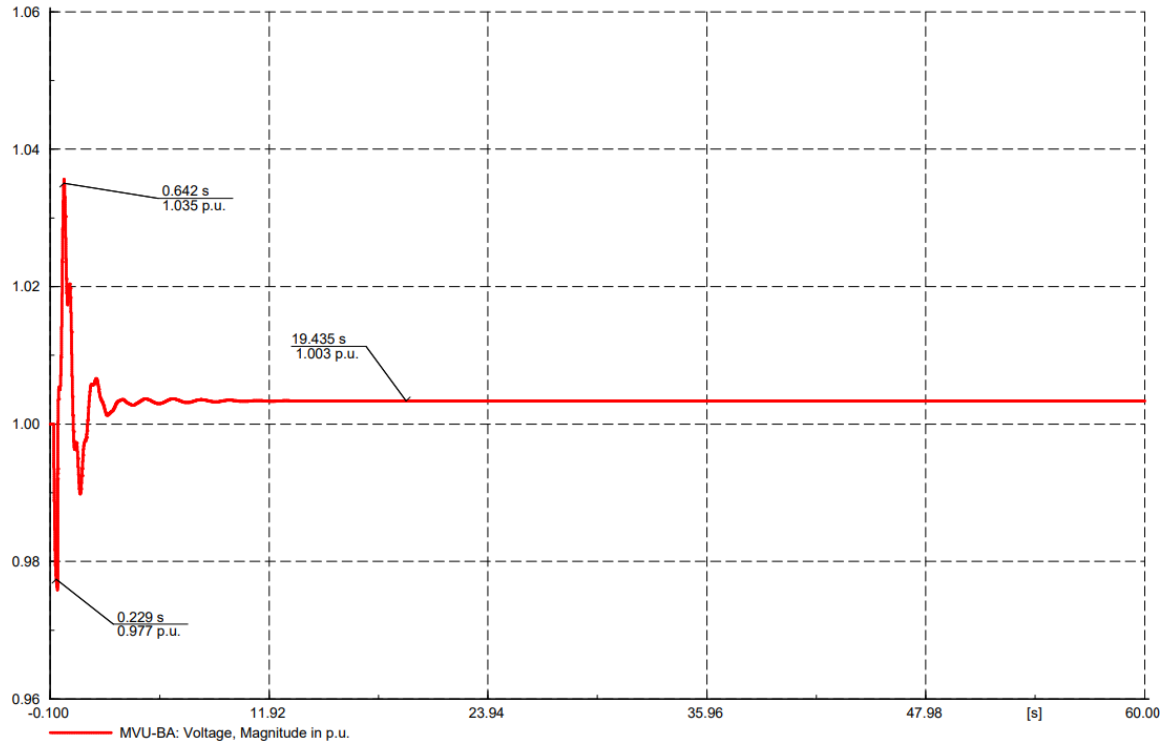
Número de etapa	Ajuste de umbral		Ajuste de derivada		
	Frecuencia (Hz)	Temporización (s)	Arranque (Hz)	Pendiente (Hz/s)	Temporización (s)
1	59	0.2	59.8	0.7	0.2
2	58.5	0.2	59.8	1	0.2

Nota: Elaboración propia

i) Etapa 1

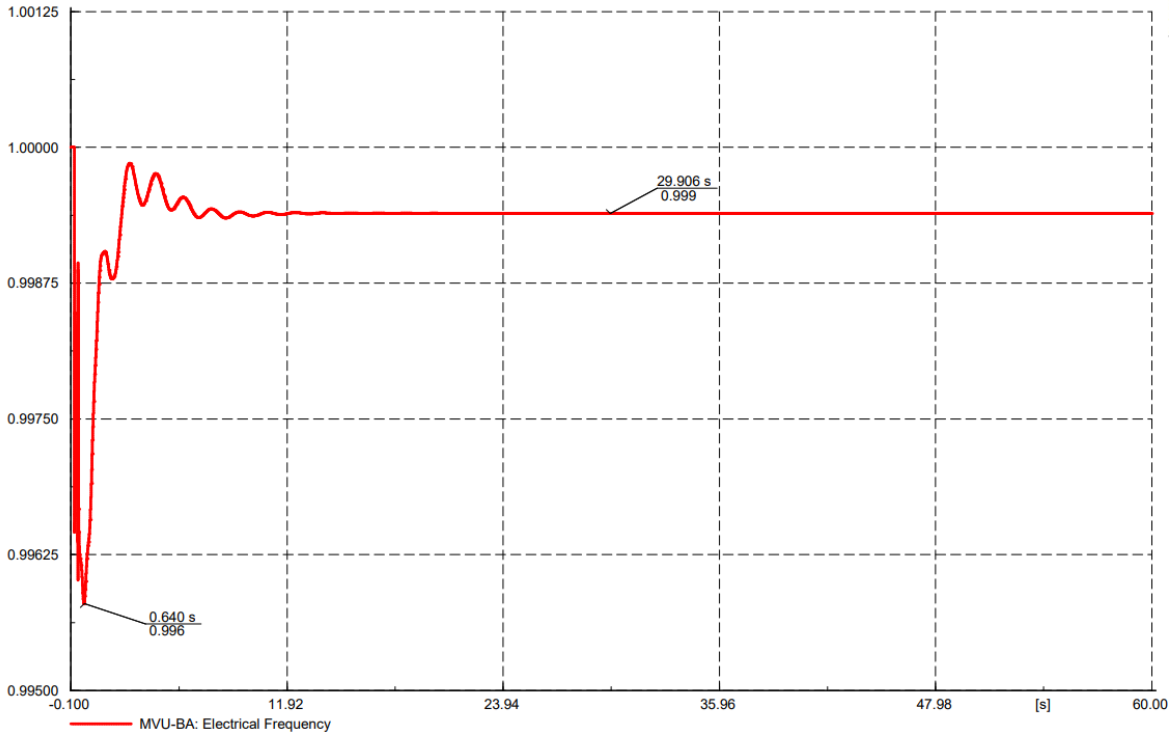
Luego de simular la desconexión intempestiva de dos generadores en el instante 0.1s, se procede a desconectar cierta cantidad mínima de HPS en el instante 0.3s, para salvar el sistema. Este efecto se da con la desconexión de cuatro HPS, mayor detalle se puede verificar en las siguientes figuras y en el Anexo D.

Figura 28:
Tensión SW1 BA luego que actúe la etapa I del ERACMF



Nota: Elaboración propia

Figura 29:
Frecuencia SW1 BA luego que actúa la etapa I del ERACMF

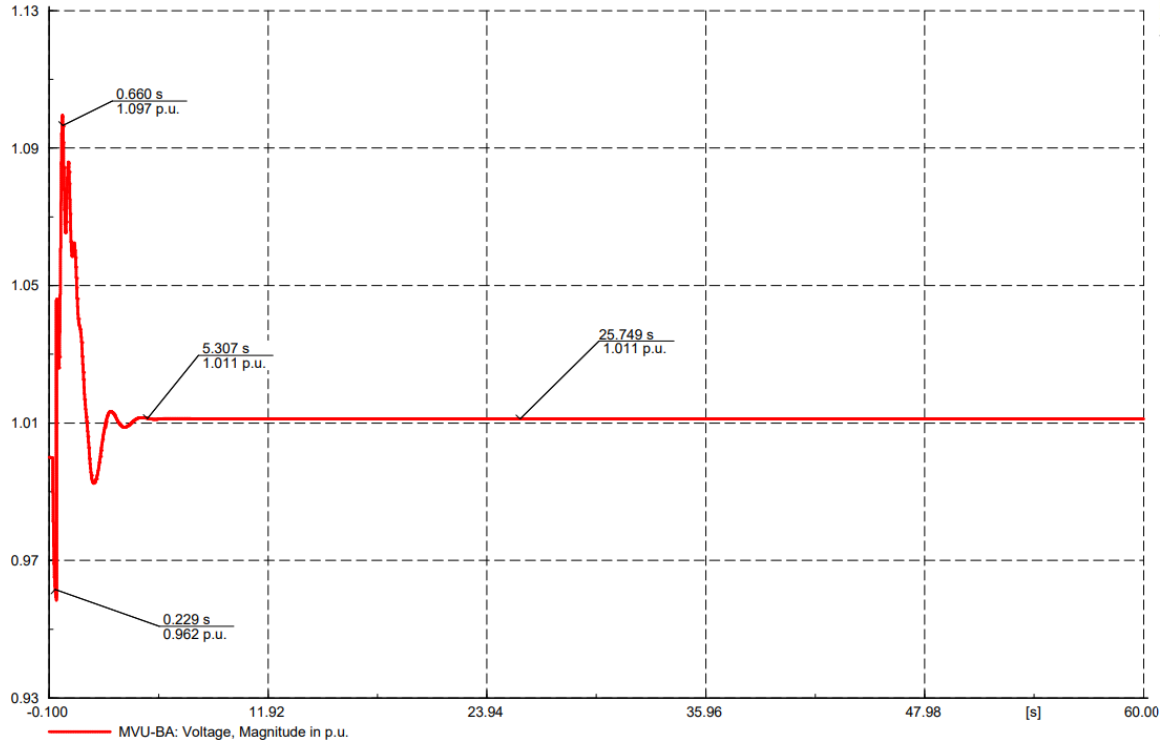


Nota: Elaboración propia

j) Etapa 2

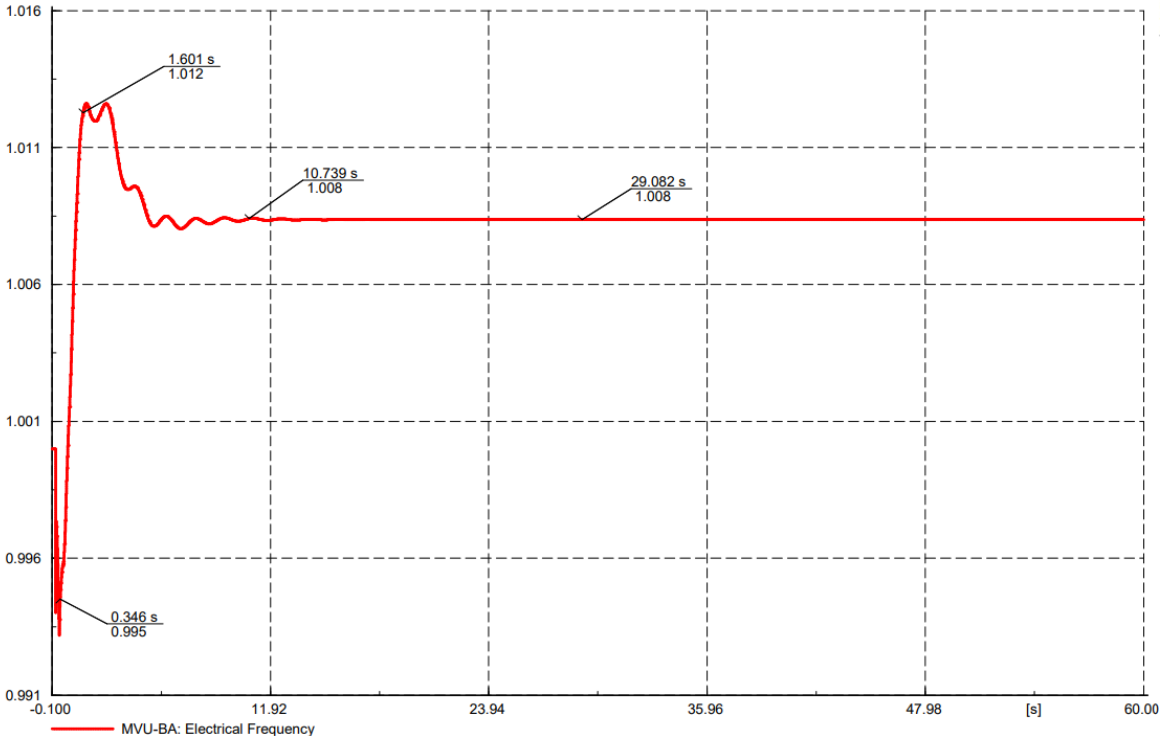
Luego de simular la desconexión intempestiva de tres generadores en el instante 0.1s, se procede a desconectar cierta cantidad mínima de HPS en el instante 0.3s, para salvar el sistema. Este efecto se da con la desconexión de ocho HPS, desde los alimentadores principales del SW1 barra A y barra B, mayor detalle se puede verificar en las siguientes figuras y en el Anexo D.

Figura 30:
Tensión SW1 BA luego que actúa la etapa II del ERACMF



Nota: Elaboración propia

Figura 31:
Frecuencia SW1 BA luego que actúe la etapa II del ERACMF



Nota: Elaboración propia

3.4.3 Protecciones eléctricas

Las protecciones eléctricas deben ser ajustadas y coordinadas, en base al ajuste propuesto por la empresa de energía. La cual realizó su ajuste, considerando los siguientes datos aproximadamente:

Se toma como referencia la capacidad total que transmite el alimentador que va desde la barra de entrega de energía de generación MVU hacia la barra del Switchgear 1.

Tabla 84:
Capacidad de barra de Switchgear 1

Celda de salida de planta de generación – Celdas de llegada Switchgear 1				
Carga	N° de Fases	Potencia	Nivel de tensión	Corriente nominal
		(kVA)	(kV)	(A)
Lote Petrolero	Trifásico	-	4.16	1375.9
Capacidad Nominal				1376
Regulación al 120%				1651.2

Nota: Elaboración propia

En el siguiente cuadro, se muestran los ajustes de protecciones que se plantean, con la finalidad de que se cumpla lo antes propuesto:

Tabla 85:
Ajuste de protecciones en el lado primario de MVU-SW1

SW	**Carga**	**Marca**	**Modelo**	**Función**	**Umbral 1**			**Umbral 2**		
					Curva	**I1(A)**	**t1**	**Curva**	**I2(A)**	**t2**
MVU	SW1	ABB	REF615	50/51	IEC DT	1700	1	IEC NI	1400	0.2
								IEC DT	4500	0.56

Nota: Elaboración propia

Dado que se cuenta con un transformador de corriente cuya relación es 2000/5, se procede hallar el ajuste a configurar en el relé.

Tabla 86:
Ajuste de protecciones en el lado secundario de MVU-SW1

SW	**Carga**	**Marca**	**Modelo**	**Función**	**Umbral 1**			**Umbral 2**		
					Curva	**I1(A)**	**t1**	**Curva**	**I2(A)**	**t2**
MVU	SW1	ABB	REF615	50/51	IEC DT	0.85	1	IEC NI	0.7	0.2
								IEC DT	2.25	0.56

Nota: Elaboración propia

a) Protección del motor HPS desde Switchgear 2

Los motores HPS cuentan con una potencia de 746kW, son arrancados mediante variadores de velocidad, razón por la cual la curva de protecciones debe estar por encima de la curva de arranque del motor, dado que, de no darse esta condición, no se permitiría el arranque de este.

Así mismo, se debe garantizar que la curva de operación del relé, debe estar por debajo de la curva de daño del motor, de no darse esta condición, primero se registraría un daño en el motor, antes de que aperture el interruptor asociado por orden directa del relé de protección. Además, se debe evitar que los valores de cortocircuito se produzcan en el motor, por lo que se considerará un valor aceptable comparado con los datos mencionados en el Anexo D.

En el caso de la función de sobre corriente entre fases, se considera 50% del valor de la corriente nominal. En el caso de la función de sobre corriente a tierra, se considerará a futuro, un valor sensitivo, dado que estamos en un conexionado delta, por lo pronto quedará fuera de análisis.

Se debe tener en cuenta que, en la aplicación, los motores son conectados a través de variadores de velocidad, por lo que el aporte de corriente de cortocircuito es prácticamente insignificante. Así mismo, los tiempos de operación, se obtienen en base a la coordinación de protecciones que se debe tener entre switchgears.

En base a los datos mencionados líneas arriba, se tiene:

Tabla 87:
Capacidad de HPS

Switchgear 2 – Celdas de salida hacia HPS				
Motor	N° de Fases	Potencia	Nivel de tensión	Corriente nominal
		(kVA)	(kV)	(A)
HPS	Trifásico	871.8	4.16	121
Capacidad Nominal de una HPS				121
Regulación al 150%				181.5

Nota: Elaboración propia

En el siguiente cuadro, se muestran los ajustes de protecciones que se plantean, con la finalidad de que se cumpla lo antes propuesto:

Tabla 88:
Ajuste de protecciones en el lado primario de SW2-HPS

SW	Carga	Marca	Modelo	Función	Umbral 1			Umbral 2		
					Curva	I1(A)	t1	Curva	I2(A)	t2
SW2	HPS	ABB	REF615	50/51	IEC EI	176.4	2.9	IEC DT	894.6	0.07

Nota: Elaboración propia

Dado que se cuenta con un transformador de corriente cuya relación es 630/5, se procede hallar el ajuste a configurar en el relé.

Tabla 89:
Ajuste de protecciones en el lado secundario de SW2-HPS

SW	Carga	Marca	Modelo	Función	Umbral 1			Umbral 2		
					Curva	I1(A)	t1	Curva	I2(A)	t2
SW2	HPS	ABB	REF615	50/51	IEC EI	0.28	2.9	IEC DT	1.42	0.07

Nota: Elaboración propia

b) Protección de Switchgear 2 desde Switchgear 1

La protección del Switchgear 2, desde su celda de llegada y desde la celda de salida del Switchgear 1A y Switchgear 1B, se modelan en base a la siguiente tabla, considerando la máxima carga a conectar y dando una reserva del 20%, adicional a ello, teniendo en cuenta posibles sobre cargas.

Tabla 90:
Capacidad de barra de SW2

Switchgear 2 – Celdas de llegada				
Switchgear 1 – Celdas de salida hacia Switchgear 2				
Motor	N° de Fases	Potencia	Nivel de tensión	Corriente nominal
		(kVA)	(kV)	(A)
HPS 1	Trifásico	871.8	4.16	121
HPS 2	Trifásico	871.8	4.16	121
HPS 3	Trifásico	871.8	4.16	121
HPS 4	Trifásico	871.8	4.16	121
HPS 5	Trifásico	871.8	4.16	121
HPS 6	Trifásico	871.8	4.16	121
HPS 7	Trifásico	871.8	4.16	121
HPS 8	Trifásico	871.8	4.16	121
SSAA	Trifásico	160	4.16	22.21
Capacidad Nominal Total				990.21
Regulación al 120%				1188.252

Nota: Elaboración propia

La protección de sobre corriente entre fases, tiene consideraciones similares al punto anterior, el objetivo es lograr despejar fallas antes de llegar a los valores de corriente de cortocircuito, por lo que se consideran porcentajes de la misma, para su correspondiente actuación.

Tabla 91:
Ajuste de protecciones en el lado primario de SW1-SW2

SW	Carga	Marca	Modelo	Función	Umbral 1			Umbral 2		
					Curva	I1(A)	t1	Curva	I2(A)	t2
SW1	SW2	ABB	REF615	50/51	IEC NI	1187.5	0.15	IEC DT	1400	0.27

Nota: Elaboración propia

Dado que se cuenta con un transformador de corriente cuya relación es 1250/5, se procede hallar el ajuste a configurar en el relé.

Tabla 92:
Ajuste de protecciones en el lado secundario de SW1-SW2

SW	Carga	Marca	Modelo	Función	Umbral 1			Umbral 2		
					Curva	I1(A)	t1	Curva	I2(A)	t2
SW1	SW2	ABB	REF615	50/51	IEC NI	0.95	0.15	IEC DT	1.12	0.27

Nota: Elaboración propia

c) Protección de transformador 2.5MVA desde Switchgear 3

Para conseguir la curva de protección del transformador, se procede analizar la carga, sobre carga del 50% y corrientes que se reflejan en el devanado primario, producidos por cortocircuitos en el secundario del transformador. Adicional a ello, se debe tener en cuenta que se debe desactivar los disparos producidos por las corrientes de inrush.

Tabla 93:
Capacidad de TR-MCC1

Celdas de salida Switchgear 3 hacia transformador				
Carga	N° de Fases	Potencia	Nivel de tensión	Corriente nominal
		(kVA)	(kV)	(A)
TR MCC 1	Trifásico	2500	4.16	347
Capacidad Nominal Total				347
Regulación al 150%				520.5

Nota: Elaboración propia

En tal sentido, se plantea el siguiente ajuste de protecciones:

Tabla 94:
Ajuste de protecciones en el lado primario de SW3-TRMCC1

SW	Carga	Marca	Modelo	Función	Umbral 1			Umbral 2		
					Curva	I1(A)	t1	Curva	I2(A)	t2
SW3	TR MCC1	ABB	REF615	50/51	IEC DT	522.9	0.6	IEC NI	522.9	0.05
								IEC DT	3780	0.1

Nota: Elaboración propia

Sabiendo que la celda de salida del switchgear 3, cuenta con un transformador de corriente con relación de transformación de 630/5, se obtiene los siguientes ajustes:

Tabla 95:
Ajuste de protecciones en el lado secundario de SW3-TRMCC1

SW	Carga	Marca	Modelo	Función	Umbral 1			Umbral 2		
					Curva	I1(A)	t1	Curva	I2(A)	t2
SW3	TR MCC1	ABB	REF615	50/51	IEC DT	0.83	0.6	IEC NI	0.83	0.05
								IEC DT	6	0.1

Nota: Elaboración propia

d) Protección de Switchgear 3 desde Switchgear 1

La condición de protección por sobre carga, es determinado bajo el mismo principio que los casos anteriores, se considera que solo un alimentador alimenta ambos transformadores, dado que la otra barra se encuentra fuera de servicio por mantenimiento o falla, esto implica la mayor demanda por un alimentador en un sistema radial.

Bajo este contexto calcularemos la máxima corriente que puede ser obtenida en operación, para que no suceda un disparo indeseado de las protecciones.

Tabla 96:
Capacidad de SW3

Celdas de salida Switchgear 1 hacia Switchgear 3				
Carga	N° de Fases	Potencia	Nivel de tensión	Corriente nominal
		(kVA)	(kV)	(A)
TR MCC 1	Trifásico	2500	4.16	347
TR MCC 2	Trifásico	2500	4.16	347
SSAA	Trifásico	50	4.16	7
Capacidad Nominal Total				701
Regulación al 120%				841.2

Nota: Elaboración propia

En base al cálculo de sobrecarga y los valores obtenidos de las simulaciones de cortocircuito, se proponen los siguientes ajustes de protecciones:

Tabla 97:
:Ajuste de protecciones en el lado primario de SW1-SW3

SW	Carga	Marca	Modelo	Función	Umbral 1			Umbral 2		
					Curva	I1(A)	t1	Curva	I2(A)	t2
SW1	SW3	ABB	REF615	50/51	IEC DT	837.5	0.8	IEC NI	837.5	0.1
								IEC DT	4500	0.3

Nota: Elaboración propia

Dada la relación de transformación de los transformadores de corriente de 1250/5, se ajusta con los siguientes valores:

Tabla 98:
Ajuste de protecciones en el lado secundario de SW1-SW3

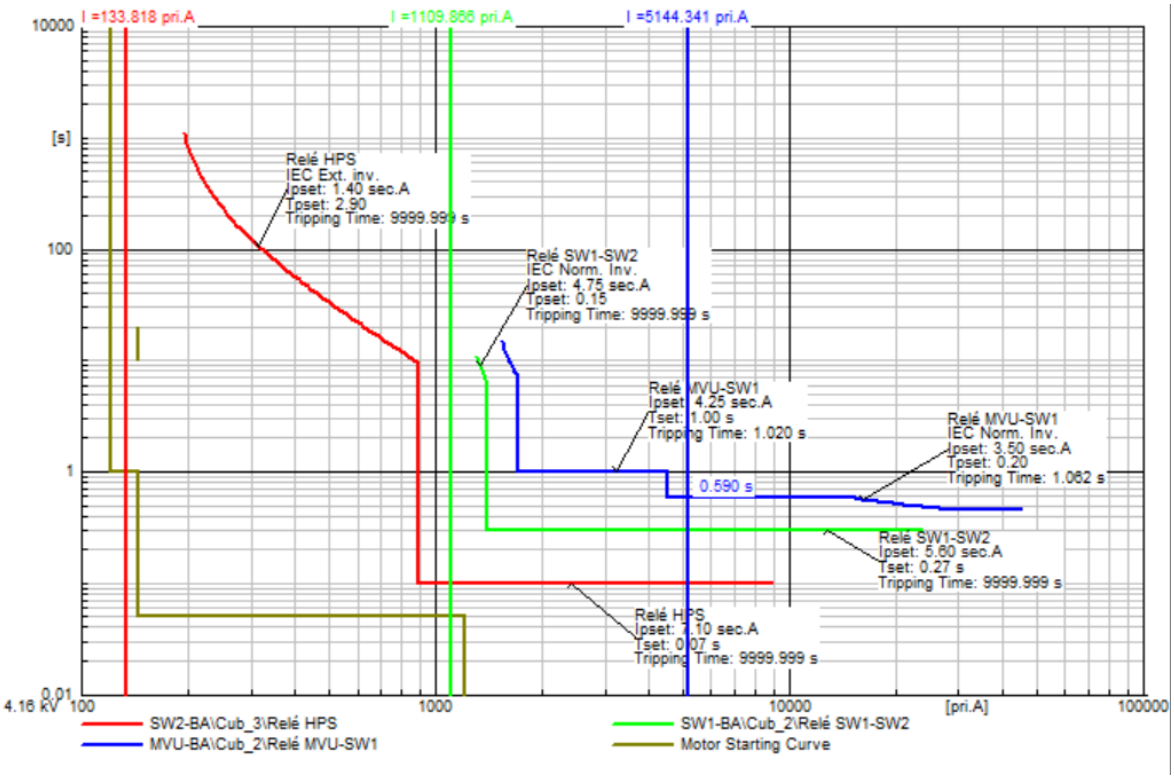
SW	Carga	Marca	Modelo	Función	Umbral 1			Umbral 2		
					Curva	I1(A)	t1	Curva	I2(A)	t2
SW1	SW3	ABB	REF615	50/51	IEC DT	0.67	0.8	IEC NI	0.67	0.1
								IEC DT	3.6	0.3

Nota: Elaboración propia

Dado que contamos con un sistema delta, se procede analizar las curvas generadas respecto a los valores de cortocircuitos trifásicos y bifásicos, visualizando los valores de corriente entre fases.

Simulando una falla trifásica, en la barra del switchgear 1, tenemos que la corriente trifásica es 5144.341 A y se despeja en 0.59 s por el relé asociado a la celda de salida desde MVU o celda de llegada del switchgear 1.

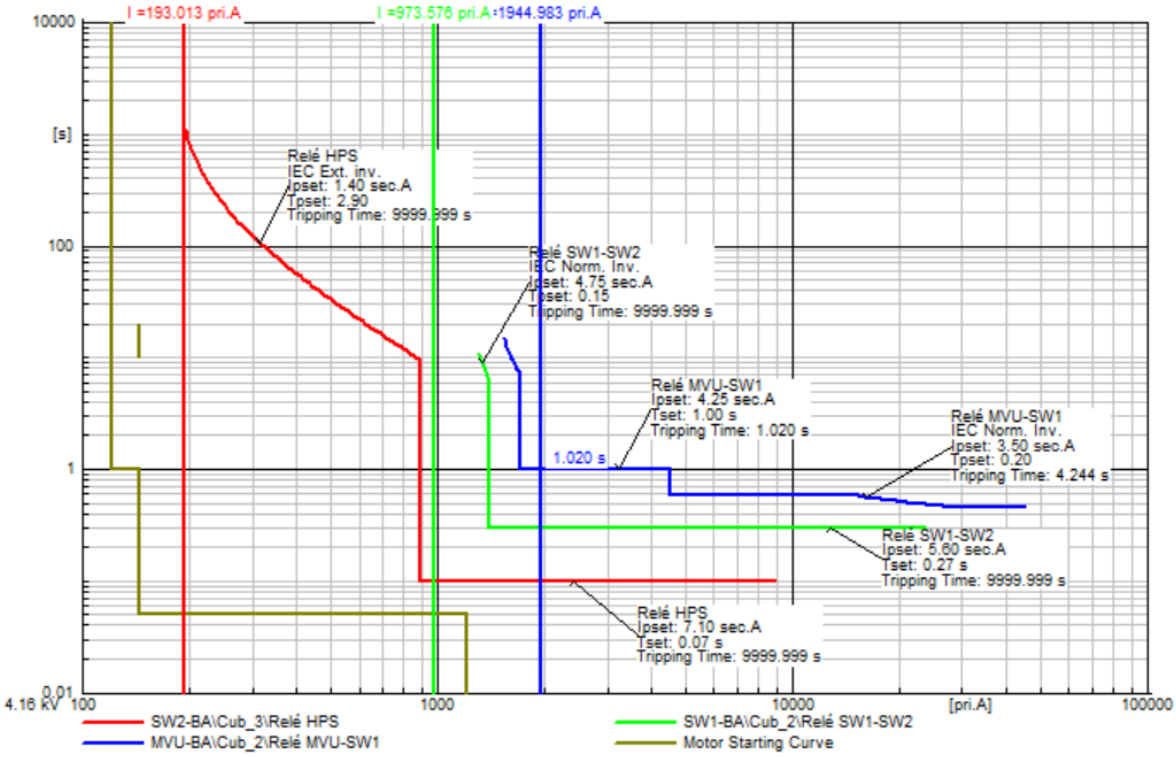
Figura 32:
Cortocircuito trifásico en barra de SW1



Nota: Elaboración propia

Simulando una falla bifásica en la barra del switchgear 1, tenemos que la corriente bifásica es 1944.983 A y se despeja en 1.02s por el relé asociado a la celda de salida del MVU o la celda de llegada del switchgear 1.

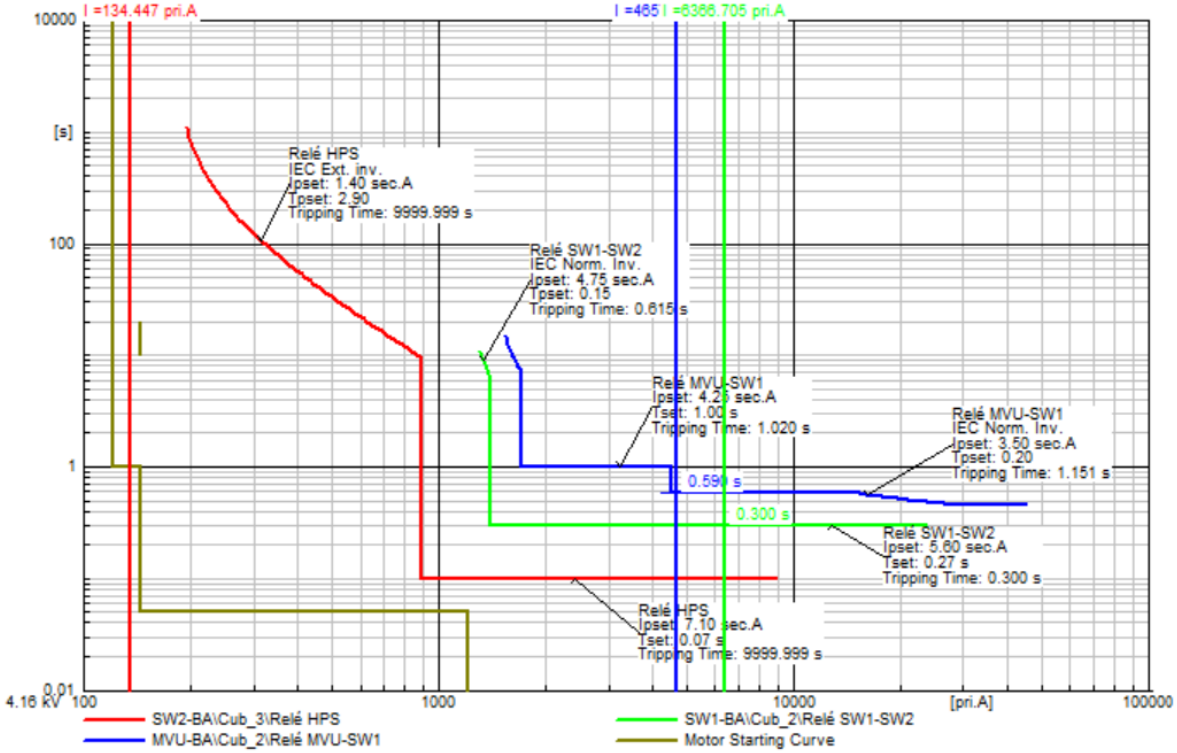
Figura 33:
Cortocircuito bifásico en barra de SW1



Nota: Elaboración propia

Simulando una falla trifásica en la barra del switchgear 2, se registra la corriente trifásica de 6366.705 A y se despeja en 0.3s, por el relé asociado a la celda de salida desde el switchgear 1 o la celda de llegada del switchgear 2.

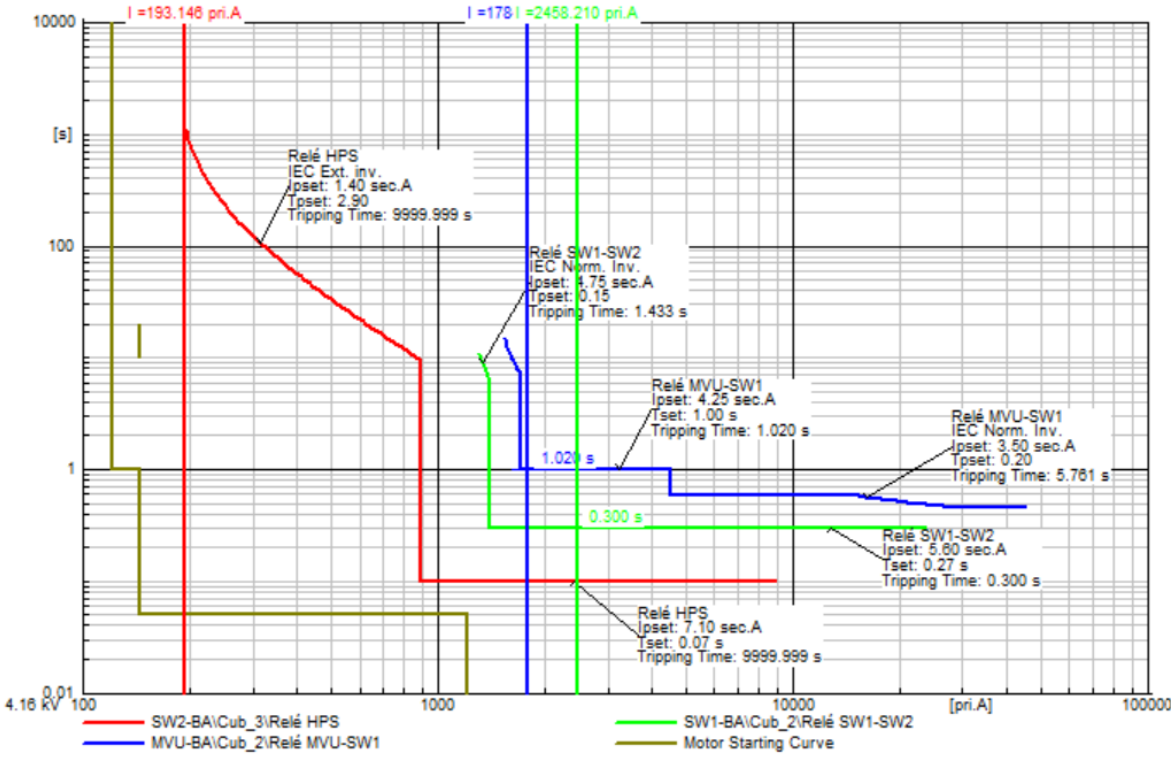
Figura 34:
Cortocircuito trifásico en barra de SW2



Nota: Elaboración propia

Simulando una falla bifásica en la barra del switchgear 2, se registra la corriente bifásica de 2458.21 A y se despeja en 0.3 s, por el relé asociado a la celda de salida del switchgear 1 o la celda de llegada del switchgear 2.

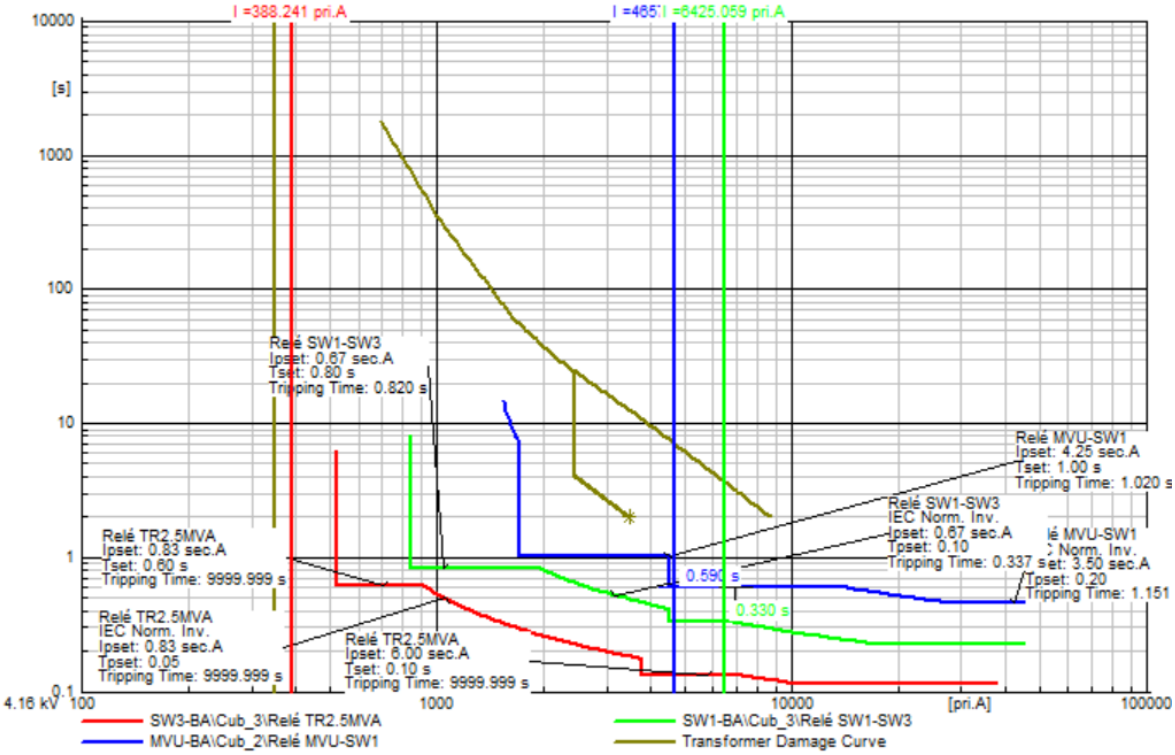
Figura 35:
Cortocircuito bifásico en barra de SW2



Nota: Elaboración propia

Simulando una falla trifásica en la barra del switchgear 3, se registra la corriente trifásica de 6425.09 A y se despeja en 0.33s, por el relé asociado a la celda de salida del switchgear 1 o la celda de llegada del switchgear 3.

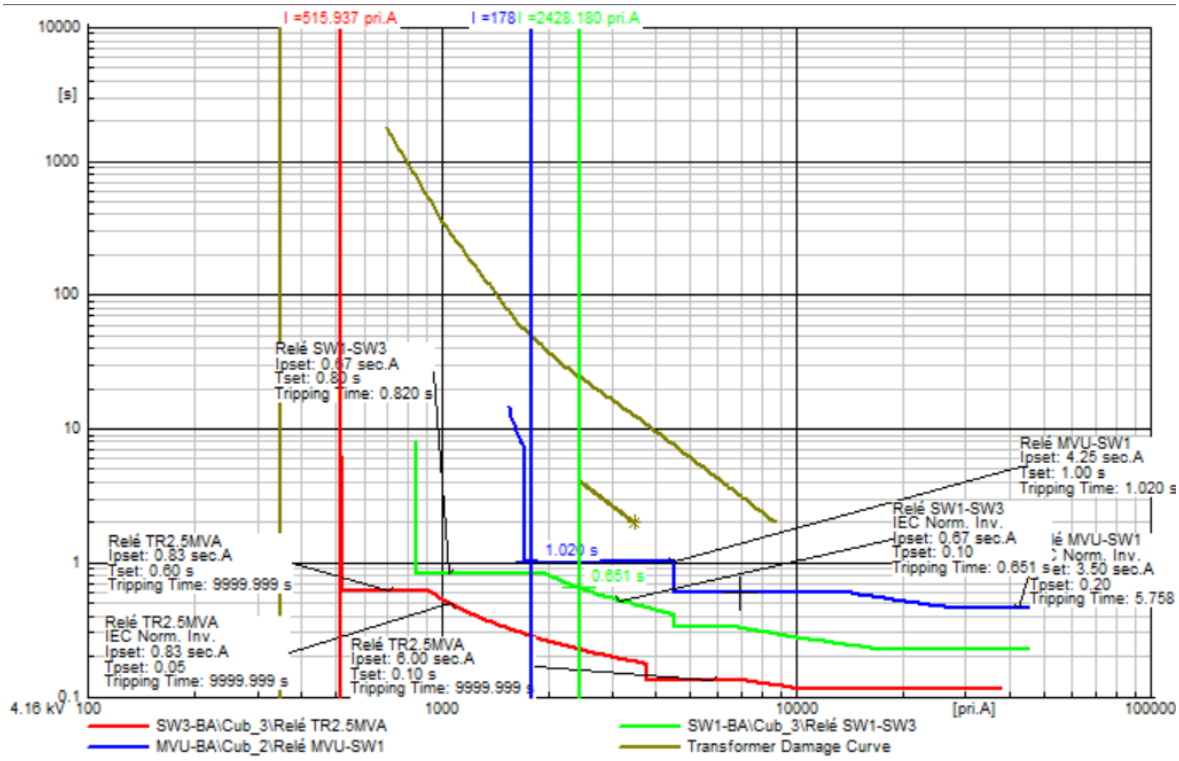
Figura 36:
Cortocircuito trifásico en barra de SW3



Nota: Elaboración propia

Simulando una falla bifásica en la barra del switchgear 3, se registra la corriente bifásica de 2428.180A y se despeja en 0.651s, por el relé asociado a la celda de salida del switchgear 1 o la celda de llegada del switchgear 3.

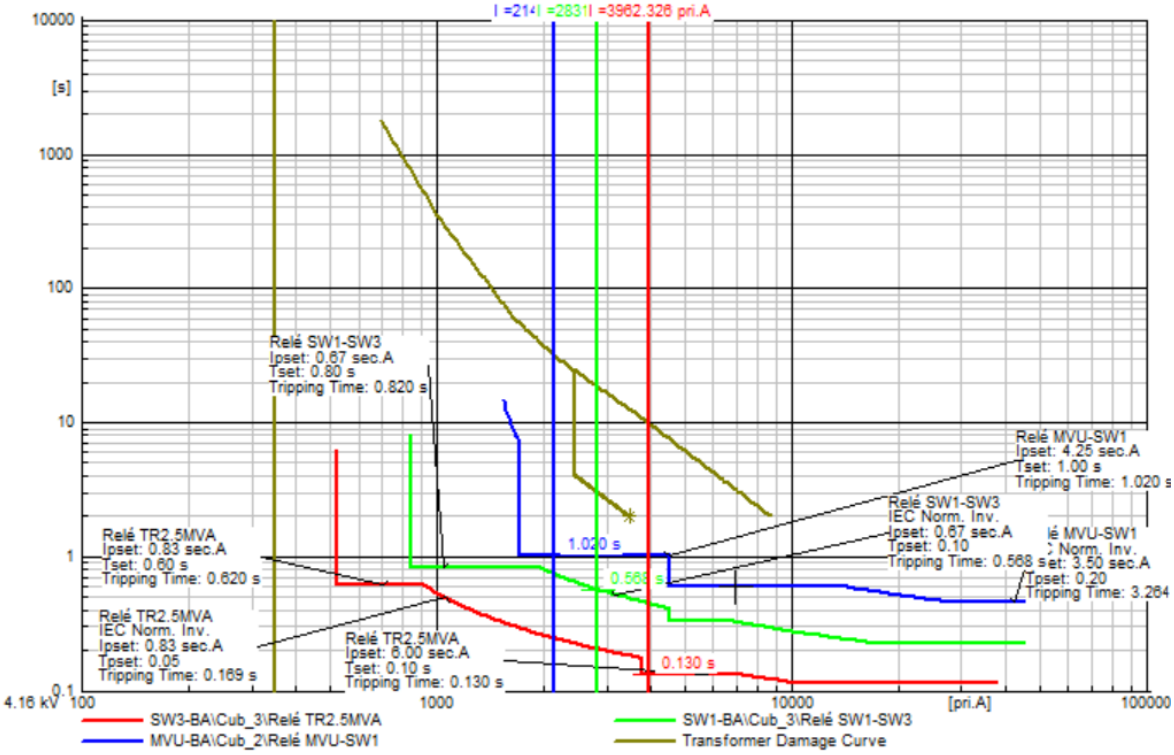
Figura 37:
Cortocircuito bifásico en barra de SW3



Nota: Elaboración propia

Simulando una falla trifásica en la barra del MCC-1, se registra la corriente trifásica de 3962.326 A y se despeja en 0.13 s, por el relé de la celda de salida del switchgear 3 que se dirige al transformador TR-MCC1.

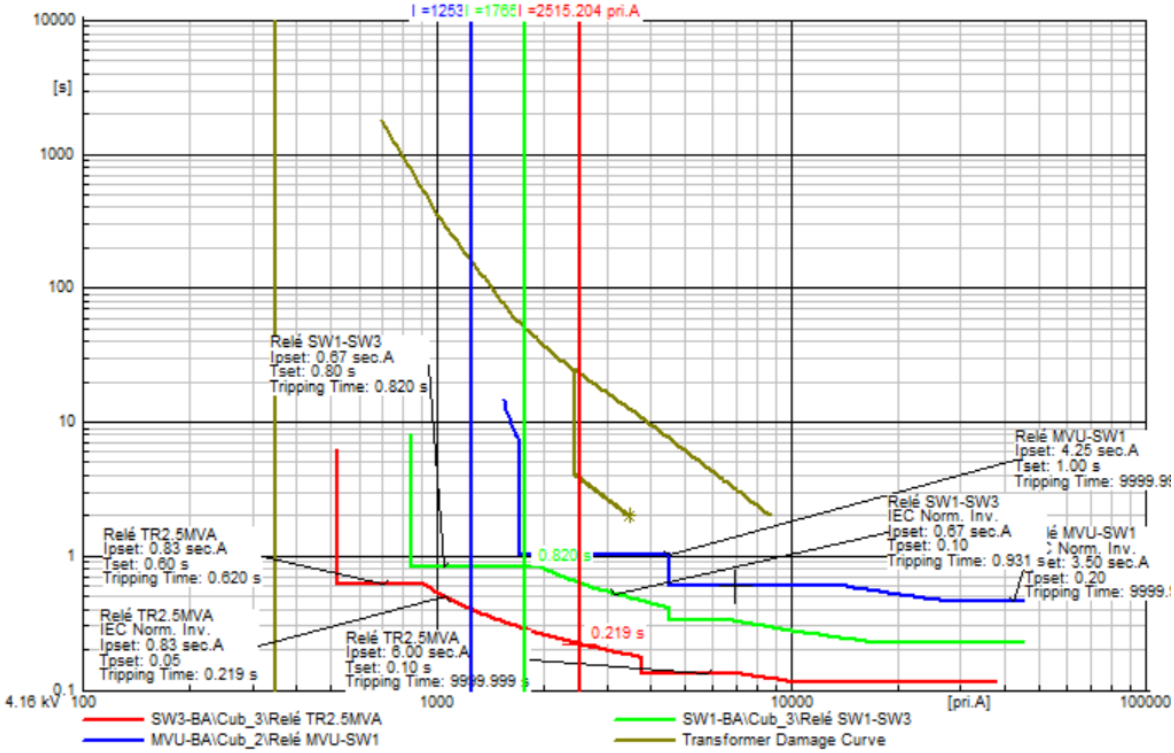
Figura 38:
Cortocircuito trifásico en barra de MCC-1



Nota: Elaboración propia

Simulando una falla bifásica en la barra del MCC-1, se registra la corriente bifásica de 2515.204 A y se despeja en 0.219s, por el relé de la celda de salida del switchgear 3, que se dirige al transformador TR-MCC1.

Figura 39:
Cortocircuito bifásico en barra de MCC-1



Nota: Elaboración propia

3.5 Análisis final de filosofía de operación

El detalle planteado en este estudio, logra el objetivo de cumplir con los lineamientos propuestos por la filosofía de operación:

- En estado estacionario, se puede evidenciar que la topología de secundario selectivo, brinda la posibilidad de despachar la energía, por diferentes caminos, en media tensión, en caso se requiera por mantenimientos programados o por mantenimientos correctivos ocasionados por fallas intempestivas. La topología de secundario selectivo, brinda la confiabilidad para tener la certeza de que, la energía llegará a la planta de procesos, equipos de perforación, equipos de reinyección, equipos de extracción de crudo y cargas auxiliares asociadas a iluminación, campamento, etc.

- En estado de contingencia, como se mencionó en el punto anterior, la topología permite, volver al estado estacionario, sin pérdida de suministro, si es que, se requiere. En caso se generen fallas en la planta de procesos se puede generar el bypass necesario, mediante el cierre o apertura de válvulas, para tratar de continuar con el proceso de producción de crudo. En caso se generen fallas en las bombas de reinyección de agua, se sabe que, se cuenta con un tiempo que permite continuar con la producción de crudo, teniendo en cuenta que, los tanques de agua pueden servir de reservorios temporales. En caso la falla se genere en ciertas bombas de extracción de crudo, se puede continuar produciendo con los equipos de superficie que no estén en falla, en estos casos es prudente subir la frecuencia en cada variador, para tratar que se mantenga la producción de crudo como lo estuvo antes del evento.
- Cabe mencionar que, los puntos de protecciones eléctricas y rechazo de carga, evitan que la planta pueda sufrir daños mayores en caso existan fallas eléctricas. En el caso de fallas por sobrecorriente, las protecciones eléctricas, aperturan la menor cantidad de equipos fallados, para tratar de aislar la falla, luego de ello se seguirán los pasos enunciados en el punto anterior. En el caso de la activación de rechazo de carga por mínima frecuencia, se evitarán Black Out, mediante la desenergización de bombas de reinyección de agua, en dicho caso se seguirán los pasos mencionados en el punto anterior.
- Para todos los casos mencionados en contingencia, los equipos brindan seguridad, ya que, fueron diseñados bajo el modelamiento de corrientes de cortocircuito monofásico, bifásico y trifásico; garantizando que, ante un evento no deseado, los equipos soporten esfuerzos por cortocircuito.

Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados

- En el análisis de flujo de carga, la tensión se mantiene dentro del rango del 5% del valor nominal, lo cual es óptimo en relación con lo recomendado por la NTCSE.
- En el análisis de flujo de carga, se evidencia que la cargabilidad de los conductores, no presenta sobrecargas que influyan de forma negativa la operación o vida útil de los conductores.
- En el análisis de flujo de carga, se evidencia que la cargabilidad de los equipos eléctricos, llámese transformadores, generadores y motores, no presentan sobrecargas que influyan de forma negativa la operación o vida útil del equipo.
- La mayor carga de cables, se registró en el cable SW1BA-M01, escenario 2, corresponde a 48.9% de su capacidad total y su estado corresponde a "Muy bueno".
- La mayor carga de transformador, se registró en el transformador TR-MCC2, escenario 2, con 66.7% de su capacidad total, su estado corresponde a "Muy bueno".
- La mayor carga de motores, se registraron en los motores de las HPS, escenario 1, con 86.8% de su capacidad nominal, su estado corresponde a "Bueno".
- La mayor carga de los generadores, fue 84.1% de su capacidad nominal, en ambos escenarios, su estado es "Bueno".
- La máxima corriente de corto circuito que se puede registrar en la barra del SW1 es 10.4kA, escenario 1, ante fallas trifásicas.
- La máxima corriente que se puede registrar en las barras del SW2 y SW3 es 10.2kA, escenario 1, ante fallas trifásicas.
- La máxima corriente que se puede registrar en la barra del SW4 es 10.3kA, escenario 1, ante fallas trifásicas.
- La máxima corriente que se puede registrar en la barra del MCC-1 y MCC-2 es 40.3kA, escenario 1, ante fallas trifásicas.

- La máxima corriente que se puede registrar en la barra del T-SG es 28.6kA, escenario 1, ante fallas trifásicas.
- La máxima corriente que se puede registrar en la barra del MCC-CPF es 17.2kA, escenario 1, ante fallas trifásicas.

Conclusiones

- El análisis y caracterización del diseño eléctrico tradicional de la planta de extracción de crudo y reinyección de agua en un lote petrolero, permitió identificar características deficientes del sistema eléctrico aislado, cuya topología radial, necesidad de diésel como recurso energético para el funcionamiento de sus grupos electrógenos, análisis pragmático en el balance de cargas y falta de respaldo ante posibles contingencias; generan que la calificación del objetivo específico 1 sea Malo.
- El diseño preliminar del sistema eléctrico de la planta de extracción de crudo y reinyección de agua en un lote petrolero garantizará que ciertos indicadores eléctricos, permitan encontrarse en las tolerancias aceptables para un funcionamiento de operación normal, esto se logró con el seguimiento de la tensión en barras, nivel de frecuencia y cargabilidad de equipos como son los cables, transformadores, motores y generadores. Así mismo, esto se verificó con el modelamiento en el software Power Factory y análisis de flujo de carga. La calificación del objetivo específico 2 es Muy Bueno.
- Complementando el análisis de flujo de carga y análisis de parámetros eléctricos, se procedió a desarrollar la simulación de cortocircuito y elaboración de especificaciones técnicas de transformadores y switchgears en base a normativas internacionales, las cuales permiten cumplir el objetivo específico 3 con una calificación de Bueno.
- Para efectos de conseguir un estudio preoperativo que aumente la confiabilidad del sistema eléctrico, se implementó el rechazo de carga por mínima frecuencia y se ajustaron los diversos relés del sistema eléctrico aislado, con esto, se cumplió el objetivo 4 con una calificación de Muy Bueno
- El diseño cumple con las expectativas de la filosofía de operación, logrando energizar las principales bombas de la planta petrolera, con energía eléctrica

principal y de respaldo que no generen mayores interrupciones y paradas de planta intempestivas, con esto, se cumple con el objetivo 5 con una calificación de Muy Bueno.

- Al finalizar y en base al cumplimiento de los objetivos específicos, podemos notar que, el objetivo general de diseñar un sistema eléctrico eficiente y confiable de una planta de extracción de crudo y reinyección de agua en un lote petrolero se ha cumplido

Recomendaciones

Del estudio de suficiencia profesional se puede evidenciar la secuencia recomendada de pasos que se deben ejecutar desde la ingeniería conceptual, básica y de detalle, para conseguir un sistema eléctrico aislado que sea robusto ante sobrecargas, fallas eléctricas en conductores o barras y salidas intempestivas de las cargas y generación más representativas del lote petrolero, por tal motivo se reitera a manera de recomendación, tomar en cuenta el presente trabajo de suficiencia profesional en posteriores estudios, proyectos y construcciones eléctricas asociados a dicho sistema.

Referencias bibliográficas

Garay, A. (1994). *Evaluación de confiabilidad en sistemas eléctricos de distribución* [Tesis de licenciatura, Pontificia Universidad Católica de Chile].

Rojas, M. (2019). *Diseño de instalaciones eléctricas de una planta Merril&Crowe cumpliendo con la norma NFPA70* [Tesis de título profesional, Universidad Nacional de Ingeniería].

Cabascango, L. (2020). *Diseño de instalaciones eléctricas para la ampliación de una plataforma petrolera ubicada en el Bloque 66* [Tesis de título profesional, Escuela Politécnica Nacional de Quito].

Decreto Supremo 052 (1993). *Reglamento de seguridad para el almacenamiento de hidrocarburo*

API RP 500 (2023). *Práctica recomendada para la clasificación de ubicaciones para instalaciones eléctricas en instalaciones petroleras clasificadas como Clase I, División 1 y División 2*

NFPA 70 (2023). *Código Eléctrico Nacional*

NFPA 70E (2024). *Norma para la seguridad eléctrica en lugares de trabajo*

CNE Suministro (2011). *Código Eléctrico Nacional – Utilización*.

IEC 62271 (2023). *Switchgear de maniobra y control de alta tensión*.

IEEE C57.12 (2015). *Requisitos generales para transformadores de distribución, regulación y potencia, inmersos en aceite.*

IEC 60228 (2023). *Conductores de cables aislados*

IEE 399 (1997). *Práctica recomendada para el análisis de sistemas de energía industriales y comerciales.*

ANSI/ICEA P 32-*382* (1999). *Características de cortocircuito de los cables aislados.*

Schlumberger. *www.slb.com*

Baker Hughes. www.bakerhughes.com

WEG. www.weg.net

API RP 540 (1999). Instalaciones eléctricas en procesos petroleros

COES. www.coes.org.pe

Anexos

Anexo 1 Factores de Corrección 1

Anexo 2 Intensidad admisible para cables unipolares 50, 120 y 400$\mathbf{mm}^2$, media tensión, con aislamiento de XLPE 3

Anexo 3 Valorización de variables 9

Anexo 4 Flujo de carga 12

Anexo 1
Factores de Corrección

Factor de corrección por temperatura

Table 13-4—F_t: Adjustment factor for various copper conductors and ambient temperatures when T_c = 90 °C and T_a = 20 °C

T'_c in °C	T'_a in °C					
	10	15	20	25	30	35
75	0.99	0.95	0.91	0.87	0.82	0.77
85	1.04	1.02	0.97	0.93	0.89	0.85
90	1.07	1.04	1.00	0.96	0.93	0.89
110	1.16	1.13	1.10	1.06	1.02	0.98
130	1.24	1.21	1.18	1.16	1.13	1.10

Nota: IEEE 399

Factor de corrección por capacidad térmica del suelo (IEEE 399)

Table 13-5—F_{th}: Thermal resistivity adjustment factor for 0–1000 V cables in duct banks with base ampacity given at an RHO of 90 °C-cm/W

Cable Size	Number of CKT	RHO (°C-cm/W)							
		60	90	120	140	160	180	200	250
#12–#1	1	1.03	1.0	0.97	0.96	0.94	0.93	0.92	0.90
	3	1.06	1.0	0.95	0.92	0.89	0.87	0.85	0.82
	6	1.09	1.0	0.93	0.89	0.85	0.82	0.79	0.75
	9+	1.11	1.0	0.92	0.87	0.83	0.79	0.76	0.71
1/0–4/0	1	1.04	1.0	0.97	0.95	0.93	0.91	0.89	0.86
	3	1.07	1.0	0.94	0.90	0.87	0.85	0.83	0.80
	6	1.10	1.0	0.92	0.87	0.84	0.81	0.78	0.74
	9+	1.12	1.0	0.91	0.85	0.81	0.78	0.75	0.70
250–1000	1	1.05	1.0	0.96	0.94	0.92	0.90	0.88	0.85
	3	1.08	1.0	0.93	0.89	0.86	0.83	0.81	0.77
	6	1.11	1.0	0.91	0.86	0.83	0.80	0.77	0.72
	9+	1.13	1.0	0.90	0.84	0.80	0.77	0.74	0.69

Nota: IEEE 399

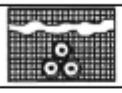
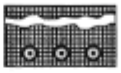
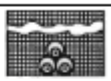
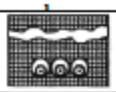
Factor de corrección por agrupamiento

Table 13-8—F_g: Grouping adjustment factor for 0–5000 V 3/C, or triplexed cables in duct banks (no spare ducts, nonmetallic conduits of 5 in with center-to-center spacing of 7.5 in)

Cable size	No. of rows	Number of columns														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
#8	1	1.00	.942	.885	.835	.795	.768	.745	.727	.710	.698	.688	.679	.671	.664	.658
	2	.930	.840	.772	.723	.687	.660	.638	.620	.604	.592	.582	.572	.564	.557	.550
	3	.870	.772	.694	.632	.596	.569	.548	.532	.519	.508	.498	.490	.482	.476	.470
	4	.820	.710	.629	.571	.536	.509	.490	.472	.458	.446	.436	.428	.420	.412	.405
#6	1	1.00	.930	.874	.826	.790	.760	.737	.718	.702	.690	.680	.671	.663	.656	.650
	2	.920	.813	.747	.700	.665	.638	.615	.598	.583	.572	.561	.552	.544	.537	.530
	3	.860	.747	.679	.625	.588	.560	.540	.525	.510	.498	.490	.481	.473	.467	.460
	4	.810	.700	.620	.565	.531	.503	.484	.467	.452	.440	.431	.422	.415	.408	.400
#4	1	1.00	.925	.871	.817	.781	.750	.726	.707	.691	.678	.668	.659	.651	.646	.640
	2	.920	.809	.742	.693	.659	.632	.610	.593	.579	.567	.555	.547	.539	.530	.525
	3	.850	.742	.668	.615	.578	.551	.531	.514	.500	.489	.480	.471	.464	.458	.450
	4	.805	.690	.610	.560	.524	.497	.477	.460	.447	.435	.425	.418	.410	.401	.395
#2	1	1.00	.918	.858	.808	.770	.741	.720	.701	.688	.677	.667	.658	.650	.641	.635
	2	.920	.800	.723	.680	.648	.623	.602	.586	.572	.560	.549	.540	.530	.522	.514
	3	.840	.723	.657	.608	.568	.540	.520	.504	.490	.479	.470	.461	.454	.447	.440
	4	.800	.685	.608	.553	.518	.490	.471	.453	.440	.429	.420	.411	.402	.395	.390
#1	1	1.00	.918	.849	.799	.753	.721	.699	.682	.669	.659	.650	.643	.639	.632	.630
	2	.920	.795	.702	.650	.613	.583	.563	.546	.530	.520	.510	.502	.494	.488	.482
	3	.830	.702	.618	.562	.525	.500	.480	.464	.450	.440	.430	.421	.413	.406	.400
	4	.740	.634	.551	.497	.465	.440	.421	.405	.392	.383	.374	.366	.359	.352	.348
1/0	1	1.00	.910	.842	.791	.745	.716	.694	.678	.665	.655	.646	.639	.635	.628	.626
	2	.915	.790	.700	.642	.604	.575	.555	.537	.523	.511	.503	.494	.486	.480	.475
	3	.817	.700	.610	.554	.520	.494	.474	.457	.444	.432	.424	.415	.408	.400	.394
	4	.735	.629	.546	.492	.460	.435	.417	.402	.391	.381	.371	.363	.355	.349	.343
2/0	1	1.00	.910	.842.	.791	.745	.716	.694	.678	.665	.655	.646	.639	.635	.628	.626
	2	.915	.790	700	.642	.604	.575	.555	.537	.523	.511	.503	.494	.486	.480	.475
	3	.817	.700	.610	.554	.520	.494	.474	.457	.444	.432	.424	.415	.408	.400	.394
	4	.735	.629	.546	.492	.460	.435	.417	.402	.391	.381	.371	.363	.355	.349	.343
3/0	1	1.00	.910	.842	.791	.745	.716	.694	.678	.665	.655	.646	.639	.635	.628	.626
	2	.915	.790	.700	.642	.604	.575	.555	.537	.523	.511	.503	.494	.486	.480	.475
	3	.817	.700	.610	.554	.520	.494	.474	.457	.444	.432	.424	.415	.408	.400	.394
	4	.735	.629	.546	.492	.460	.435	.417	.402	.391	.381	.371	.363	.355	.349	.343
4/0	1	1.00	.908	.830	.780	.737	.709	.690	.673	.660	.650	.642	.635	.628	.623	.619
	2	.910	.770	.684	.635	.599	.570	.550	.532	.518	.506	.498	.489	.481	.475	.470
	3	.810	.684	.602	.548	.515	.489	.469	.452	.440	.429	.420	.411	.403	.397	.391
	4	.730	.624	.541	.487	.456	.431	.414	.399	.388	.378	.368	.360	.352	.346	.341
250	1	1.00	.905	.830	.777	.725	.692	.668	.646	.628	.615	.603	.597	.590	.583	.580
	2	.890	.770	.675	.609	.570	.542	.519	.500	.485	.474	.466	.458	.450	.445	.440
	3	.780	.675	.579	.518	.480	.454	.434	.420	.408	.398	.390	.383	.378	.373	.370
	4	.694	.588	.512	.460	.422	.397	.379	.364	.352	.345	.338	.331	.327	.323	.320

Nota: IEEE 399

Anexo 2
Intensidad admisible para cables unipolares 50, 120 y 400mm^2, media tensión, con aislamiento de XLPE

Sección nominal del conductor	Enterrado directamente en el terreno		En conductos (un cable por conducto)		Al aire		
	Trébol	Espaciados, mismo plano	Conductos en trébol	Conductos en contacto, mismo	Trébol	En contacto, mismo plano	Espaciados, mismo plano
							
mm^2	A	A	A	A	A	A	A
16	109	113	103	104	125	128	150
25	140	144	132	133	163	167	196
35	166	172	157	159	198	203	238
50	196	203	186	188	238	243	286
70	239	246	227	229	296	303	356
95	285	293	271	274	361	369	434
120	323	332	308	311	417	426	500
150	361	366	343	347	473	481	559
185	406	410	387	391	543	550	637
240	469	470	447	453	641	647	745
300	526	524	504	510	735	739	846
400	590	572	564	571	845	837	938

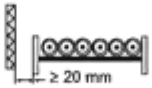
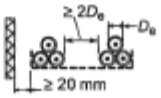
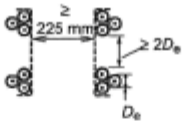
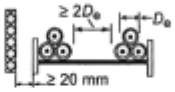
Temperatura máxima del conductor	90 °C
Temperatura ambiente	30 °C
Temperatura del terreno	20 °C
Profundidad de tendido	0,8 m
Resistividad térmica del terreno	1,5K.m/W
Resistividad térmica de los conductos cerámicos	1,2 K.m/W
Pantallas a tierra en ambos extremos	

* Intensidad admisible calculada para cables de tensión asignada 6/10 IcV.

Nota: CNE-Utilización

Factor de corrección por agrupamiento de conductor unipolar media tensión

Factores de reducción para grupos de más de un circuito de cables unipolares (nota 2). De aplicación para intensidad máxima admisible de un circuito de cable unipolar al aire libre

Método de instalación		Número de canales	Numero de circuitos trifásicos (nota 5)			A utilizar como multiplicador de la intensidad admisible para
			1	2	3	
Canales perforados (nota 3)	En contacto	1	0,98	0,91	0,87	Tres cables en una capa horizontal
		2	0,96	0,87	0,81	
		3	0,95	0,85	0,78	
Bandejas tipo escalera, soportes, etc. (nota 3)	En contacto 	1	1,00	0,97	0,96	Tres cables en una capa horizontal
		2	0,98	0,93	0,89	
		3	0,97	0,90	0,86	
Bandejas perforados (nota 3)		1	1,00	0,98	0,96	Tres cables en trébol
		2	0,97	0,93	0,89	
		3	0,96	0,92	0,86	
Bandejas perforadas verticales (nota 4)	 Espaciados	1	1,00	0,91	0,89	
		2	1,00	0,90	0,86	
Bandejas tipo escalera, ménsulas, etc. (nota 3)		1	1,00	1,00	1,00	
		2	0,97	0,95	0,93	
		3	0,96	0,94	0,90	

NOTA 1 Los valores dados son el promedio para este tipo de cable en las secciones consideradas. La dispersión de los valores es generalmente del 5%

NOTA 2 Los factores se aplican a grupos de cables en una sola capa (o grupos en trébol) tal como se indica en la tabla, no deben aplicarse a cables instalados en más de una capa en contacto. Los valores para este tipo de instalaciones pueden ser significativamente menores y deben determinarse por el método apropiado.

NOTA 3 Los valores se dan para espaciados verticales entre bandejas de 300 mm. Para distancias inferiores deberán reducirse los factores.

NOTA 4 Los valores se dan para espaciados horizontales entre bandejas de 225 mm con bandejas dorso contra dorso. Para espaciados inferiores deberán reducirse los factores.

NOTA 5 Para los efectos de esta tabla, en los circuitos con más de un cable en paralelo por fase, cada grupo de tres fases de conductores debería ser considerado como un circuito.

Nota: CNE-Utilización

Intensidad admisible e impedancias, para cables unipolares 350kcmil

Nexans

Contact
Industrial Cables
Phone: 845-469-2141
USA.IndustrialCable@nexans.com

CORFLEX® VFD

CORFLEX® VFD

Part Number: Drive Cable

Corflex VFD - 3 Conductors with 3 Bare Grounds Electrical Data

Part Number	Cond. Size AWG/ kcmil	Ground Wire Size AWG	DC Resistance		AC Resistance 90ºC, 60 Hz Ω/kft	Inductive Reactance (Ω/kft @60Hz)	Voltage Drop V/(A.Kft)	Ampacities Note 1	
			20ºC Ω/kft	25ºC Ω/kft				75ºC	90ºC
670142	14(7w)	3x18(7w)	2.5553	2.6064	3.2583	0.0376	2.9489	15	15
670144	12(7w)	3x16(7w)	1.6082	1.6404	2.0506	0.0353	1.8610	20	20
670146	10(7w)	3x14(7w)	1.0118	1.0320	1.2902	0.0332	1.1756	30	30
*670148	8(7w)	3x14(7w)	0.6361	0.6488	0.8111	0.0348	0.7452	50	55
*670149	6(7w)	3x12(7w)	0.4002	0.4082	0.5104	0.0329	0.4737	65	75
*670150	4(7w)	3x12(7w)	0.2516	0.2566	0.3209	0.0312	0.3024	85	95
*670151	2(7w)	3x10(7w)	0.1574	0.1605	0.2009	0.0299	0.1938	115	130
670152	1(19w)	3x10(7w)	0.1255	0.1280	0.1603	0.0288	0.1568	130	145
*670153	1/0(19w)	3x10(7w)	0.0999	0.1019	0.1278	0.0281	0.1272	150	170
*670118	2/0(19w)	3x10(7w)	0.0797	0.0813	0.1021	0.0280	0.1041	175	195
*670119	3/0(19w)	3x8(7w)	0.0629	0.0642	0.0808	0.0275	0.0847	200	225
*670120	4/0(19w)	3x8(7w)	0.0497	0.0507	0.0641	0.0271	0.0695	230	260
*670121	250(37w)	3x8(7w)	0.0424	0.0432	0.0584	0.0263	0.0608	255	290
*670122	350(37w)	3x6(7w)	0.0301	0.0307	0.0395	0.0263	0.0470	310	350
*670123	500(37w)	3x6(7w)	0.0212	0.0216	0.0290	0.0250	0.0367	380	430

*Stock Item

Notes:
1) Ampacities are based on NEC 2011 Table 310.15(B)(16) for not more than three current-carrying conductors in raceway, cable, or earth (direct buried), based on an ambient temperature of 30°C (86°F). Refer to Table 310.15(B)(2) for the ampacity correction factors where the ambient temperature is other than 30°C (86°F).

Nota: Nexans

Intensidad admisible y factores de corrección, para cables unipolares 500mm^2 en baja tensión

CELSA
CALIDAD Y SEGURIDAD

Conductores Eléctricos Lima S.A.

SISTEMA INTEGRADO DE GESTIÓN CERTIFICADO POR:

INTENSIDAD ADMISIBLE EN AMPERES

Temperatura ambiente: 30 ºC al aire libre
25 ºC directamente enterrado ó en ducto
Resistividad térmica del terreno: 0,9 K.m/n

Tipo de cable: N2XY 0,6/1 kV

Sección Nominal mm²	Aire (A)			Directamente enterrado (A)			Ducto (A)		
	3 Cables unipolares en plano	3 Cables unipolares en triangulo	1 Cable Tripolar	3 Cables unipolares en plano	3 Cables unipolares en triangulo	1 Cable Tripolar	1 Cables unipolares por ducto	3 Cables unipolares por ducto	1 Cable Tripolar
1,5	31	25	23	41	34	31	33	27	24
2,5	41	34	31	54	45	41	43	36	32
4	55	45	41	70	59	53	56	47	41
6	69	57	52	87	73	66	70	58	51
10	94	78	71	117	97	89	94	78	70
16	125	105	95	151	125	115	121	100	90
25	168	142	128	193	160	148	155	128	115
35	206	175	158	231	192	178	185	154	140
50	251	214	193	271	226	219	217	180	170
70	317	272	244	331	277	269	265	222	210
95	393	339	303	393	332	320	315	265	253
120	455	393	352	448	377	365	358	300	290
150	523	453	406	500	422	410	400	338	324
185	604	524	468	562	477	461	450	380	365
240	722	627	544	649	552	512	520	442	405
300	834	723	622	730	620	574	600	496	454
400	969	836	714	827	699	647	678	560	512
500	1 127	964	825	936	782	720	750	625	568

Factores de corrección para temperatura ambiente del aire diferente a 30 °C

Temperatura máxima del conductor °C	Temperatura ambiente del aire °C							
	20	25	35	40	45	50	55	60
90	1,08	1,04	0,96	0,91	0,87	0,82	0,76	0,71

Factores de corrección para temperaturas el terreno diferentes a 25 °C

Temperatura máxima del conductor °C	Temperatura ambiente del terreno °C						
	20	25	30	35	40	45	50
90	1,04	1,00	0,96	0,92	0,88	0,83	0,78

Nota: Celsa

Valores de resistencia eléctrica, para cables unipolares 500mm^2 en baja tensión

CELSA
CALIDAD Y SEGURIDAD

Conductores Eléctricos Lima S.A.

SISTEMA INTEGRADO DE GESTIÓN CERTIFICADO POR:

TABLA DE DATOS ELECTRICO

Sección Nominal mm²	Resistencia Óhmica en c.c. a 20 ºC Ohm/km	Resistencia Óhmica en c.a. a 90 ºC Ohm/km
4	4,61	5,88
6	3,08	3,93
10	1,83	2,33
16	1,15	1,46
25	0,727	0,927
35	0,524	0,669
50	0,387	0,495
70	0,268	0,343
95	0,193	0,248
120	0,153	0,196
150	0,124	0,161
185	0,0991	0,130
240	0,0754	0,100
300	0,0601	0,0817
400	0,0470	0,0661
500	0,0366	0,0541

Nota: Celsa

Valores de resistencia eléctrica, para cables unipolares media tensión

CELSA **CONDUCTORES ELÉCTRICOS LIMA S.A.**

Tipo de cable: N2XSY 3,6/6 kV

Sección Nominal mm²	Resistencia Óhmica en c.c. a 20 ºC Ohm/km	Resistencia en c.a. a 90 ºC Ohm/km	Reactancia X_L (Ohm / km)		
			3 Cables unipolares en plano	3 Cables unipolares en triangulo	1 Cable Tripolar
10	1,83	2,34	0,256	0,185	0,171
16	1,15	1,47	0,240	0,171	0,158
25	0,727	0,928	0,228	0,159	0,147
35	0,525	0,671	0,220	0,151	0,139
50	0,387	0,435	0,214	0,144	0,133
70	0,268	0,343	0,205	0,136	0,125
95	0,193	0,248	0,199	0,129	0,119
120	0,153	0,197	0,194	0,125	0,115
150	0,124	0,161	0,191	0,121	0,112
185	0,0991	0,130	0,187	0,118	0,109
240	0,0754	0,100	0,182	0,113	0,104
300	0,0601	0,0817	0,179	0,110	---
400	0,0470	0,0661	0,177	0,107	---
500	0,0366	0,0541	0,174	0,105	---

Nota: Celsa

Anexo 3
Valorización de variables

Valorización de variables de objetivo específico #2

Variables	Indicadores	Nivel	Rango	Valor	Descripción
X2.1 Nivel de tensión en barra (pu)	Tensión ha aumentado hasta el 2.5% o disminuido hasta el 2.5%	4	60-74%	70%	Bueno
X2.2 Nivel de carga en cable	Carga de conductor de 60 a 80%	4	60-74%	70%	Bueno
X2.3 Nivel de carga en transformador	Carga de transformador de 60 a 80%	5	75-100%	90%	Muy bueno
X2.4 Nivel de carga en motor	Carga de motor de 60 a 80%	5	75-100%	90%	Muy bueno
X2.5 Nivel de carga en generador	Carga de generador de 60 a 80%	5	75-100%	90%	Muy bueno
X2.6 Frecuencia	Frecuencia del sistema menor que 0.2% al 0.4%	4	60-74%	74%	Bueno

Nota: Elaboración propia

$$M.O_2 = \frac{\sum X_{2i}}{n} = \frac{70\% + 70\% + 90\% + 90\% + 90\% + 74\%}{6} = 80.6\% \ (MUY\ BUENO)$$

Valorización de variables de objetivo específico #3

Variables	Indicadores	Nivel	Rango	Valor	Descripción
X3.1 Nivel de cumplimiento de la norma: IEEE C57.12 “Estándar IEEE para requisitos generales para transformadores de distribución, potencia y regulación, sumergidos en aceite”	Norma técnica de referencia. Especificación técnica, organizada en base a extractos puntuales de la norma.	4	60-74%	67%	Bueno
X3.2 Nivel de cumplimiento de la norma: IEC 6271 “Estándar IEC para el control y maniobra en alta tensión con envolvente metálica, para tensiones nominales de 1kV hasta 52kV inclusive”	Norma técnica de referencia. Especificación técnica, organizada en base a extractos puntuales de la norma.	4	60-74%	67%	Bueno
X3.3 Nivel de cumplimiento de la norma: IEC 60228 “Estándar IEC para conductores con aislamiento”	Norma técnica de referencia. Especificación técnica, organizada en base a extractos puntuales de la norma.	4	60-74%	67%	Bueno

Nota: Elaboración propia

$$M.O_3 = \frac{\sum X_{3i}}{n} = \frac{67\% + 67\% + 67\%}{3} = 67\% \ (BUENO)$$

Valorización de variables de objetivo específico #4

Variables	Indicadores	Nivel	Rango	Valor	Descripción
X4.1 Implementación de banco de condensadores	Tensión ha aumentado, luego de la implementación, entre el rango de 97.5% hasta el 102.5%	5	75-100%	80%	Muy bueno
X4.2 Implementación de rechazo de carga	Actuación del sistema de rechazo de carga (II etapa), por frecuencia del sistema menor al 96%	4	60-74%	70%	Bueno
X4.3 Implementación de ajustes de protecciones	Correcta operación del relé en módulo y tiempo	5	75-100%	80%	Muy bueno

Nota: Elaboración propia

$$M.O_4 = \frac{\sum X_{4i}}{n} = \frac{80\% + 70\% + 80\%}{3} = 76.6\% \ (MUY\ BUENO)$$

Valorización de variables de objetivo específico #5

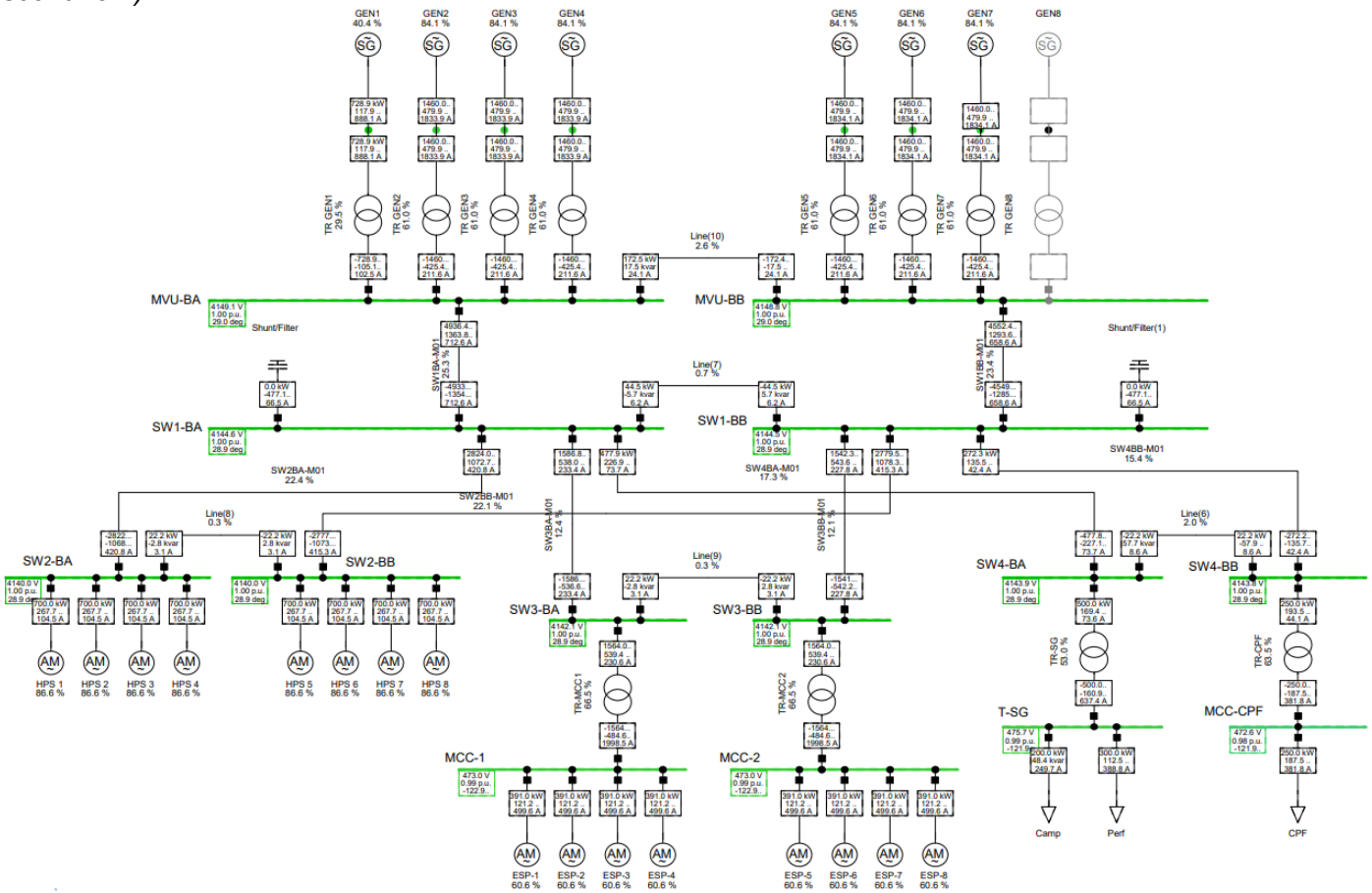
Variables	Indicadores	Nivel	Rango	Valor	Descripción
X5.1 Verificación con Filosofía de Operación	Diseño cumple con las expectativas de la filosofía de operación	**5**	**75-100%**	**90%**	**Muy bueno**

Nota: Elaboración propia

$$M.O_5 = \frac{\sum X_{5i}}{n} = \frac{90\%}{1} = 90\% \ (MUY\ BUENO)$$

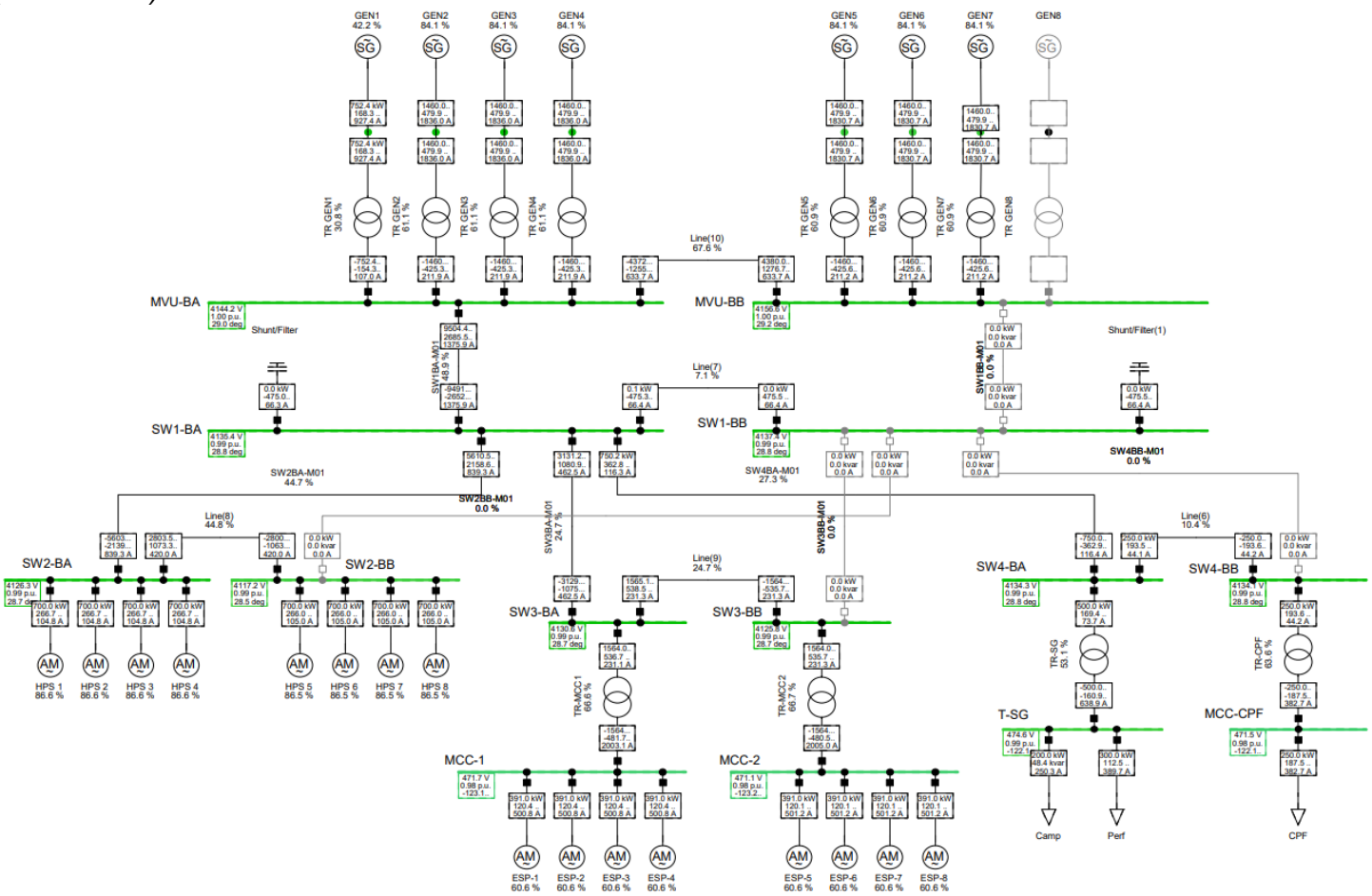
Anexo 4
Flujo de carga

Flujo de carga (Escenario 1)



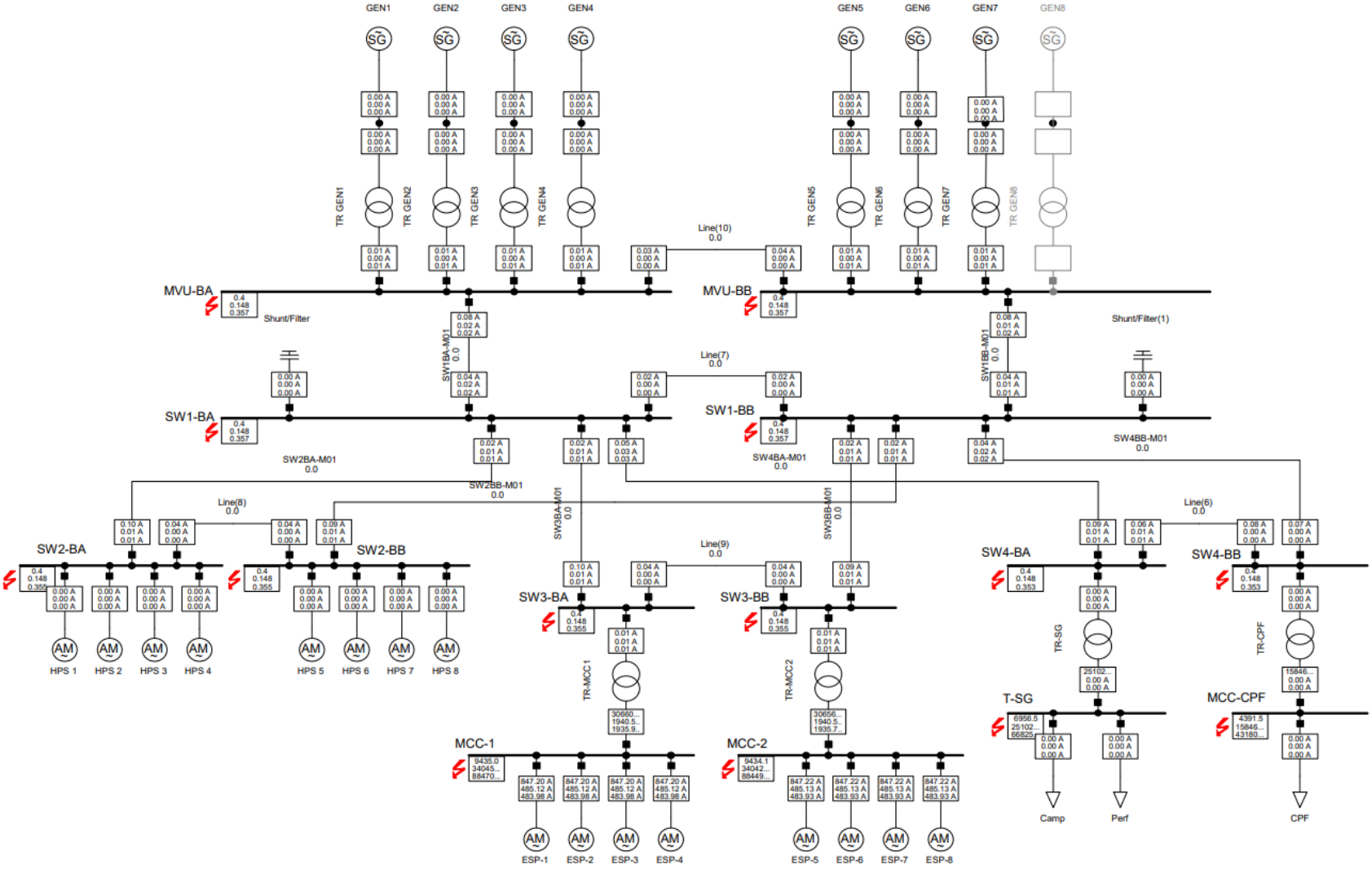
Nota: Elaboración propia

Flujo de carga (Escenario 2)



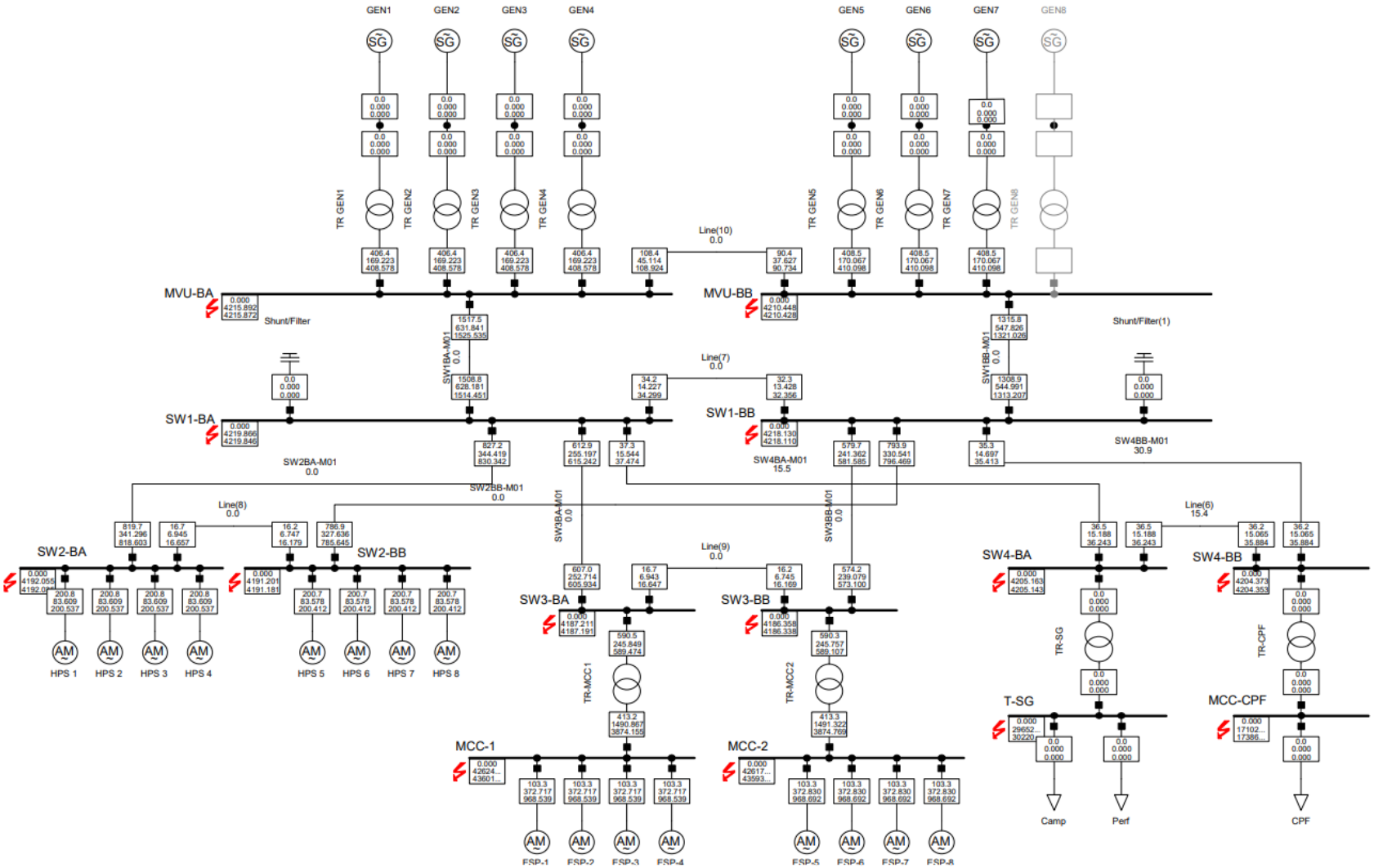
Nota: Elaboración propia

Cortocircuito monofásico (Escenario 1)



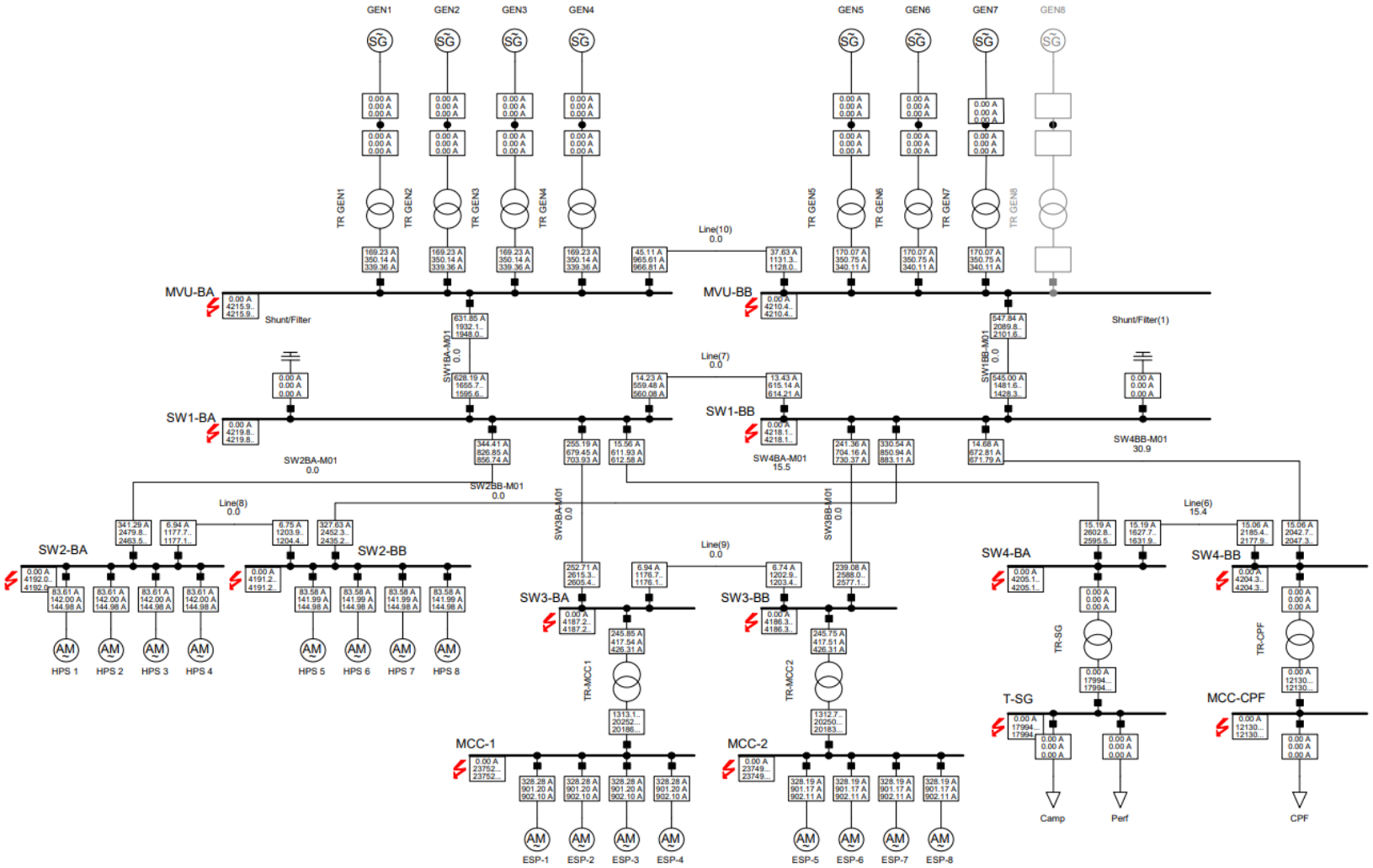
Nota: Elaboración propia

Cortocircuito bifásico a tierra (Escenario 1)



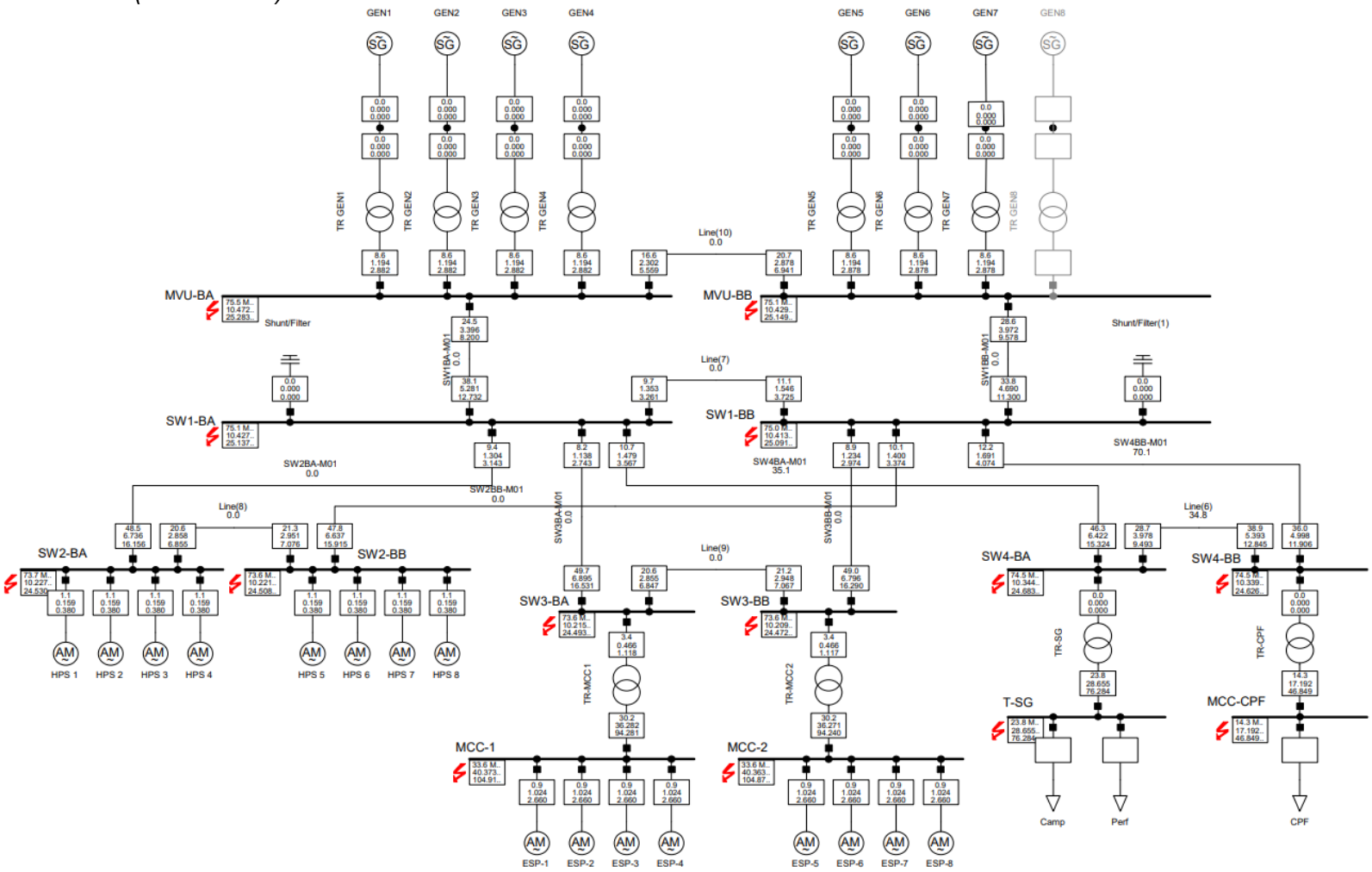
Nota: Elaboración propia

Cortocircuito bifásico (Escenario 1)



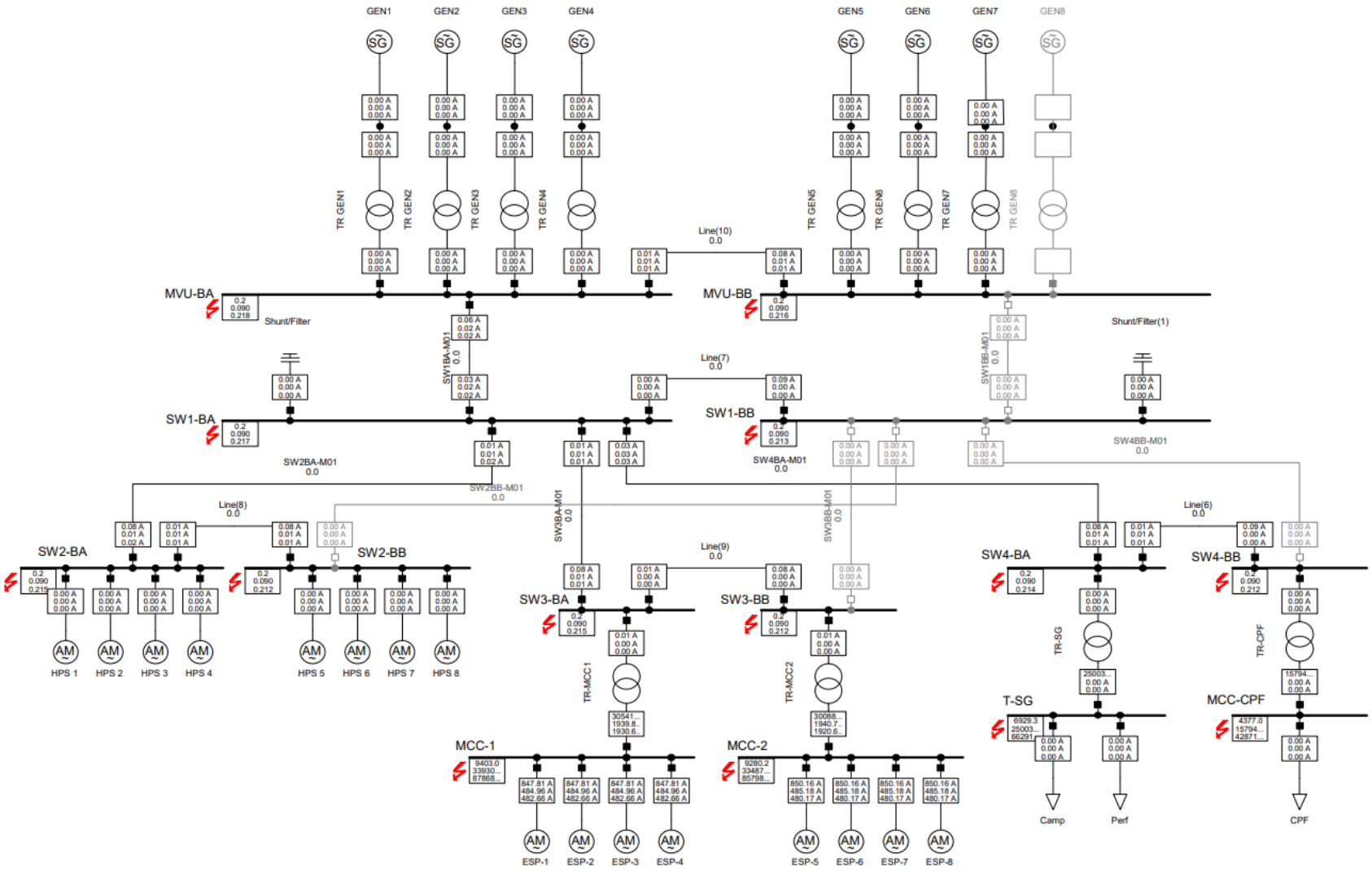
Nota: Elaboración propia

Cortocircuito trifásico (Escenario 1)



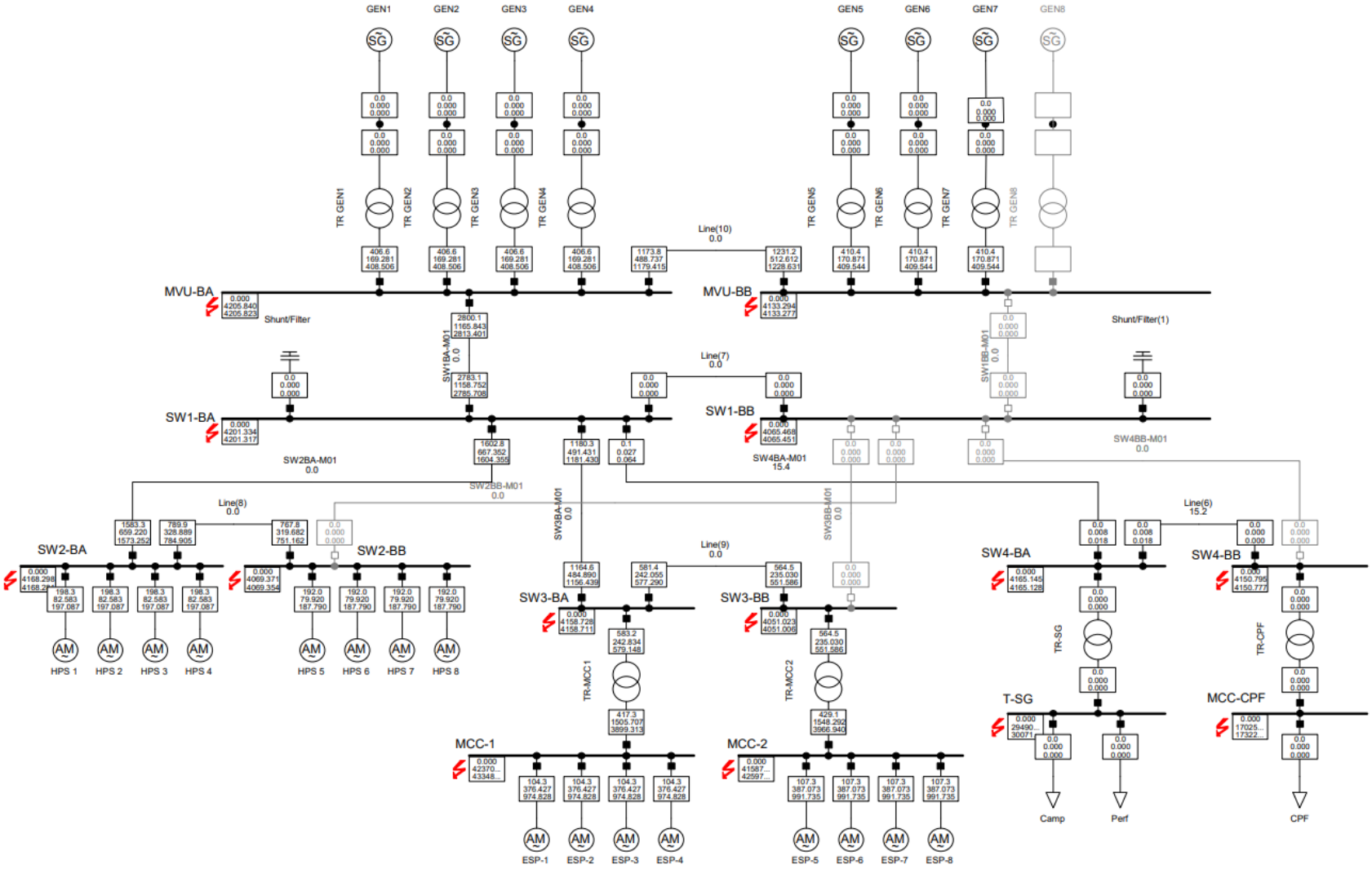
Nota: Elaboración propia

Cortocircuito monofásico (Escenario 2)



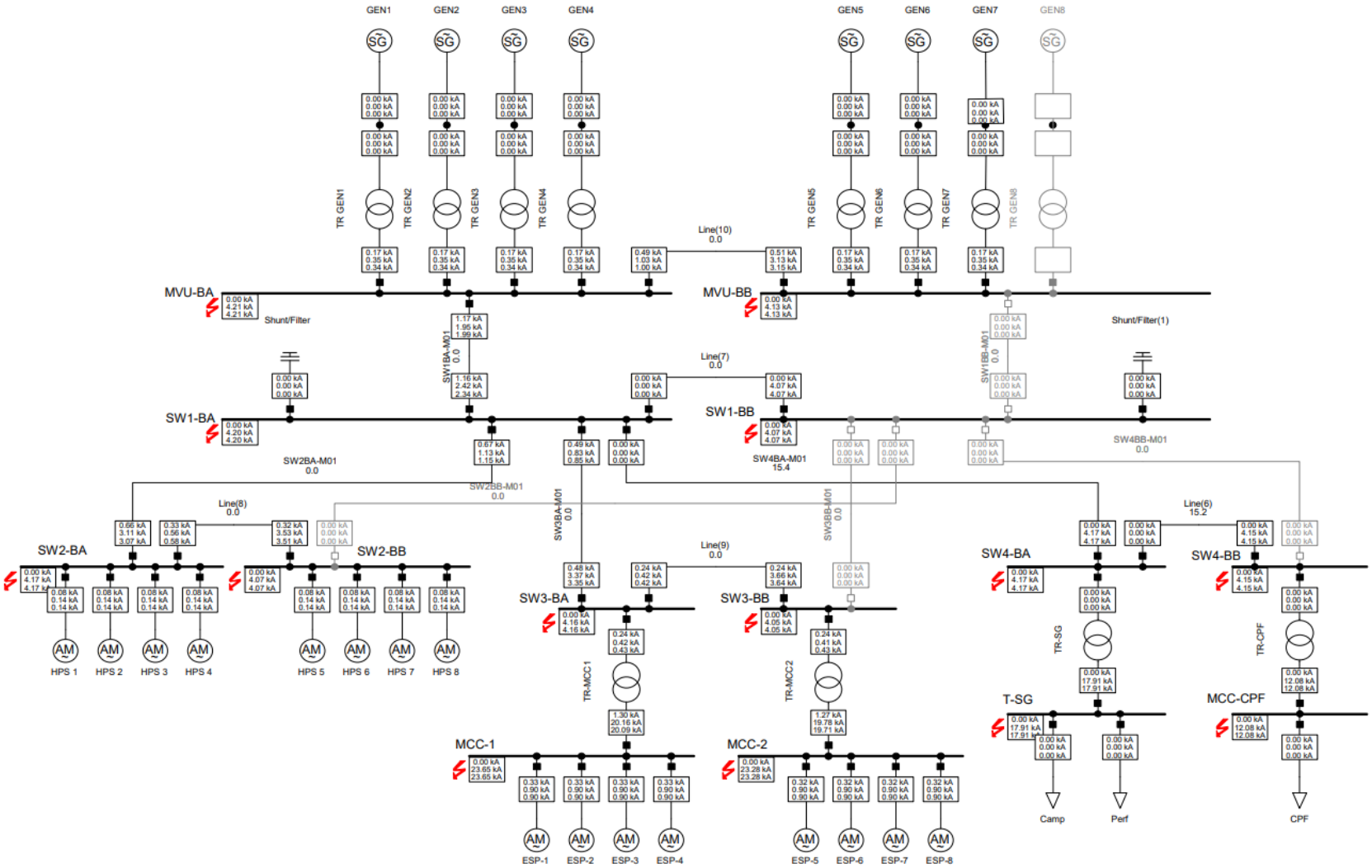
Nota: Elaboración propia

Cortocircuito bifásico a tierra (Escenario 2)



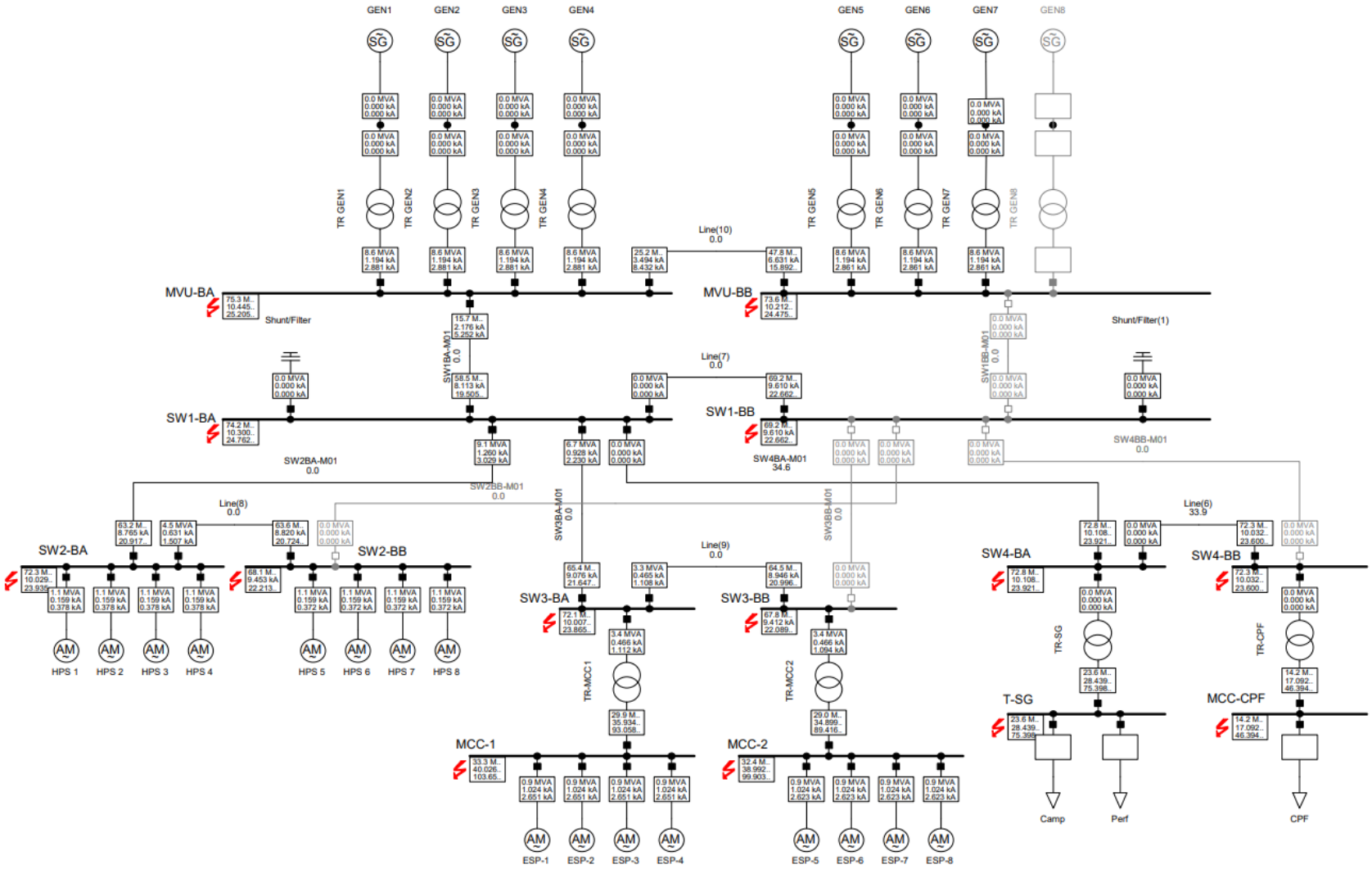
Nota: Elaboración propia

Cortocircuito bifásico (Escenario 2)



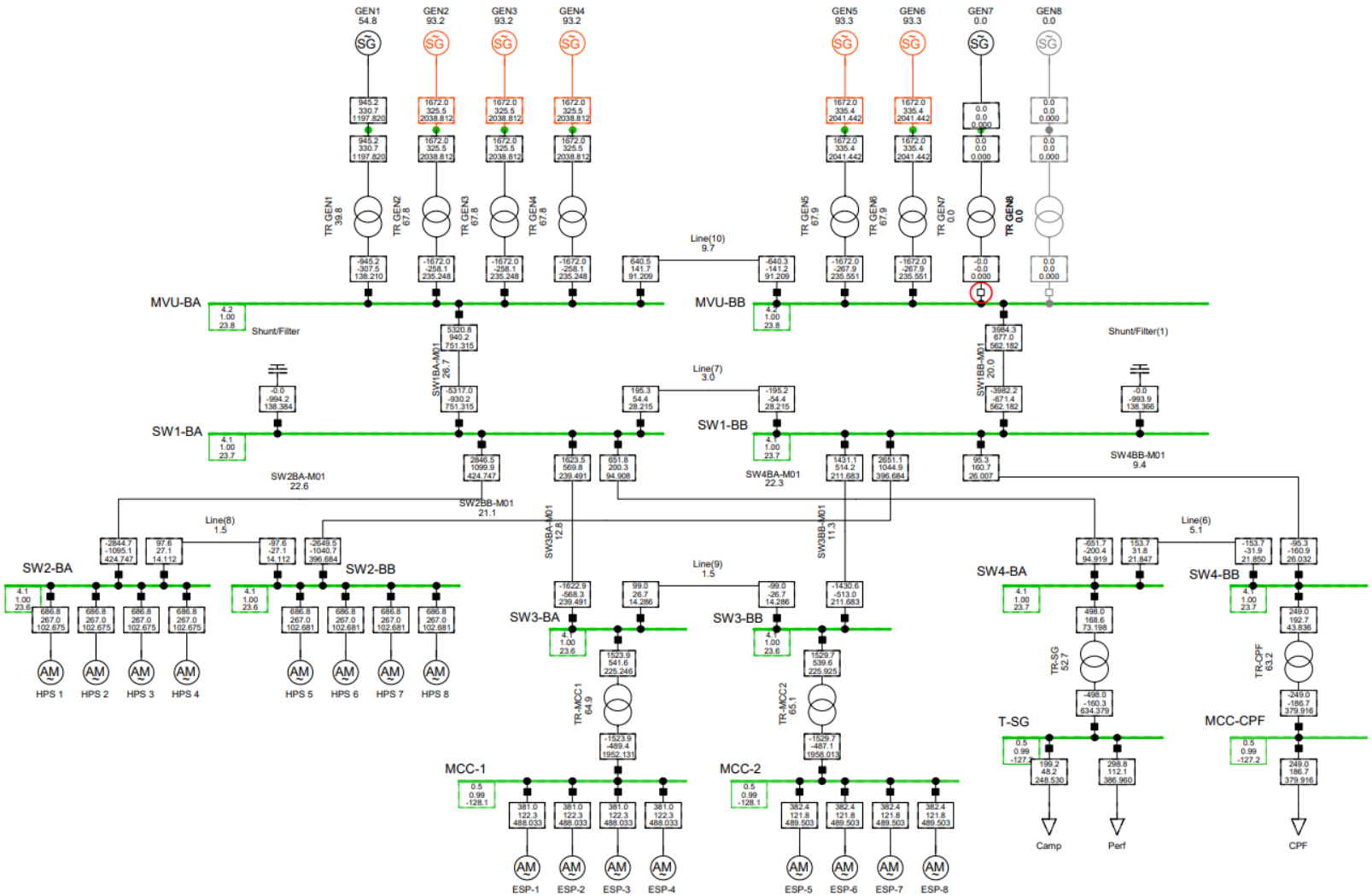
Nota: Elaboración propia

Cortocircuito trifásico (Escenario 2)



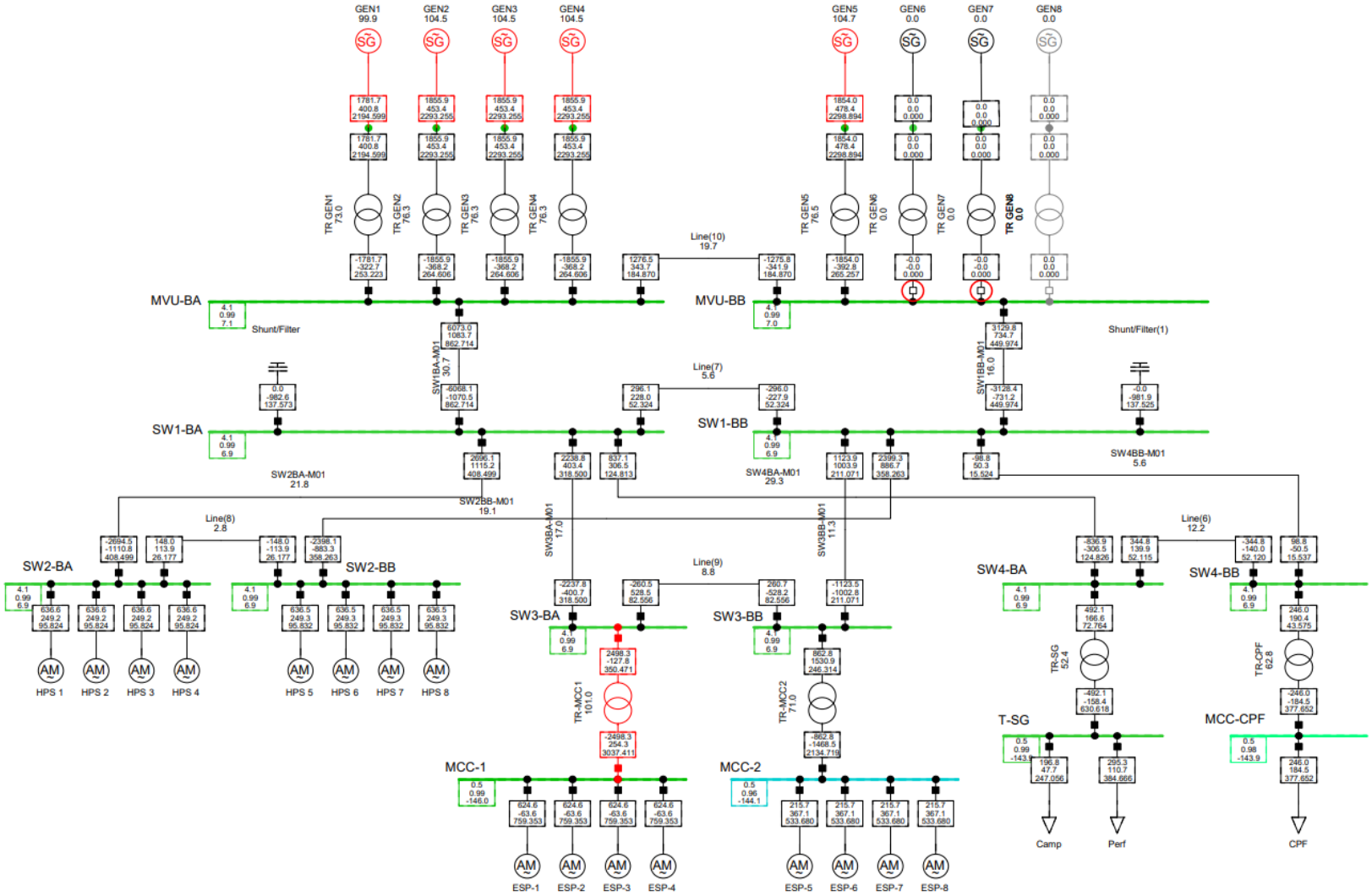
Nota: Elaboración propia

Salida intempestiva de un generador



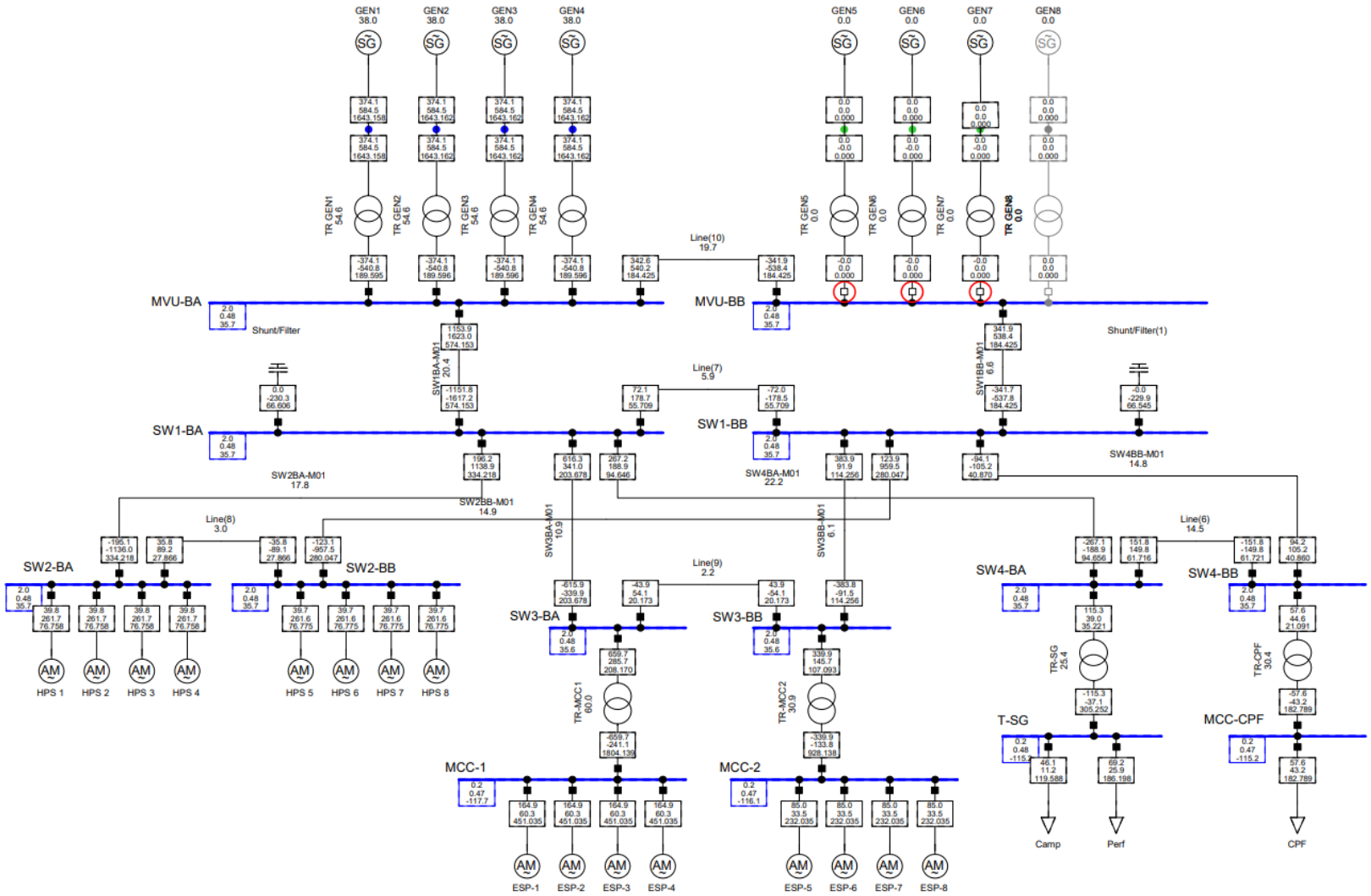
Nota: Elaboración propia

Salida intempestiva de dos generadores



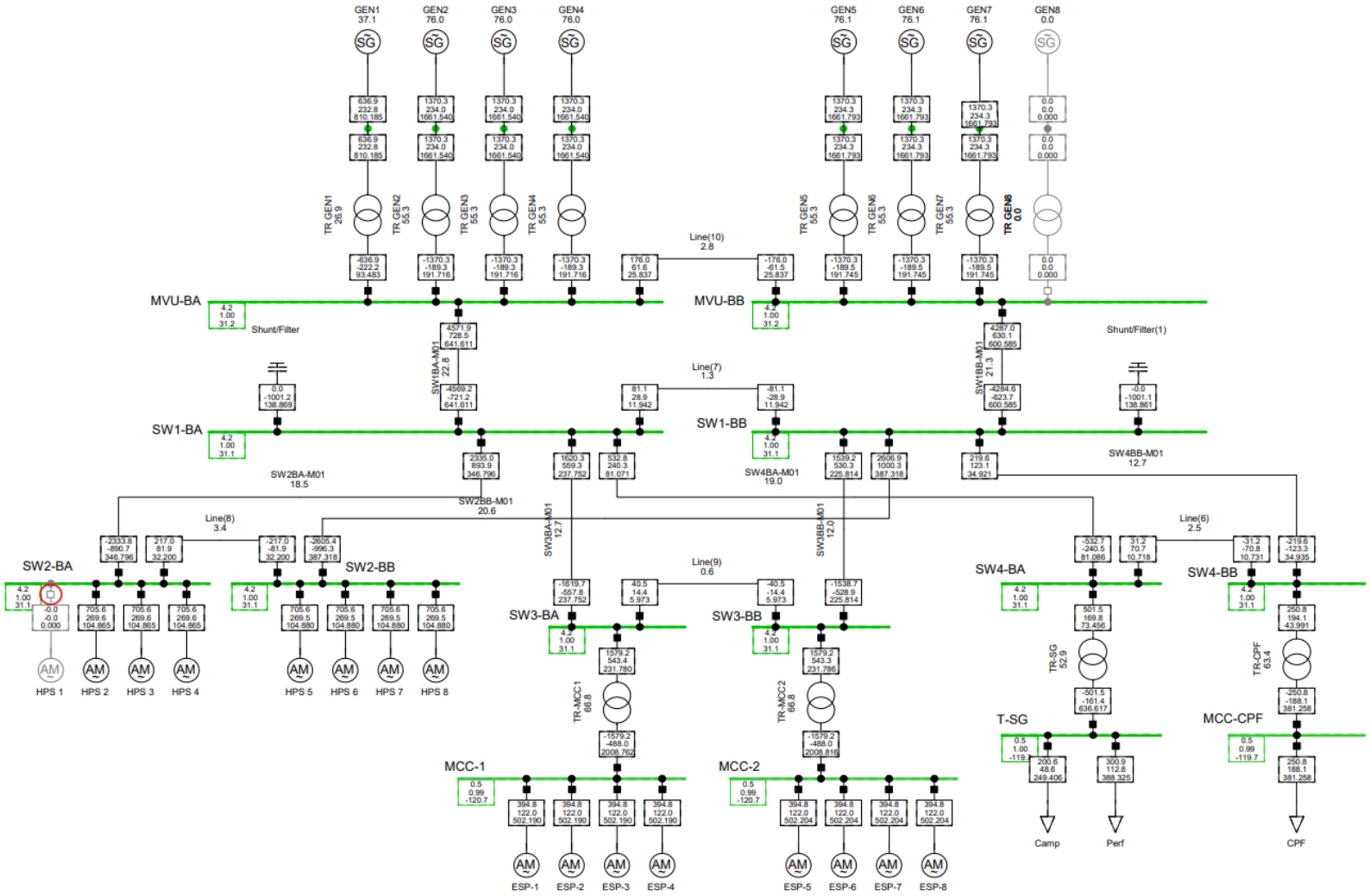
Nota: Elaboración propia

Salida intempestiva de tres generadores



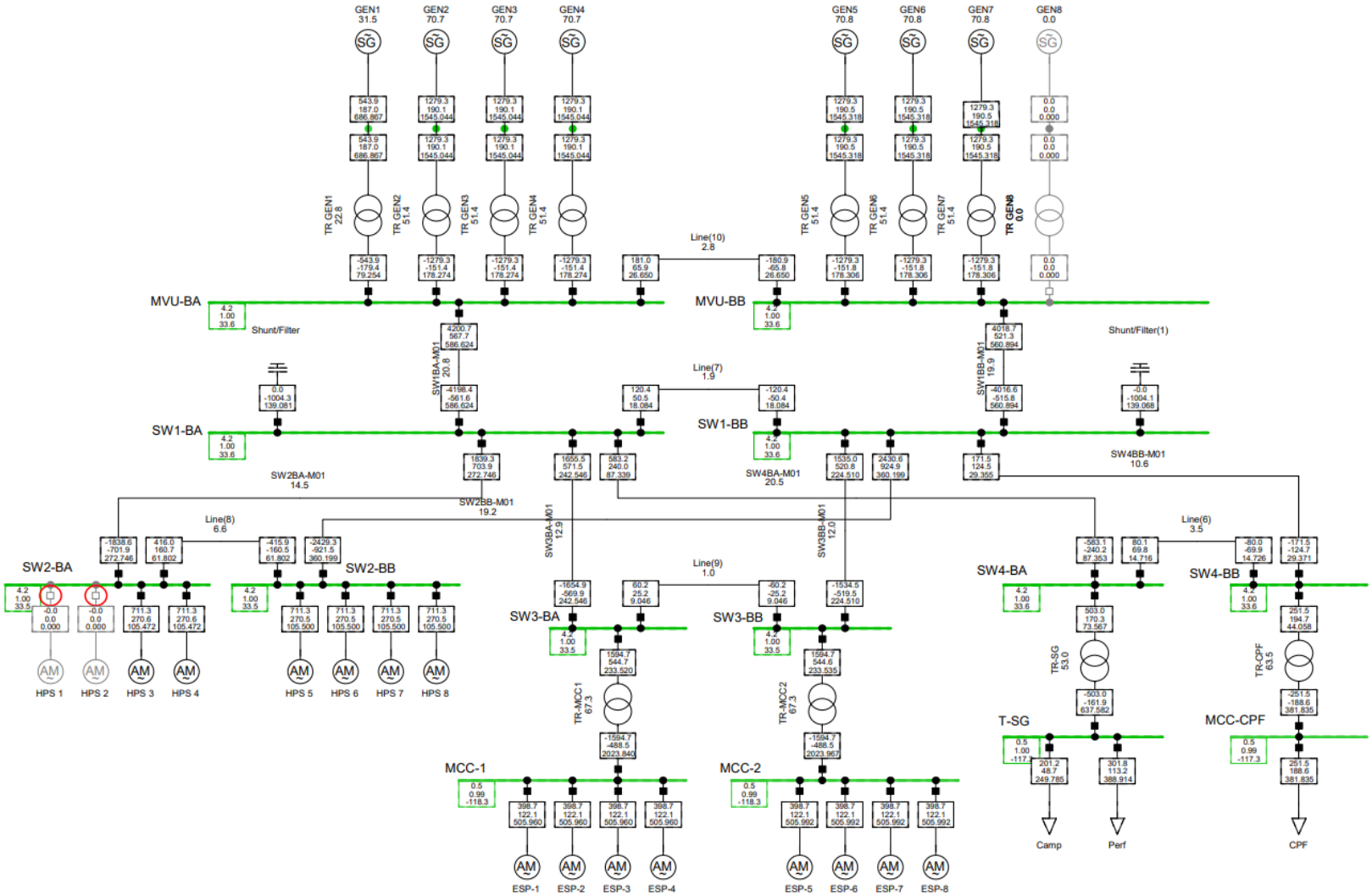
Nota: Elaboración propia

Salida intempestiva de una HPS



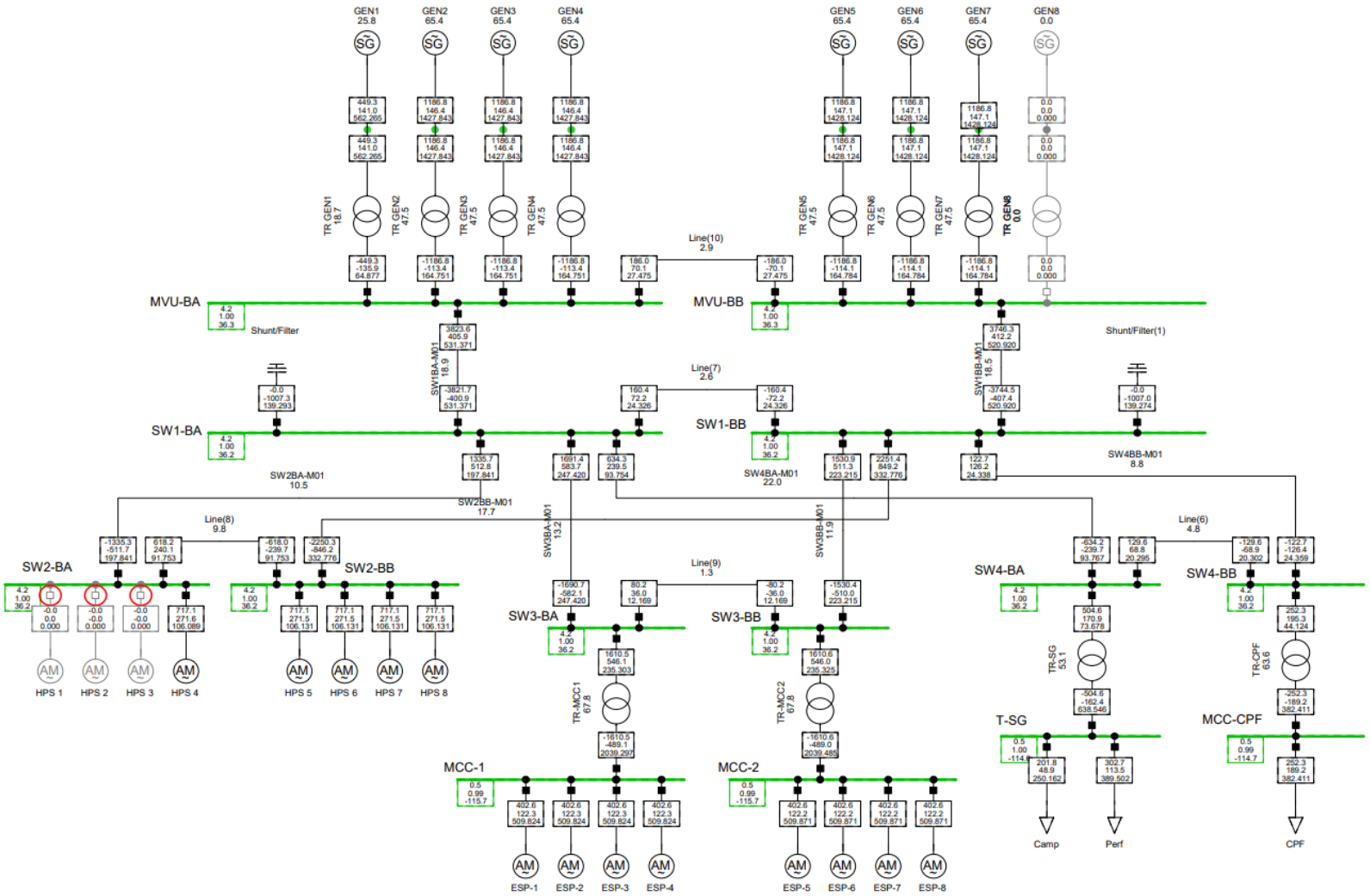
Nota: Elaboración propia

Salida intempestiva de dos HPS



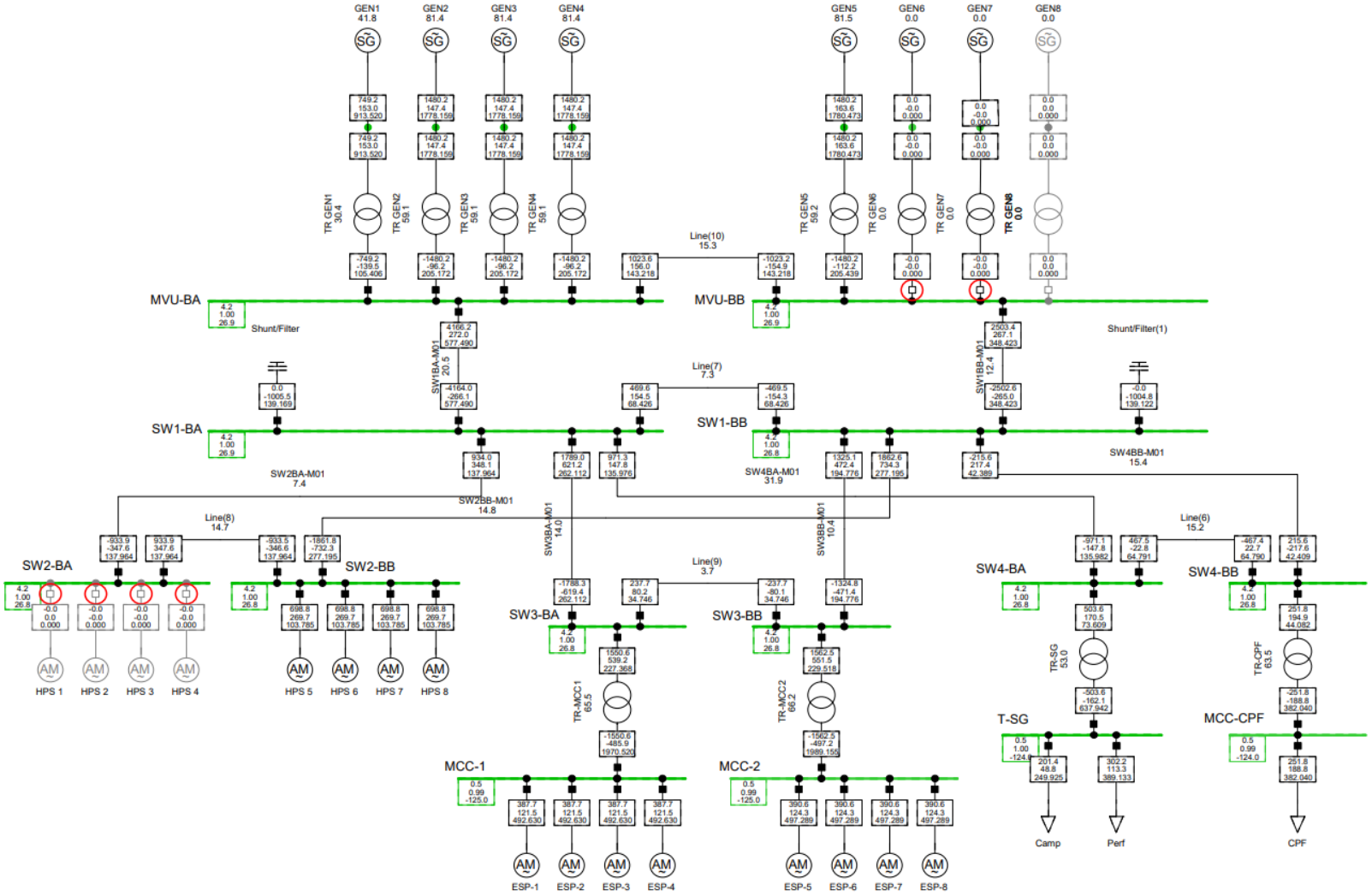
Nota: Elaboración propia

Salida intempestiva de tres HPS



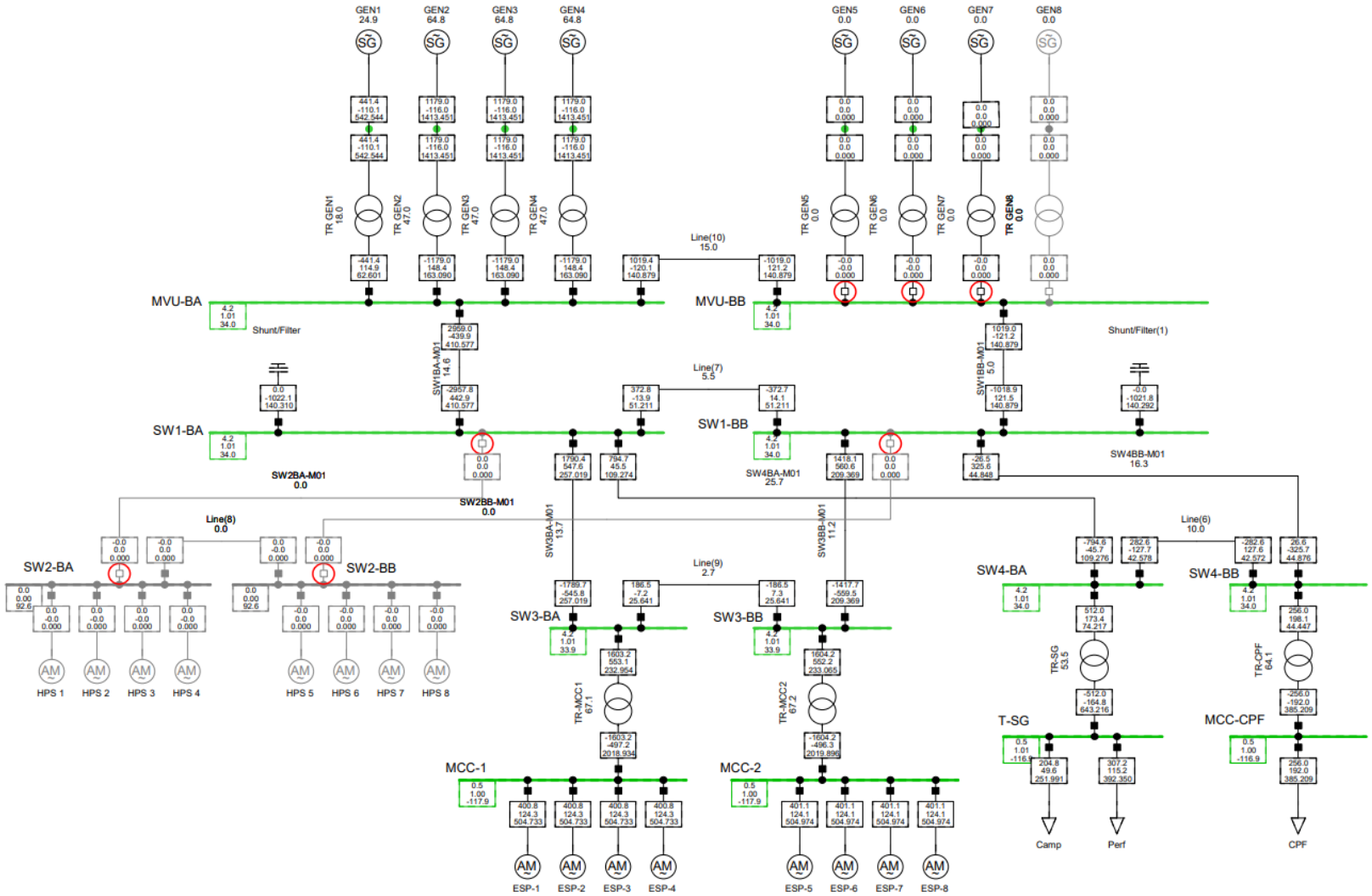
Nota: Elaboración propia

Etapa I – ERACMF



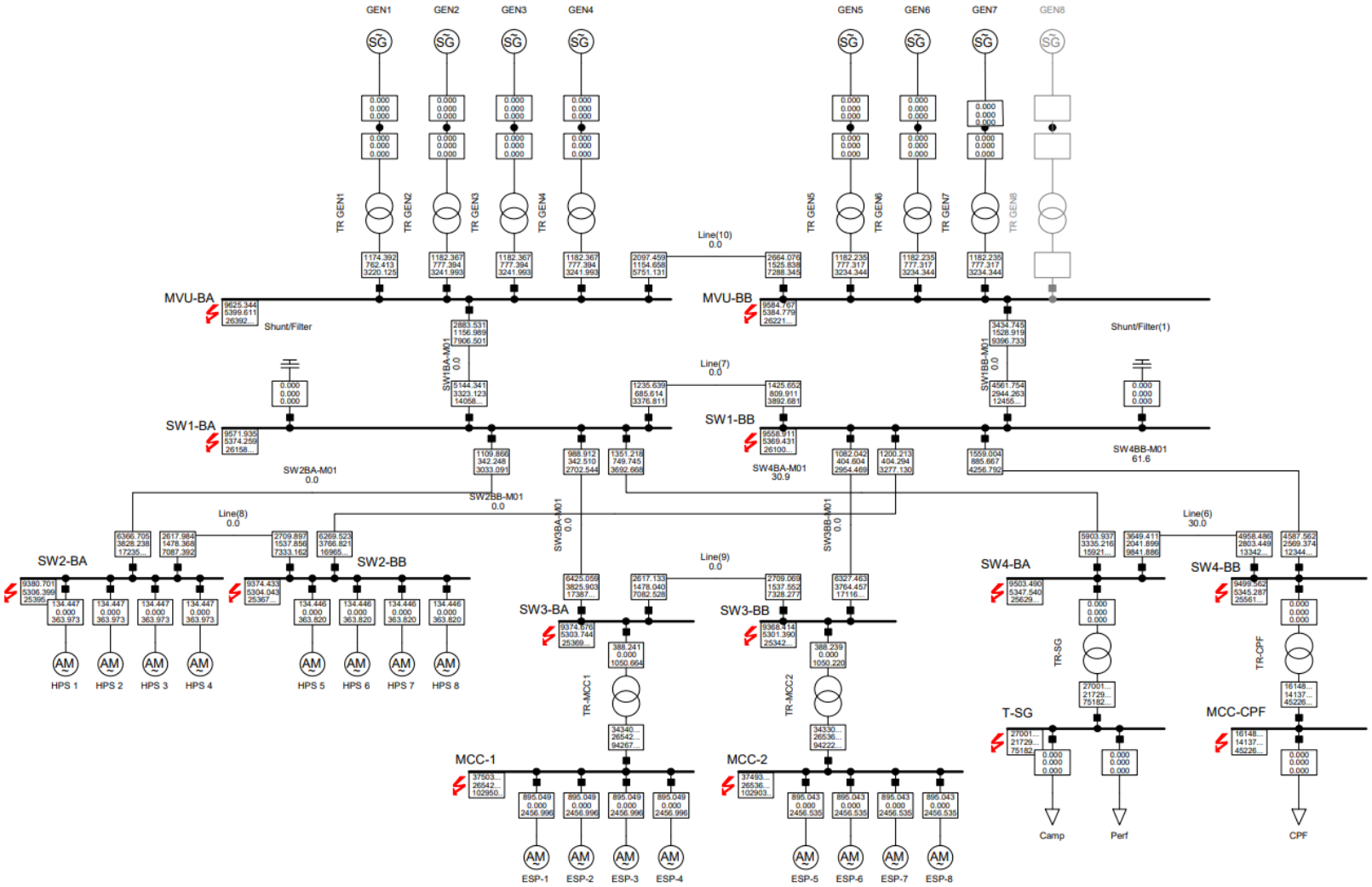
Nota: Elaboración propia

Etapa II – ERACMF



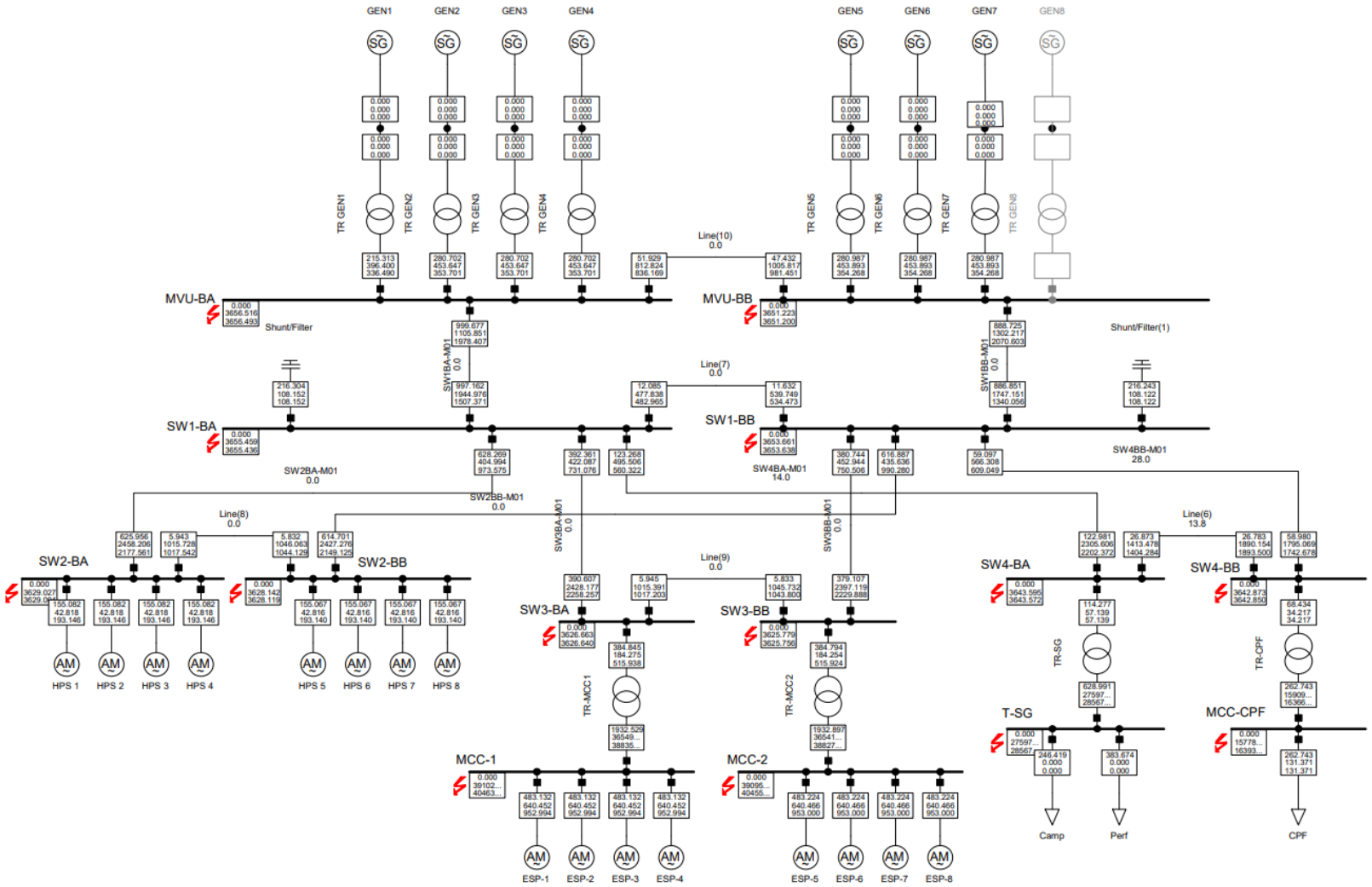
Nota: Elaboración propia

Cortocircuito trifásico por método completo



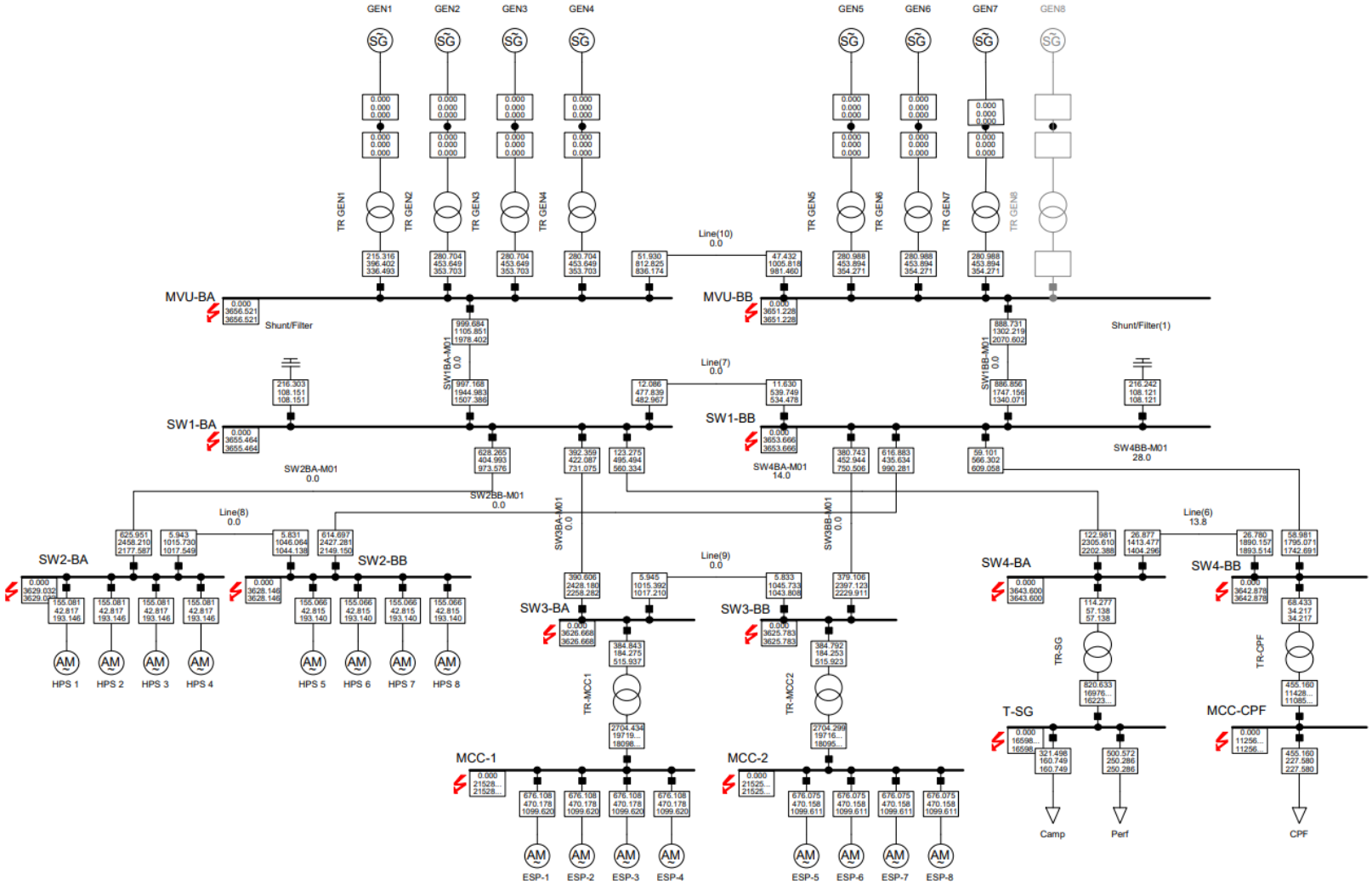
Nota: Elaboración propia

Cortocircuito bifásico a tierra por método completo



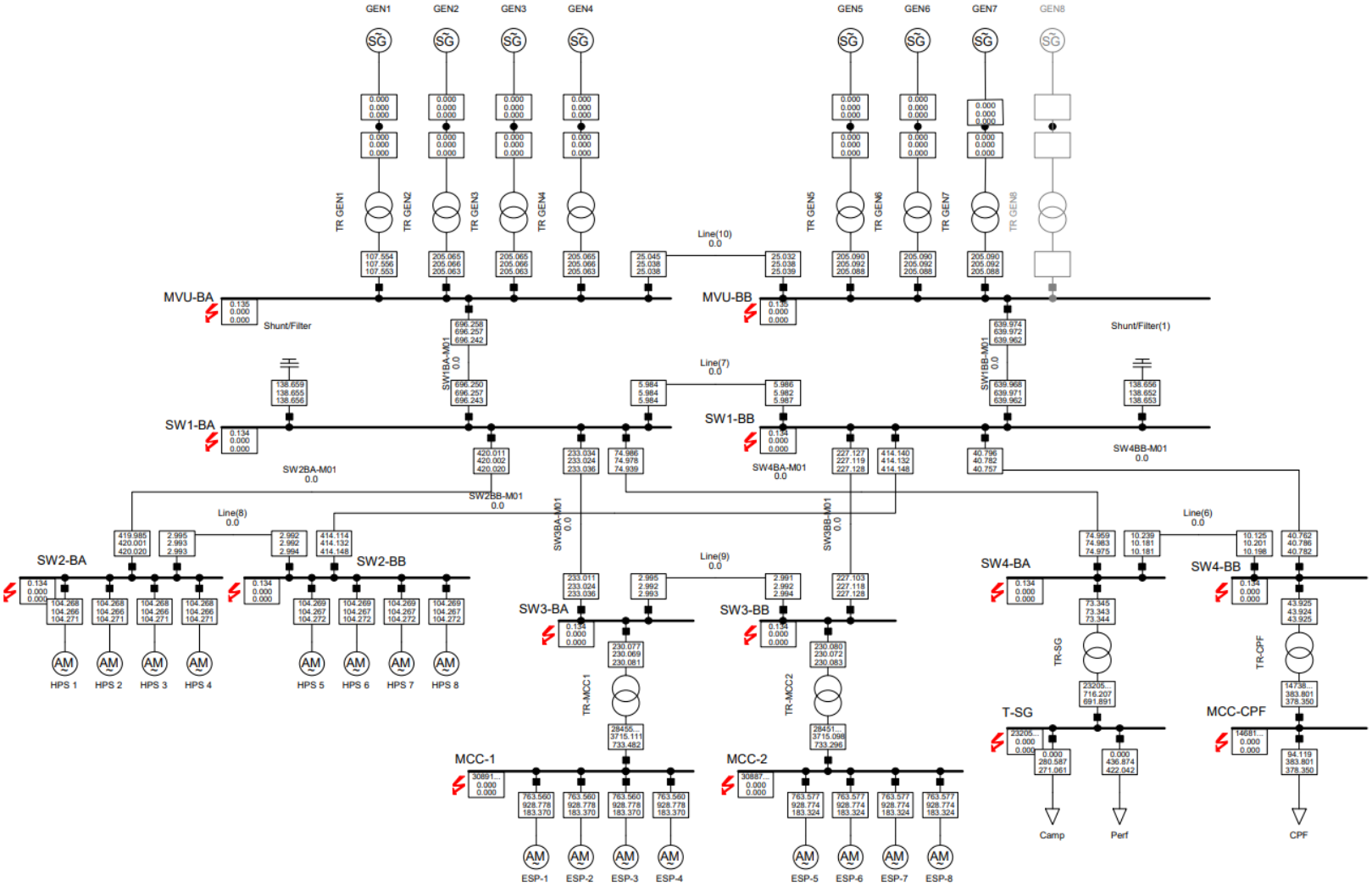
Nota: Elaboración propia

Cortocircuito bifásico por método completo



Nota: Elaboración propia

Cortocircuito monofásico por método completo



Nota: Elaboración propia