



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

**EVALUACIÓN TÉCNICO Y ECONÓMICA DE PROPUESTAS DE  
INFRAESTRUCTURA EN LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN MINERO  
CON ENFOQUE EN ESTABILIDAD DE TENSIÓN**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO

**MAURICIO IGNACIO RAVANAL INDA**

PROFESOR GUÍA:  
JAIME MUÑOZ CASTRO

PROFESOR CO-GUÍA:  
PATRICIO ARAYA MENDOZA

COMISIÓN:  
ANDRÉS CABA RUTTE

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por Minera Los Pelambres

SANTIAGO DE CHILE  
2024

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO  
POR: MAURICIO IGNACIO RAVANAL INDA  
FECHA: 2024  
PROF. GUÍA: JAIME MUÑOZ CASTRO

## **EVALUACIÓN TÉCNICO Y ECONÓMICA DE PROPUESTAS DE INFRAESTRUCTURA EN LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN MINERO CON ENFOQUE EN ESTABILIDAD DE TENSIÓN**

Esta memoria está centrada en la industria minera, en específico, en Minera Los Pelambres, la cual presenta una necesidad imperante de mantener sus operaciones continuas para mejorar la productividad y rentabilidad del negocio. Considerando que todos los procesos requieren de electricidad, es que la calidad del suministro eléctrico es fundamental, siendo este, otro proceso más del negocio minero. Conocido el contexto, se menciona que esta memoria tiene como objetivo principal definir y evaluar diferentes propuestas de infraestructura, que generen soluciones técnicas y económicas para el respectivo sistema de distribución de Minera Los Pelambres, compuesto por el Sistema de Transporte de Mineral Grueso (STMG) y loop mina, con sus respectivas cargas, con enfoque en mejorar uno de los componentes de la calidad de suministro, que corresponde a la estabilidad de tensión.

Las propuestas se centrarán en mejorar los problemas de estabilidad de tensión de las cargas críticas del sistema, es decir palas y perforadoras eléctricas, las cuales tienen límites operacionales de voltaje. Cuando las cargas críticas se encuentran fuera de estos límites de operación, se genera la activación de trips de protecciones para sub-voltajes o sobre-voltajes, produciendo demoras no programadas que generan pérdidas económicas.

Respecto de las conclusiones principales, se puede mencionar que la mejor propuesta, tanto técnica como económicamente, resultó ser la propuesta 2 (STATCOM de  $\pm 10$  MVar en transformador móvil #7 y #1), seguida de la propuesta 3 (STATCOM de  $\pm 10$  MVar en parrones de maniobra PM-Patio Cable y PM-7A), mientras que la propuesta 1 (STATCOM de  $\pm 30$  MVar en sala N°12) quedó descartada debido a su inviabilidad económica. Tanto, la propuesta 2 como la propuesta 3 presentan los mismos indicadores de rentabilidad (VPN, TIR y PRC), sin embargo, la propuesta 2 es mejor técnicamente.

Se concluye además, que las soluciones que plantean propuestas de infraestructura más cercanas a las cargas críticas (2 y 3) requieren equipos con una menor capacidad de compensación de reactivos, ya que presentan menores pérdidas por transmisión, lo que conlleva menores costos de inversión y operación, y por tanto, una mejor rentabilidad. De la misma forma, desde el punto de vista técnico, mientras más cercana es la propuesta de infraestructura a las cargas críticas, mejor rendimiento presenta con respecto a la mejora en la estabilidad de tensión. Sin embargo, las propuestas 2 y 3 enfrentan limitaciones operacionales no analizadas, como la dificultad de acceso para mantenimiento debido a condiciones geográficas y climáticas, además, la propuesta 1 podría ser viable económicamente si se consideran otras fuentes de ingresos, es por esto, que no se puede seleccionar una propuesta definitiva.

*Nuestras virtudes y nuestros defectos son inseparables, como la fuerza y la materia. Cuando se separan, el hombre ya no existe - Nikola Tesla.*

# Agradecimientos

Quisiera agradecer primero a mi familia, que siempre estuvo presente para apoyarme en todo durante mi etapa universitaria, sin ellos esto no podría haber sido posible. También quiero agradecer a mis amistades, cuya compañía me permitió superar situaciones en las que pensé que no podría seguir adelante. Gracias a ellos, mi época en la universidad fue de los mejores años de mi vida, formé vínculos que nunca olvidaré. También quisiera agradecer al personal de Minera los Pelambres, los cuales me brindaron su apoyo y me permitieron poder entregar este trabajo de manera exitosa. Por último, agradezco a todas aquellas personas que estuvieron presentes en mi vida y me ayudaron de una u otra manera a lograr esto, a pesar de que ya no están.



# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación y antecedentes . . . . .	1
1.2. Objetivo general . . . . .	2
1.3. Objetivos específicos: . . . . .	2
1.4. Contribución de trabajo de título . . . . .	2
1.5. Alcances . . . . .	3
1.6. Estructura de la Memoria . . . . .	3
<b>2. Marco Teórico y Estado del Arte</b>	<b>4</b>
2.1. Sistemas eléctricos en minería: Componentes, funciones y aplicaciones en los procesos operativos . . . . .	4
2.2. Calidad de suministro . . . . .	7
2.3. Estabilidad de tensión . . . . .	8
2.3.1. Factores que afectan la estabilidad de tensión. . . . .	9
2.3.2. Variaciones de tensión . . . . .	9
2.4. Métodos de análisis de estabilidad de tensión . . . . .	10
2.4.1. Análisis dinámico . . . . .	10
2.4.2. Análisis estático . . . . .	11
2.4.3. Método de las Curvas PV y QV . . . . .	11
2.4.4. Método de simulación de estado cuasi-estacionario . . . . .	13
2.5. Indicador de estabilidad de tensión . . . . .	15
2.5.1. Índice de perfil de voltaje . . . . .	15
2.6. Regulación de Tensión . . . . .	16
2.6.1. Dispositivos Convencionales . . . . .	16
2.6.2. Dispositivos Avanzados . . . . .	17
2.7. Estado del arte . . . . .	18
2.8. Evaluación económica . . . . .	22
2.8.1. Indicadores de rentabilidad . . . . .	23
<b>3. Metodología</b>	<b>25</b>
<b>4. Modelo eléctrico y casos de operación</b>	<b>28</b>
4.1. STMG . . . . .	29
4.2. Loop Mina . . . . .	32
4.3. Palas eléctricas . . . . .	34
4.3.1. Pala P&H 4100 XPC AC . . . . .	36
4.3.2. Pala P&H 4100 XPB/XPC DC . . . . .	37
4.4. Perforadora Pit Viper 451 . . . . .	39

4.5.	STATCOM como elección para las propuestas de infraestructura . . . . .	40
4.6.	DigSILENT como herramienta computacional . . . . .	41
4.7.	Escenarios de operación . . . . .	42
4.7.1.	Tensión en sala N°1 . . . . .	42
4.7.2.	Operación del STMG . . . . .	43
4.7.3.	Largo de cables mineros . . . . .	44
4.7.4.	Diagrama de escenarios de operación . . . . .	45
<b>5.</b>	<b>Resultados</b>	<b>46</b>
5.1.	Evaluación técnica . . . . .	46
5.1.1.	Caso base . . . . .	47
5.1.1.1.	Tensión en sala N°1 de 22.74 kV . . . . .	47
5.1.1.2.	Tensión de sala N°1 en 23.68 kV . . . . .	52
5.1.1.3.	Curvas PV . . . . .	57
5.1.1.4.	Margen de cargabilidad para caso base . . . . .	59
5.1.2.	Propuesta de infraestructura 1 . . . . .	60
5.1.2.1.	Tensión en sala N°1 de 22.74 kV . . . . .	61
5.1.2.2.	Tensión en sala N°1 de 23.68 kV . . . . .	62
5.1.2.3.	Margen de cargabilidad para propuesta de infraestructura 1 . . . . .	63
5.1.2.4.	VPI para propuesta de infraestructura 1 . . . . .	64
5.1.3.	Propuesta de infraestructura 2 . . . . .	66
5.1.3.1.	Tensión en sala N°1 de 22.74 kV . . . . .	67
5.1.3.2.	Tensión en sala N°1 de 23.68 kV . . . . .	68
5.1.3.3.	Margen de cargabilidad para propuesta de infraestructura 2 . . . . .	69
5.1.3.4.	VPI para propuesta de infraestructura 2 . . . . .	70
5.1.4.	Propuesta de infraestructura 3 . . . . .	72
5.1.4.1.	Tensión en sala N°1 de 22.74 kV . . . . .	73
5.1.4.2.	Tensión en sala N°1 de 23.68 kV . . . . .	74
5.1.4.3.	Margen de cargabilidad para propuesta de infraestructura 3 . . . . .	75
5.1.4.4.	VPI para propuesta de infraestructura 3 . . . . .	76
5.2.	Análisis de resultados técnicos . . . . .	78
5.2.1.	Comparativa margen de cargabilidad . . . . .	79
5.2.2.	Comparativa VPI . . . . .	80
5.3.	Evaluación económica . . . . .	81
5.3.1.	Ingresos . . . . .	81
5.3.2.	Capex y Opex . . . . .	83
5.3.3.	Resultados . . . . .	84
5.3.3.1.	Caso base . . . . .	84
5.3.3.2.	Análisis de sensibilidad para los ingresos . . . . .	85
5.3.3.3.	Análisis de sensibilidad para las inversiones . . . . .	87
<b>6.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>89</b>
6.1.	Trabajo futuro . . . . .	91
	<b>Bibliografía</b>	<b>92</b>
	<b>Anexos</b>	<b>94</b>
A.	Caso base . . . . .	95

A.1.	Curvas PV . . . . .	95
A.1.1.	Tensión en sala N°12 en 22.74 kV . . . . .	95
A.1.2.	Tensión en sala N°12 en 23.68 kV . . . . .	98
B.	Propuesta de infraestructura 1 . . . . .	101
B.1.	Tensión en sala N°12 en 22.74 kV . . . . .	101
B.1.1.	Niveles de tensión . . . . .	101
B.1.2.	Curvas PV . . . . .	106
B.1.3.	Tensión en sala N°12 en 23.68 kV . . . . .	109
B.1.4.	Niveles de tensión . . . . .	109
B.1.5.	Curvas PV . . . . .	114
C.	Propuesta de Infraestructura 2 . . . . .	117
C.1.	Tensión en sala N°12 en 22.74 kV . . . . .	117
C.1.1.	Niveles de tensión . . . . .	117
C.1.2.	Curvas PV . . . . .	123
C.2.	Tensión en sala N°12 en 23.68 kV . . . . .	126
C.2.1.	Niveles de tensión . . . . .	126
C.2.2.	Curvas PV . . . . .	132
D.	Propuesta de Infraestructura 3 . . . . .	135
D.1.	Tensión en sala N°12 en 22.74 kV . . . . .	135
D.1.1.	Niveles de tensión . . . . .	135
D.1.2.	Curvas PV . . . . .	141
D.2.	Tensión en sala N°12 en 23.68 kV . . . . .	144
D.2.1.	Niveles de tensión . . . . .	144
D.2.2.	Curvas PV . . . . .	150
E.	Propuesta descartada . . . . .	153
F.	Datos del modelo . . . . .	154

# Índice de Tablas

4.1.	Ubicación y largo de cables para equipos mineros. . . . .	33
4.2.	Descripción de los movimientos de la pala durante un ciclo de carga y descarga del balde. . . . .	35
4.3.	Accionamientos de la Pala P&H 4100 XPC AC [14]. . . . .	36
4.4.	Accionamientos de la Pala P&H 4100 XPB/XPC DC. . . . .	38
4.5.	Modos de operación del STMG y su probabilidad. . . . .	44
4.6.	Escenarios para el largo de los cables mineros. . . . .	45
5.1.	Costos de capital, obras civiles e ingeniería para STATCOM[19]. . . . .	83
5.2.	Resumen de Capex y Opex por propuesta. . . . .	83
5.3.	PRC por propuesta. . . . .	85
5.4.	PRC por propuesta para el análisis de sensibilidad de los ingresos. . . . .	86
5.5.	PRC por propuesta para el analisis de sensibilidad de las inversiones. . . . .	88
F.1.	Consumos STMG. . . . .	162

# Índice de Ilustraciones

2.1.	Configuración típica de un sistema de distribución eléctrica para una mina y una planta de procesamiento (imagen extraída de [2]). . . . .	4
2.2.	Sistema radial simple para la ilustración del fenómeno de estabilidad de tensión (imagen extraída de [4]). . . . .	11
2.3.	Curva PV (imagen extraída de [4]). . . . .	13
2.4.	Curva QV (imagen extraída de [4]). . . . .	13
3.1.	Diagrama de flujo de la metodología (basada en [12] y [? ]). . . . .	27
4.1.	Sistema eléctrico STMG. . . . .	29
4.2.	Sistema eléctrico loop mina. . . . .	32
4.3.	Perfil de consumo pala eléctrica P&H 4100 XPC DC [1]. . . . .	34
4.4.	Pala P&H 4100 XPC y los movimientos asociados a su operación [15]. . . . .	35
4.5.	Perfil de consumo pala P&H 4100 XPC AC. . . . .	37
4.6.	Perfil de consumo pala P&H 4100 XPC/XPB DC. . . . .	39
4.7.	Perfil de consumo perforadora Epiroc Viper 451. . . . .	40
4.8.	Diagrama esquemático de STATCOM. . . . .	40
4.9.	Distribución normal de tensión en sala N°1. . . . .	43
4.10.	Diagrama esquemático del sistema de correas transportadoras de Minera Los Pelambres (imagen propiedad de Minera Los Pelambres). . . . .	44
4.11.	Diagrama de escenarios de operación. . . . .	45
5.1.	Niveles de tensión de palas para caso base - Tensión de sala N°1 en 22.74 kV. .	47
5.2.	Niveles de tensión de perforadoras para caso base - Tensión de sala N°1 en 22.74 kV. . . . .	48
5.3.	Niveles de tensión de Loop Mina para caso base - Tensión de sala N°1 en 22.74 kV. . . . .	49
5.4.	Niveles de tensión de STMG para caso base - Tensión de sala N°1 en 22.74 kV. .	50
5.5.	Tensión vs Nodos - Caso Base - Tensión en sala N°1 de 22.74 kV . . . . .	51
5.6.	Niveles de tensión de palas para caso base - Tensión de sala N°1 en 23.68 kV .	52
5.7.	Niveles de tensión de perforadoras para caso base - Tensión de sala N°1 en 23.68 kV . . . . .	53
5.8.	Niveles de Tensión de Loop Mina para Caso Base - Tensión de sala N°1 en 23.68 kV . . . . .	54
5.9.	Niveles de Tensión de STMG para Caso Base - Tensión de sala N°1 en 23.68 kV .	55
5.10.	Tensión vs Nodos - Caso Base - Tensión en sala N°1 de 23.68 kV . . . . .	56
5.11.	Curvas PV para STMG - Tensión en sala N°12 en 22.74 kV - STMG en vacío - Extensión de cables mineros. . . . .	57
5.12.	Curvas PV para Transformadores Móviles - Tensión en sala N°12 en 22.74 kV - STMG en vacío - Extensión de cables mineros. . . . .	58

5.13.	Curvas PV para Loop Mina - Tensión en sala N°12 en 22.74 kV - STMG en vacío - Extensión de cables mineros. . . . .	58
5.14.	Margen de cargabilidad para caso base. . . . .	59
5.15.	STATCOM en sala N°12 - Propuesta de infraestructura 1 . . . . .	60
5.16.	Tensión vs nodos - Caso base vs propuesta de infraestructura 1 - Tensión en sala N°1 de 22.74 kV. . . . .	61
5.17.	Tensión vs nodos - Caso base vs propuesta de infraestructura 1 - Tensión en sala N°1 de 23.68 kV. . . . .	62
5.18.	Margen de cargabilidad para caso base vs propuesta de infraestructura 1. . . . .	63
5.19.	VPI para máximo nivel de tensión - Caso base vs propuesta de infraestructura 1. . . . .	64
5.20.	VPI para mínimo nivel de tensión - Caso base vs propuesta de infraestructura 1. . . . .	65
5.21.	STATCOM en transformador móvil #7 - Propuesta de infraestructura 2. . . . .	66
5.22.	STATCOM en transformador móvil #1 - Propuesta de infraestructura 2. . . . .	66
5.23.	Tensión vs nodos - Caso base vs propuesta de infraestructura 2 - Tensión en sala N°1 de 22.74 kV. . . . .	67
5.24.	Tensión vs nodos - Caso base vs propuesta de infraestructura 2 - Tensión en sala N°1 de 23.68 kV. . . . .	68
5.25.	Margen de cargabilidad caso base vs propuesta de infraestructura 2. . . . .	69
5.26.	VPI para máximo nivel de tensión - caso base vs propuesta de infraestructura 2. . . . .	70
5.27.	VPI para mínimo nivel de tensión - caso base vs propuesta de infraestructura 2. . . . .	71
5.28.	STATCOM en PM-Patio Cable - Propuesta de infraestructura 3 . . . . .	72
5.29.	STATCOM en PM-7A - Propuesta de infraestructura 3 . . . . .	72
5.30.	Tensión vs nodos - Caso base vs propuesta de infraestructura 3 - Tensión en sala N°1 de 22.74 kV. . . . .	73
5.31.	Tensión vs nodos - Caso base vs propuesta de infraestructura 3 - Tensión en sala N°1 de 23.68 kV. . . . .	74
5.32.	Margen de cargabilidad caso base vs propuesta de infraestructura 3. . . . .	75
5.33.	VPI para máximo nivel de tensión - caso base vs propuesta de infraestructura 3. . . . .	76
5.34.	VPI para mínimo nivel de tensión - caso base vs propuesta de infraestructura 3. . . . .	77
5.35.	Comparativa margen de cargabilidad - Caso base vs propuesta 1 vs propuesta 2 vs propuesta 3. . . . .	79
5.36.	Comparativa VPI para máximo nivel de tensión - Caso base vs propuesta 1 vs propuesta 2 vs propuesta 3. . . . .	80
5.37.	Comparativa VPI para mínimo nivel de tensión - Caso base vs propuesta 1 vs propuesta 2 vs propuesta 3. . . . .	80
5.38.	Estructura de tiempos AMSA [18]. . . . .	81
5.39.	VPN y TIR por propuesta para el caso base . . . . .	84
5.40.	VPN y TIR por propuesta para el análisis de sensibilidad para los ingresos . . . . .	86
5.41.	VPN y TIR por propuesta para el análisis de sensibilidad para las inversiones . . . . .	87
A.1.	Curva PV para loop mina - Tensión sala N°1 22.74 kV - Caso base. . . . .	95
A.2.	Curva PV para STMG - Tensión sala N°1 22.74 kV - Caso base. . . . .	96
A.3.	Curva PV para transformadores móviles - Tensión sala N°1 22.74 kV - Caso base. . . . .	97
A.4.	Curva PV para loop mina - Tensión sala N°1 23.68 kV - Caso base. . . . .	98
A.5.	Curva PV para STMG - Tensión sala N°1 23.68 kV - Caso base. . . . .	99
A.6.	Curva PV para transformadores móviles - Tensión sala N°1 23.68 kV - Caso base. . . . .	100
B.1.	Niveles de tensión de palas para caso base vs propuesta de infraestructura 1 - Tensión en sala N°1 22.74 kV. . . . .	101

B.2.	Niveles de tensión de perforadoras para caso base vs propuesta de infraestructura 1 - Tensión en sala N°1 22.74 kV. . . . .	102
B.3.	Niveles de tensión de loop mina para caso base vs propuesta de infraestructura 1 - Tensión en sala N°1 22.74 kV. . . . .	103
B.4.	Niveles de tensión STMG para caso base vs propuesta de infraestructura 1 - Tensión en sala N°1 22.74 kV. . . . .	104
B.5.	Potencia Reactiva entregada por STATCOM en 23 kV conectado a sala N°12 (propuesta de infraestructura 1) - Tensión en sala N°1 22.74 kV. . . . .	105
B.6.	Curva PV para loop mina - Tensión sala N°1 22.74 kV - Propuesta de infraestructura 1. . . . .	106
B.7.	Curva PV para STMG - Tensión sala N°1 22.74 kV - Propuesta de infraestructura 1. . . . .	107
B.8.	Curva PV para transformadores móviles - Tensión sala N°1 22.74 kV - Propuesta de infraestructura 1. . . . .	108
B.9.	Niveles de tensión de palas para caso base vs propuesta de infraestructura 1 - Tensión en sala N°1 23.68 kV. . . . .	109
B.10.	Niveles de tensión de perforadoras para caso base vs propuesta de infraestructura 1 - Tensión en sala N°1 23.68 kV. . . . .	110
B.11.	Niveles de tensión de loop mina para caso base vs propuesta de infraestructura 1 - Tensión en sala N°1 23.68 kV. . . . .	111
B.12.	Niveles de tensión de STMG para caso base vs propuesta de infraestructura 1 - Tensión en sala N°1 23.68 kV. . . . .	112
B.13.	Potencia reactiva entregada por STATCOM en 23 kV conectado a Sala N°12 (Propuesta de Infraestructura 1) - Tensión en sala N°1 23.68 kV. . . . .	113
B.14.	Curva PV para loop mina - Tensión sala N°1 23.68 kV - Propuesta de infraestructura 1. . . . .	114
B.15.	Curva PV para STMG - Tensión sala N°1 23.68 kV - Propuesta de infraestructura 1. . . . .	115
B.16.	Curva PV para transformadores móviles - Tensión sala N°1 23.68 kV - Propuesta de infraestructura 1. . . . .	116
C.1.	Niveles de tensión de palas para caso base vs propuesta de infraestructura 2 - Tensión en sala N°1 22.74 kV. . . . .	117
C.2.	Niveles de tensión de perforadoras para caso base vs propuesta de infraestructura 2 - Tensión en sala N°1 22.74 kV. . . . .	118
C.3.	Niveles de tensión de loop mina para caso base vs propuesta de infraestructura 2 - Tensión en sala N°1 22.74 kV. . . . .	119
C.4.	Niveles de tensión de STMG para caso base vs propuesta de infraestructura 2 - Tensión en sala N°1 22.74 kV. . . . .	120
C.5.	Potencia reactiva entregada por STATCOM en 23 kV conectado a PM-Patio Cable (propuesta de infraestructura 2) - Tensión en sala N°1 22.74 kV. . . . .	121
C.6.	Potencia reactiva entregada por STATCOM en 23 kV conectado a PM-7A (propuesta de infraestructura 2) - Tensión en sala N°1 22.74 kV. . . . .	122
C.7.	Curva PV para loop mina - Tensión sala N°1 22.74 kV - Propuesta de infraestructura 2. . . . .	123
C.8.	Curva PV para STMG - Tensión sala N°1 22.74 kV - Propuesta de infraestructura 2. . . . .	124

C.9.	Curva PV para transformadores móviles - Tensión sala N°1 22.74 kV - Propuesta de infraestructura 2. . . . .	125
C.10.	Niveles de tensión de palas para caso base vs propuesta de infraestructura 2 - Tensión en sala N°1 23.68 kV. . . . .	126
C.11.	Niveles de tensión de perforadoras para caso base vs propuesta de infraestructura 2 - Tensión en sala N°1 23.68 kV. . . . .	127
C.12.	Niveles de tensión de loop mina para caso base vs propuesta de infraestructura 2 - Tensión en sala N°1 23.68 kV. . . . .	128
C.13.	Niveles de tensión de STMG para caso base vs propuesta de infraestructura 2 - Tensión en sala N°1 23.68 kV. . . . .	129
C.14.	Potencia reactiva entregada por STATCOM en 23 kV conectado a PM-Patio Cable (propuesta de infraestructura 2) - Tensión en sala N°1 23.68 kV. . . . .	130
C.15.	Potencia reactiva entregada por STATCOM en 23 kV conectado a PM-7A (propuesta de infraestructura 2) - Tensión en sala N°1 23.68 kV. . . . .	131
C.16.	Curva PV para loop mina - Tensión sala N°1 23.68 kV - Propuesta de infraestructura 2. . . . .	132
C.17.	Curva PV para STMG - Tensión sala N°1 23.68 kV - Propuesta de infraestructura 2. . . . .	133
C.18.	Curva PV para transformadores móviles - Tensión sala N°1 23.68 kV - Propuesta de infraestructura 2. . . . .	134
D.1.	Niveles de tensión de palas para caso base vs propuesta de infraestructura 3 - Tensión en sala N°1 22.74 kV. . . . .	135
D.2.	Niveles de tensión de perforadoras para caso base vs propuesta de infraestructura 3 - Tensión en sala N°1 22.74 kV. . . . .	136
D.3.	Niveles de tensión de loop mina para caso base vs propuesta de infraestructura 3 - Tensión en sala N°1 22.74 kV. . . . .	137
D.4.	Niveles de tensión de STMG mina para caso base vs propuesta de infraestructura 3 - Tensión en sala N°1 22.74 kV. . . . .	138
D.5.	Potencia reactiva entregada por STATCOM en 6.9 kV conectado a transformador móvil #7 (propuesta de infraestructura 3) - Tensión en sala N°1 22.74 kV. . . . .	139
D.6.	Potencia reactiva entregada por STATCOM en 6.9 kV conectado a transformador móvil #1 (propuesta de infraestructura 3) - Tensión en sala N°1 22.74 kV. . . . .	140
D.7.	Curva PV para loop mina - Tensión sala N°1 22.74 kV - Propuesta de infraestructura 3. . . . .	141
D.8.	Curva PV para STMG - Tensión sala N°1 22.74 kV - Propuesta de infraestructura 3. . . . .	142
D.9.	Curva PV para transformadores móviles - Tensión sala N°1 22.74 kV - Propuesta de infraestructura 3. . . . .	143
D.10.	Niveles de tensión de palas para caso base vs propuesta de infraestructura 3 - Tensión en sala N°1 23.68 kV. . . . .	144
D.11.	Niveles de tensión de perforadoras para caso base vs propuesta de infraestructura 3 - Tensión en sala N°1 23.68 kV. . . . .	145
D.12.	Niveles de tensión de loop mina para caso base vs propuesta de infraestructura 3 - Tensión en sala N°1 23.68 kV. . . . .	146



D.13.	Niveles de tensión de STMG para caso base vs propuesta de infraestructura 3 - Tensión en sala N°1 23.68 kV. . . . .	147
D.14.	Potencia reactiva entregada por STATCOM en 6.9 kV conectado a transformador móvil #7 (propuesta de infraestructura 3) - Tensión en sala N°1 23.68 kV. . . . .	148
D.15.	potencia reactiva entregada por STATCOM en 6.9 kV conectado a transformador móvil #1 (propuesta de infraestructura 3) - Tensión en sala N°1 23.68 kV. . .	149
D.16.	Curva PV para loop mina - Tensión sala N°1 23.68 kV - Propuesta de infraestructura 3. . . . .	150
D.17.	Curva PV para STMG - Tensión sala N°1 23.68 kV - Propuesta de infraestructura 3. . . . .	151
D.18.	Curva PV para transformadores móviles - Tensión sala N°1 23.68 kV - Propuesta de infraestructura 3. . . . .	152
E.1.	Niveles de tensión para propuesta descartada en el peor escenario de operación.	153
F.1.	Transformador SS/AA TP2 y TP1. . . . .	154
F.2.	Transformador SS/AA E. Motriz. . . . .	154
F.3.	Transformador motores TP2, TP1 y E. motriz. . . . .	155
F.4.	Transformador motores TP2, TP1 y E. motriz. . . . .	156
F.5.	Transformador chancador 1 y 2. . . . .	156
F.6.	Transformador SS/AA chancador 1 y 2. . . . .	157
F.7.	Red equivalente en sala N°1. . . . .	157
F.8.	Filtro 3° armónica. . . . .	158
F.9.	Filtro 5° armónica. . . . .	158
F.10.	Filtro 7° armónica. . . . .	159
F.11.	Filtro 11° armónica. . . . .	159
F.12.	Filtro 13° armónica. . . . .	160
F.13.	Motor chancador 2 y 1 (110-CR-001A). . . . .	160
F.14.	Motor chancador 1 (110-CV-001A y 110-CV-001B). . . . .	161
F.15.	Motor chancador 1 (110-CP-001A y 110-CP-001B). . . . .	161
F.16.	25 kV 3x250MCM UV y 25 kV 1x250MCM UV . . . . .	162
F.17.	25 kV 3x350MCM UV y 25 kV 1x350MCM UV . . . . .	162
F.18.	25 kV 3x500MCM UV y 25 kV 1x500MCM UV . . . . .	163
F.19.	25 kV 3x750MCM UV y 25 kV 1x750MCM UV . . . . .	164
F.20.	25 kV 3x1000MCM UV y 25 kV 1x1000MCM UV . . . . .	164
F.21.	Cable de linea 4-0 CU . . . . .	164
F.22.	1x375 mm tipo ACSR . . . . .	165
F.23.	Cable desnudo de cobre 250 MCM . . . . .	165
F.24.	Cable minero 4/0 AWG para palas . . . . .	166
F.25.	Cable minero 2/0 AWG para perforadoras . . . . .	166
F.26.	Transformadores móviles 5-6-7. . . . .	166
F.27.	Transformadores móviles 1-2-3-4. . . . .	167
F.28.	Transformador STATCOM 23 kV para propuesta 1. . . . .	168
F.29.	Convertidor PWM STATCOM 23 kV para propuesta 1. . . . .	168
F.30.	Capacitancia DC STATCOM 23 kV para propuesta 1. . . . .	169
F.31.	Transformador STATCOM 6.9 kV para propuesta 2. . . . .	169
F.32.	Convertidor PWM STATCOM 23 kV para propuesta 2. . . . .	170
F.33.	Capacitancia DC STATCOM 23 kV para propuesta 2. . . . .	170

F.34.	Transformador STATCOM 23 kV para propuesta 3. . . . .	171
F.35.	Convertidor PWM STATCOM 23 kV para propuesta 3. . . . .	171
F.36.	Capacitancia DC STATCOM 23 kV para propuesta 3. . . . .	172

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Motivación y antecedentes

La industria minera se distingue por su necesidad crítica de mantener una operación continua, esencial para asegurar la productividad y rentabilidad de sus procesos. Dentro de este marco, la infraestructura eléctrica, especialmente los sistemas de distribución de energía desempeñan un papel fundamental. La continuidad operativa en la minería está intrínsecamente ligada a un suministro eléctrico confiable y de calidad, dado que la mayoría de los equipos y procesos en este sector dependen esencialmente de la energía eléctrica para su funcionamiento.

La problemática central de esta memoria es estudiar cómo las perturbaciones en los niveles de tensión en los sistemas de distribución pueden traer consecuencias que afecten la operación de las distintas cargas críticas (palas y perforadoras) encargadas de realizar diferentes procesos en la operación minera, impactando económicamente el negocio. Las causas de las perturbaciones pueden ser diversas, sin embargo, el sistema eléctrico encargado de operar las distintas cargas debe estar diseñado de tal manera que estas continúen trabajando a pesar de estas perturbaciones [1][2].

El impacto de las perturbaciones de tensión, como las caídas y los aumentos de tensión, puede ser significativo en la minería, provocando interrupciones operativas debido al accionar de los trips de las protecciones de los equipos. Esto se debe a la ubicación remota de muchas operaciones mineras, donde la transmisión de electricidad a largas distancias aumenta la susceptibilidad a pérdidas de potencia y fluctuaciones de tensión debido a la infraestructura limitada [2][3].

Dada la importancia crítica de un suministro eléctrico confiable y de calidad para el sector minero, la presente memoria propone el desarrollo de una infraestructura eléctrica mejorada, centrada específicamente en las necesidades de las palas y perforadoras mineras. Estos equipos, debido a su ubicación remota de la alimentación eléctrica y su funcionamiento a niveles acotados de tensión, son especialmente susceptibles a perturbaciones, lo que puede comprometer la continuidad de las operaciones mineras. La propuesta incluirá un análisis detallado de las soluciones técnicas y económicas viables, diseñadas para asegurar la estabilidad de la tensión y minimizar los riesgos asociados a perturbaciones eléctricas. Este enfoque no solo busca mejorar la continuidad operativa, sino también ofrecer una solución sostenible que contribuya al incremento de la productividad y la reducción de los impactos económicos

adversos [1][2][3].

## **1.2. Objetivo general**

Definir y evaluar, técnica y económicamente las propuestas de infraestructura para resolver los problemas de estabilidad de tensión en el sistema de distribución de Minera Los Pelambres, enfocado principalmente en sus cargas críticas (palas y perforadoras).

## **1.3. Objetivos específicos:**

- Modelar el sistema de distribución completo (STMG y loop Mina) considerando cada componente, las cargas y perfiles de carga (palas y perforadoras).
- Definir las propuestas de infraestructura.
- Evaluar técnicamente las propuestas de infraestructura planteadas.
- Evaluar económicamente las propuestas de infraestructura planteadas.

## **1.4. Contribución de trabajo de título**

La contribución de este trabajo de título corresponde a entregar una solución técnica económica para la problemática de detención de equipos críticos (palas y perforadoras eléctricas) dadas en la operación debido a problemas de estabilidad de tensión. Mediante el uso de datos reales propios del sistema eléctrico de Minera Los Pelambres, lo que permite lograr obtener resultados cercanos a la realidad operacional y entregar propuestas que permitan mejorar la rentabilidad del negocio.

## 1.5. Alcances

El modelamiento de los sistemas eléctricos de potencia tiene una serie de desafíos asociadas al ámbito técnico, este trabajo se centra en utilizar herramientas matemáticas y computacionales de modelamiento que permite analizar la estabilidad de tensión en estado cuasi-estacionario. Es decir, no se analizarán las respuestas transitorias del sistema y sus diferentes componentes.

Desde el punto de vista económico, se busca capturar ingresos mediante pérdidas económicas producto de demoras no programadas, que serán resueltas con las propuestas técnicas de infraestructura, analizando las fallas operacionales del año 2023 como caso base, esto mediante el uso de calculadoras financieras aprobadas por Minera los Pelambres, sin embargo, existen más ingresos que pueden ser capturados como la disminución de las pérdidas por transmisión de energía y el aumento de la flexibilidad del sistema de distribución para el movimiento de palas y perforadoras.

Por último, no se analizarán las ventajas y desventajas operacionales de cada propuesta, lo cual es fundamental para definir una selección.

## 1.6. Estructura de la Memoria

Primero, se presenta el marco teórico y el estado del arte, abordando los contenidos clave y las herramientas necesarias para resolver la problemática planteada. También se examinan soluciones previamente implementadas en otros casos de estudio relevantes.

En segundo lugar, se describe la metodología adoptada para resolver el problema, centrándose en responder la pregunta: ¿Dónde deben instalarse los equipos FACT y con qué capacidad? Esta metodología se utiliza para definir y evaluar cada una de las propuestas.

A continuación, se detalla el modelo eléctrico y los casos de operación, describiendo el sistema eléctrico en estudio y sus respectivas cargas. Se incluyen los modelos de las palas y perforadoras eléctricas, elementos fundamentales en el análisis debido a su impacto económico en la operación y se entrega una breve explicación de porque se selecciona el STATCOM como alternativa. Los casos de operación reflejan la realidad operacional de Minera Los Pelambres, por lo que es esencial su correcta formulación.

Posteriormente, se presentan los resultados de la evaluación técnica y económica, analizando la viabilidad de cada propuesta de infraestructura desde ambos enfoques.

Finalmente, se exponen las conclusiones del trabajo, evaluando el cumplimiento de los objetivos. Además, se consideran las limitaciones de las propuestas y se sugieren futuras líneas de trabajo antes de tomar una decisión definitiva sobre la infraestructura a implementar.



Dentro de esta amplia gama de actividades, los principales componentes de la infraestructura eléctrica en una mina incluyen subestaciones eléctricas, que corresponden a los nodos para la recepción y distribución de energía. Los transformadores, que ajustan los niveles de voltaje para diferentes operaciones, son esenciales para manejar las variadas demandas energéticas de los equipos. Las líneas de transmisión y distribución permiten la distribución de la energía a través de la vasta extensión de las operaciones mineras al igual que los cables mineros. Las distintas cargas encargadas de cumplir una función en específico dentro del proceso minero también representan una componente fundamental dentro de la infraestructura eléctrica. Por último, los sistemas de control, protección y monitoreo son fundamentales para garantizar la seguridad, la eficiencia y la continuidad de las operaciones.

Esta sección se detallan los componentes esenciales de los sistemas eléctricos en la minería:

- Subestaciones eléctricas

Una subestación eléctrica en una operación minera es una instalación crucial diseñada para manejar el suministro de electricidad necesario para todas las fases del proceso minero. Albergando transformadores que ajustan los niveles de voltaje, la subestación recibe energía de alta tensión y la convierte a una tensión más baja, adecuada para el uso en los distintos procesos. Equipada con interruptores y seccionadores que facilitan el mantenimiento y gestionan emergencias, la subestación también incluye relés de protección que vigilan las variables eléctricas y activan mecanismos de desconexión para proteger contra fallas eléctricas, asegurando así la continuidad y seguridad de las operaciones. Adicionalmente, cuenta con barras colectoras que distribuyen la energía a múltiples salidas y sistemas de control automatizados que optimizan la distribución y el uso de la energía [7].

- Transformadores

Los transformadores son dispositivos que modifican los niveles de voltaje para adaptar la energía eléctrica a las necesidades específicas de los distintos equipos involucrados en cada proceso, estos pueden aumentar el voltaje según sea necesario [7].

- Líneas de transmisión y distribución

Son las arterias del sistema eléctrico de una mina, transportando electricidad desde las subestaciones hasta los diversos equipos y sectores de la operación minera. Pueden ser aéreas o subterráneas, con aislamiento y protecciones diseñadas para soportar las condiciones ambientales severas y ofrecer un rendimiento confiable y seguro [7].

- Cables mineros

Específicamente diseñados para la industria minera, estos cables son robustos y resistentes a la abrasión, la humedad y las temperaturas extremas. Facilitan la conexión segura y eficiente entre las fuentes de energía y los equipos de minería, asegurando la confiabilidad del suministro eléctrico.

- Sistemas de control y monitoreo

Incluyen tecnologías avanzadas como PLCs (controladores lógicos programables), sensores y otros dispositivos de monitoreo que supervisan continuamente las operaciones eléctricas. Estos sistemas permiten a los operadores ajustar y optimizar el uso de la energía, y proporcionan alertas tempranas sobre cualquier problema potencial que pueda surgir, mejorando así la seguridad y la eficiencia operativa [7].

- Equipos de protección

Estos dispositivos son esenciales para proteger el sistema eléctrico y los equipos de la mina contra sobre-tensiones, sub-tensiones, cortocircuitos y otras condiciones eléctricas anormales. Incluyen interruptores automáticos, fusibles y relés de protección que detectan y responden automáticamente a las anomalías para prevenir daños y garantizar la seguridad [7].

- Principales cargas

En una operación minera, el sistema de distribución de energía alimenta diversas cargas críticas, cada una cumpliendo funciones esenciales en diferentes etapas del proceso minero. Estas cargas varían desde equipos de alto consumo de potencia utilizados en la extracción y procesamiento de minerales hasta infraestructuras de soporte que garantizan la seguridad y eficiencia operativa. A continuación, se describen las principales cargas conectadas al sistema de distribución de energía en una mina y sus respectivas funciones:

- Equipos de extracción

- Palas eléctricas: estas máquinas de gran tamaño requieren motores eléctricos y electrónica de potencia para operar. Consumen grandes cantidades de energía eléctrica debido a la necesidad de levantar y mover enormes volúmenes de material.
- Perforadoras: utilizan sistemas eléctricos para accionar taladros que perforan la roca, ya sea para explosivos o exploración. Estos equipos pueden estar alimentados por motores eléctricos directos o a través de sistemas hidráulicos accionados eléctricamente [2].

- Equipos de transporte

Cintas transportadoras: operan con motores eléctricos que accionan las correas para mover materiales a lo largo de grandes distancias. Estos sistemas son esenciales para la eficiencia energética y necesitan ser cuidadosamente controlados para optimizar su consumo de energía.

- Equipos de trituración y molienda

- Chancadores (Trituradoras): estos usan grandes motores eléctricos y electrónica de potencia para generar la fuerza necesaria para romper rocas y reducir el tamaño del mineral [2].
- Molinos SAG y de bolas: dependientes de sistemas de accionamiento eléctrico de alta potencia, los molinos utilizan la energía para girar y así triturar el mineral hasta alcanzar la consistencia deseada para el proceso de concentración [2].



- Plantas de procesamiento
  - Celdas de flotación y espesadores: operan con motores eléctricos y bombas que ajustan la mezcla y el flujo de los minerales y reactivos químicos. Requieren un control preciso para mantener la eficiencia del proceso [2].
  - Filtros: estos sistemas extraen excesos de humedad y requieren motores eléctricos para operar las bombas y mecanismos de filtrado [2].
- Sistemas de bombeo (dewatering)

Bombas: estas herramientas vitales para el manejo de agua utilizan motores eléctricos para mover el agua acumulada fuera de la mina o para circular las pulpas en los procesos de tratamiento de minerales [2].

- Otros Componentes

Otros componentes muy importantes de mencionar son los filtros armónicos y los sistemas de compensación reactiva, elementos críticos para mejorar la calidad y eficiencia de la energía eléctrica. Los filtros armónicos reducen las corrientes y tensiones armónicas, que pueden causar sobrecalentamiento, interferencias y daños en los equipos, mejorando así la calidad de la energía y protegiendo la infraestructura eléctrica. Por otro lado, los sistemas de compensación reactiva, como los bancos de condensadores, optimizan el factor de potencia, minimizando las pérdidas de energía y evitando sobrecargas en la red, lo que contribuye a una operación más eficiente y a reducir los costos de energía. Ambos sistemas son esenciales para mantener la estabilidad y la eficiencia de los sistemas eléctricos en la minería, garantizando así una operación continua y segura [2].

## 2.2. Calidad de suministro

La calidad del suministro de energía se refiere a la capacidad del sistema eléctrico para proporcionar energía sin interrupciones y con características de tensión y frecuencia dentro de límites aceptables. La calidad de suministro se ve afectada por diversos factores, incluyendo fluctuaciones de tensión, armónicos, caídas y picos de tensión, y transitorios. Estos problemas pueden ser causados por cargas no lineales, condiciones ambientales adversas y una infraestructura de red sub-dimensionada.

Esta memoria se centrará en la estabilidad de tensión como uno de los componentes clave de la calidad de suministro[8].

## 2.3. Estabilidad de tensión

La estabilidad de tensión se refiere a la capacidad del sistema eléctrico para mantener tensiones aceptables en todas las barras bajo condiciones normales y de contingencia. Esta estabilidad es crucial para evitar problemas como caídas de tensión, sub-tensión, sobre-tensión y apagones. Según Kundur, "la estabilidad de tensión se define como la capacidad de un sistema de energía para mantener tensiones en todas las barras dentro de límites aceptables después de estar sujeto a una perturbación". Además, Bollen destaca que "la estabilidad de tensión es fundamental para mantener la continuidad del servicio eléctrico y evitar interrupciones significativas que pueden afectar la operación de equipos sensibles" [4][5].

- Estabilidad de tensión ante pequeños disturbios:

La estabilidad de tensión ante pequeños disturbios se refiere a la capacidad de un sistema eléctrico para mantener niveles de tensión constantes y dentro de rangos aceptables después de enfrentar perturbaciones leves o cambios pequeños en las condiciones operativas. Estos pequeños disturbios pueden incluir variaciones en la carga, cambios en la generación de energía, o eventos similares que no generan interrupciones significativas en el suministro eléctrico

- Estabilidad de tensión ante grandes disturbios:

Hace referencia a la capacidad del sistema para preservar la estabilidad de las tensiones tras ocurrencias significativas, como fallos en el sistema de transmisión o distribución, pérdida de generación o contingencias de cortocircuito. Esta habilidad se ve influenciada por las características inherentes al sistema, la carga, así como las interacciones entre los controles continuos y discretos, y las medidas de protección.

- Estabilidad de tensión de corto plazo:

La estabilidad de tensión de corto plazo involucra la dinámica en el tiempo de los componentes rápidos de la carga, tales como motores de inducción, cargas controladas electrónicamente, y los convertidores de la HVDC. El período del estudio de interés está en el orden de varios segundos, y el análisis requiere la solución de las ecuaciones diferenciales del sistema; esto es similar al análisis de la estabilidad del ángulo del rotor.

- Estabilidad de tensión de mediano plazo:

La estabilidad de mediano plazo se orienta hacia oscilaciones de potencia entre máquinas sincrónicas, incluyendo los efectos de algunos de los fenómenos más lentos de variación de voltaje o frecuencia. Un rango típico de periodos de duración va desde los 10 segundos hasta unos pocos minutos, lo cual corresponde a fenómenos como el control de la fuerza motriz, la limitación del campo del generador (OXL), la regulación de tensión de transformadores, etc.

- Estabilidad de tensión de largo plazo:

La estabilidad de tensión a largo plazo aborda la dinámica de componentes de respuesta más lenta, como los cambiadores de tomas de transformadores (tap), cargas reguladas por temperatura y limitadores de corriente del generador. El periodo de observación se extiende a varios minutos, y para analizar el funcionamiento dinámico del sistema, se requieren simulaciones a largo plazo. En contraste, el análisis estático puede emplearse para estimar los márgenes de estabilidad, identificar los factores que influyen en la estabilidad y analizar una amplia variedad de condiciones del sistema y escenarios [4].

### **2.3.1. Factores que afectan la estabilidad de tensión.**

- Características de la carga: la variabilidad de las cargas es determinante en la estabilidad de tensión, grandes caídas o aumentos de consumo pueden generar problemas en dicha estabilidad.
- Capacidad de generación: la capacidad de los generadores para suministrar potencia reactiva es fundamental para mantener la tensión en los niveles deseados.
- Capacidades de compensación de reactivos: la capacidad de compensación reactiva de un sistema es determinante para mantener la tensión en niveles adecuados. Dispositivos como condensadores y reactores ayudan a compensar la potencia reactiva, mejorando la estabilidad de tensión [4].

### **2.3.2. Variaciones de tensión**

Las variaciones de tensión, también conocidas como fluctuaciones de tensión, se refieren a cambios temporales en el nivel de tensión en un sistema eléctrico. Estas variaciones pueden ocurrir debido a diversas razones y pueden manifestarse de diferentes maneras. Algunas de las formas comunes de variaciones de tensión incluyen:

- Variaciones lentas: incluyen tanto variaciones previsibles (periódicas) como aleatorias. Las variaciones previsibles periódicas se originan en los cambios periódicos de los consumos. Las variaciones aleatorias provienen de las conexiones y desconexiones de los consumos, que ocurren en instantes imprevisibles, así como del hecho de que los consumos reales son siempre algo distintos de los supuestos.
- Variaciones del tipo parpadeo (flicker): consiste en variaciones cíclicas de la envolvente de tensión con valores entre el 90 % y el 110 % del valor nominal. Es una variación rápida de tensión de forma repetitiva. Se deben a los golpes de corriente causados por el funcionamiento intermitente de algunos equipos que toman y botan carga en forma brusca.

- Caídas de tensión: es el resultado catastrófico de una serie de eventos presentados en el sistema que conduce a la caída de tensión en un nodo o varios del sistema. Una caída de tensión ocurre cuando no hay suficiente potencia disponible para suministrar en un área. La deficiencia de la potencia lleva a la caída de tensión. Si los límites de transferencia de potencia se sobrepasan, el sistema se vuelve vulnerable a cualquier disturbio en la red, lo cual puede conducir a una caída de tensión. Ocurren cuando la tensión se encuentra por debajo del valor 90 %, de breve duración (desde fracciones de segundo hasta algunos segundos) y de amplitudes muy variables (hasta del 100 % de la tensión) Las caídas de tensión son clasificadas de acuerdo con la duración de los eventos inestables que conllevan al mismo como: largo, mediano y corto tiempo.
  - Caída de tensión de largo plazo: es el resultado final de los eventos inestables creados por pequeños disturbios entre la carga y la generación que provocan sobrecargas en el sistema, los cuales duran desde minutos hasta varias horas.
  - Caída de tensión de corto plazo: es el resultado final de los eventos inestables creados por varios disturbios ocasionados debido a grandes cambios en el suministro o el consumo de reactivos, que hacen que se presente una rápida disminución de los reactivos del sistema; estos eventos pueden durar entre varios segundos hasta minutos.
  - Caída de tensión transitoria: es el resultado final de los eventos inestables creados por disturbios muy grandes como la pérdida de paso y el arranque de motores de inducción, provocando una rápida deficiencia de reactivos, los cuales duran menos de 15 segundos [4][7].

## 2.4. Métodos de análisis de estabilidad de tensión

### 2.4.1. Análisis dinámico

El análisis dinámico considera las respuestas del sistema a perturbaciones transitorias, como fallos o cambios bruscos en la carga. Este análisis es crucial para entender cómo el sistema se recupera de perturbaciones temporales. Se enfoca en la evolución temporal de las variables del sistema y en cómo estas responden a cambios rápidos, utilizando ecuaciones diferenciales que describen el comportamiento dinámico de los generadores, cargas y otros componentes del sistema. El análisis dinámico es fundamental para evaluar la estabilidad transitoria y diseñar sistemas de control y protección adecuados [4].

## 2.4.2. Análisis estático

El análisis estático involucra el estudio de las condiciones de operación en estado estable del sistema eléctrico. Este tipo de análisis se enfoca en el comportamiento del sistema bajo condiciones normales y después de que el sistema ha alcanzado un nuevo estado de equilibrio tras una perturbación. Utiliza modelos matemáticos para predecir el comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones de carga y generación. El objetivo principal del análisis estático es asegurar que las tensiones y corrientes en el sistema se mantengan dentro de límites aceptables durante la operación normal y las contingencias [4].

En esta memoria, nos centraremos en los métodos de análisis estático para evaluar la estabilidad de tensión, y en particular en las curvas PV y las simulaciones de estado cuasi-Estacionario. Dado que queremos observar el comportamiento del sistema en régimen permanente y no las respuestas transitorias. Este análisis nos permitirá evaluar cómo el sistema mantiene las tensiones en condiciones normales y de contingencia, asegurando que el suministro de energía.

## 2.4.3. Método de las Curvas PV y QV

Una manera fácil de examinar la estabilidad de voltaje es mediante el uso de las curvas PV y QV. Se emplea el análisis de estas curvas para llevar a cabo estudios de estabilidad e identificar los puntos críticos de operación de un sistema con su respectivo margen de cargabilidad, que corresponde al margen o diferencia entre el punto crítico de operación y la operación actual del sistema. Como ejemplo del fenómeno de tensión, se considera un sistema radial básico, donde un generador y un receptor están conectados a través de una línea con una impedancia  $Z_{LN} < \theta$ .

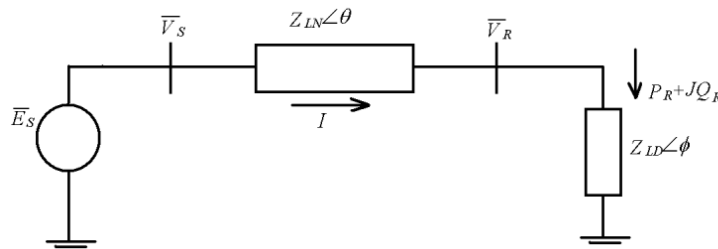


Figura 2.2: Sistema radial simple para la ilustración del fenómeno de estabilidad de tensión (imagen extraída de [4]).

Aunque en sistemas de potencia es posible simplificar el análisis al considerar únicamente la parte reactiva de la impedancia en las líneas de transmisión, esta aproximación no es adecuada para redes de distribución específicas. Esto se debe a que no se cumple la relación de X mucho mayor a R, que sí se presenta en niveles de transmisión. Por lo tanto, plantearemos la impedancia de la línea como  $Z_{LN} < \theta$ .

$$\bar{I} = \frac{\overline{ES}}{\overline{Z_{LN} + Z_{LD}}} \quad (2.1)$$

La magnitud del fasor de corriente sería:

$$I = \frac{Es}{\sqrt{(Z_{LN} \cos \theta + Z_{LD} \cos \emptyset)^2 + (Z_{LN} \sin \theta + Z_{LD} \sin \emptyset)^2}} \quad (2.2)$$

Definimos la siguiente variable auxiliar como sigue:

$$F = 1 + \left(\frac{Z_{LD}}{Z_{LN}}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_{LD}}{Z_{LN}}\right) \cos(\theta - \emptyset) \quad (2.3)$$

Por lo cual, la magnitud de corriente queda:

$$I = \frac{1}{\sqrt{F}} \frac{ES}{Z_{LN}} \quad (2.4)$$

La magnitud de voltaje en el receptor es:

$$V = Z_{LD}I = \frac{Z_{LD}}{\sqrt{F}} \frac{Es}{Z_{LN}} \quad (2.5)$$

Por último, la potencia suministrada a la carga finalmente será:

$$P_R = \frac{Z_{LD}}{F} \left(\frac{Es}{Z_{LN}}\right)^2 \cos \emptyset \quad (2.6)$$

A partir de este análisis matemático, se deduce que el factor de potencia de la carga desempeña un papel importante en la relación Potencia-Tensión del sistema. En consecuencia, se anticipa que la estabilidad de tensión esté vinculada a la relación entre V, Q y P, como se ilustra en las siguientes figuras.

La relevancia del factor de potencia se observa claramente en la figura 2.3. En primer lugar, se ha trazado la curva PV para diferentes valores de factor de potencia. Cada curva muestra un límite de estabilidad, marcado por la línea punteada. Los puntos que se sitúan por debajo de esta línea representan una región de inestabilidad, donde un aumento en la potencia activa demandada en un nodo conlleva a una caída de tensión en dicho nodo. En contraste, la región por encima de la línea punteada es una zona de estabilidad, indicando que al aumentar la potencia activa, no se produce una disminución de la tensión.

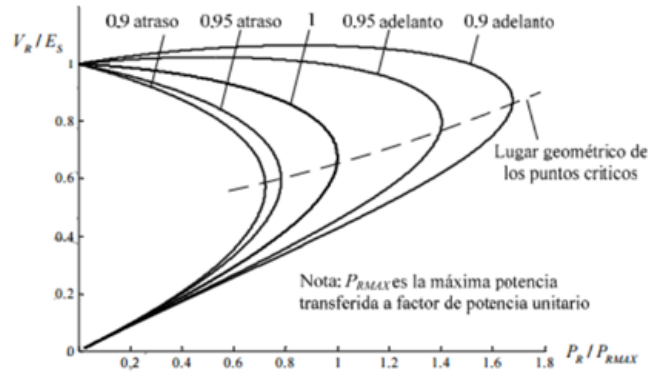


Figura 2.3: Curva PV (imagen extraída de [4]).

La figura 2.4 exhibe la Curva Q-V, destacando la conexión entre la inyección de potencia reactiva y la tensión. La línea punteada delimita el límite de estabilidad. Para generar este gráfico, es esencial mantener constante la potencia activa. La región a la izquierda de la línea punteada se caracteriza como una zona de inestabilidad, dado que se observa una relación inversa entre Q y V. En contraste, el lado derecho de la curva representa un estado de operación satisfactoria [4].

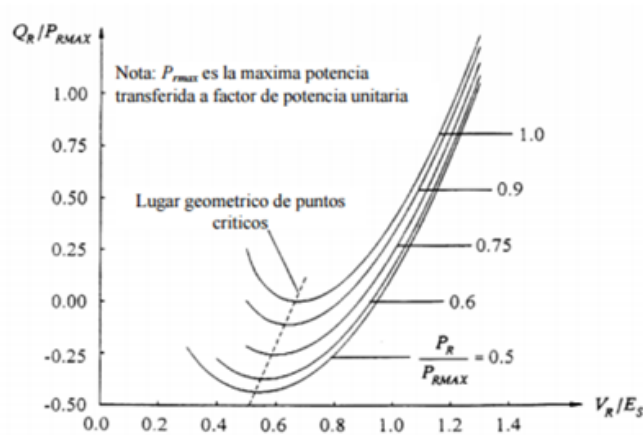


Figura 2.4: Curva QV (imagen extraída de [4]).

#### 2.4.4. Método de simulación de estado cuasi-estacionario

Las simulaciones de estado cuasi-estacionario (QSS) son una técnica utilizada en el análisis de estabilidad de tensión para evaluar el comportamiento del sistema eléctrico en situaciones donde las variaciones de carga y generación ocurren lentamente en comparación con la respuesta dinámica del sistema. Este enfoque permite estudiar el sistema a lo largo del tiempo mediante la combinación de análisis estáticos secuenciales con actualizaciones de las condiciones de operación.

El propósito de las simulaciones cuasi-estáticas es evaluar la estabilidad de tensión a mediano y largo plazo en sistemas eléctricos. Este método es particularmente útil cuando

se desea observar cómo los cambios graduales en la carga, generación y topología de la red afectan la estabilidad de tensión sin la necesidad de realizar un análisis completamente dinámico, que puede ser más complejo y computacionalmente intensivo.

Proceso de Simulación de Estado Cuasi-Estacionario:

1. Inicialización: Comienza con un estado inicial del sistema basado en un análisis de flujo de potencia en estado estacionario.
2. Actualización de Condiciones: Las condiciones del sistema, como la carga y la generación, se actualizan en pasos discretos de tiempo.
3. Resolución de Flujo de Potencia: Para cada paso de tiempo, se realiza un nuevo análisis de flujo de potencia para determinar las tensiones y corrientes en el sistema bajo las nuevas condiciones.

En una simulación de estado cuasi-estacionario, el comportamiento del sistema se modela utilizando las ecuaciones de flujo de potencia, pero se incluyen términos adicionales para representar el cambio en las condiciones de operación con el tiempo [8].

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, y) \\ 0 &= g(x, y) \end{aligned} \tag{2.7}$$

Donde:

- $x$  es el vector de variables de estado.
- $y$  es el vector de variables algebraicas.
- $f$  y  $g$  son funciones no lineales que describen las ecuaciones diferenciales y algebraicas del sistema, respectivamente.

Para el análisis de dinámica de mediano y largo plazo, se incorpora un vector de variables de acción discreta  $z$  y un vector de funciones de control  $h$ :

$$\begin{aligned} x^{(k+1)} &= f(x^{(k)}, y^{(k)}, z^{(k)}) \\ 0 &= g(x^{(k)}, y^{(k)}, z^{(k)}) \\ z^{(k+1)} &= h(x^{(k)}, y^{(k)}, z^{(k)}) \end{aligned} \tag{2.8}$$

Para los análisis de larga duración, donde los fenómenos se desarrollan en minutos u horas, se puede simplificar aún más:

$$0 = f(x, y, z) \tag{2.9}$$



## 2.5. Indicador de estabilidad de tensión

### 2.5.1. Índice de perfil de voltaje

El índice de perfil de voltaje (VPI) se formula para asignar un valor único que describa qué tan bien el voltaje se ajusta al voltaje ideal. Este índice es capaz de comparar el perfil de voltaje del sistema, el cual se mide en varios casos dados, y el caso con el mayor valor de VPI indica una mejor mejora del perfil de voltaje [6]. El VPI se puede determinar de la siguiente manera:

$$VPI = \log \left( k \times \left| \frac{1}{V_\mu - 1} \right| \right) \quad (2.10)$$

Donde,

$$V_\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i \quad (2.11)$$

y

$$k = 1 - \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_i - V_\mu)^2} \quad (2.12)$$

Donde:

$N$  = número de nodos,  $i = 2, 3, \dots, N$ .

$V_i$  = la magnitud del voltaje en el nodo  $i$ .

$V_\mu$  = el promedio de voltaje en los nodos.

## 2.6. Regulación de Tensión

La regulación de tensión se refiere al proceso de mantener las tensiones dentro de un rango específico en diferentes puntos de una red eléctrica. Esto es necesario porque los equipos eléctricos funcionan adecuadamente solo dentro de ciertos rangos de tensión. Las variaciones de tensión pueden ser causadas por cambios en la carga, generación distribuida, o fluctuaciones en la red eléctrica [7].

Las técnicas más utilizadas para regular tensión se pueden dividir en dos categorías, dispositivos convencionales y avanzados.

### 2.6.1. Dispositivos Convencionales

Los dispositivos convencionales se utilizan en redes de distribución pasivas para regular la tensión en los alimentadores primarios y secundarios. Estos dispositivos, como transformadores, reguladores de tensión escalonados (SVR), bancos de condensadores y conductores de mayor diámetro, son tecnologías maduras que pueden ser controladas manual o automáticamente.

- Transformadores:

Un transformador interviene activamente en el control de tensión, ya que presenta una relación de transformación variable mediante el uso de las derivaciones (tap en inglés) o tomas de alimentación, que le permiten aumentar o disminuir la tensión en el secundario. Los cambios en la relación de transformación se logran con el movimiento mecánico del tap. Según su operación, los tap pueden conmutarse con carga o sin carga. Tradicionalmente se utilizan transformadores con tap accionados sin carga en redes de baja tensión (BT); y transformadores con tap accionados bajo carga, denominados OLTC, en alimentadores de media tensión (MT). De acuerdo con el tipo de control, los cambiadores de tap pueden ser controlados de manera manual o automática.

- Reguladores de Tensión Escalonados (SVR):

Un SVR consta de un autotransformador provisto de un OLTC. El cambio de tensión se obtiene cambiando la posición del OLTC en el devanado en serie del autotransformador, logrando un margen de  $\pm 10\%$  de corrección de tensión. La tensión inducida en el devanado serie puede ser aditiva o sustractiva respecto al devanado primario, seleccionada mediante un conmutador de polaridad. Los SVR se instalan antes del punto donde exista un problema de caída de tensión y son relativamente lentos, adecuados para cargas que cambian lentamente durante varios minutos u horas.

- Bancos de Condensadores:

En los sistemas de distribución se utilizan bancos de condensadores, fijos o conmutados, para elevar la tensión, reducir la caída de tensión del alimentador y mejorar la tensión en el punto de conexión.

- Bancos de Reactores:  
Los bancos de reactores se utilizan para controlar la potencia reactiva y regular la tensión en sistemas eléctricos. Proporcionan una inductancia controlable que puede ser ajustada para compensar la potencia reactiva excesiva, mejorando la estabilidad y eficiencia del sistema eléctrico. Estos bancos son especialmente útiles en situaciones donde es necesario reducir la sobrecarga de reactivos en la red y mantener niveles de tensión adecuados.
- Compensación Serie y Paralelo:  
La compensación serie implica la conexión de dispositivos, como reactores, en serie con la línea para regular la impedancia y mejorar la estabilidad de la tensión. Por otro lado, la compensación paralela se logra mediante la inserción de condensadores, que reducen la reactancia y mejoran la eficiencia de la transmisión al compensar la potencia reactiva. Estas técnicas tradicionales son parte integral de la regulación de tensión en sistemas de distribución eléctrica.
- Conductores de Mayor Diámetro:  
El uso de conductores de mayor diámetro en redes de distribución puede reducir las pérdidas de línea, lo que mejora la eficiencia de la transmisión de energía. Al disminuir la resistencia del conductor, se minimizan las pérdidas de energía debidas al efecto Joule, permitiendo un suministro de energía más eficiente y estable en todo el sistema.
- STATCOM (Compensador Síncrono Estático) :  
Un STATCOM es un dispositivo flexible de los sistemas de transmisión alterna (FACTS), está basado en un convertidor de fuente de voltaje que convierte un voltaje de entrada de continua (DC) en un voltaje de salida de alterna (AC) para compensar la potencia reactiva del sistema. Por lo general, la salida reactiva de un STATCOM se regula para mantener el voltaje deseado en el nodo al que está conectado. Puede proporcionar control de voltaje en sistemas de transmisión o distribución con una respuesta de control rápida. La función es similar al control de potencia reactiva de la generación, excepto que un STATCOM proporciona una solución independiente del generador. Actualmente, el despliegue de STATCOM está restringido por los elevados costes.

### 2.6.2. Dispositivos Avanzados

Estos dispositivos brindan prestaciones avanzadas para el mejoramiento de la calidad de la energía gracias a la incorporación de la electrónica de potencia y el uso de almacenadores de energía. Poseen ventajas notables frente a los dispositivos tradicionales debido a sus capacidades de control y regulación, lo que los convierte en dispositivos de uso frecuente en las redes eléctricas. Sin embargo, en las aplicaciones de redes de distribución, su alto costo supone una barrera de entrada para su implementación.

- **DVR (Restaurador Dinámico de Tensión):**  
El DVR es un compensador serie diseñado para proteger cargas críticas o sensibles de sub-tensiones tensión (sag) y sobre-tensiones temporales (swell). Está constituido por una fuente de alimentación de corriente continua (DC), un convertidor VSI (Voltage Source Inverter) y un transformador de potencia que está conectado en serie con la línea de alimentación a la carga. Ante una perturbación, como una sub-tensión, el DVR inyecta una corriente alterna (AC) a través del transformador desde la fuente de energía DC mediante el uso de IGBT. Esta funcionalidad permite regular la tensión, mejorar las caídas de tensión y reducir los desequilibrios de tensión en alimentadores residenciales de BT.
- **DSTATCOM (Compensador Estático de Distribución):**  
El DSTATCOM es un dispositivo conectado en paralelo utilizado principalmente para proporcionar compensación de potencia reactiva para soporte de tensión. Consta de un solo VSI y un transformador conectado en paralelo al punto de conexión por donde se inyecta la potencia. Su capacidad es similar a la del condensador sincrónico o de un SVC (Static VAR Compensator).
- **UPFC (Controlador de Flujo de Potencia Unificado):**  
El UPFC consta de dos convertidores VSI interconectados por un enlace común de DC a un condensador de almacenamiento. Uno de los convertidores está en serie con la línea (convertidor en serie) y el otro está en paralelo (convertidor en derivación). Esta disposición permite al UPFC regular la tensión, proporcionar compensación en serie, regulación de ángulo de fase y control de flujo de potencia [9] [10].

## 2.7. Estado del arte

El documento *“Mitigation of Power Quality Problem in Underground Mine Using Different Control Strategies”* analiza los problemas de calidad de energía en minas subterráneas, que son críticos debido a las fluctuaciones de voltaje asociadas con la lejanía a la alimentación de la carga y el uso intensivo de maquinaria grande y sensible. La investigación destaca la implementación de un DSTATCOM (Compensador Estático de Distribución) utilizando diferentes estrategias de control como el control proporcional integral (PI) y el control de histéresis de voltaje para mitigar estos problemas.

El uso de controladores PI y de histéresis demuestra ser efectivo en la reducción de la distorsión armónica total (THD), con el controlador de histéresis mostrando una superioridad en la estabilidad de la tensión al reducir más efectivamente las fluctuaciones de voltaje. La simulación y resultados obtenidos en MATLAB/SIMULINK indican una mejora significativa en la calidad de energía, lo cual es crucial para la operación eficiente y segura de la maquinaria pesada en entornos mineros subterráneos [11].

El estudio *“Energy Quality and Efficiency of an Open Pit Mine Distribution System: Evaluation and Solution”* investiga y propone soluciones para problemas de calidad de energía en sistemas de distribución de minas a cielo abierto, centrándose en la mejora de la eficiencia y la estabilidad operativa. Los problemas específicos abordados incluyen fluctuaciones de tensión, armónicos, y alto consumo de potencia reactiva, que impactan directamente en la operatividad de las palas mineras. El documento propone cuatro alternativas estratégicas para mejorar la calidad de la energía:

- Compensación de potencia reactiva vs adición de un nuevo alimentador:
  - Compensación de potencia reactiva: se explora la utilización de dispositivos de compensación para mejorar el factor de potencia y reducir las pérdidas generadas por potencia reactiva. Esta estrategia es beneficiosa para controlar y estabilizar la tensión en puntos críticos del sistema de distribución.
  - Adición de un nuevo alimentador: se considera la posibilidad de añadir un nuevo alimentador para distribuir mejor la carga y reducir las fluctuaciones de tensión. Esta alternativa podría ser más costosa, pero proporciona una solución a largo plazo para problemas de estabilidad de tensión y distribución de carga.
- Re-dimensionamiento de cables de alimentación: se sugiere modificar el tamaño de los cables de alimentación utilizados para conectar las palas a la subestación móvil. El re-dimensionamiento pretende adecuar la capacidad de los cables a las demandas actuales de potencia, reduciendo las caídas de tensión y las pérdidas energéticas durante la transmisión.
- Aumento del tamaño de las subestaciones móviles:

Ampliar el tamaño de las subestaciones móviles podría facilitar una mejor regulación de la tensión y manejo de la carga, permitiendo que las palas operen más eficientemente al estar mejor respaldadas por una infraestructura adecuada que puede manejar mayores demandas de energía sin degradar la calidad de esta.
- Adición de un nuevo alimentador al loop de la mina: esta propuesta busca integrar un alimentador adicional en el loop de distribución de la mina para mejorar la redundancia y la capacidad de distribución de energía. La adición de este nuevo alimentador puede ayudar a balancear la carga en toda la mina, mejorando la estabilidad y la calidad de la tensión en todas las operaciones mineras [3].

El documento titulado *“Voltage Regulation in Mine Power Distribution Systems: Problems and Solutions”* explora en profundidad los desafíos asociados con la regulación de voltaje en los sistemas de distribución de energía de minas a cielo abierto.

El documento aborda los problemas persistentes de regulación de voltaje en sistemas de distribución de minas, que son especialmente críticos debido a las largas distancias de los cables, la topología cambiante de los sistemas de distribución de energía y la no linealidad de las cargas dadas por la maquinaria utilizada, como palas y perforadoras. Estos factores crean fluctuaciones significativas de voltaje que pueden impactar gravemente en la operación de la maquinaria, desencadenando el actuar de las protecciones y afectando la producción minera.

Con respecto a las características operativas se menciona que los sistemas de distribución de energía de la mina emplean líneas de media tensión y transformadores para energizar equipos como palas y perforadoras. Se discute cómo la variabilidad en el número de equipos y la distancia de las líneas afecta la calidad de la energía, manifestándose en fluctuaciones de voltaje, armónicos y problemas de factor de potencia.

Por otro lado, se presentan mediciones de voltaje y corriente reales obtenidas en diferentes instalaciones mineras para analizar la regulación del voltaje y los perfiles de carga de los equipos críticos.

El documento sugiere varias alternativas prácticas para mejorar la regulación del voltaje. Destaca el uso de compensación activa en serie, que ofrece ventajas importantes al proporcionar una regulación de voltaje más estable en los terminales de la carga crítica.

El estudio concluye que la regulación efectiva del voltaje es crucial para la operatividad y eficiencia de las minas a cielo abierto. Se recomienda implementar soluciones que se adapten a la dinámica específica de cada mina para mitigar los efectos adversos relacionados con la calidad de la energía [1].

El documento titulado "*The Optimal Location and Sizing of Single and Multiple STATCOM Using Analytical Approaches Under High Loading Occasion*" presenta métodos analíticos para determinar la ubicación y el tamaño óptimos de compensadores síncronos estáticos (STATCOM) en redes eléctricas, utilizando índices como el factor de sensibilidad de pérdidas (LSF), el índice de pérdidas de potencia (PLI) y el índice de estabilidad de voltaje (PSI). Se realizó un estudio en dos sistemas de referencia de IEEE (IEEE 14 bus y IEEE 33 radial distribution system) utilizando DigSILENT. Los resultados buscan minimizar la pérdida de potencia activa, reducir la variación de voltaje y mejorar los márgenes de estabilidad bajo diversas condiciones de carga.

Se destacan los siguientes hallazgos clave:

- Líneas críticas: se identificaron líneas críticas para la inestabilidad de voltaje y altas pérdidas de potencia bajo condiciones de carga normales y altas.
- Ubicación de STATCOM: se determinó que la mejor ubicación para la integración de STATCOM es el Bus 33 para la reducción de pérdidas de potencia, mientras que el Bus 18 mostró la mejora más significativa en el perfil de voltaje.
- Estabilidad de voltaje: la integración de STATCOM mejoró significativamente la estabilidad de voltaje, especialmente en el Bus 33.
- Mejoras en el rendimiento: la integración de STATCOM en ubicaciones óptimas reduce las pérdidas de potencia y mejora los perfiles de voltaje, siendo más efectiva la integración de múltiples STATCOM en comparación con una sola unidad.

El estudio enfatiza la importancia de la colocación y el dimensionamiento óptimos de dispositivos FACTS para minimizar las pérdidas de potencia y mejorar los perfiles de voltaje en sistemas de distribución eléctrica [6].

El documento titulado “*Systematic approach for optimal placement and sizing of STATCOM to assess the voltage stability*” discute un enfoque sistemático para la ubicación y dimensionamiento óptimos de compensadores sincrónicos estáticos (STATCOM) con el fin de mejorar la estabilidad de voltaje en sistemas de energía deficientes en potencia reactiva. Se destaca la importancia del soporte de potencia reactiva para prevenir las caídas de voltaje y se presenta una metodología utilizando el método de Flujo de potencia de continuación (CPF) o curvas PV implementado en la caja de herramientas PSAT de MATLAB. El estudio analiza sistemas de prueba estándar IEEE-6 e IEEE-14 bajo diversas condiciones, incluyendo cambios de carga y contingencias del sistema. Los resultados indican que los STATCOM colocados y dimensionados de manera óptima mejoran los perfiles de voltaje y los márgenes de carga, siendo soluciones efectivas para problemas de estabilidad de voltaje. Los factores clave para determinar la ubicación y el tamaño óptimos incluyen la magnitud del voltaje y el margen de carga.

Además, se discuten varios estudios y análisis relacionados con la estabilidad de voltaje en sistemas de energía, enfocándose en el uso de dispositivos FACTS como STATCOM y UPFC para mejorar la estabilidad de voltaje y la capacidad de carga. Los hallazgos clave incluyen:

- Mejora de la estabilidad de voltaje: la integración de STATCOM mejora significativamente la estabilidad de voltaje y la capacidad de cargabilidad en diversas condiciones de carga y configuraciones.
- Margen de carga: se indica que el uso de un STATCOM de tamaño 3.25 p.u. aumenta el margen de carga de 2.8286 p.u. a 2.9012 p.u.
- Análisis de contingencias: el análisis muestra que STATCOM puede mejorar la capacidad de carga bajo diferentes escenarios de contingencia, como fallas de generadores y líneas.

En general, los hallazgos enfatizan la importancia de la ubicación y dimensionamiento estratégicos de los dispositivos FACTS para mejorar el rendimiento y la fiabilidad de los sistemas de energía [12].

## 2.8. Evaluación económica

La evaluación económica es un proceso analítico que busca determinar la viabilidad financiera de un proyecto, inversión o empresa. Implica el uso de métodos como el valor presente neto (VPN), la tasa interna de retorno (TIR) y el periodo de recuperación de capital (PRC). El VPN calcula la rentabilidad actual descontando los flujos de efectivo futuros, la TIR identifica la tasa de rendimiento que iguala la inversión con los flujos de efectivo, y el PRC indica el tiempo para recuperar la inversión inicial. Estos métodos ayudan a tomar decisiones informadas sobre la rentabilidad y la asignación eficiente de recursos.

Por otro lado, debemos considerar que corresponde a un flujo de caja. El flujo de caja es un registro detallado de los ingresos y egresos de efectivo de una entidad durante un periodo específico. Se divide en tres categorías: actividades operativas, de inversión y de financiamiento. Las actividades operativas reflejan los flujos de efectivo relacionados con las operaciones diarias del negocio, las actividades de inversión incluyen transacciones con activos a largo plazo, y las actividades de financiamiento abarcan la obtención de fondos y las transacciones con accionistas. El flujo de caja proporciona una visión clara de la liquidez de la empresa y su capacidad para cumplir con obligaciones financieras.

A continuación, se detallan una serie de conceptos necesarios para poder comprender los flujos de cajas y además los distintos indicadores de rentabilidad que se definirán:

- Ingresos operativos: representan los flujos de efectivo generados por las actividades operativas centrales del negocio. Incluyen las ventas de bienes y servicios.
- Egresos operativos: comprenden los costos y gastos directamente asociados con la producción y entrega de bienes y servicios. Pueden abarcar salarios, costos de materias primas, gastos operativos y otros.
- Inversiones en activos a largo plazo: reflejan los desembolsos de efectivo relacionados con la adquisición de activos fijos, como maquinaria, equipos o propiedades. Estos afectan la capacidad de la empresa para expandirse.
- Financiamiento externo o préstamos: representa el efectivo recibido a través de préstamos o emisión de deuda. Es una fuente de financiamiento que aumenta la liquidez.
- Pagos de financiamiento: comprenden los pagos de intereses y la devolución de deudas. Estos pagos afectan la carga financiera y el flujo de efectivo disponible.
- Ingresos por inversiones: refieren a los flujos de efectivo generados por inversiones financieras, como dividendos de acciones o ganancias por la venta de valores. Aumentan la liquidez.
- Impuestos sobre ingresos: representan los pagos de impuestos sobre las utilidades, lo cual afecta directamente la liquidez de la empresa.
- Cambios en el capital de trabajo: incluyen modificaciones en activos circulantes (como cuentas por cobrar e inventario) y pasivos circulantes (como cuentas por pagar). Tienen un impacto directo en el flujo de caja.



- Dividendos: representan los pagos realizados a los accionistas, lo cual reduce el flujo de efectivo disponible para reinversiones o pagos de deudas.
- Flujo de caja neto: es la diferencia entre los ingresos y egresos de efectivo, reflejando la liquidez neta de la empresa. Es un indicador crucial para evaluar la salud financiera.
- Reserva de efectivo: se refiere a la porción del flujo de caja neto que se retiene como reserva para contingencias o futuras inversiones.
- Efectivo final: es el saldo de efectivo al final del periodo y se calcula sumando el flujo de caja neto al efectivo inicial. Indica la disponibilidad final de efectivo.
- Capex (Gastos de capital): capex, que proviene de “Capital Expenditure” en inglés, se refiere a los gastos de capital. Estos son desembolsos financieros significativos que una empresa realiza para adquirir, mejorar o mantener activos a largo plazo. Los activos de capital suelen tener una vida útil extendida y contribuyen a la capacidad de la empresa para generar ingresos a lo largo del tiempo. Ejemplos de capex incluyen la compra de maquinaria, equipos, edificios, terrenos o tecnología.

La característica distintiva de los gastos de capital es que tienen un impacto prolongado en la empresa, ya que estos activos contribuyen a la producción y operación durante varios años. Los capex son cruciales para el crecimiento y la expansión de la empresa, pero suelen requerir una inversión inicial significativa.

- Opex (Gastos operativos): opex, proveniente de “Operating Expenditure” en inglés, se refiere a los gastos operativos. Estos son los desembolsos regulares y recurrentes que una empresa incurre en el curso normal de sus operaciones para mantener su actividad diaria. Los gastos operativos son esenciales para la gestión continua del negocio y para generar ingresos a corto plazo.

Los opex incluyen una variedad de costos, como salarios y beneficios del personal, servicios públicos, alquiler de instalaciones, suministros de oficina y otros gastos relacionados con las operaciones diarias. A diferencia de los capex, los opex se gastan en el periodo en el que se incurren y se registran directamente en el estado de resultados[21].

### 2.8.1. Indicadores de rentabilidad

- Valor presente neto (o actual neto): se encarga de medir el aumento o disminución de capital de los accionistas de un proyecto, este se mide, para flujos en un tiempo  $t$   $FC_t$ , una tasa de descuento en  $t$   $r_t$  y durante  $n$  periodos, como:

$$VPN = \sum_{t=0}^n \frac{FC_t}{(1 + r_t)^t}$$

De esta manera se puede notar que a una mayor tasa de descuento (manteniendo los mismos flujos) el VPN tenderá a disminuir. Este indicador se utiliza para elegir entre proyectos mutuamente excluyentes en donde se escoge aquel con mayor VPN o diferencia de VPN, para el caso de diferenciación de alternativas.

Los criterios de decisión del VPN son:

- $VPN > 0$ ; Conviene realizar el proyecto.
  - $VPN = 0$ ; indiferente.
  - $VPN < 0$ ; No conviene realizar el proyecto.
- Tasa interna de retorno (TIR): esta tasa mide la rentabilidad del proyecto, de tal manera que hace al  $VPN = 0$ , así se aceptan los proyectos en los que la TIR es mayor que la tasa de descuento  $r$ .

$$VPN = -I + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1 + TIR)^t} = 0$$

La regla general de la tasa interna de rendimiento consiste en aceptar un proyecto de inversión si el costo de oportunidad del capital es menor que la tasa interna de rendimiento, es decir:

- $r < TIR$ , el  $VPN > 0$ .
- $r = TIR$ , el  $VPN = 0$ .
- $r > TIR$ , el  $VPN < 0$ .

Sin embargo esta presenta diferentes problemas:

- No permite comparar proyectos con distinta vida útil, a menos que se calcule la TIR ajustada (bajo el supuesto de reinvertir los flujos a la tasa de descuento).
  - No permite incorporar distintos costos de oportunidad para distintos periodos.
  - Se podría errar en la decisión al comparar proyectos mutuamente excluyentes e independientes.
  - Sólo tiene sentido usarla como indicador de rentabilidad al evaluar proyectos puros.
  - Se indefiniría cuando los flujos presentan más de un cambio de signo (ejemplo, proyectos que presenten inversiones durante el periodo de operación).
- Periodo de recuperación del capital (PRC): indica el número de periodos que demora el proyecto en recuperar la inversión realizada. Una gran desventaja es que no considera el valor del dinero en el tiempo, para poder incorporar esto es necesario utilizar el PRC Descontado.
  - Índice de rentabilidad (IR): mide la valorización del dinero invertido en el proyecto, por lo que se aceptan aquellos proyectos en que  $IR > 1$ . Se calcula de la siguiente manera:

$$IR = \frac{\sum_{t=1}^N \frac{FC_t}{(1+r)^t}}{I_0}$$

- IVAN: Corresponde a una variación del índice de rentabilidad, el cual mide el valor presente del proyecto por unidad de inversión. Se aceptan los proyectos con  $IVAN > 0$  [26].

$$IVAN = \frac{VAN}{I_0} = IR - 1$$

# Capítulo 3

## Metodología

En la siguiente sección podemos ver la metodología a seguir para cada propuesta, la cantidad de propuestas a definir será tres. Cada propuesta está enfocada en 3 zonas del sistema de distribución: salas eléctricas del STMG, parrones de maniobra del loop mina y transformadores móviles del loop mina. La justificación se basa en que estas son las zonas donde, desde un punto de vista operacional, sería factible instalar un equipo FACT.

1. Modelar la red: se modela el sistema de distribución considerando: el STMG, loop mina, cargas y los perfiles de cargas dados.
2. Realizar simulaciones cuasi-dinámicas e identificar peor/es escenario/s: mediante el uso de esta herramienta se visualizan los perfiles tensión de los nodos más importantes del STMG, loop mina y las cargas críticas. Identificando el peor escenario de operación en el cual no se respetan los límites de tensión establecidos, es decir, el escenario con peor estabilidad de tensión.
3. Realizar curva/s PV para el peor/es escenario/s de operación: mediante el uso de esta herramienta, se logran obtener los márgenes de cargabilidad de los nodos que son considerados para las propuestas de infraestructura, esto debido a que operacionalmente no todos los nodos tienen disponibilidad para ser considerados en una propuesta. Hay que mencionar que, se identificaron 3 sectores tentativos para realizar las propuestas de infraestructura, estos son: salas eléctricas del STMG, parrones de maniobra del loop mina y transformadores móviles del loop mina.
4. Identificación de los nodos más débiles del sistema mediante la observación de margen de cargabilidad y perfiles de tensión, ubicaciones óptimas: mediante los márgenes de cargabilidad y los perfiles de tensión se puede identificar los nodos más débiles del sistema. Esto se realizará para cada sector tentativo, definiendo las ubicaciones óptimas.
5. Realizar curvas PV con FACTS: para cada propuesta establecida se realiza la curva PV con el uso de equipos FACTS para cada escenario de operación obteniendo el respectivo margen de cargabilidad.
6. Verificación de la propuesta: se analiza si la propuesta cumple técnicamente con los requerimientos de tensión y margen de estabilidad, esto mediante el análisis del margen de cargabilidad, los perfiles de tensión y el valor del indicador VPI. Si la respuesta es afirmativa, tenemos el dimensionamiento óptimo. Si no, se repite el ciclo redimensionando el equipo hasta cumplir con las condiciones estipuladas.
7. Evaluación económica: luego de verificar que la propuesta cumpla con los requerimientos técnicos, ya se encuentra dimensionado el equipo FACT. Por último, se procede a evaluar económicamente la propuesta considerando, ingresos, capex, opex y los respectivos indicadores de rentabilidad (VPN, TIR y PRC).

La siguiente figura 3.1 representa al diagrama de flujo de la metodología que resume lo mencionado anteriormente.

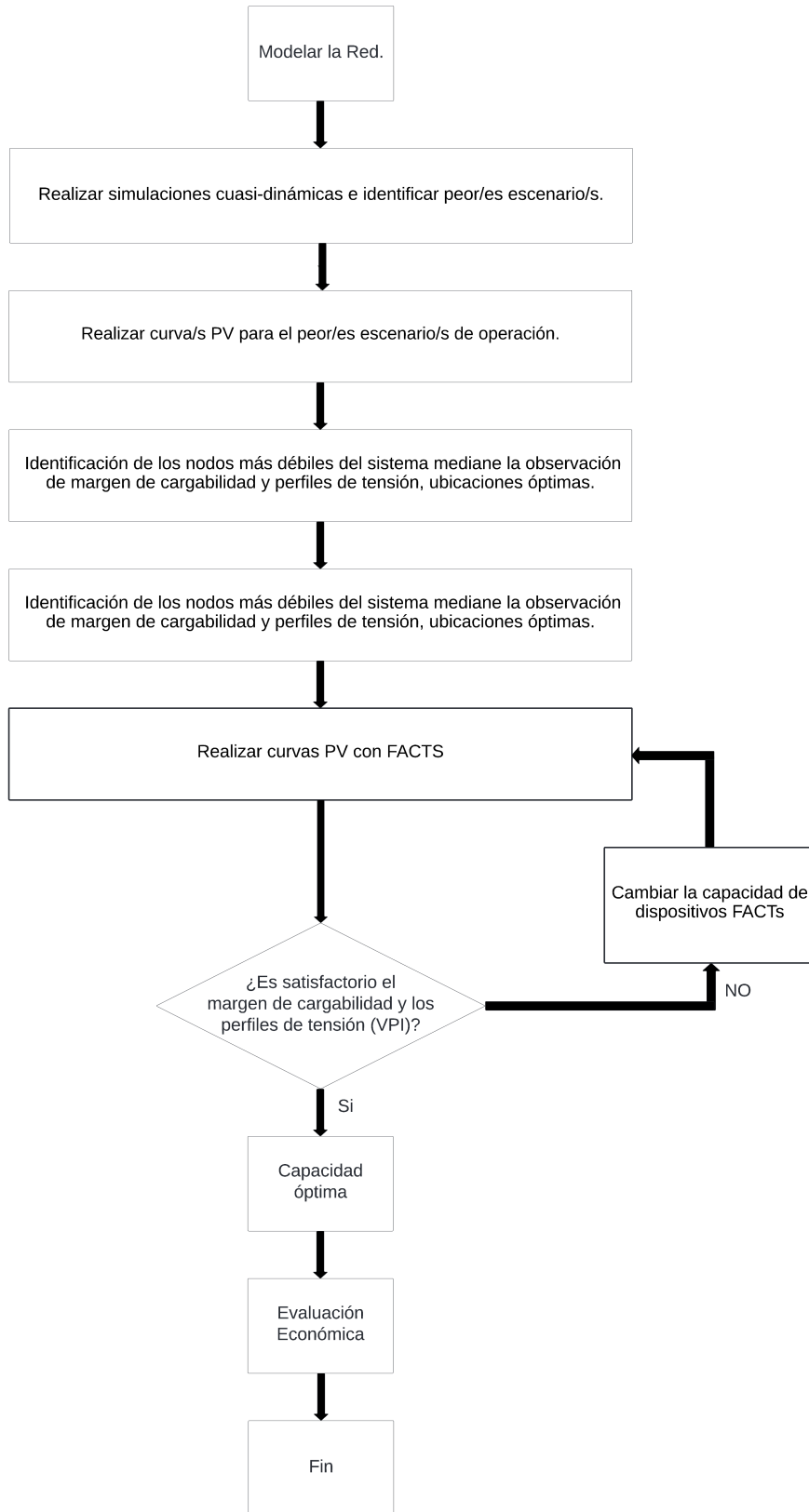


Figura 3.1: Diagrama de flujo de la metodología (basada en [12] y [?]).

# Capítulo 4

## Modelo eléctrico y casos de operación

En esta sección nos centraremos en el modelo eléctrico de la red a estudiar y sus respectivos componentes. Comenzaremos describiendo el sistema de transporte mineral grueso (STMG), que incluye el conjunto de barras, líneas, motores y cargas que conforman las correas transportadoras y el área mina. Dentro de este sistema, las barras o salas específicas a destacar son: Sala N°1, TP2, TP1, Estación Motriz y Sala N°12.

En segundo lugar, analizaremos el loop mina, que está compuesto por una serie de barras o parrones de maniobra, líneas y transformadores. Este loop constituye un circuito que permite la alimentación de las cargas de la mina, asegurando una distribución de energía eléctrica.

En tercer lugar, describiremos las cargas más significativas a considerar en este estudio, entre las cuales se incluyen las palas y las perforadoras eléctricas. Estas cargas son esenciales para las operaciones mineras y su comportamiento eléctrico es crítico para la estabilidad del sistema.

En cuarto lugar, se definirá el uso del STATCOM como el equipo FACT a utilizar para la mejora de la estabilidad de tensión.

En quinto lugar, se hablará de la herramienta computacionales a utilizar, Digsilent. De esta herramienta haremos uso para la obtención de curvas PV y las modelaciones cuasi-dinámicas.

Por último, se definirán distintos escenarios de operación basados en la experiencia de la operación de la red y en fallas documentadas. En cada uno de estos escenarios, se evaluará la influencia de la operación del STMG, los valores de tensión en la sala N°1 y la longitud de los cables mineros en la estabilidad de tensión del sistema. Este análisis permitirá identificar y mitigar posibles problemas de estabilidad de tensión, garantizando así una operación continua de la red eléctrica en la mina.

# 4.1. STMG

En la figura 4.1 se puede observar el STMG, un sistema compuesto por diversas barras, líneas, motores y cargas que en su conjunto forman la correa transportadora y el área mina.

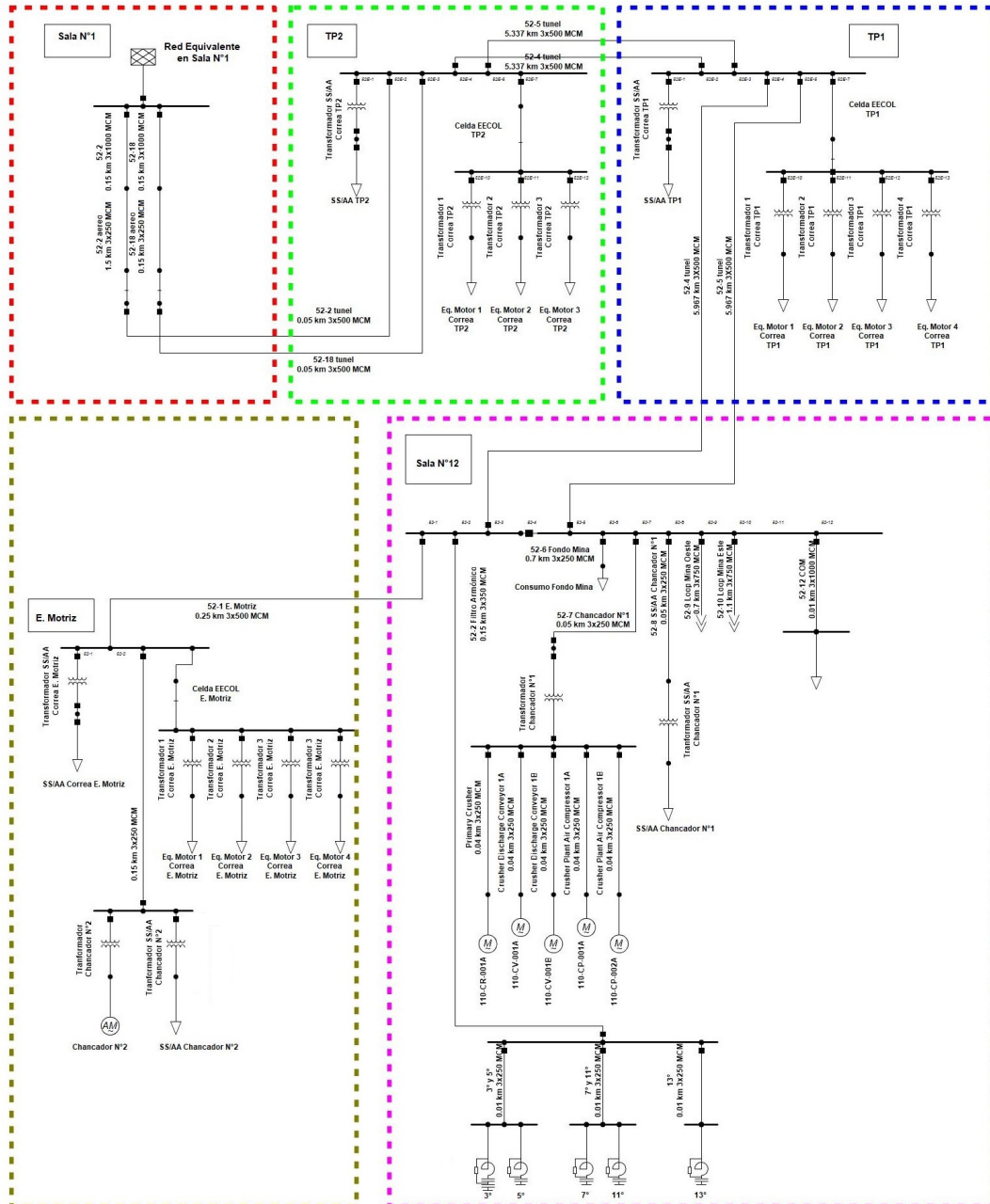


Figura 4.1: Sistema eléctrico STMG.

Encerrada en rojo se encuentra la sala N°1. Esta sección incluye una sala eléctrica con interruptores encargados de alimentar la mayoría de las cargas de Minera Los Pelambres. Sin embargo, en este modelo, se muestra conectada a una red equivalente del modelo completo de la minera. Esta sala alimenta dos líneas, cada una compuesta por tres secciones de cable tripolar de 1000, 250 y 500 MCM, que se dirigen hacia TP2.

Encerrada en verde se visualiza TP2, o la estación de transferencia N°2, que incluye una sala eléctrica con los siguientes componentes: dos interruptores que reciben alimentación desde las líneas de la sala N°1, un interruptor que alimenta el transformador de servicios auxiliares con su respectiva carga, dos interruptores que alimentan dos líneas tripolares de 500 MCM hacia TP1, y un interruptor que alimenta la celda ECCOL TP2, la cual contiene tres transformadores que alimentan cada uno un motor de 2500 kW, controlados por electrónica de potencia para diferentes arranques. Cabe destacar que tanto los servicios auxiliares como los motores y su electrónica de potencia son modelados como cargas PQ, es decir, cargas especificadas en potencia activa y reactiva.

Encerrada en azul se encuentra TP1, la estación de transferencia N°1. Similar a TP2, esta estación tiene interruptores que alimentan dos líneas de entrada desde TP2 y dos líneas de salida hacia la sala N°12, todas de cable tripolar de 500 MCM. También incluye un interruptor para los servicios auxiliares y otro para la celda ECCOL de TP1, que tiene cuatro transformadores para cuatro motores de 2500 kW, todos modelados como cargas PQ.

Encerrada en marrón está la estación motriz, que recibe una línea de la sala N°12 mediante un cable tripolar de 500 MCM. Esta estación tiene interruptores para los servicios auxiliares, una celda ECCOL con cuatro motores y cuatro transformadores, y un interruptor que alimenta el chancador N°2 con una línea de 250 MCM, un transformador y su respectivo motor, además de los servicios auxiliares del chancador N°2.

Finalmente, encerrada en rosa, se encuentra la sala N°12, que incluye una serie de interruptores: dos interruptores que reciben dos líneas tripolares de 500 MCM desde TP1, un interruptor que alimenta el filtro armónico mediante una línea tripolar de 350 MCM, un interruptor que alimenta el consumo del fondo mina mediante una línea tripolar de 250 MCM, un interruptor que alimenta el chancador N°1, compuesto por un transformador que alimenta seis motores eléctricos mediante líneas tripolares de 250 MCM, un interruptor que alimenta los servicios auxiliares del chancador N°1 mediante su respectivo transformador, dos interruptores que alimentan el loop este y oeste del loop mina, y un interruptor que alimenta el COM mediante una línea tripolar de 1000 MCM.

Es importante considerar que en la sala N°12, el filtro armónico está compuesto por cinco cargas RLC que mitigan las armónicas de 3°, 5°, 7°, 11° y 13°. El consumo del fondo mina, los servicios auxiliares del chancador N°1 y el COM son modelados como cargas PQ.

En cuanto a las tensiones de operación, las salas eléctricas (sala N°1, TP2, TP1, estación motriz y sala N°12) operan a 23 kV, los servicios auxiliares del STMG a 400 V, los distintos motores de la correa a 2.9 kV, y los motores de cada chancador a 3.45 kV. Finalmente, el filtro armónico y los consumos equivalentes del COM y fondo mina operan a 23 kV. Por último, hay que mencionar que la recomendación de regulación de tensión para las salas eléctricas



del STMG es de  $\pm 0.1$  p.u.

## 4.2. Loop Mina

En la figura 4.2 se puede visualizar la topología del loop mina, compuesta por líneas de diferentes calibres, parrones de maniobra o nodos del sistema, transformadores móviles y las respectivas cargas conectadas a estos mediante los cables mineros, que son: palas eléctricas y perforadoras eléctricas.

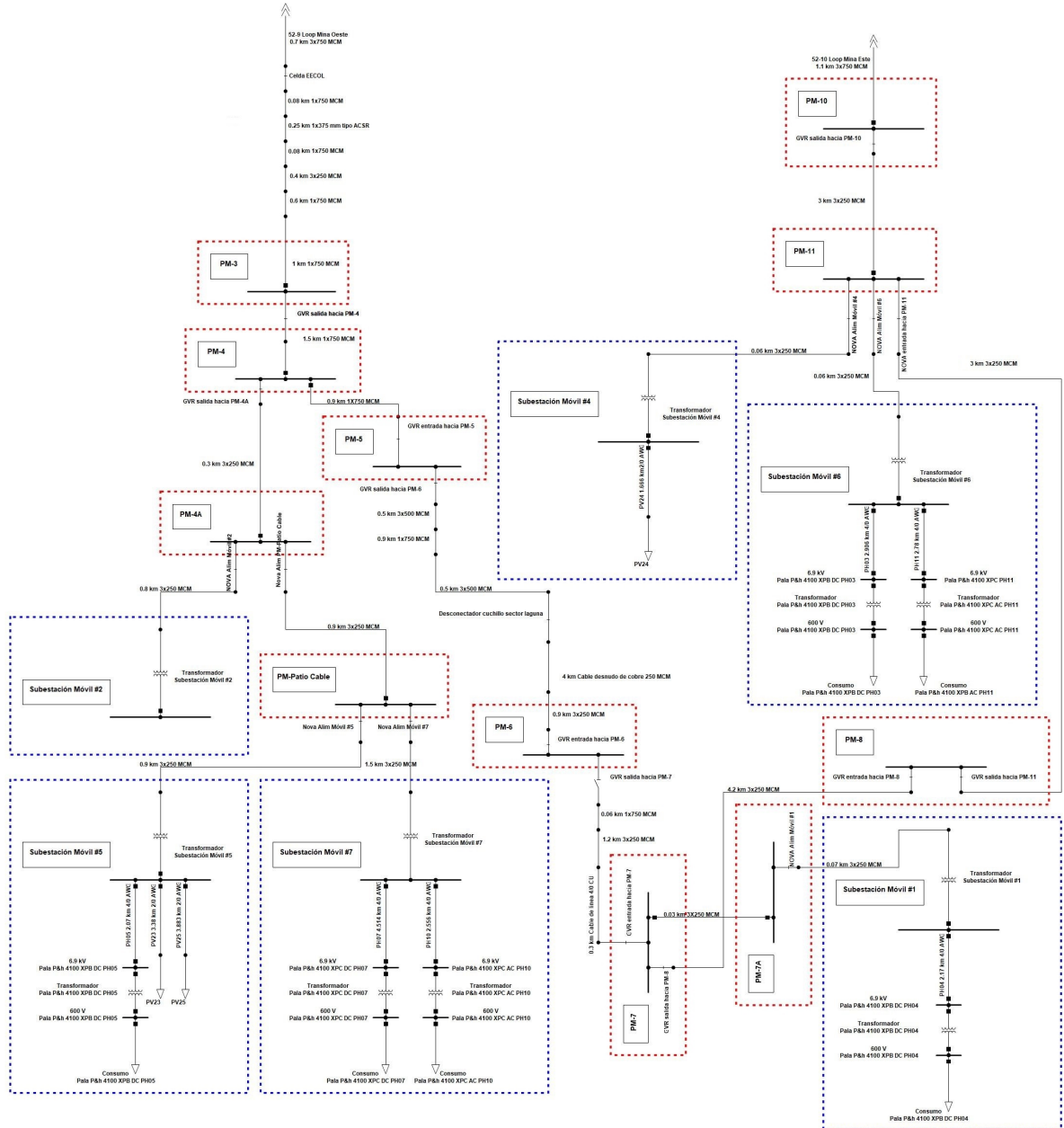


Figura 4.2: Sistema eléctrico loop mina.

En rojo se pueden visualizar los parrones de maniobra. Estos parrones son los nodos del sistema que permiten conectar y desconectar ciertas secciones del loop mina para diferentes maniobras. En el loop este se encuentran los parrones: PM-3, PM-4, PM-4A, PM-5, PM-6 y PM-Patio Cable. En el loop oeste tenemos los parrones: PM-7, PM-7A, PM-8, PM-10 y PM-11.

En azul se pueden visualizar los transformadores móviles, que se encargan de alimentar las cargas de la mina, es decir, las palas y perforadoras eléctricas. En el loop este tenemos los transformadores móviles #2, #5 y #7. Por otro lado, en el loop oeste tenemos los transformadores #1, #4 y #6.

Con respecto a las líneas y cables que conectan el loop en los distintos tramos, se tienen líneas tanto monopolares como tripolares de calibre 250, 500 y 750 MCM. Además de cables desnudos monopolares de 375 mm tipo ACSR, desnudos de cobre de 250 MCM y 4/0 AWG. Por otro lado, los cables que alimentan las palas son mineros de 4/0 AWG y los que alimentan las perforadoras son de 2/0 AWG.

En la siguiente tabla se puede visualizar a qué transformador móvil se conecta cada pala y perforadora, con los respectivos largos de los cables mineros que las conectan.

Tabla 4.1: Ubicación y largo de cables para equipos mineros.

Equipo	Transformador Móvil	Largo cable minero (m)
PH03	#6	2906
PH04	#1	2170
PH05	#5	2070
PH07	#7	4514
PH10	#7	2556
PH11	#6	2780
PV23	#5	3380
PV24	#4	1666
PV25	#5	3883

Las tensiones de operación son las siguientes: para los parrones de maniobra en 23 kV, en los niveles de tensión bajos donde se conectan las cargas a los transformadores móviles en 6.9 kV.

Por último, hay que mencionar que la recomendación de regulación de tensión para los parrones de maniobras del loop mina es de  $\pm 0.1$  p.u.

### 4.3. Palas eléctricas

Minera Los Pelambres dispone de seis palas P&H de los modelos XPC 4100 AC, 4100 XPB DC y 4100 XPC DC. Las principales especificaciones técnicas de estos modelos de palas se encuentran en [13]. Todas las palas operan bajo el mismo ciclo de trabajo, que consiste en la carga y descarga del balde en un camión. Este ciclo de trabajo, ilustrado en la figura 4.3, muestra las variaciones en los valores de potencia según los distintos movimientos de la pala. Es relevante mencionar que durante los períodos en los que es necesario frenar, la pala genera energía que es devuelta a la red.

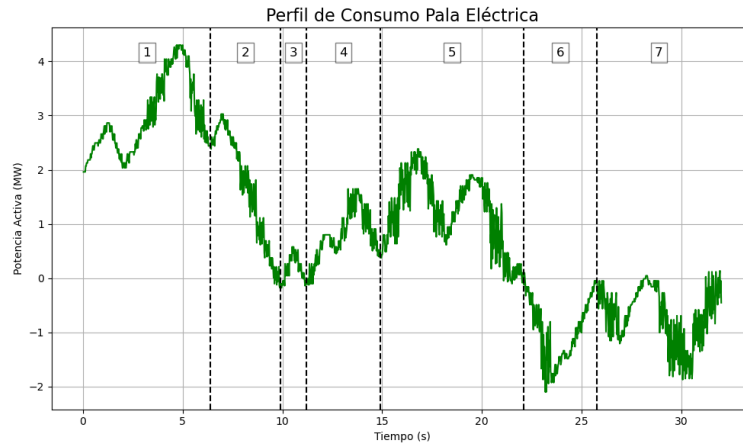


Figura 4.3: Perfil de consumo pala eléctrica P&H 4100 XPC DC [1].

Según [13], las características técnicas de las palas 4100 XPB y 4100 XPC, ambas en corriente continua, son idénticas y similares a las del modelo 4100 XPC en su versión de corriente alterna.

La figura 4.4 ilustra los movimientos involucrados en la operación de una pala. La figura 4.3 presenta el registro de la potencia activa consumida por una pala 4100 XPC DC durante un ciclo de carga y descarga del balde. Se observa que la potencia activa consumida por la pala varía, con valores positivos cuando la pala consume potencia y valores negativos cuando la pala genera potencia. La generación de potencia ocurre durante los movimientos de frenado, tanto de la tornamesa (swing) como durante el descenso del balde (hoist). La identificación de los distintos movimientos de la pala y sus correspondientes valores de potencia se muestra en la figura mencionada, con su descripción detallada en la tabla 4.2.

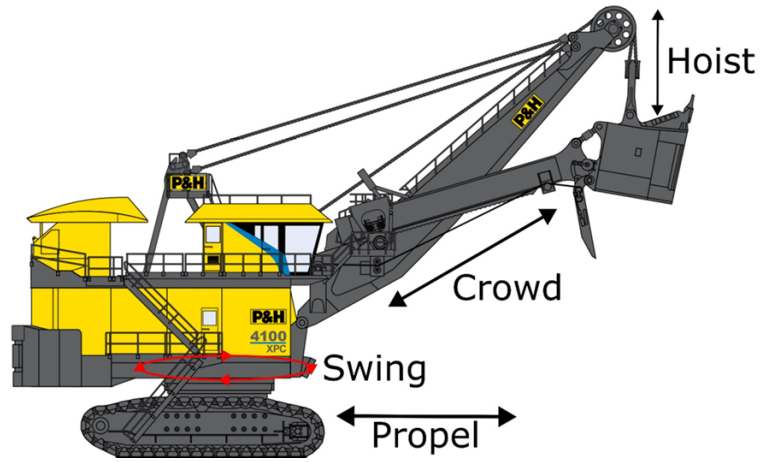


Figura 4.4: Pala P&H 4100 XPC y los movimientos asociados a su operación [15].

Tabla 4.2: Descripción de los movimientos de la pala durante un ciclo de carga y descarga del balde.

Etapa	Movimiento
1	Se carga el balde con mineral
2	Giro de la tornamesa hacia el camión con balde cargado
3	Frenado de la tornamesa
4	Descarga del mineral sobre el camión y levante del balde
5	Giro de la tornamesa hacia el cerro
6	Frenado de la tornamesa
7	Se baja el balde para comenzar nueva carga

Las palas se modelan en digisilent como una carga PQ conectada a un transformador de 6600/600 V, para la visualización de los niveles de tensión de las palas nos fijaremos bus de 600 V.

### 4.3.1. Pala P&H 4100 XPC AC

La pala P&H 4100 XPC AC viene equipada con accionamientos en corriente alterna, con capacidad de regeneración durante las etapas de frenado, especialmente durante el giro de la tornamesa (swing) y en la bajada del balde (hoist). Las potencias de los diferentes motores que mueven la pala se muestran en la tabla 4.3.

Tabla 4.3: Accionamientos de la Pala P&H 4100 XPC AC [14].

Movimiento	Accionamiento	Fuente de Potencia	Potencia nominal convertidores
Hoist	2 motores de inducción de 2388 kW c/u en 690 V	Transformador trifásico en 6600 V	4640 kVA
Crowd	1 motor de inducción de 545 kW en 690 V	Transformador trifásico en 6600 V	1160 kVA
Swing	3 motores de inducción de 1090 kW c/u en 690 V	Transformador trifásico en 6600 V	2320 KVA
Propel	2 motores de inducción de 1090 kW c/u en 690 V	Transformador trifásico en 6600 V	2320 KVA

En un ciclo de carga y descarga del balde se producen diferentes movimientos, tanto de la tornamesa como del balde, que son accionados por motores de inducción de distinta potencia. La pala P&H 4100 XPC cuenta con variadores de frecuencia del tipo fuente de voltaje con rectificadores de frente activo que usan insulated gate bipolar transistors (IGBTs), lo que permite trabajar en los 4 cuadrantes del plano P-Q, con corriente con bajo contenido armónico y factor de potencia casi unitario (0.98).

Con respecto a los niveles de tensión adecuados, en [14] se establece que los niveles en los que actúan los relés de protección para sobre-voltajes y sub-voltajes son 1.3 p.u y 0.8 p.u, respectivamente.

Dados los antecedentes es que se establece que la Pala P&H 4100 XPC AC se va a modelar como una carga PQ conectada a un transformador, que representa al propio de la pala, con un perfil de carga que se muestra en la figura 4.5 y con un factor de potencia de 0.98.

## Perfil de Consumo Pala P&H 4100 XPC AC

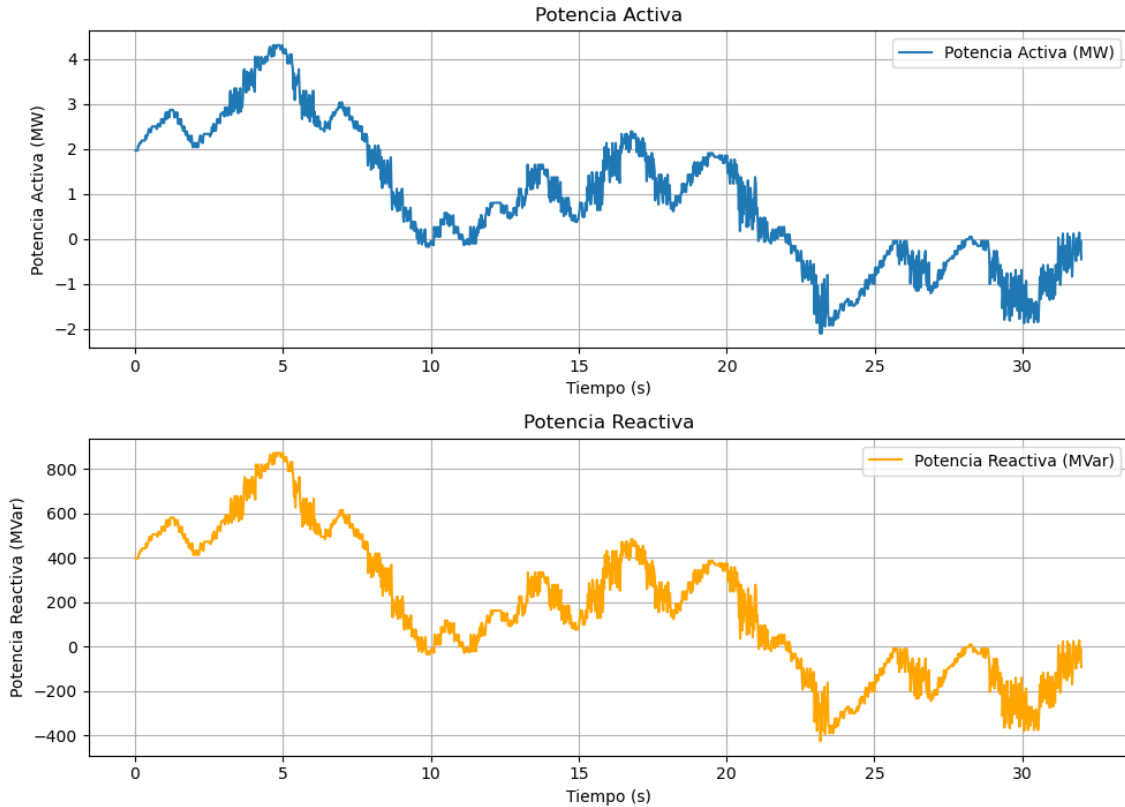


Figura 4.5: Perfil de consumo pala P&H 4100 XPC AC.

### 4.3.2. Pala P&H 4100 XPB/XPC DC

Las palas P&H 4100 XPC y P&H 4100 XPB ambas con accionamientos en corriente continua tienen las mismas características eléctricas según [13]. La tabla 4.4 muestra las características de los diferentes accionamientos asociados a cada movimiento de la pala.

En estas palas, los rectificadores usan tiristores, por lo que solo operan en el primer y tercer cuadrante (siempre con corriente inductiva). Una característica de estas palas es que vienen con un compensador de potencia reactiva de 6 MVar, compuesto por condensadores conmutados por tiristores y reactores conectados en serie.

Tabla 4.4: Accionamientos de la Pala P&H 4100 XPB/XPC DC.

Movimiento	Accionamiento	Fuente de Potencia	Conversores
Hoist	2 motores dc de 1887 kW c/u en 600 Vdc	Transformador trifásico en 6600 V	2 rectificadores para la armadura 1 rectificador para el campo
Crowd	1 motor dc de 537 kW en 600 Vdc	Transformador trifásico en 6600 V	1 rectificador para la armadura 1 rectificador para el campo
Swing	3 motores dc de 1119 kW c/u en 690 V	Transformador trifásico en 6600 V	1 rectificador para dos circuitos de armadura 1 rectificador para dos circuitos de campo
Propel	2 motores dc de 1074 kW c/u en 690 V	Transformador trifásico en 6600 V	2 rectificadores para la armadura 1 rectificador para el campo

Con respecto a los niveles de tensión adecuados, en [15] se establece que los niveles en los que actúan los relés de protección para sobre-voltajes y sub-voltajes son 1.3 p.u y 0.8 p.u, respectivamente.

Dados los antecedentes es que se establece que las palas P&H 4100 XPB/XPC DC se van a modelar como una carga PQ conectada a un transformador, que representa al propio de la pala, con un perfil de carga que se muestra en la figura 4.6 con un factor de potencia de 0.95.



## Perfil de Consumo P&H 4100 XPB/XPC DC

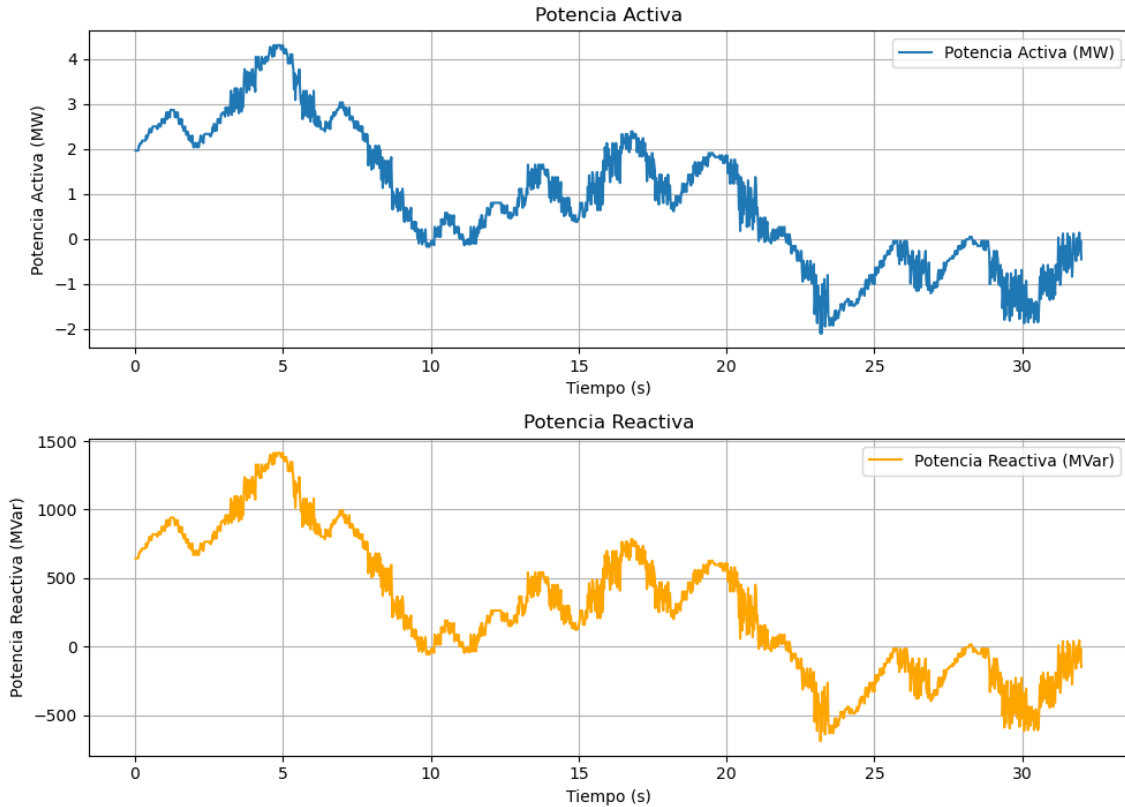


Figura 4.6: Perfil de consumo pala P&H 4100 XPC/XPB DC.

### 4.4. Perforadora Pit Viper 451

Minera Los Pelambres cuenta con perforadoras marca Pit Viper modelo 351, accionadas por un motor de inducción de 1400 HP en 6.9 kV. Estos motores de conectan directamente a la red, con partida directa, por lo que se modelan como carga PQ. El perfil de carga para la perforadora esta dado por la figura 4.7.

Con respecto a los niveles de tensión adecuados, en [16] se establece que los niveles en los que actúan los relés de protección para sobre-voltajes y sub-voltajes son 1.1 p.u y 0.8 p.u, respectivamente.

## Perfil de Consumo Perforadora Epiroc Viper 451

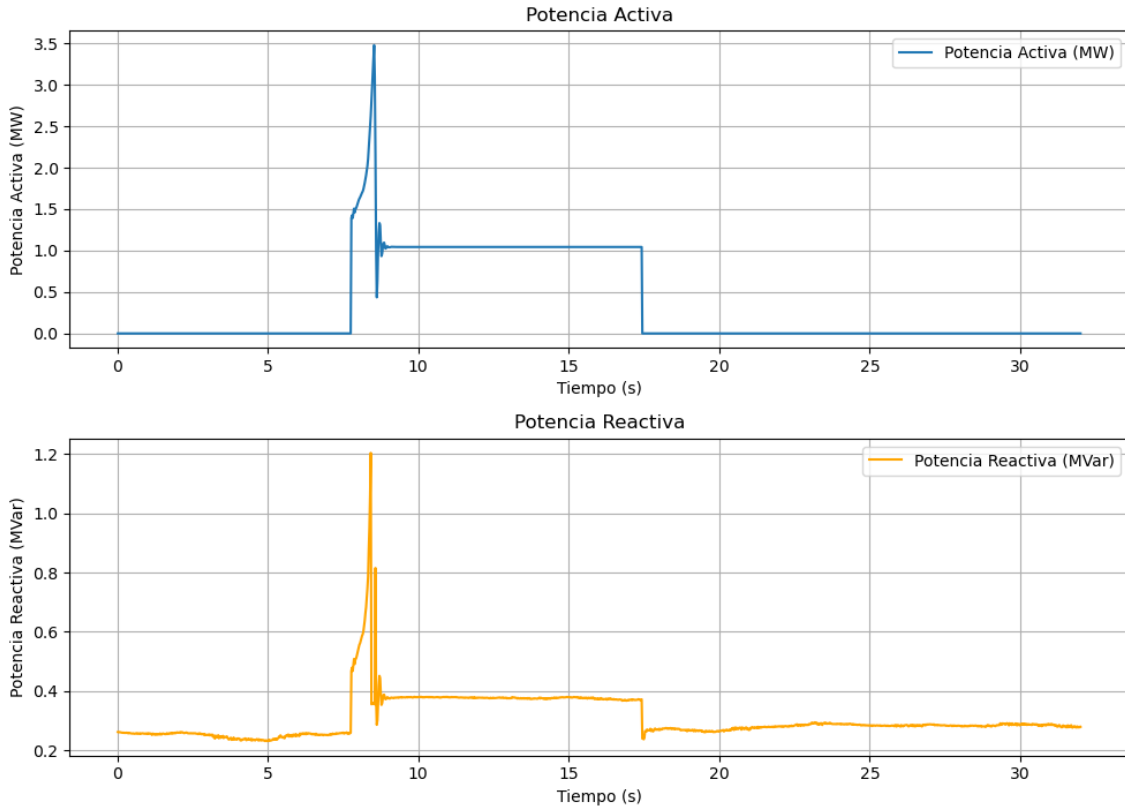


Figura 4.7: Perfil de consumo perforadora Epiroc Viper 451.

## 4.5. STATCOM como elección para las propuestas de infraestructura

La figura 4.8 muestra el diagrama esquemático de un Stacom:

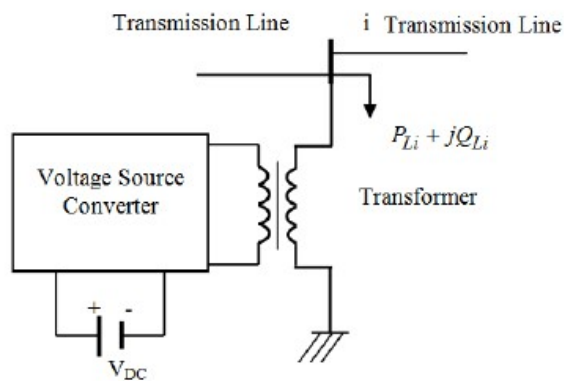


Figura 4.8: Diagrama esquemático de STATCOM.

Un STATCOM (Static Synchronous Compensator) es una excelente elección para la regulación de tensión en sistemas eléctricos por varias razones:

- Respuesta rápida y eficaz: el STATCOM puede responder rápidamente a las variaciones de tensión, proporcionando o absorbiendo reactiva según sea necesario para mantener la estabilidad de tensión.
- Mejora de la estabilidad transitoria: ayuda a mejorar la estabilidad transitoria del sistema, permitiendo que el sistema eléctrico recupere la estabilidad después de perturbaciones.
- Compensación de potencia reactiva: puede compensar la potencia reactiva de manera flexible, lo que es crucial para mantener niveles de tensión adecuados y minimizar pérdidas de energía.
- Versatilidad en aplicaciones: es adecuado para diversas aplicaciones, incluyendo la regulación de tensión en líneas de transmisión largas y la mejora de la capacidad de transferencia de potencia.
- Pequeña huella y modularidad: comparado con otros dispositivos de compensación, el STATCOM tiene una huella física más pequeña y puede ser modular, lo que facilita su instalación y expansión.

Estas características hacen del STATCOM una solución eficiente y efectiva para la regulación de tensión en sistemas eléctricos complejos. Además, se consideró la propuesta de reemplazar los cables que no fueran de 750 MCM en el loop mina por cables de dicho calibre. Sin embargo, esta propuesta fue descartada porque no resolvía los problemas de estabilidad de tensión en todos los escenarios, como se puede ver en el anexo.

## 4.6. DigSILENT como herramienta computacional

DigSILENT PowerFactory es una herramienta poderosa para el análisis y simulación de sistemas eléctricos de potencia. Entre sus múltiples funcionalidades, se destacan las herramientas para obtener curvas PV y realizar simulaciones cuasi dinámicas.

- Curvas PV:  
La herramienta de DigSILENT PowerFactory permite generar curvas PV (Potencia-Voltaje) para evaluar la estabilidad de tensión en un sistema eléctrico. Las curvas PV muestran la relación entre la potencia activa suministrada a una carga y el voltaje en el punto de carga, lo cual es crucial para determinar el margen de cargabilidad y predecir el punto de colapso de voltaje. Estas curvas son esenciales para identificar los límites operativos y la capacidad de un sistema para manejar cargas adicionales sin comprometer la estabilidad del voltaje.

- Simulaciones Cuasi Dinámicas:

DigSILENT PowerFactory también soporta simulaciones cuasi dinámicas, una técnica que permite evaluar el comportamiento del sistema eléctrico bajo condiciones cambiantes sin necesidad de realizar simulaciones dinámicas completas, que son más complejas y requieren más recursos computacionales. Las simulaciones cuasi dinámicas son útiles para analizar la respuesta del sistema a variaciones graduales en la carga o la generación, proporcionando una visión detallada de cómo el sistema se adapta a estos cambios y ayudando a predecir posibles problemas de estabilidad.

[25]

## 4.7. Escenarios de operación

Para poder establecer los escenarios de operación tenemos que analizar cuáles son los elementos que más influencia tienen en la estabilidad de tensión, tanto del sistema eléctrico compuesto por el STMG y loop mina, como por la estabilidad de tensión de las cargas críticas, es decir, palas y perforadoras. Luego de realizar un análisis exhaustivo, propio de la experiencia misma del sistema eléctrico en Minera Los Pelambres, se concluye que los principales elementos que afectan a la estabilidad de tensión son los siguientes:

- Tensión en sala N°1.
- Operación del STMG.
- Largo de los cables mineros.

Además, con objetivo de estudiar el escenario de mayor cargabilidad del sistema es que se define una coincidencia de carga de las palas y también una coincidencia de carga de las perforadoras.

### 4.7.1. Tensión en sala N°1

Primero debemos comprender que es ELSPEC G4430 Power Quality Recorder, este dispositivo es un analizador de calidad de energía que permite la grabación continua de formas de onda de hasta 1024 muestras por ciclo. Este dispositivo fue instalado en sala N°1 de Minera Los Pelambres y se recopiló información de los valores de tensión durante todo el año 2023. Mediante el uso de esta información se pudo crear la siguiente figura 4.9 que corresponde a la curva de distribución normal de voltaje en sala N°1, en dicha curva se puede ver el valor medio de tensión, y los valores alejados hasta  $\pm 2$  desviaciones estándar de la media, todo esto, con su respectiva probabilidad asociada.

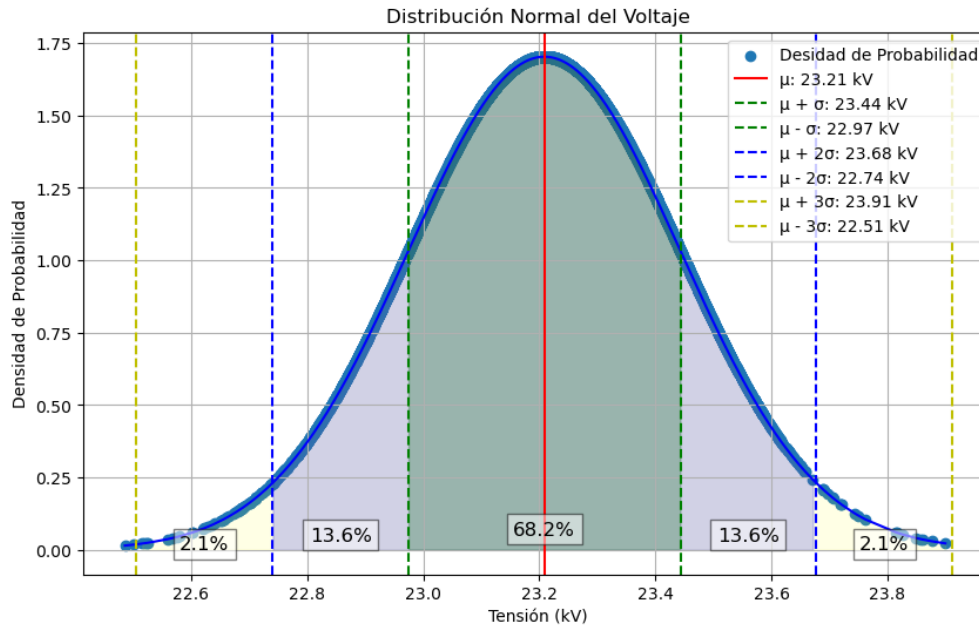


Figura 4.9: Distribución normal de tensión en sala N°1.

Se establece de esta imagen que se analizaran dos escenarios de operación, ambos corresponden a  $\pm$  dos desviaciones estándar de la media con probabilidad de un 2.1 % cada uno, estos son entonces:

- Tensión en sala N°1 en 22.74 kV.
- Tensión en sala N°1 en 23.68 kV.

#### 4.7.2. Operación del STMG

Una de las principales características del sistema de distribución de Minera Los Pelambres, es la existencia de un sistema de correas transportadoras accionadas por motores de inducción energizados desde inversores del tipo fuente de voltaje, que operan en el modo generación, esto es frenando la correa, y entregando energía a la red (22 MW). Sin embargo, existen dos modos de operación extra, el modo vacío y el modo detenido, el primero se da cuando se debe vaciar la correa por mantenencias tanto programadas como no programadas, en este caso, los motores no entregan energía, sino que la consumen (4 MW), el segundo caso se da cuando la correa está completamente detenida debido a las mantenencias, en este caso los motores no inyectan ni consumen energía. Con respecto a las probabilidades de operación de cada modo, estas fueron calculadas gracias a los estados de operación del STMG del año 2023. De esta manera se pueden definir 3 escenarios de operación para el STMG, en la tabla 4.5 se puede ver resumido lo mencionado anteriormente:

Tabla 4.5: Modos de operación del STMG y su probabilidad.

Escenario	Potencia (MW)	Probabilidad (%)
Vacío	4	0.18
Detenido	0	5.66
Funcionando	-22	94.16

La figura 4.10 muestra un esquema del Sistema de Transporte de Mineral Grueso (STMG) de Minera Los Pelambres

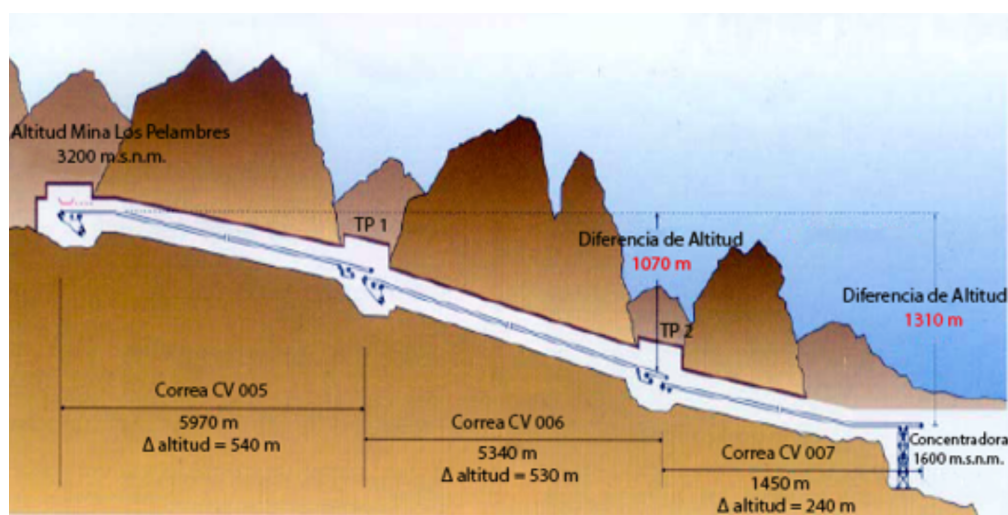


Figura 4.10: Diagrama esquemático del sistema de correas transportadoras de Minera Los Pelambres (imagen propiedad de Minera Los Pelambres).

### 4.7.3. Largo de cables mineros

El largo de los cables mineros afecta significativamente la estabilidad de tensión en un sistema eléctrico debido a la mayor resistencia y reactancia que presentan estos cables más largos. Esto provoca una caída de tensión más pronunciada a lo largo del cable, resultando en niveles de tensión insuficientes en el extremo de carga. Además, las pérdidas de potencia aumentan con la longitud del cable, disminuyendo la eficiencia del sistema y contribuyendo a una mayor caída de tensión. Desde la experiencia operacional de Minera Los Pelambres, se ha observado que el largo de los cables es un factor fundamental en los problemas de estabilidad de tensión. Es por esto que, se estudiarán dos casos de operación de largo de cables mineros. El primero, en el cual se utilizarán los largos de cables en la fecha de 19/03/2024. El segundo caso, busca capturar los cambios constantes en la topología de la red, dado por los movimientos de palas y perforadoras, esto con sus respectivos cambios en los largos de los cables de alimentación. Es por esto, que se establece aumentar todos los largos de los cables mineros a 4.5 km.

Con respecto a que equipos estarán alimentados por cada transformador móvil, estos no cambiarán de disposición, la justificación de esto es que de la propia experiencia operacional y el análisis de los cambios de topología, permitió observar que la topología actual representa a la topología con mayores debilidades, esto debido a la gran concentración de cargas en un

solo tramo del loop mina, y a la gran distancia de la alimentación.

En resumen, se analizarán dos escenarios para el largo de los cables mineros, sin extensión de cables y con extensión. En la siguiente tabla se puede visualizar un resumen de lo mencionado anteriormente:

Tabla 4.6: Escenarios para el largo de los cables mineros.

Equipo	Largo cables mineros Sin extensión de cables mineros (m)	Largo cables mineros Sin extensión de cables mineros (m)
PH03	2906	4500
PH04	2170	4500
PH05	2070	4500
PH07	4514	4514
PH10	2556	4500
PH11	2780	4500
PV23	3380	4500
PV24	1666	4500
PV25	3883	4500

#### 4.7.4. Diagrama de escenarios de operación

En la siguiente figura 4.11 se presenta el diagrama de los escenarios de operación, este resume los 12 escenarios a considerar, en donde se debe seleccionar entre dos opciones para la tensión en sala 1, dos opciones para el largo de los cables mineros y tres opciones para el funcionamiento del STMG:

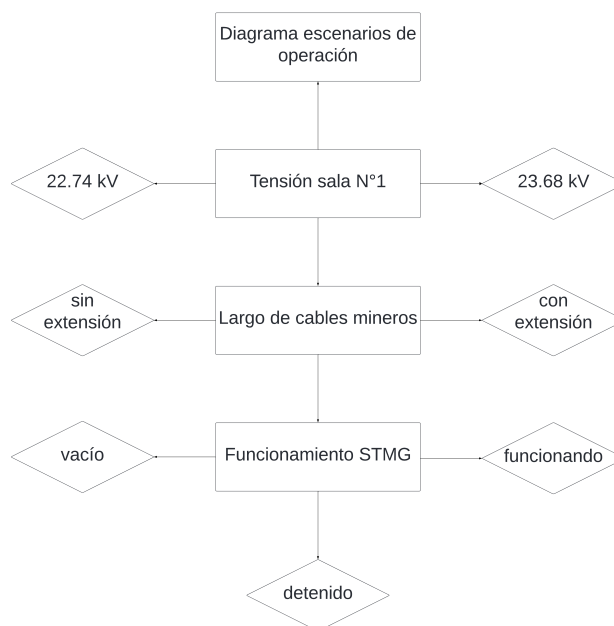


Figura 4.11: Diagrama de escenarios de operación.

# Capítulo 5

## Resultados

### 5.1. Evaluación técnica

En el análisis técnico que se realizará a continuación, se evaluarán primero los perfiles de tensión y las tensiones máximas y mínimas de los nodos en el caso base. Este paso inicial permitirá visualizar los fenómenos de inestabilidad de tensión, identificando situaciones en las que se accionan los trip de las protecciones para las cargas más críticas. Para una evaluación más completa, se utilizarán herramientas como el índice de perfil de voltaje (VPI) y el margen de cargabilidad, las cuales proporcionarán una medida cuantitativa de la estabilidad de tensión y la capacidad del sistema para soportar cargas adicionales sin comprometer dicha estabilidad.

Las mismas herramientas se emplearán posteriormente para evaluar el cumplimiento de los requisitos técnicos de cada propuesta de infraestructura. Analizando el VPI y el margen de cargabilidad, se determinará cómo cada propuesta mejora la estabilidad de tensión y se aleja de los límites en los que las protecciones se activarían. Este análisis permitirá identificar las propuestas que ofrecen una mayor robustez y confiabilidad al sistema eléctrico.

El estudio incluirá la comparación de las propuestas de infraestructura 1, 2 y 3. Esta comparación se centrará en la efectividad de cada propuesta en mejorar la estabilidad de tensión del sistema eléctrico. A través del análisis de los perfiles de tensión, las tensiones máximas y mínimas, el VPI y el margen de cargabilidad, se podrá determinar cuál de las propuestas ofrece las mejoras más significativas en términos de estabilidad y cumplimiento de los requisitos técnicos centrado en los requerimientos de las cargas críticas (palas y perforadoras).



## 5.1.1. Caso base

### 5.1.1.1. Tensión en sala N°1 de 22.74 kV

La figura 5.1 ilustra cómo la tensión en la sala N°1, la longitud de los cables mineros y las condiciones operativas del STMG (vacío, detenido y funcionando) afectan los perfiles de tensión en las palas. En general, los problemas de tensión son más pronunciados cuando el STMG está en vacío, seguidos por cuando está detenido y, finalmente, cuando está en funcionamiento. La longitud de los cables mineros provoca una peor regulación de tensión debido a la resistencia y reactancia adicionales que estos cables largos introducen en el sistema (mayores subidas y caídas de tensión). Además, durante los períodos en que las palas están regenerando energía, se observan subidas de tensión. Por último, cabe destacar que no se cumplen con los límites de tensión adecuados, lo que provocaría la actuación de los trip de las protecciones por sub-voltajes en una o más palas en todos los escenarios.

Niveles de Tensión de Palas para Caso Base - Tensión sala N°1 en 22.74 kV

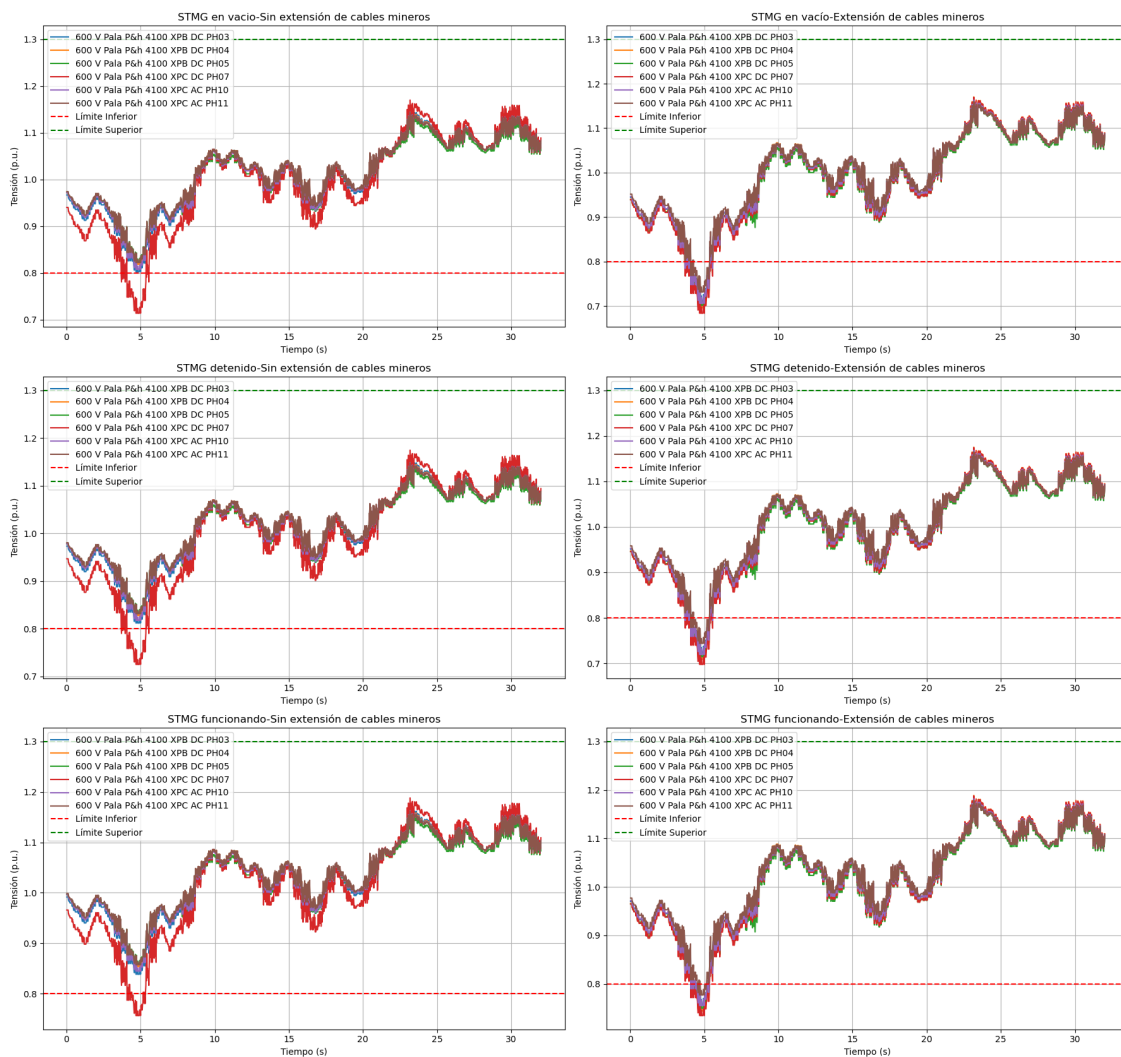


Figura 5.1: Niveles de tensión de palas para caso base - Tensión de sala N°1 en 22.74 kV.

La figura 5.2 muestra cómo la longitud de los cables mineros y las condiciones operativas del STMG (vacío, detenido y funcionando) afectan los perfiles de tensión en las perforadoras, con la tensión en la sala N°1 fijada en 22.74 kV. Similar al caso anterior, el peor escenario se presenta cuando el STMG está en vacío, seguido de cuando está detenido y, finalmente, cuando está en funcionamiento. La extensión de los cables provoca una mayor caída de tensión, especialmente bajo condiciones de carga máximas. A diferencia de las palas, las perforadoras no inyectan energía al sistema y sus perfiles de tensión se ven principalmente afectados el arranque de los motores. En la mayoría de los casos, no se cumple con los límites de tensión establecidos, lo que podría activar los trip de las protecciones por sub-voltajes en una o más perforadoras para más de un escenario.

Niveles de Tensión de Perforadoras para Caso Base - Tensión sala N°1 en 22.74 kV

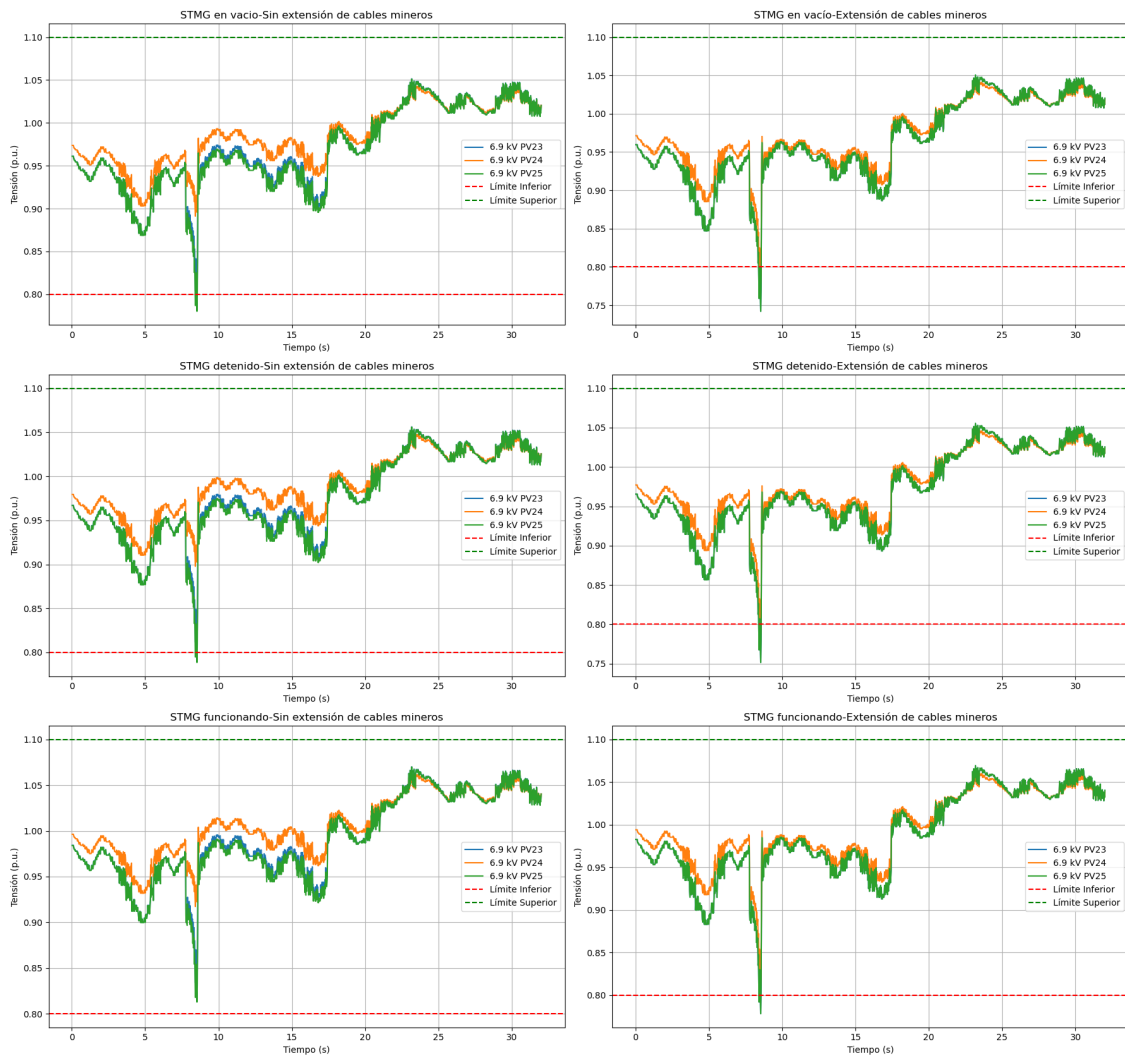


Figura 5.2: Niveles de tensión de perforadoras para caso base - Tensión de sala N°1 en 22.74 kV.

La figura 5.3 muestra los niveles de tensión en el loop mina bajo diferentes condiciones operativas (vacío, detenido y funcionando) con la tensión en la sala N°1 fijada en 22.74 kV. En varios casos, no se cumplen los límites de tensión recomendados. La extensión de los cables mineros provoca mayores caídas de tensión. Los perfiles de tensión varían significativamente según la curva de consumo de las palas, con caídas más pronunciadas durante los picos de consumo, reflejando el impacto del arranque de los motores. Los parrones más alejados de la sala N°12 y aquellos con mayor concentración de cargas presentan las mayores caídas y subidas de tensión. La operación del STMG influye en estos niveles, siendo el peor escenario cuando está en vacío, seguido de detenido y, finalmente, funcionando, donde las variaciones de tensión son menos severas pero aún significativas.

Niveles de Tensión de Loop Mina para Caso Base - Tensión sala N°1 en 22.74 kV

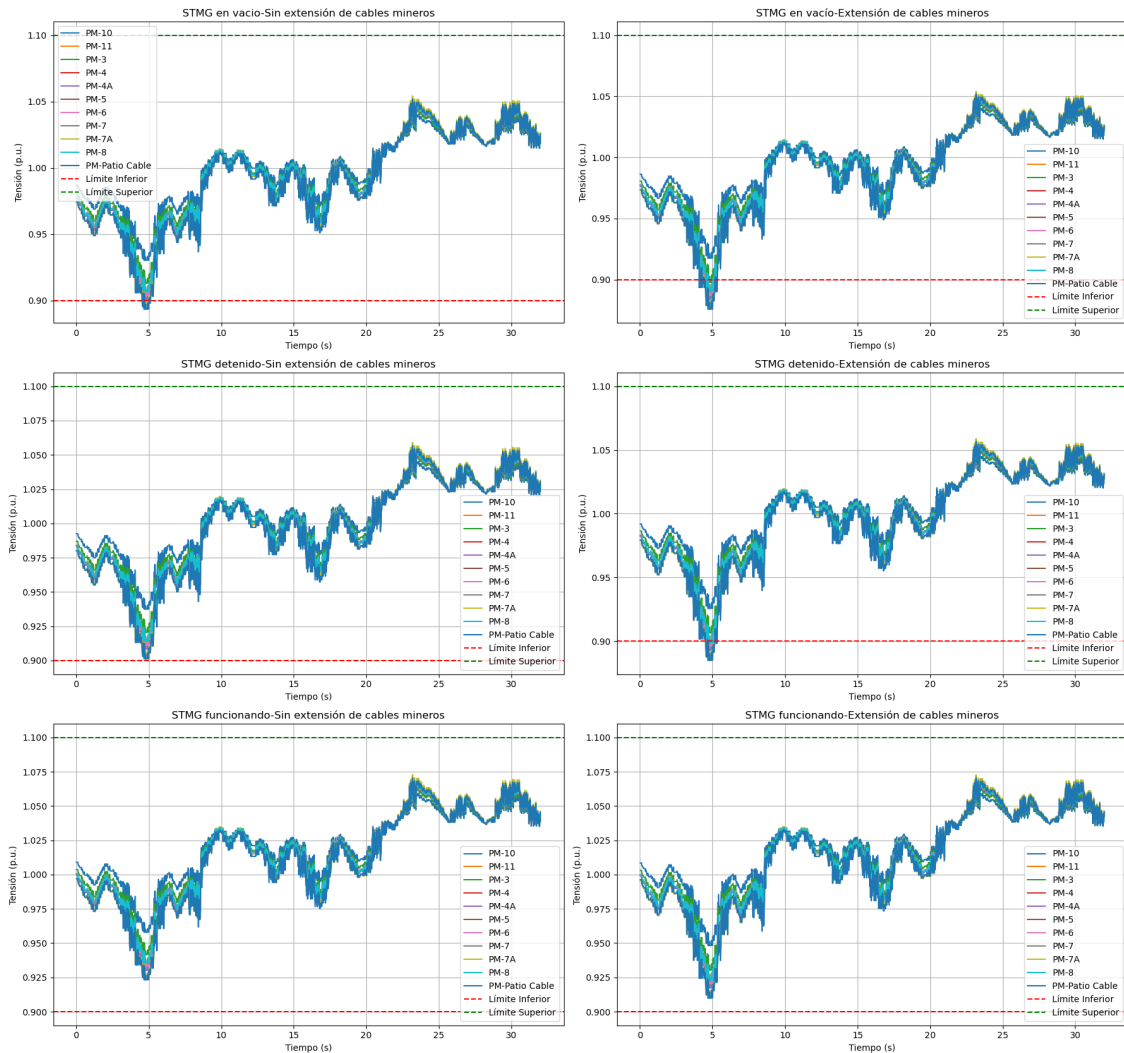


Figura 5.3: Niveles de tensión de Loop Mina para caso base - Tensión de sala N°1 en 22.74 kV.

La figura 5.4 muestra los perfiles de tensión del STMG bajo diferentes condiciones operativas (vacío, detenido y funcionando) con la tensión en la sala N°1 fijada en 22.74 kV, comparando escenarios con y sin extensión de cables mineros. Los gráficos indican que se cumplen los límites de tensión recomendados, aunque se observa una tendencia a peores perfiles de tensión en los escenarios con extensión de cables y en las condiciones operativas más desfavorables: primero en vacío, luego detenido y, finalmente, funcionando. Las salas más alejadas de la sala N°1 presentan peor regulación, con caídas y subidas de tensión más drásticas.

Niveles de Tensión de STMG para Caso Base - Tensión sala N°1 en 22.74 kV

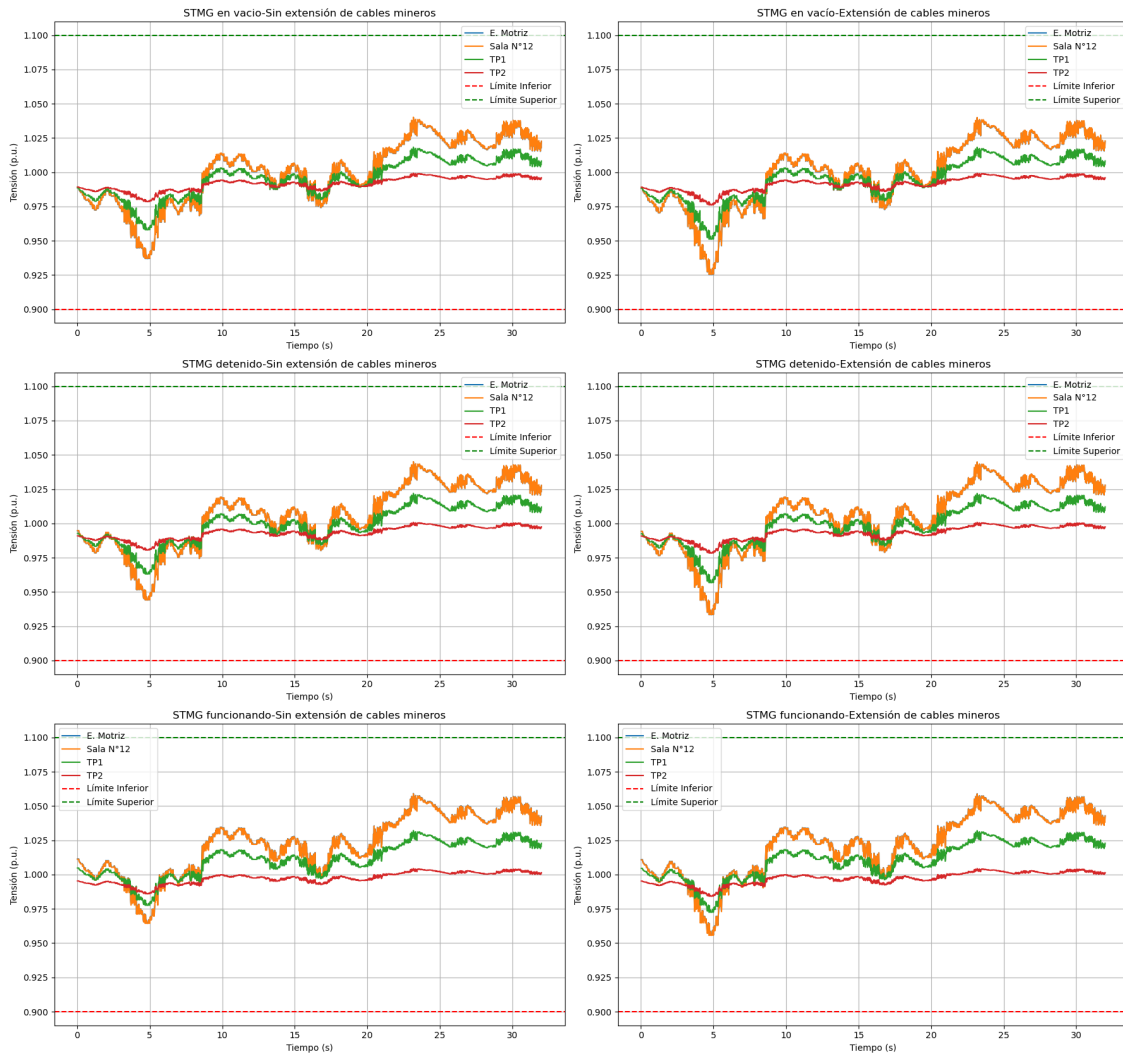


Figura 5.4: Niveles de tensión de STMG para caso base - Tensión de sala N°1 en 22.74 kV.

La figura 5.5 resume todo lo mencionado anteriormente, en esta imagen se puede visualizar de mejor manera los valores máximos y mínimos de tensión en todos los nodos (palas, perforadoras, loop mina y STMG), en donde los valores máximos se presentan cuando existe la máxima regeneración, mientras que los valores mínimos en el máximo consumo del sistema.

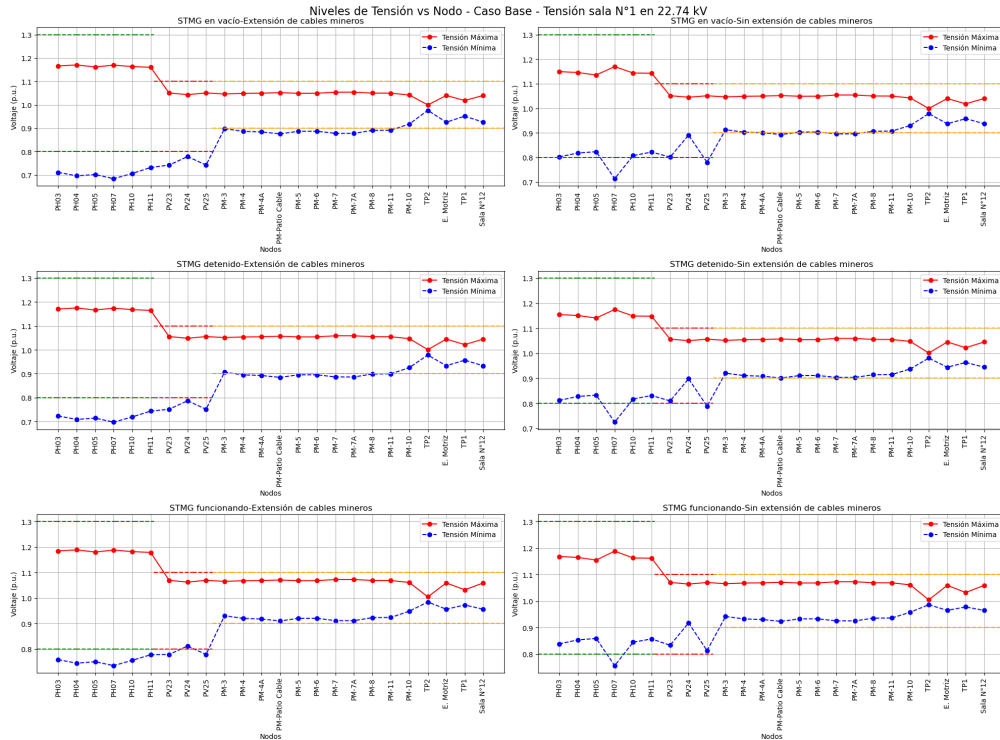


Figura 5.5: Tensión vs Nodos - Caso Base - Tensión en sala N°1 de 22.74 kV

Las palas se ordenan por peor regulación de tensión de la siguiente forma cuando no hay extensión de cables: PH07, PH03, PH10, PH04, PH11 y PH05. Cuando hay extensión de cables se tiene el siguiente orden: PH07, PH04, PH05, PH10, PH03 y PH11. Esto tiene sentido, pues aquellas palas con mayor extensión de cables, con más cargas en las cercanías (otras palas o perforadoras) y más lejanía de sala N°12 son las que presentan peores perfiles de tensión.

Con respecto a las perforadoras, cuando no hay extensión de cables, el orden es: PV25, PV23 y PV24 después. Cuando hay extensión de cables, el orden es: PV23 y PV25 iguales, luego PV24. Esto tiene sentido, pues aquellas perforadoras con mayor extensión de cables, con más cargas en las cercanías (otras palas o perforadoras) y más lejanía de sala N°12 son las que presentan peor regulación de tensión.

Con respecto a los parrones de maniobra, se puede concluir tanto para los casos sin y con extensión de cables, los parrones con peor regulación de tensión son: PM-Patio Cable, PM-7 y PM-7A.

Con respecto a las salas eléctricas, se puede concluir tanto para los casos sin extensión de cables, como para los casos con extensión las que presentan peor regulación de tensión son: sala eléctrica N°12 y estación motriz, dado que son las salas más alejadas de la alimentación de sala N°1.

### 5.1.1.2. Tensión de sala N°1 en 23.68 kV

En la figura 5.6 se puede ver algunas similitudes con el caso anterior, donde tenemos una tensión de la sala N°1 de 22.74 kV, en este caso al subir la tensión a 23.68 kV es notorio el aumento en los perfiles de tensión de las palas, sobre todo en los periodos de regeneración de energía de estas. Sin embargo, sigue quedando en evidencia que el largo de los cables es fundamental en la regulación de tensión, además que la operación del STMG sigue afectando de igual forma en las caídas de tensión. En estos escenarios de operación, es más difícil que actúen las protecciones por sub-tensiones, sin embargo, en más de un escenario esto ocurre.

Niveles de Tensión de Palas para Caso Base - Tensión sala N°1 en 23.68 kV

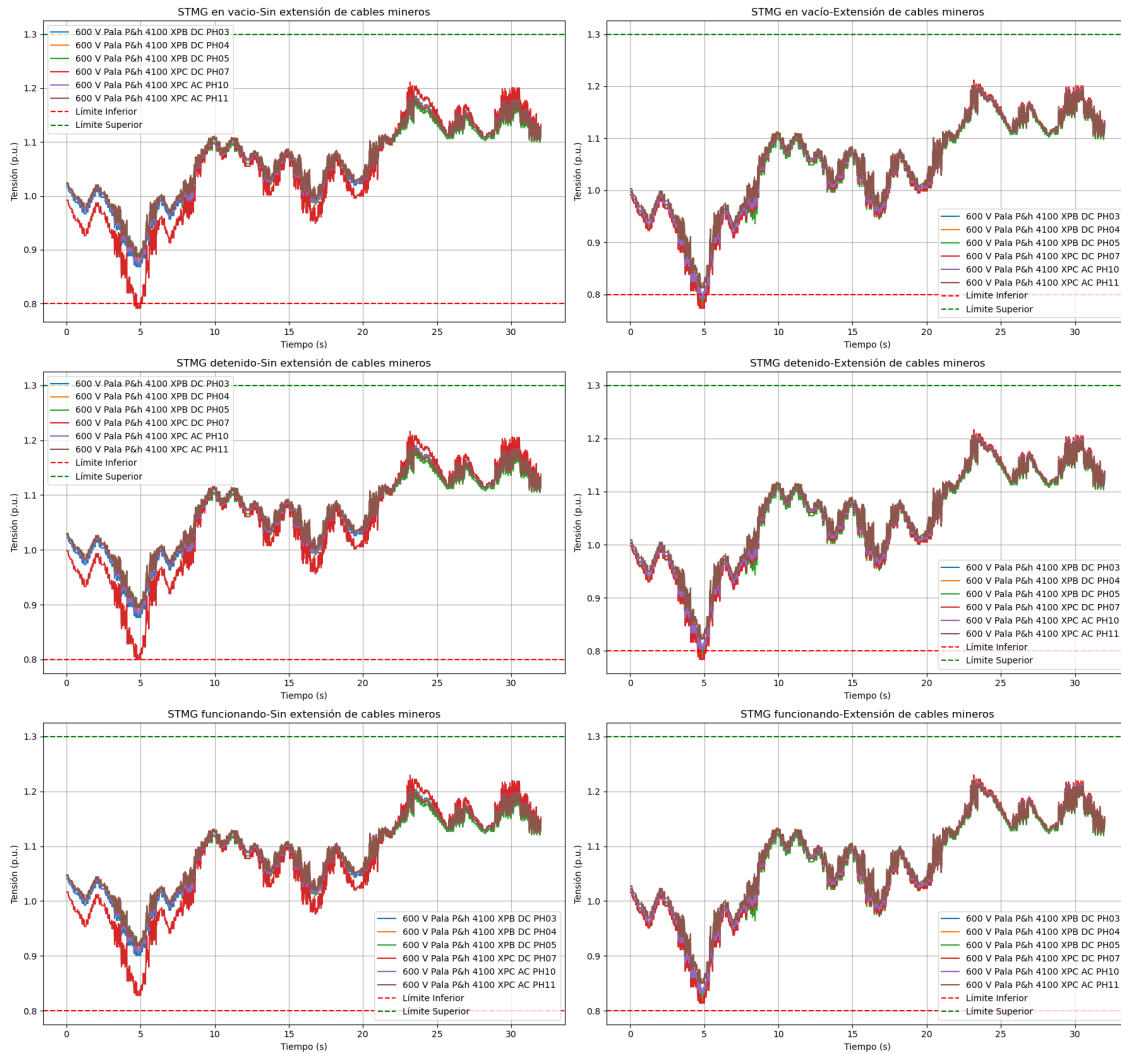


Figura 5.6: Niveles de tensión de palas para caso base - Tensión de sala N°1 en 23.68 kV

En la figura 5.7, se observa algunas similitudes en comparación con el caso en donde tenemos 22.74 kV en sala N°1, con un aumento en los perfiles de tensión significativos dada la alimentación de 23.68 kV en sala N°1. Las caídas más pronunciadas se obtienen en la partida de los motores de inducción de las perforadoras. También, el largo de los cables y la operación del STMG siguen marcando la misma tendencia. Otra diferencia radica en que, en estos escenarios, no se presentan activaciones de los trips de protecciones por sub-tensiones, pero si por sobre-tensiones.

Niveles de Tensión de Perforadoras para Caso Base - Tensión sala N°1 en 23.68 kV

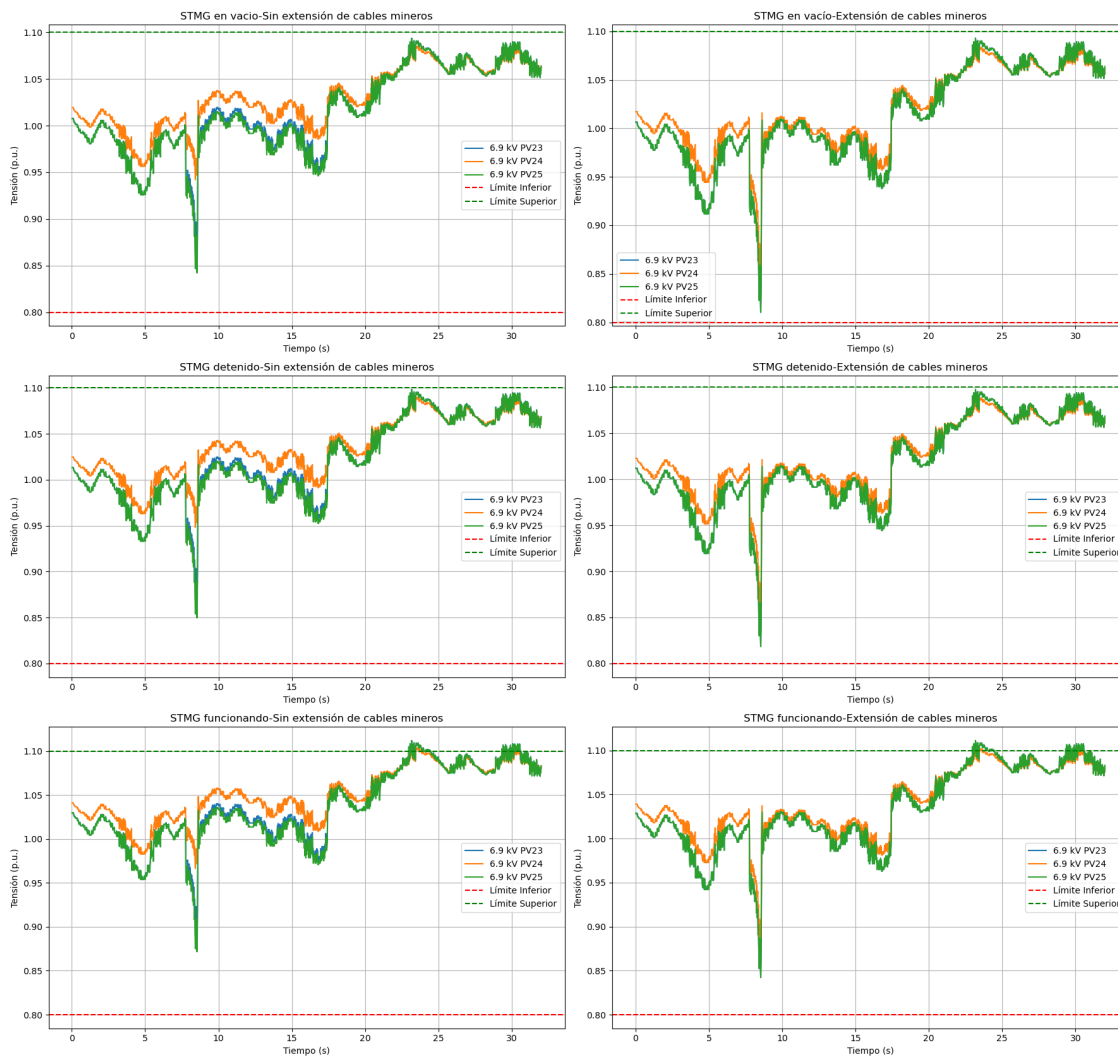


Figura 5.7: Niveles de tensión de perforadoras para caso base - Tensión de sala N°1 en 23.68 kV



De la figura 5.8, se puede mencionar que se presentan algunas similitudes con el caso anterior (22.74 kV en sala N°1), el largo de los cables y la operación del STMG siguen afectando de igual manera, sin embargo, acá el aumento de los perfiles de tensión es general, esto debido al presentar una tensión de 23.68 kV en sala N°1. La forma del perfil de tensión para todos los parrones es la misma y viene dada por la curva de consumos de las palas y las perforadoras. Se conserva la tendencia de que aquellos parrones más alejados de la alimentación, al igual que aquellos en donde se concentran las cargas, son los con peor regulación de tensión, es decir, hay mayores caídas y subidas de tensión. Por último, hay que mencionar que existe un escenario en el que no se cumplen los límites de tensión recomendados.

Niveles de Tensión de Loop Mina para Caso Base - Tensión sala N°1 en 23.68 kV

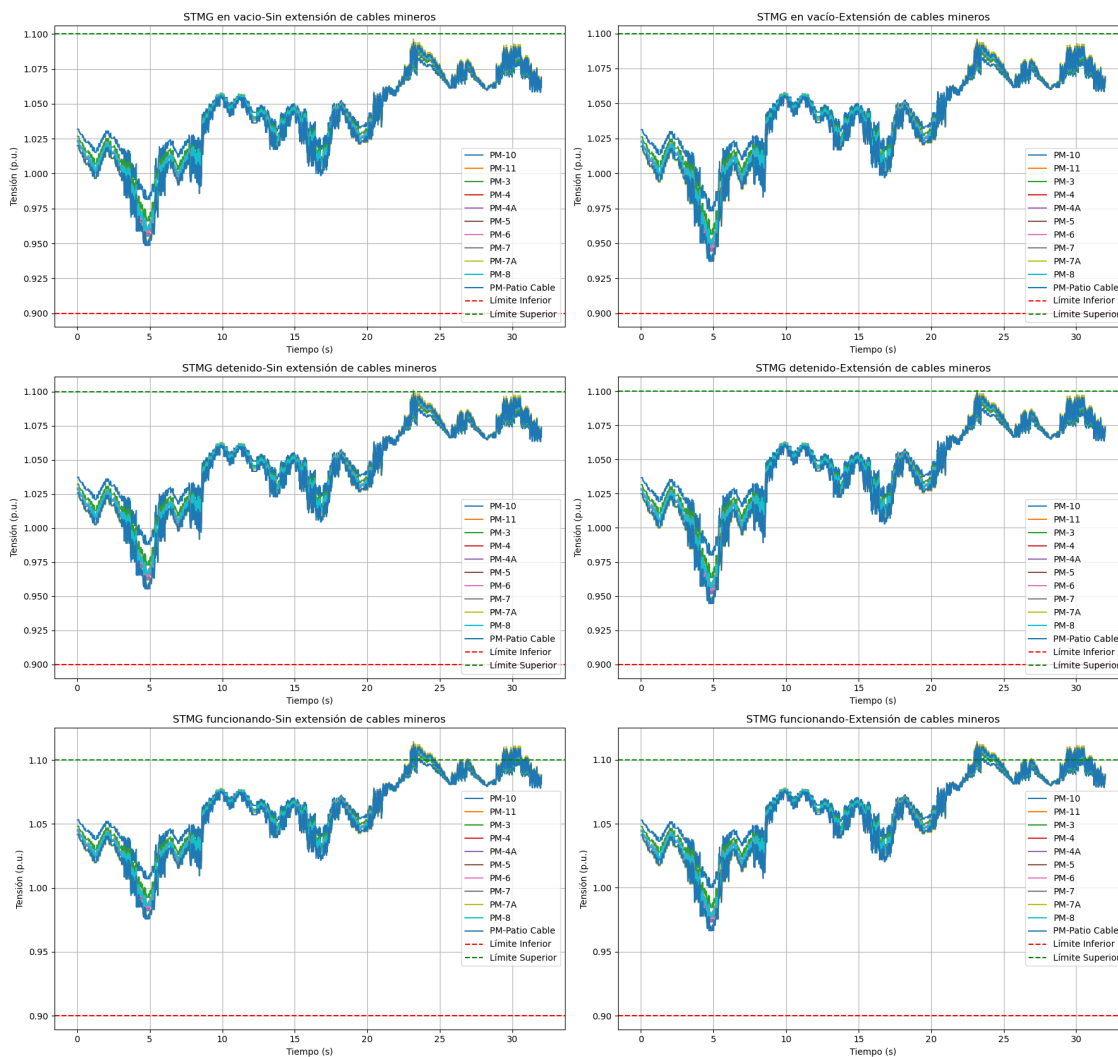


Figura 5.8: Niveles de Tensión de Loop Mina para Caso Base - Tensión de sala N°1 en 23.68 kV



Al observar la figura 5.9, se puede mencionar que se presentan algunas similitudes con el caso anterior (22.74 kV en sala N°1), en este caso, al aumentar la tensión de sala N°1 a 23.68 kV, se tiene un aumento significativo en los perfiles de tensión para cada sala eléctrica, en donde aquellas más cercanas a sala N°1 tienen mejor regulación de tensión, es decir, presentan menores caídas y aumentos en los niveles de tensión.

Niveles de Tensión de STMG para Caso Base - Tensión sala N°1 en 23.68 kV

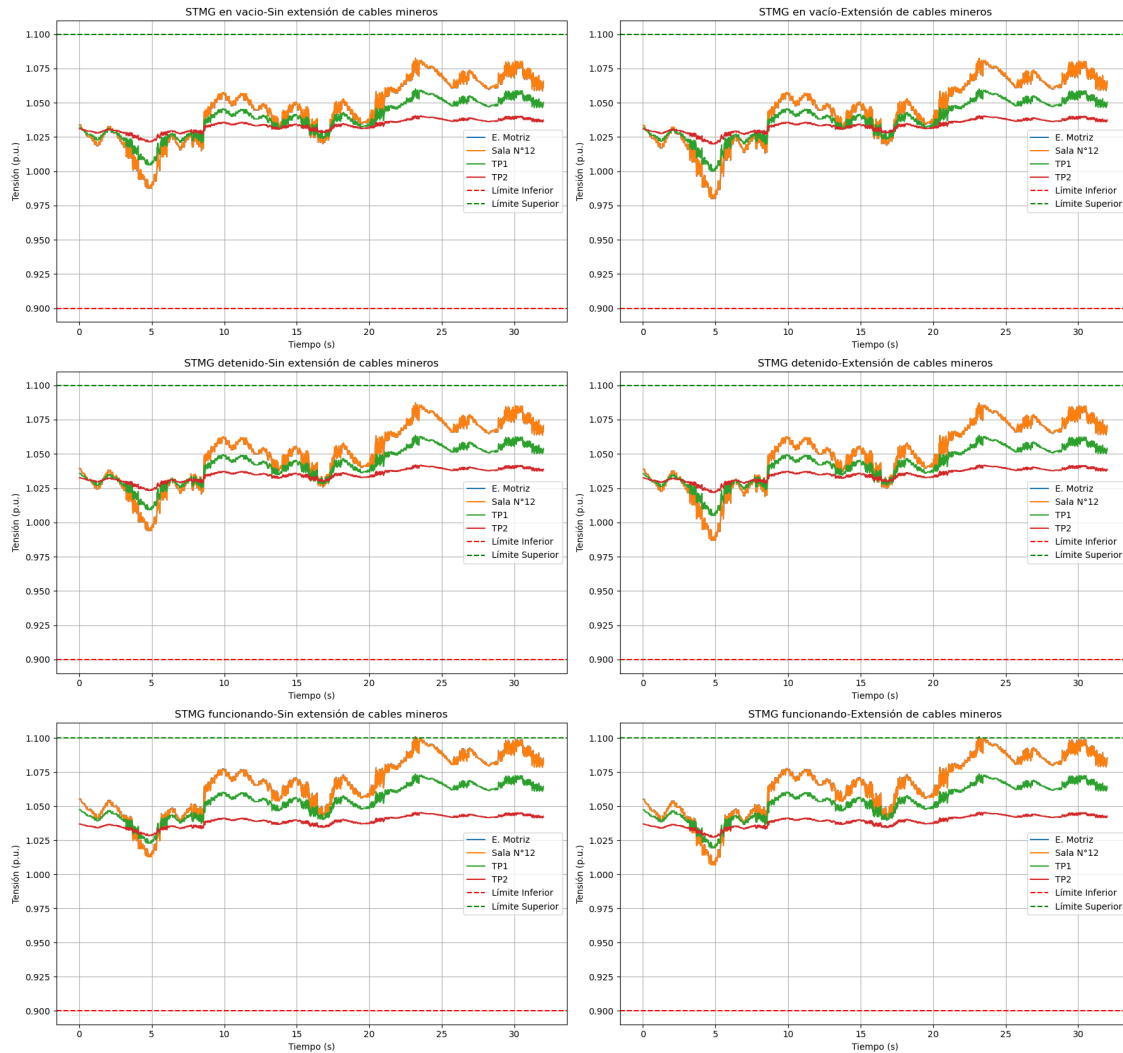


Figura 5.9: Niveles de Tensión de STMG para Caso Base - Tensión de sala N°1 en 23.68 kV

La figura 5.5 resume toda la información mencionada anteriormente. En esta imagen se pueden visualizar de manera más clara los valores máximos y mínimos de tensión en todos los nodos (palas, perforadoras, loop mina y STMG).

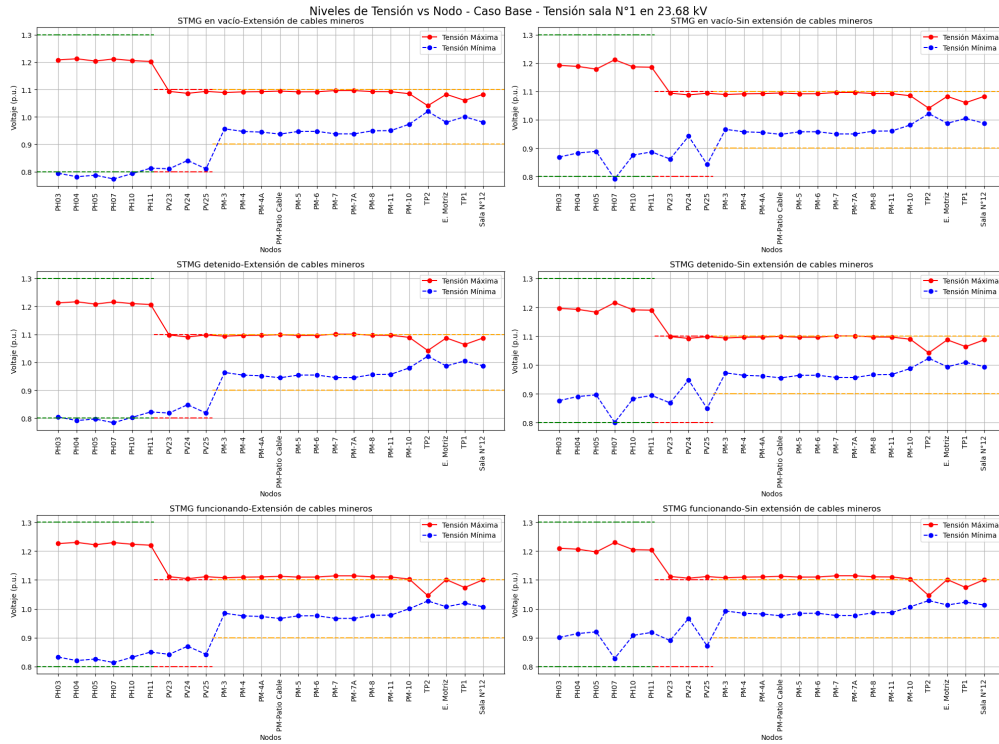


Figura 5.10: Tensión vs Nodos - Caso Base - Tensión en sala N°1 de 23.68 kV

Las palas se ordenan por peor regulación de tensión de la siguiente manera cuando no hay extensión de cables: PH07, PH03, PH10, PH04, PH11 y PH05. Con la extensión de cables, el orden es: PH07, PH04, PH05, PH03, PH10 y PH11. Esto tiene sentido, ya que las palas con mayor extensión de cables, más cargas cercanas (otras palas o perforadoras) y mayor distancia de la sala N°12 son las que presentan peores niveles de tensión.

Para las perforadoras, sin extensión de cables, el orden es: PV25, PV23 y PV24. Con la extensión de cables, el orden es: PV25 y PV23 iguales, luego PV24. Esto también tiene sentido, ya que las perforadoras con mayor extensión de cables, más cargas cercanas y mayor distancia de la sala N°12 presentan peor regulación de tensión.

En cuanto a los parrones de maniobra, se puede concluir que, tanto en los casos sin extensión de cables como con extensión de cables, los parrones con peor regulación de tensión son: PM-Patio Cable, PM-7 y PM-7A.

Respecto a las salas eléctricas, se concluye que, tanto en los casos sin extensión de cables como con extensión de cables, las que presentan peor regulación de tensión son: la sala eléctrica N°12 y la estación motriz. Esto se debe a que son las salas más alejadas de la alimentación de la sala N°1.

### 5.1.1.3. Curvas PV

Después de analizar los perfiles de tensión para los nodos más importantes del sistema, se concluye que el peor escenario de operación ocurre cuando la alimentación de la sala N°12 es de 22.74 kV, el STMG opera en modo vacío y hay extensión de cables mineros.

La figura 5.11 muestra las curvas PV para el peor escenario. En esta imagen se puede observar que las salas eléctricas con peor estabilidad de tensión son la sala N°12 y la estación motriz. Sin embargo, debido a consideraciones operacionales, se propone instalar un STATCOM en la sala N°12.

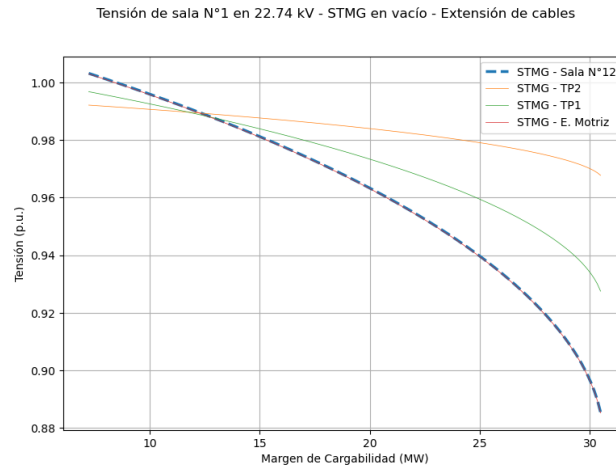


Figura 5.11: Curvas PV para STMG - Tensión en sala N°12 en 22.74 kV - STMG en vacío - Extensión de cables mineros.

La figura 5.12 corresponde a las curvas PV para los transformadores móviles del loop este y loop oeste, la razón de analizar las curvas PV para las dos secciones del loop es que este se encuentra dividido en 2 por un seccionador GVR en PM-6 como se puede ver en 4.2. De esta imagen se puede concluir que los transformadores con peor estabilidad de tensión son: transformador móvil #7 en el loop este y transformador Móvil #1 en el loop oeste. Es por esto, que se propone instalar 2 STATCOM, cada uno en los transformadores ya mencionados.

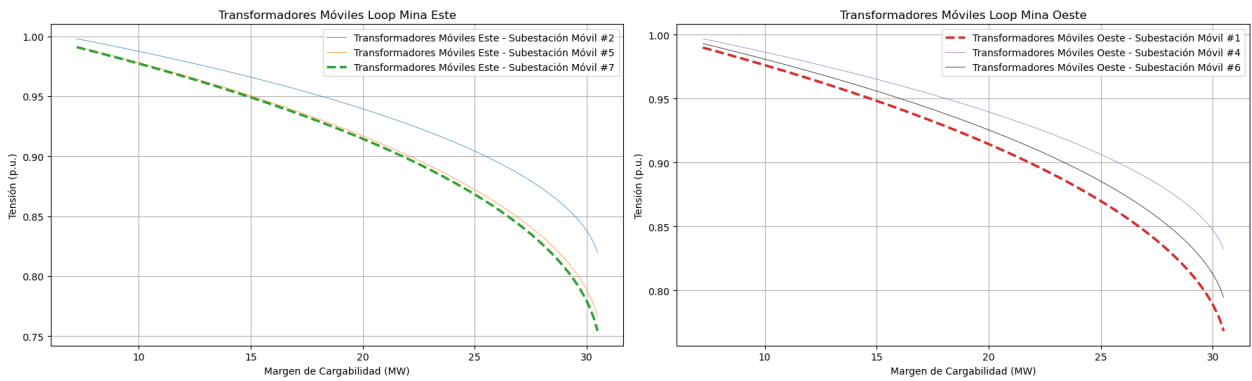


Figura 5.12: Curvas PV para Transformadores Móviles - Tensión en sala N°12 en 22.74 kV - STMG en vacío - Extensión de cables mineros.

La figura 5.13 corresponde a las curvas PV para los parrones de maniobra del loop este y loop oeste, la razón de analizar las curvas PV para las dos secciones del loop es que este se encuentra dividido en 2 por un seccionador GVR en PM-6 como se puede ver en 4.2. De esta imagen se puede concluir que los parrones con peor estabilidad de tensión son: PM-Patio Cable en el loop este y PM-7 o PM-7A en el loop oeste. Es por esto, que se propone instalar 2 STATCOM, en el loop este el parrón ya mencionado mientras que en el oeste se decide instalar el equipo en PM-7A pues está más cerca de las cargas.

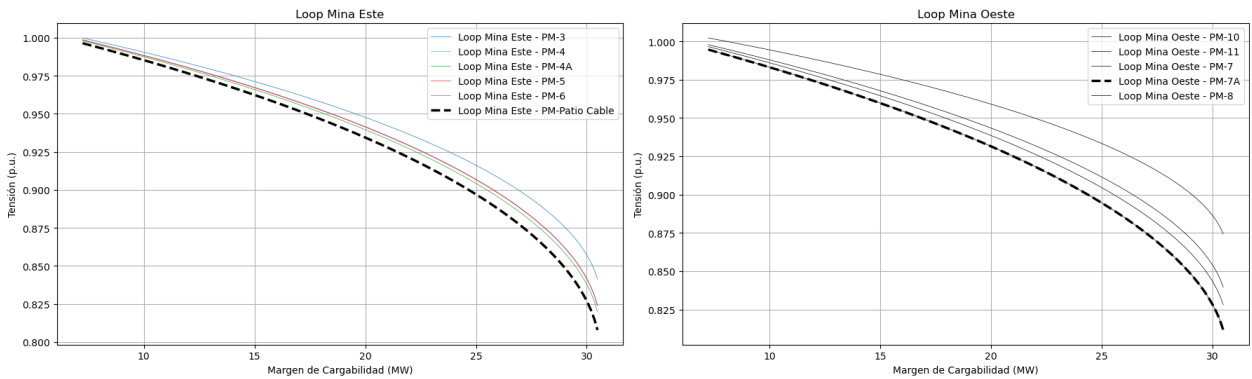


Figura 5.13: Curvas PV para Loop Mina - Tensión en sala N°12 en 22.74 kV - STMG en vacío - Extensión de cables mineros.

#### 5.1.1.4. Margen de cargabilidad para caso base

La figura 5.14 representa los márgenes de cargabilidad del sistema para cada uno de los escenarios, en donde se puede visualizar que este es creciente respecto a la operación del STMG (vacío, detenido y funcionando), al largo de los cables y a la tensión de la sala N°1. En donde se tiene mejor margen de cargabilidad si no existe extensión de cables, el STMG esta funcionando y la tensión de sala N°1 es de 23.68 kV. El peor margen de cargabilidad existe cuando existe extensión de cables, el STMG esta en vacío y la tensión de sala N°1 es de 22.74 kV.

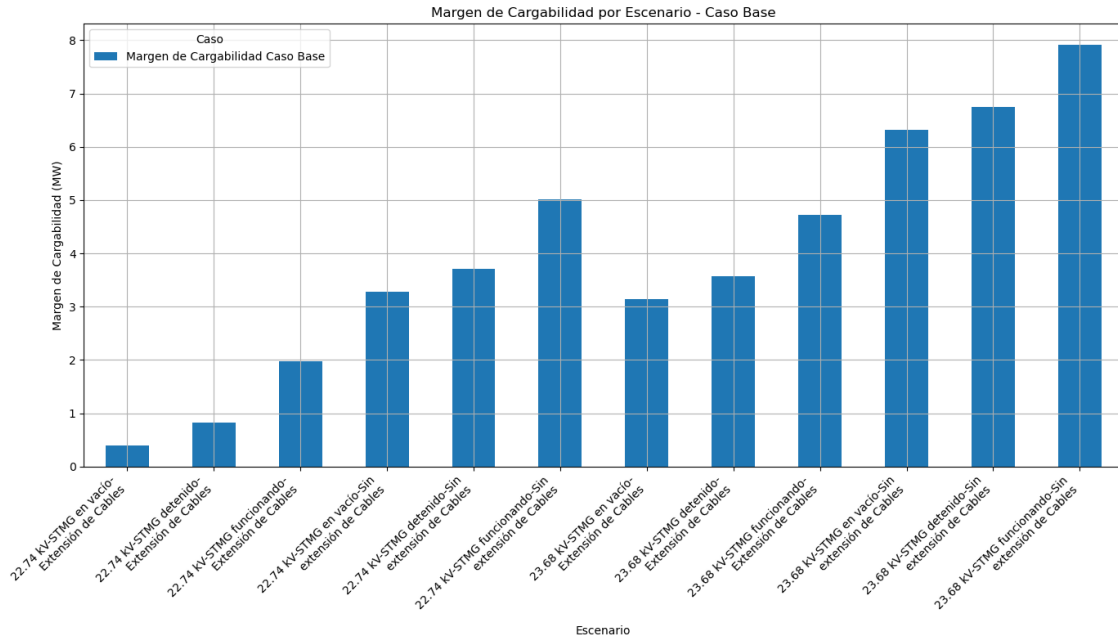


Figura 5.14: Margen de cargabilidad para caso base.

### 5.1.2. Propuesta de infraestructura 1

Como se mencionó anteriormente, la propuesta de infraestructura 1 corresponde a la instalación de un STATCOM en sala N°12, con una capacidad de  $\pm 30$  MVar que fue determinada siguiendo la metodología propuesta. Esto se puede visualizar en la siguiente figura:

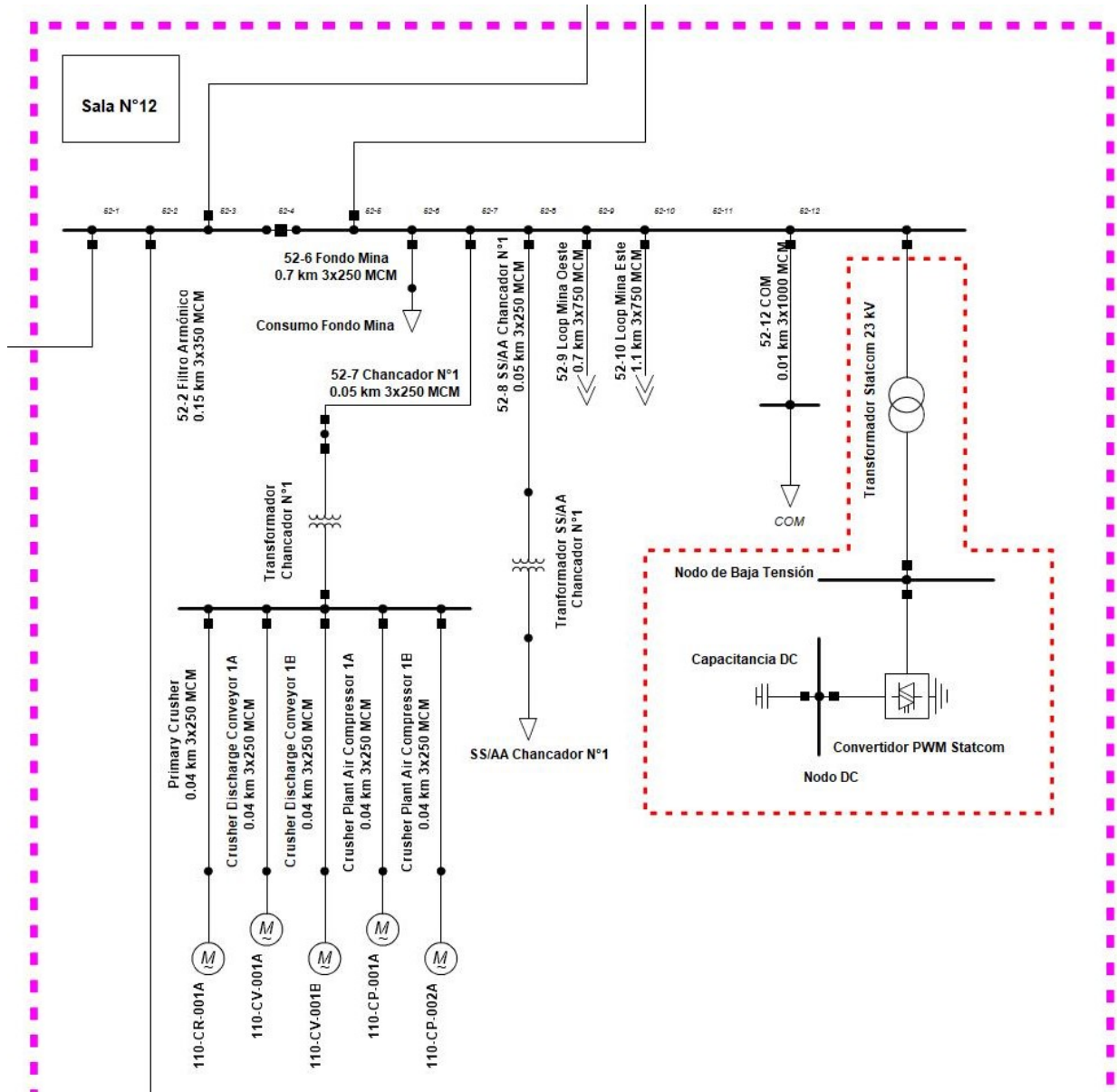


Figura 5.15: STATCOM en sala N°12 - Propuesta de infraestructura 1

### 5.1.2.1. Tensión en sala N°1 de 22.74 kV

La figura 5.16 muestra la tensión máxima y mínima de los nodos más importantes del sistema, con una tensión en la sala N°1 de 22.74 kV, comparando el caso base (en azul) con la propuesta de infraestructura 1 (en rojo). En esta imagen, se puede observar que la propuesta de infraestructura 1 mejora la estabilidad de tensión del sistema, ya que los valores de tensión mínimos son más altos en comparación con el caso base, evitando caer por debajo de los límites de operación establecidos.

Sin embargo, se nota que, aunque la propuesta mejora los valores de tensión mínimos, los valores de tensión máximos empeoran ligeramente en algunos escenarios. A pesar de esta pequeña degradación en las tensiones máximas, los valores permanecen dentro de los límites operacionales y no activan las protecciones de sub-tensión y sobre-tensión tanto para las palas como las perforadoras.

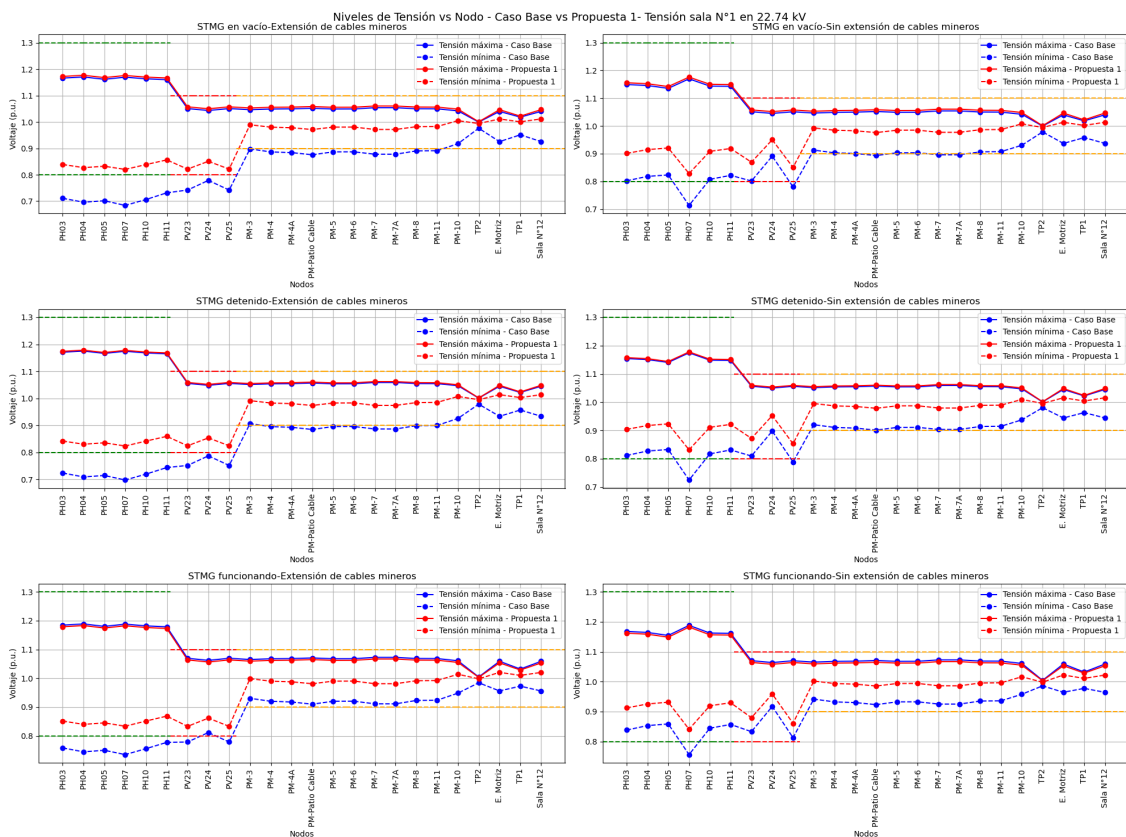


Figura 5.16: Tensión vs nodos - Caso base vs propuesta de infraestructura 1 - Tensión en sala N°1 de 22.74 kV.

### 5.1.2.2. Tensión en sala N°1 de 23.68 kV

La figura 5.17 muestra la tensión máxima y mínima de los nodos más importantes del sistema, comparando el caso base (en azul) y la propuesta de infraestructura 1 (en rojo) cuando la tensión en la sala N°1 es de 23.68 kV. La propuesta de infraestructura 1 mejora los valores mínimos de tensión en comparación con el caso base, lo que contribuye a una mayor estabilidad.

En contraste con los resultados obtenidos a 22.74 kV en la sala N°1, en todos los casos, la propuesta de infraestructura 1 ofrece una mejor regulación de tensión para los valores máximos. Las tensiones se mantienen dentro de los límites operacionales y no activan las protecciones de sub-tensión y sobre-tensión.

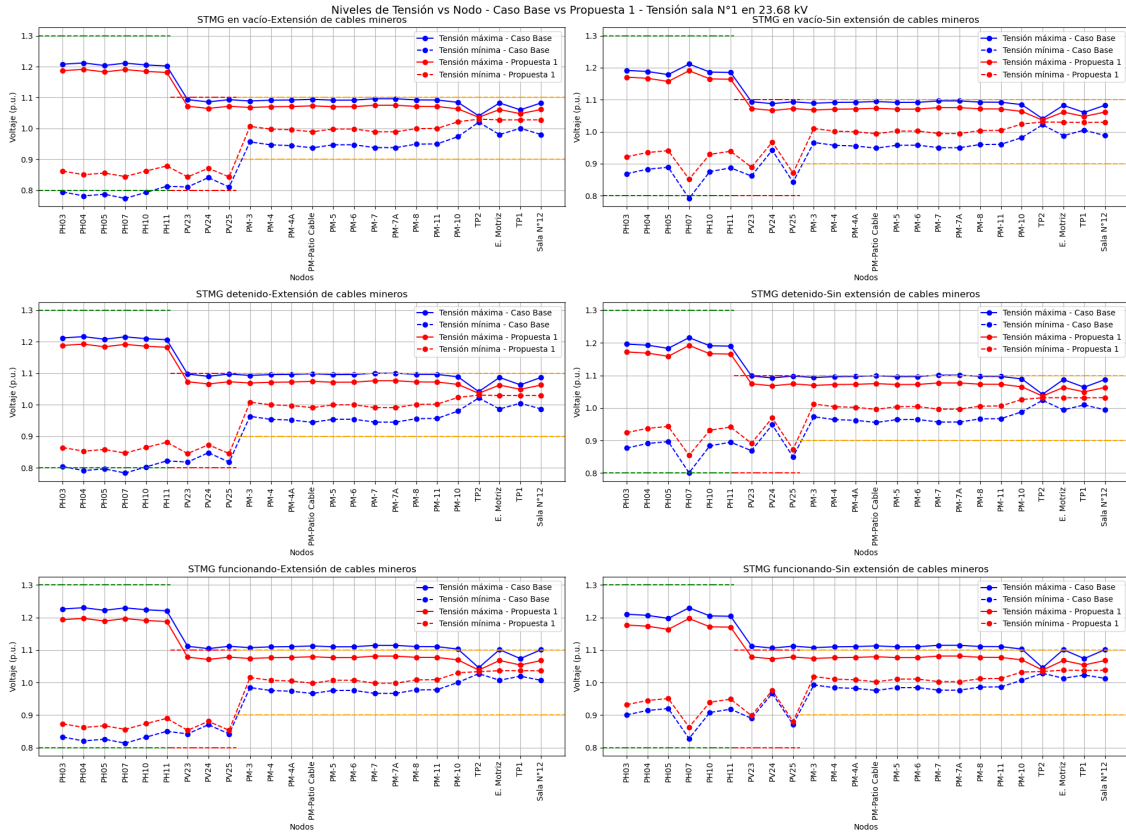


Figura 5.17: Tensión vs nodos - Caso base vs propuesta de infraestructura 1 - Tensión en sala N°1 de 23.68 kV.



### 5.1.2.3. Margen de cargabilidad para propuesta de infraestructura 1

La figura 5.18 muestra el contraste del margen de cargabilidad del caso base frente a la propuesta de infraestructura 1 para 12 escenarios de operación diferentes. Cada escenario combina distintos estados del STMG (en vacío, detenido y funcionando) y la extensión de cables (con y sin). Los márgenes de cargabilidad se presentan en MW para cada escenario, con el caso base representado en azul y la propuesta 1 en naranja.

En promedio, el margen de cargabilidad aumenta en 4.8 MW con la propuesta de infraestructura 1 en comparación con el caso base. Este incremento indica una mejora significativa en la estabilidad de tensión del sistema, ya que un mayor margen de cargabilidad implica que el sistema puede soportar cargas adicionales sin comprometer la estabilidad de tensión. En todos los escenarios, la propuesta de infraestructura 1 muestra un margen de cargabilidad superior, lo cual sugiere que esta infraestructura permite una mejor respuesta del sistema frente a variaciones de carga y condiciones operativas, mejorando la estabilidad de tensión.

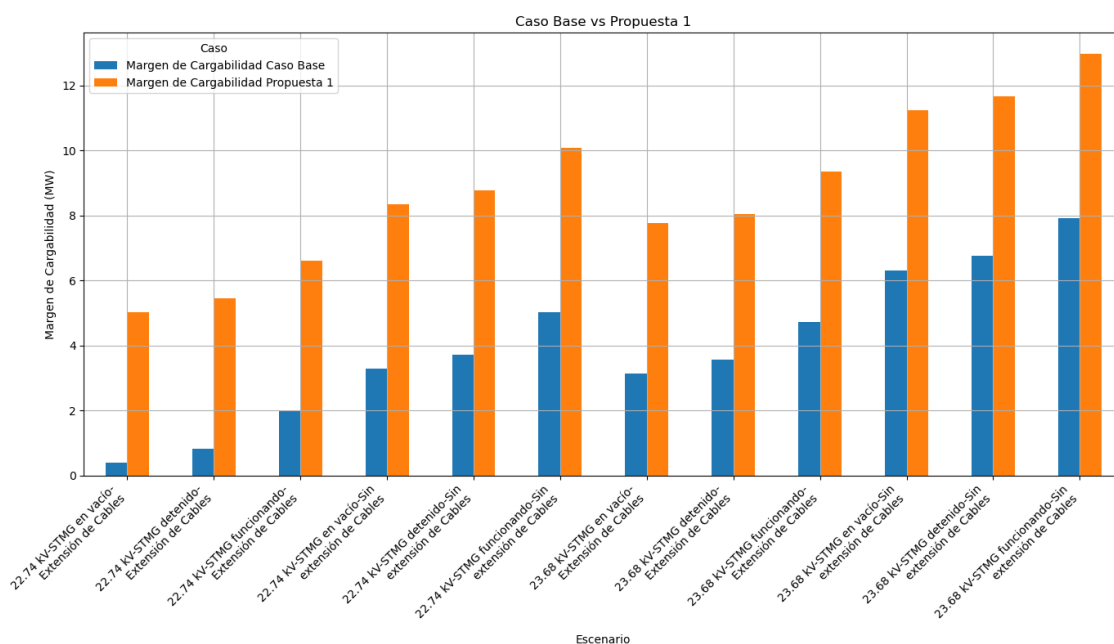


Figura 5.18: Margen de cargabilidad para caso base vs propuesta de infraestructura 1.

#### 5.1.2.4. VPI para propuesta de infraestructura 1

La figura 5.19 muestra la comparación del índice de perfil de voltaje (VPI) para el caso base y la propuesta 1 para los máximos valores de tensión que se tienen en el proceso de regeneración de energía de las palas.

Se observa que el VPI es generalmente más bajo (indicando un peor perfil de voltaje) en los escenarios con extensión de cables mineros para ambos casos, base y propuesta. La extensión de los cables incrementa la resistencia y la reactancia del sistema, lo que conduce a una peor regulación de tensión debido a las pérdidas por transmisión, por lo tanto, a una peor calidad del perfil de tensión. Por otro lado, se tiene un VPI mayor cuando el STMG está en vacío, luego detenido y por último, funcionando. Con respecto al valor de tensión en sala N°1 a mayor tensión menor VPI.

En aproximadamente el 33 % de los escenarios, el VPI es mejor para el caso base, mientras que en el otro 66 % es mejor para la propuesta 1. Esto sugiere que la propuesta de infraestructura 1 mejora el perfil de voltaje para los máximos valores de tensión la mayoría de los escenarios.

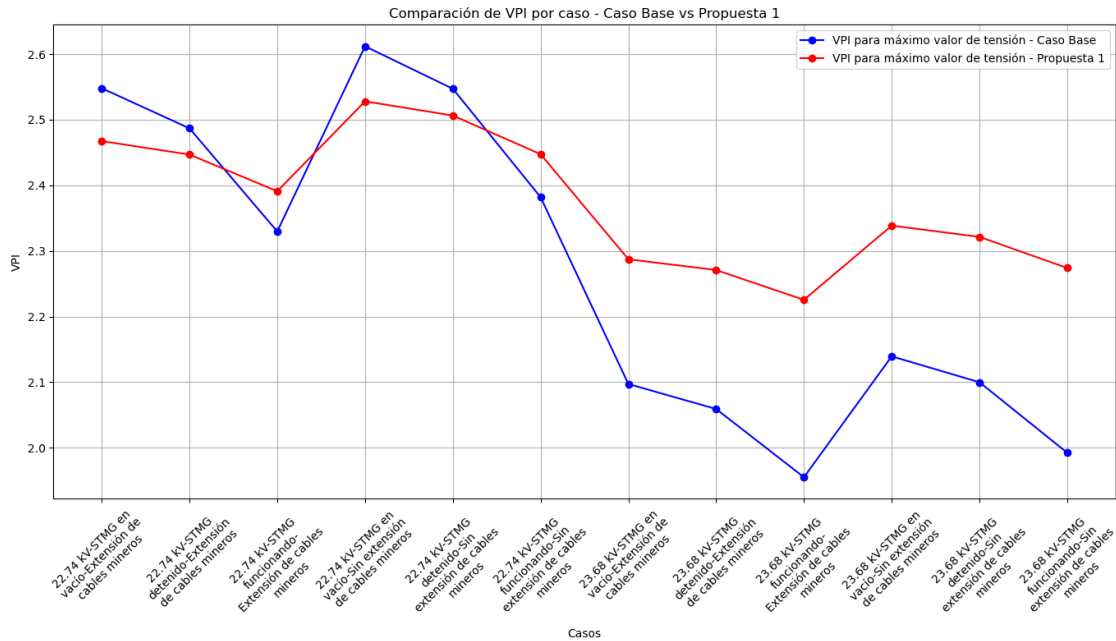


Figura 5.19: VPI para máximo nivel de tensión - Caso base vs propuesta de infraestructura 1.

La figura 5.20 muestra la comparación del índice de perfil de voltaje (VPI) para el caso base (en azul) y la propuesta de infraestructura 1 (en rojo) enfocándose en los valores mínimos de tensión que se obtienen en el instante de máximo consumo del sistema.

Se observa que el VPI es mejor para la propuesta de infraestructura 1 en comparación con el caso base en todos los escenarios. Esto indica que, para los valores mínimos de tensión, la propuesta de infraestructura 1 proporciona un mejor perfil de voltaje que el caso base.

Los escenarios con extensión de cables mineros muestran valores de VPI más bajos, indicando un peor perfil de voltaje debido a la mayor resistencia y reactancia en los cables largos, lo que contribuye a una mayor caída de tensión. Este efecto es más pronunciado en los escenarios del caso base.

Además, la tensión en la sala N°1 también impacta el VPI. Los escenarios con una tensión de 23.68 kV tienden a tener valores de VPI más altos en comparación con los de 22.74 kV, sugiriendo que una mayor tensión en la sala N°1 favorece un mejor perfil de voltaje.

En cuanto a la operación del STMG, los peores valores de VPI se presentan cuando el STMG está en vacío, seguido de cuando está detenido y, finalmente, cuando está funcionando.

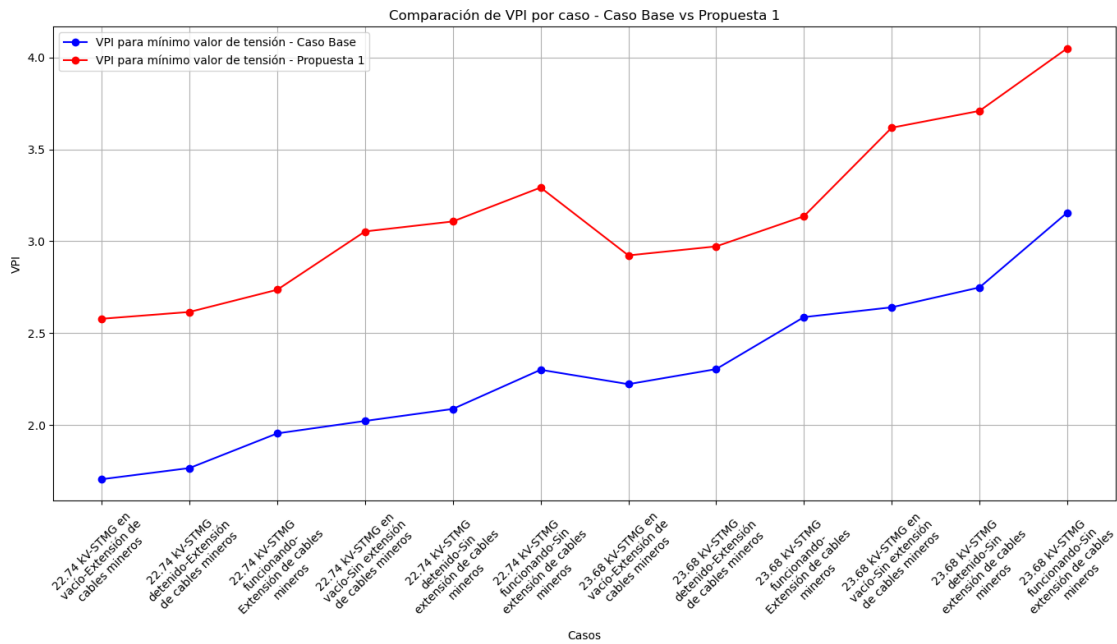


Figura 5.20: VPI para mínimo nivel de tensión - Caso base vs propuesta de infraestructura 1.

### 5.1.3. Propuesta de infraestructura 2

Como se mencionó anteriormente, la propuesta de infraestructura 2 corresponde a la instalación de dos STATCOM en transformador móvil #7 y #1, con una capacidad de  $\pm 10$  MVar cada unos, que fue determinada siguiendo la metodología propuesta. Esto se puede visualizar en las siguientes figuras:

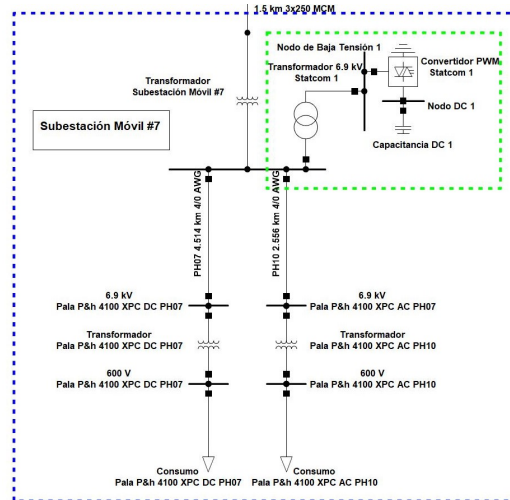


Figura 5.21: STATCOM en transformador móvil #7 - Propuesta de infraestructura 2.

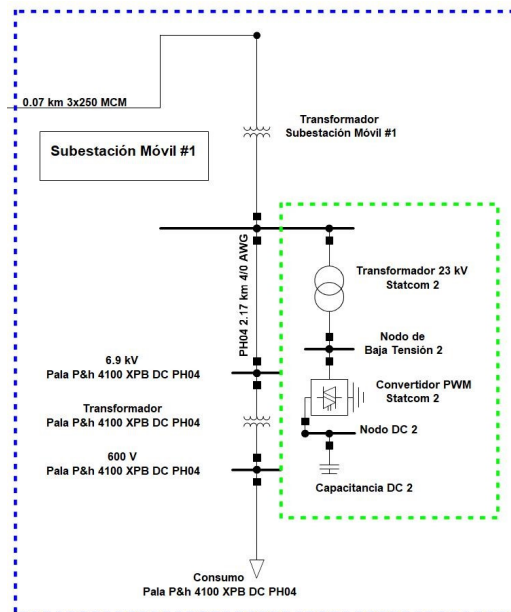


Figura 5.22: STATCOM en transformador móvil #1 - Propuesta de infraestructura 2.

### 5.1.3.1. Tensión en sala N°1 de 22.74 kV

La figura 5.23 muestra la comparación de los valores de tensión máximos y mínimos en los nodos más importantes del sistema para el caso base (en azul) y la propuesta de infraestructura 2 (en rojo), con la tensión en la sala N°1 de 22.74 kV.

En todos los escenarios, se observa que la propuesta de infraestructura 2 mejora significativamente los valores mínimos de tensión en comparación con el caso base, lo mismo ocurre con los máximos valores de tensión. De esta manera, se logra estar dentro de los límites de tensión operacionales sin permitir la actuación de las protecciones de sub-tensión como sobre-tensión.

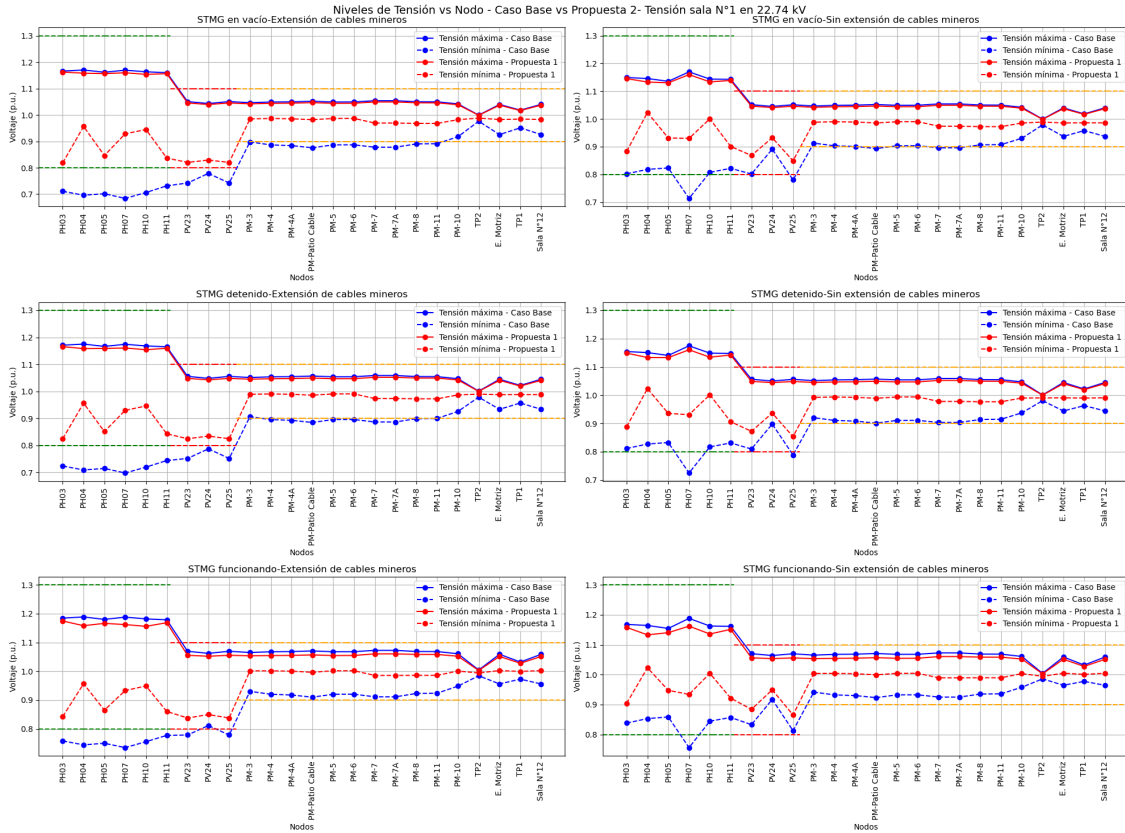


Figura 5.23: Tensión vs nodos - Caso base vs propuesta de infraestructura 2 - Tensión en sala N°1 de 22.74 kV.

### 5.1.3.2. Tensión en sala N°1 de 23.68 kV

La figura 5.24 muestra la comparación de los niveles de tensión máximos y mínimos en los nodos más importantes del sistema para el caso base (en azul) y la propuesta de infraestructura 2 (en rojo), con la tensión en la Sala N°1 de 23.68 kV.

En todos los escenarios, se observa que la propuesta de infraestructura 2 mejora significativamente los valores mínimos y máximos de tensión en comparación con el caso base. De igual manera, se logra estar dentro de los límites de tensión operacionales en el cual no actúan las protecciones de sub-tensión y sobre-tensión.

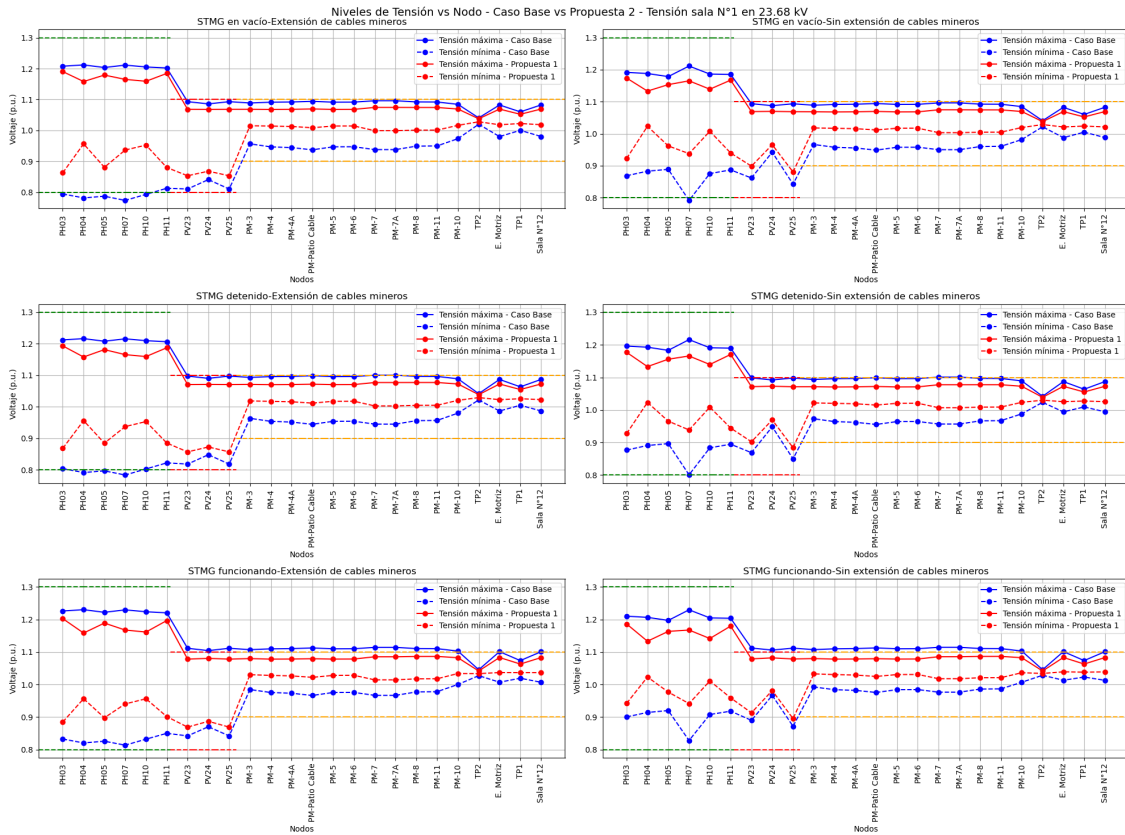


Figura 5.24: Tensión vs nodos - Caso base vs propuesta de infraestructura 2 - Tensión en sala N°1 de 23.68 kV.

### 5.1.3.3. Margen de cargabilidad para propuesta de infraestructura 2

La figura 5.25 muestra el contraste del margen de cargabilidad del caso base frente a la propuesta de infraestructura 1 para 12 escenarios de operación diferentes. Cada escenario combina distintos estados del STMG (en vacío, detenido y funcionando) y la extensión de cables (con y sin). Los márgenes de cargabilidad se presentan en MW para cada escenario, con el caso base representado en azul y la propuesta 2 en naranja.

En promedio, el margen de cargabilidad aumenta en 8.17 MW con la propuesta de infraestructura 2 en comparación con el caso base. En todos los escenarios, la propuesta muestra un margen de cargabilidad superior, sugiriendo una mejor respuesta del sistema ante variaciones de carga y condiciones operativas, mejorando la estabilidad de tensión.

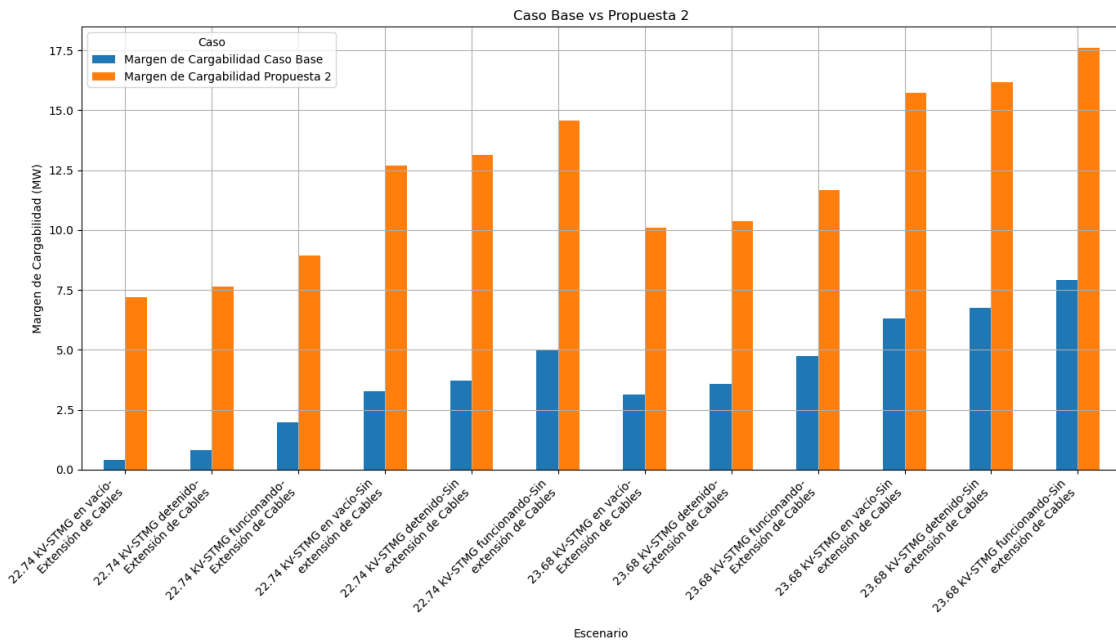


Figura 5.25: Margen de cargabilidad caso base vs propuesta de infraestructura 2.

### 5.1.3.4. VPI para propuesta de infraestructura 2

La figura 5.26 muestra la comparación del índice de perfil de voltaje (VPI) para el caso base y la propuesta 2 para los máximos valores de tensión (regeneración máxima).

Se observa que el VPI es mayor en el 100 % de los escenarios para la propuesta de infraestructura 2 en comparación con el caso base. Se observa que el VPI es generalmente más alto (indicando un mejor perfil de voltaje) en los escenarios sin extensión de cables mineros tanto para el caso base como para la propuesta. La extensión de los cables incrementa la resistencia y la reactancia del sistema, lo que trae consigo mayores pérdidas y peor regulación. Además, el VPI es mayor cuando el STMG está en vacío, seguido de cuando está detenido y, por último, cuando está funcionando. En cuanto al nivel de tensión en la sala N°1, a mayor tensión, el VPI es menor, lo que indica un peor perfil de voltaje.

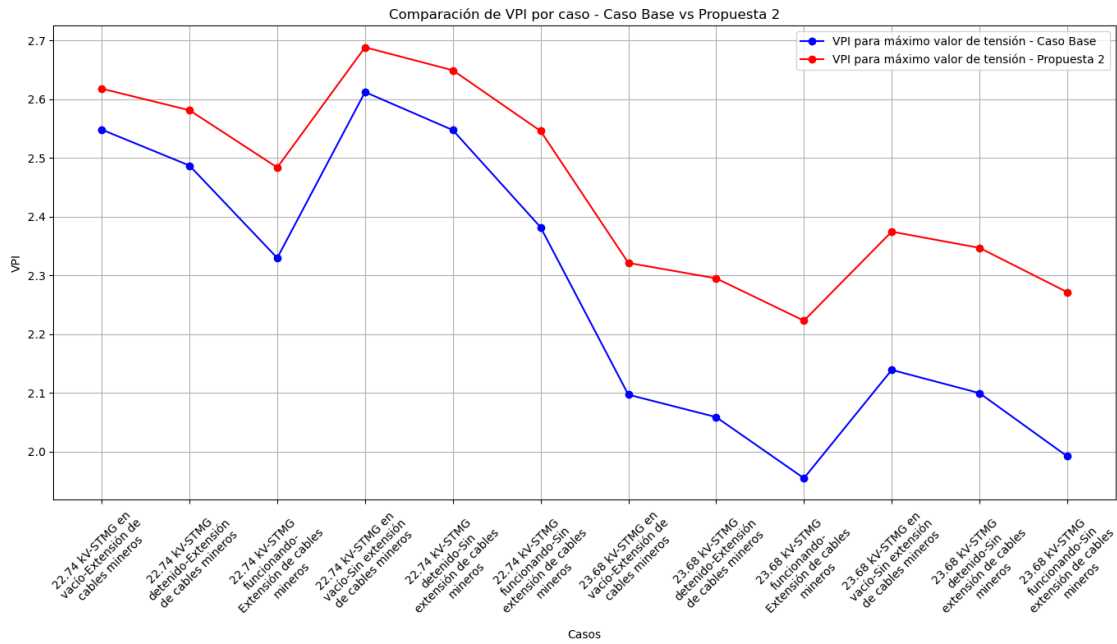


Figura 5.26: VPI para máximo nivel de tensión - caso base vs propuesta de infraestructura 2.



La figura 5.27 muestra la comparación del índice de perfil de voltaje (VPI) para el caso base (en azul) y la propuesta de infraestructura 2 (en rojo) enfocándose en los valores mínimos de tensión.

Se observa que el VPI es mejor para la propuesta de infraestructura 2 en comparación con el caso base en todos los escenarios. Esto indica que, para los niveles mínimos de tensión, la propuesta de infraestructura 2 proporciona un mejor perfil de voltaje que el caso base.

Se da la misma tendencia con la extensión de cables, en la cual cuando existe, el VPI es menor. Con respecto a la tensión en sala N°1, cuando es igual 22.74 kV se presenta un menor VPI que cuando es igual 23.68 kV. Por último, respecto de la operación del STMG, en orden creciente de VPI, se tiene vacío, detenido y funcionando.

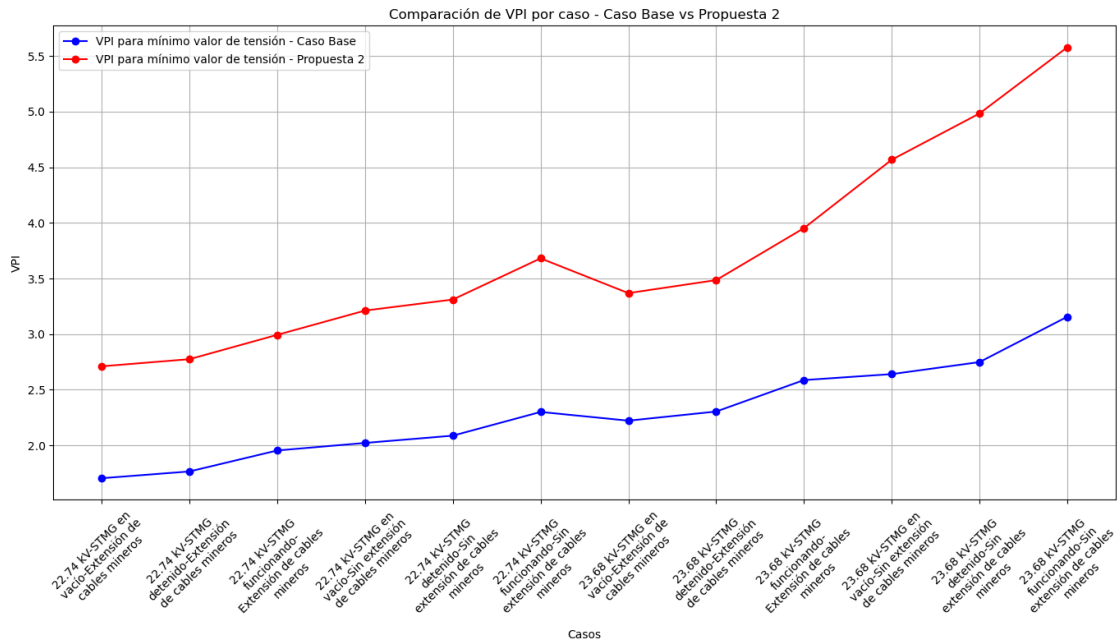


Figura 5.27: VPI para mínimo nivel de tensión - caso base vs propuesta de infraestructura 2.

### 5.1.4. Propuesta de infraestructura 3

Como se mencionó anteriormente, la propuesta de infraestructura 3 corresponde a la instalación de dos STATCOM en parrones de maniobras PM-Patio Cable y PM-7A, con una capacidad de  $\pm 10$  MVar cada uno, que fue determinada siguiendo la metodología propuesta. Esto se puede visualizar en las siguientes figuras:

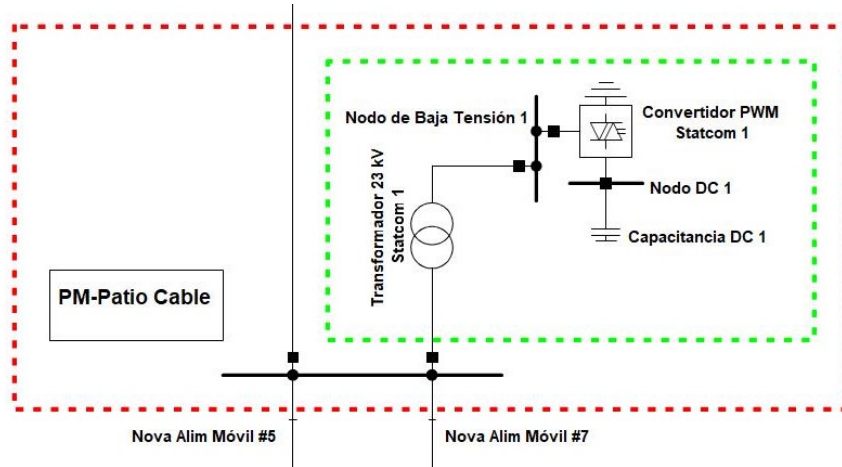


Figura 5.28: STATCOM en PM-Patio Cable - Propuesta de infraestructura 3

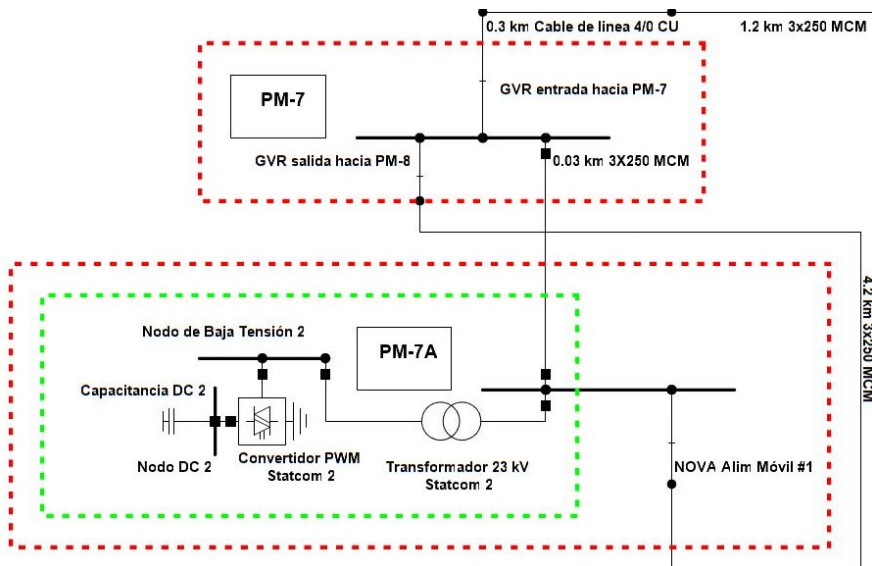


Figura 5.29: STATCOM en PM-7A - Propuesta de infraestructura 3

### 5.1.4.1. Tensión en sala N°1 de 22.74 kV

La figura 5.30 muestra la comparación de los valores de tensión máximos y mínimos en los nodos más importantes del sistema para el caso base (en azul) y la propuesta de infraestructura 3 (en rojo), con la tensión en la sala N°1 de 22.74 kV.

En todos los escenarios, se observa que la propuesta de infraestructura 3 mejora significativamente los valores mínimos de tensión en comparación con el caso base, lo mismo ocurre con los valores máximos de tensión. De esta forma, se logra estar dentro de los límites de tensión en el cual no actúan, tanto las protecciones de sub-tensión como sobre-tensión.

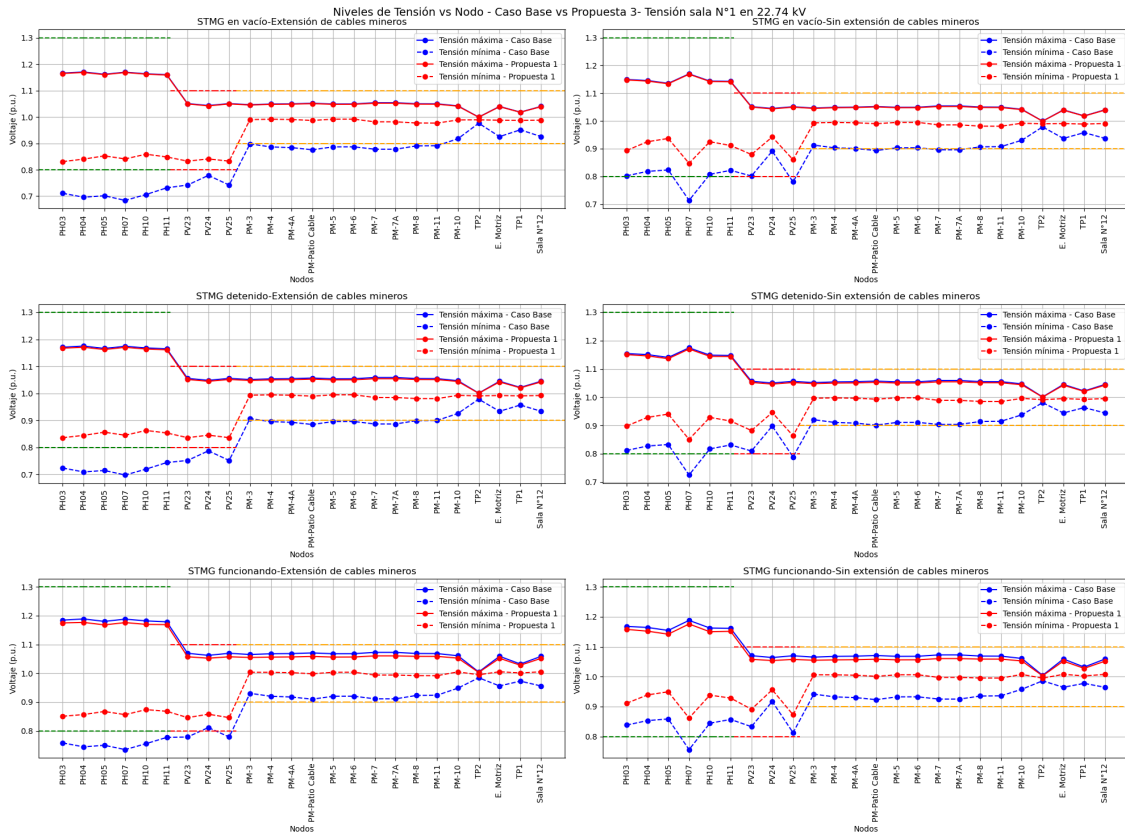


Figura 5.30: Tensión vs nodos - Caso base vs propuesta de infraestructura 3 - Tensión en sala N°1 de 22.74 kV.

### 5.1.4.2. Tensión en sala N°1 de 23.68 kV

La figura 5.31 muestra la comparación de los valores de tensión máximos y mínimos en los nodos más importantes del sistema para el caso base (en azul) y la propuesta de infraestructura 3 (en rojo), con la tensión en la sala N°1 de 23.68 kV.

En todos los escenarios, se observa que la propuesta de infraestructura 3 mejora significativamente los valores mínimos y máximos de tensión en comparación con el caso base. De esta manera, se logra estar dentro de los límites de tensión en el cual no actúan, tanto las protecciones de sub-tensión como sobre-tensión.

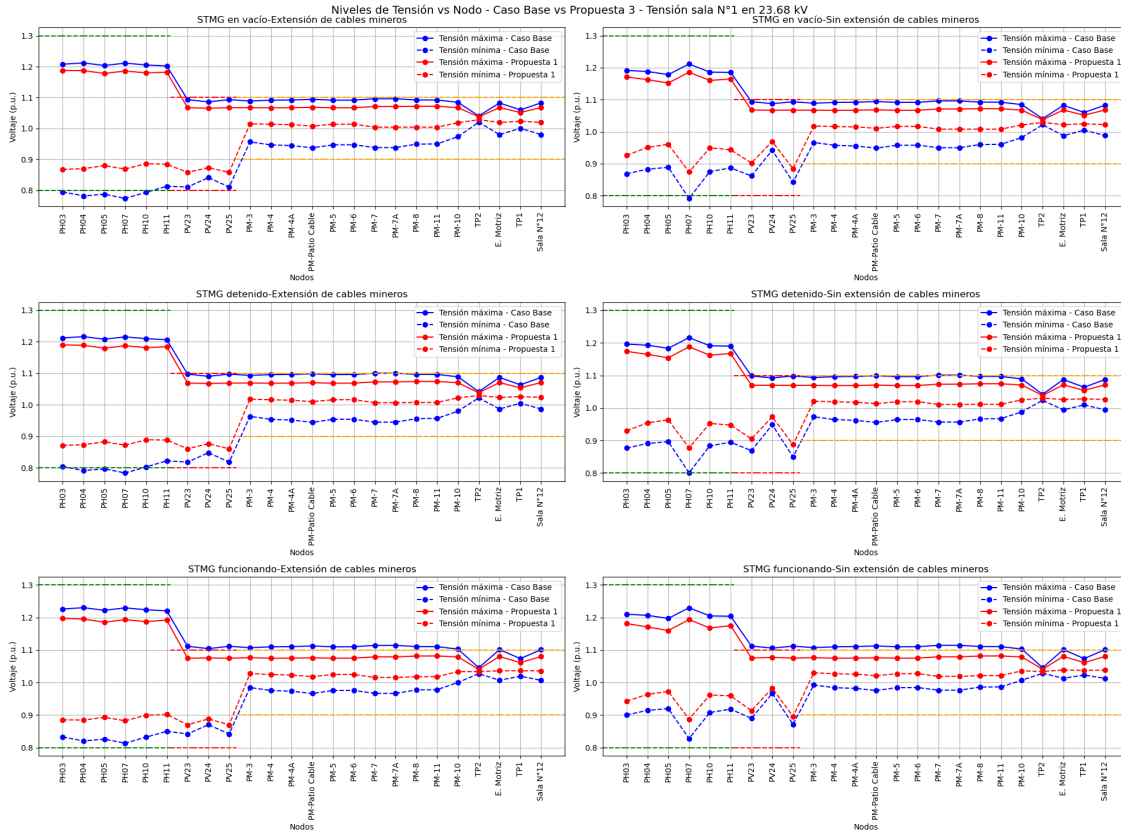


Figura 5.31: Tensión vs nodos - Caso base vs propuesta de infraestructura 3 - Tensión en sala N°1 de 23.68 kV.

### 5.1.4.3. Margen de cargabilidad para propuesta de infraestructura 3

La figura 5.32 muestra el contraste del margen de cargabilidad del caso base frente a la propuesta de infraestructura 3 para 12 escenarios de operación diferentes. Cada escenario combina distintos estados del STMG (en vacío, detenido y funcionando) y la extensión de cables (con y sin). Los márgenes de cargabilidad se presentan en MW para cada escenario, con el caso base representado en azul y la propuesta 3 en naranja.

En promedio, el margen de cargabilidad aumenta en 5.71 MW con la propuesta de infraestructura 3 en comparación con el caso base. Este incremento mejora significativamente la estabilidad de tensión del sistema, permitiendo soportar cargas adicionales sin comprometer el voltaje. En todos los escenarios, la propuesta muestra un margen de cargabilidad superior, sugiriendo una mejor respuesta del sistema ante variaciones de carga y condiciones operativas.

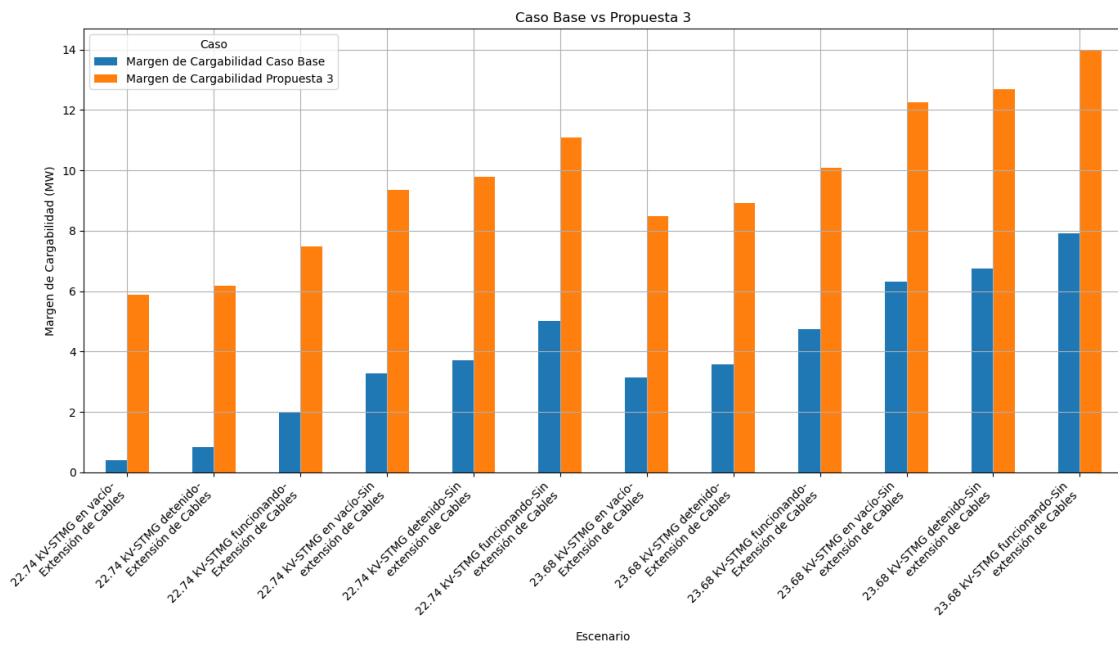


Figura 5.32: Margen de cargabilidad caso base vs propuesta de infraestructura 3.

#### 5.1.4.4. VPI para propuesta de infraestructura 3

La figura 5.33 muestra la comparación del índice de perfil de voltaje (VPI) para el caso base y la propuesta 3 para los máximos valores de tensión.

Se observa que el VPI es mayor en el 100 % de los escenarios. El VPI tiende a ser más alto (indicando un mejor perfil de voltaje) en los escenarios sin extensión de cables mineros tanto para el caso base como para la propuesta, debido al aumento en la resistencia y reactancia del sistema. Además, el VPI es mayor (mejor perfil de voltaje) cuando el STMG está en vacío, seguido por cuando está detenido y, finalmente, cuando está funcionando. En cuanto al valor de tensión en la sala N°1, una mayor tensión resulta en un VPI menor, indicando un peor perfil de voltaje.

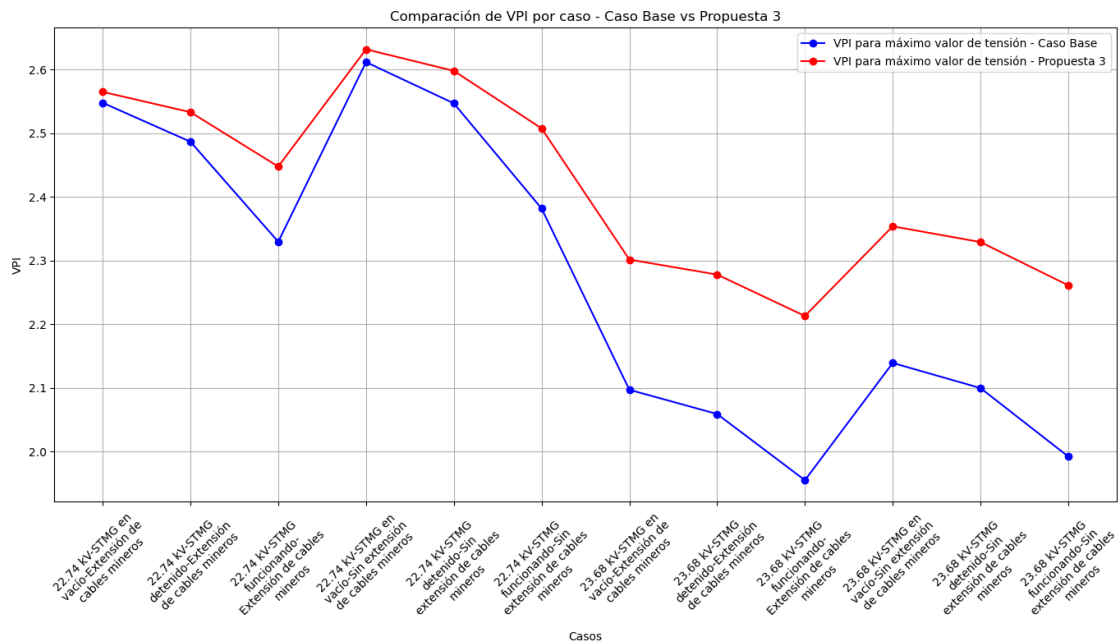


Figura 5.33: VPI para máximo nivel de tensión - caso base vs propuesta de infraestructura 3.

La figura 5.34 muestra la comparación del índice de perfil de voltaje (VPI) para el caso base (en azul) y la propuesta de infraestructura 3 (en rojo), enfocándose en los valores mínimos de tensión.

Se observa que el VPI es superior para la propuesta de infraestructura 3 en todos los escenarios comparados con el caso base. Esto indica que, para los valores mínimos de tensión, la propuesta de infraestructura 3 proporciona un mejor perfil de voltaje.

La misma tendencia se observa con la extensión de cables, donde la presencia de extensión resulta en un VPI menor. Asimismo, la tensión en la sala N°1 muestra que a 22.74 kV el VPI es menor que a 23.68 kV. En términos de operación del STMG, el VPI tiene un orden creciente de la siguiente forma: vacío, detenido y funcionando.

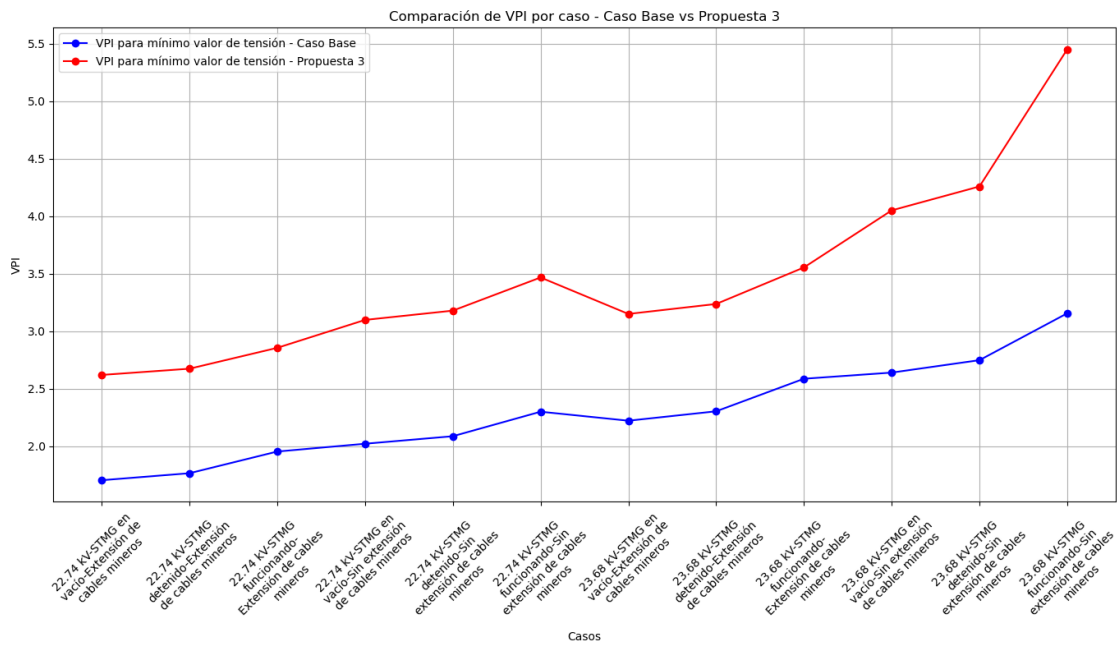


Figura 5.34: VPI para mínimo nivel de tensión - caso base vs propuesta de infraestructura 3.

## 5.2. Análisis de resultados técnicos

En la siguiente sección, se contrastarán las 3 propuestas de infraestructura para determinar cuál de ellas presenta un mejor rendimiento, para esto se va a comparar los indicadores utilizados, el VPI y margen de cargabilidad.

Pero antes de llegar a esto, se deben entregar las primeras conclusiones de todo lo que se ha analizado. La ecuación de variación de voltaje ( $\Delta V$ ) puede explicar varios fenómenos observados en el análisis técnico del sistema eléctrico. La ecuación se expresa como:

$$\Delta V = \frac{PR + QX}{V} \quad (5.1)$$

Donde:

- $\Delta V$  es la variación de voltaje.
- $P$  es la potencia activa.
- $Q$  es la potencia reactiva.
- $R$  es la resistencia de la línea.
- $X$  es la reactancia de la línea.
- $V$  es la tensión en el extremo de carga.

Esta ecuación muestra cómo las pérdidas resistivas ( $PR$ ) y las pérdidas reactivas ( $QX$ ) afectan la variación de voltaje en el sistema. Un aumento en la resistencia ( $R$ ) o la reactancia ( $X$ ) de la línea, o un cambio en la potencia activa ( $P$ ) o reactiva ( $Q$ ), puede llevar a una caída o aumento de tensión ( $\Delta V$ ) [17].

Las principales conclusiones obtenidas del análisis técnico son las siguientes:

- **Largo de cables mineros:** El largo de los cables determina una peor regulación de tensión, incrementando las caídas de tensión ( $\Delta V$ ) a mayor longitud, especialmente cuando el consumo de energía ( $P$ ) es máximo, lo mismo ocurre cuando la regeneración de energía es máxima, donde a mayor largo, mayores subidas de tensión y peor regulación.
- **Operación del STMG:** La operación del STMG afecta la regulación de tensión de la siguiente manera: Durante el máximo consumo de energía, el peor escenario se da en vacío ( $P = 4$  MW) ya que los consumos de la red en general son mayores, seguido por el estado detenido ( $P = 0$  MW) y finalmente funcionando ( $P = -22$  MW) en donde con la inyección de energía se compensan los mayores consumos. Durante la máxima regeneración de energía, el peor escenario se da cuando el STMG está funcionando ( $P = -22$  MW) ya que las inyecciones de energía a la red son mayores, seguido por el estado detenido ( $P = 0$  MW) y finalmente en vacío ( $P = 4$  MW) donde se compensan las inyecciones. En resumen, mayor  $P$  menor  $\Delta V$  y viceversa.



- **Tensión de sala N°1:** La tensión en sala N°1 es determinante en la regulación de tensión: Durante el máximo consumo de energía, el peor escenario se presenta a 22.74 kV. Durante la máxima regeneración de energía, el peor escenario se presenta a 23.68 kV. Esto debido a que  $\Delta V$  es inversamente proporcional a  $V$  y directamente proporcional a  $PR + QX$ .

### 5.2.1. Comparativa margen de cargabilidad

Dada la figura 5.35 podemos notar que la propuesta 2, es aquella que presenta el mejor rendimiento, permitiendo aumentar en 8.17 MW el margen en promedio, luego, lo sigue la propuesta 3 con un aumento de 5.71 MW. Por último, la propuesta 1 con un aumento de 4.81 MW.

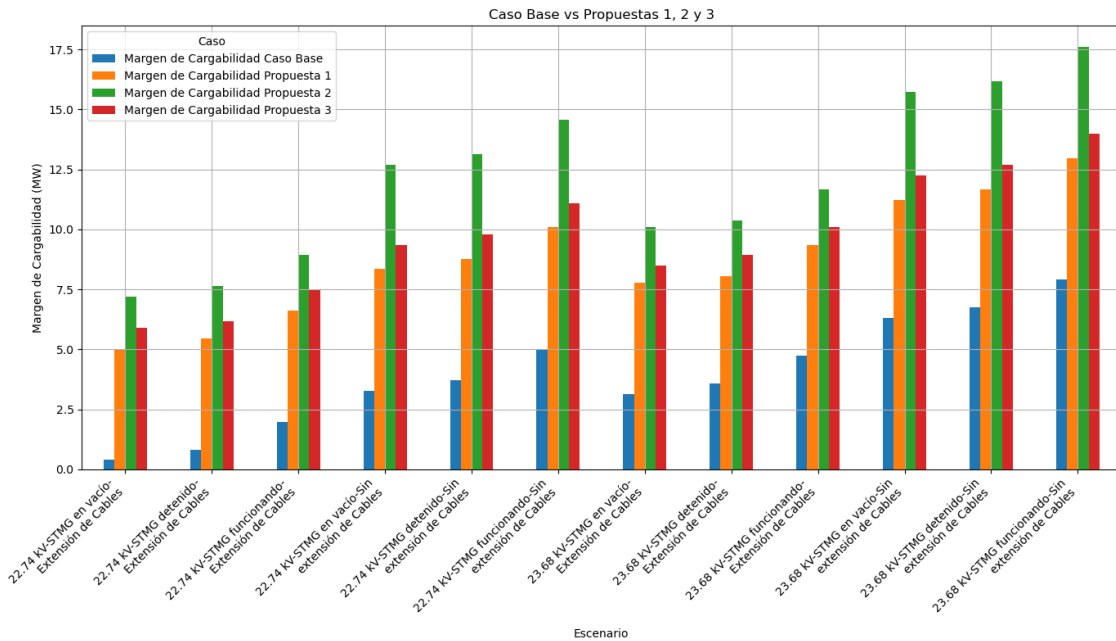


Figura 5.35: Comparativa margen de cargabilidad - Caso base vs propuesta 1 vs propuesta 2 vs propuesta 3.

De la ecuación 5.1 se puede observar que, a mayor reactancia y resistencia, mayor es la variación de voltaje ( $\Delta V$ ). Por lo tanto, cuanto más cercana esté la compensación reactiva a las cargas a compensar (afectando directamente la componente reactiva de la ecuación), mejor será la regulación de tensión, ya que la energía debe recorrer menores distancias para llegar a las cargas. Debido a esto, la propuesta 2 ofrece el mayor rendimiento, ya que está más próxima a las cargas a compensar. Esto resulta en menores pérdidas reactivas, permitiendo al sistema manejar mayores consumos resistivos, lo que se traduce en un mayor margen de cargabilidad. luego lo sigue la propuesta 3 y por último, la propuesta 1.

## 5.2.2. Comparativa VPI

En la figura 5.36 se pueden ver el VPI para los valores máximos de tensión, de cada propuesta vs el caso base por escenario. se puede notar que nuevamente el mayor rendimiento lo presenta la propuesta 2, luego lo sigue la propuesta 3 y por último, la propuesta 1.

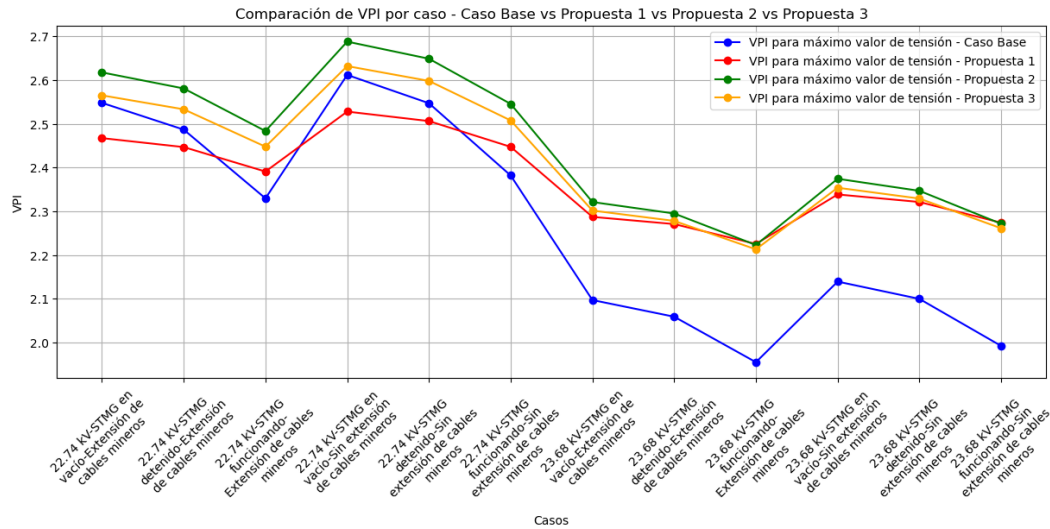


Figura 5.36: Comparativa VPI para máximo nivel de tensión - Caso base vs propuesta 1 vs propuesta 2 vs propuesta 3.

En la figura 5.37 se pueden ver el VPI para los valores mínimos de tensión, de cada propuesta vs el caso base por escenario. Se puede notar que nuevamente el mayor rendimiento lo presenta la propuesta 2, luego lo sigue la propuesta 3 y por último, la propuesta 1.

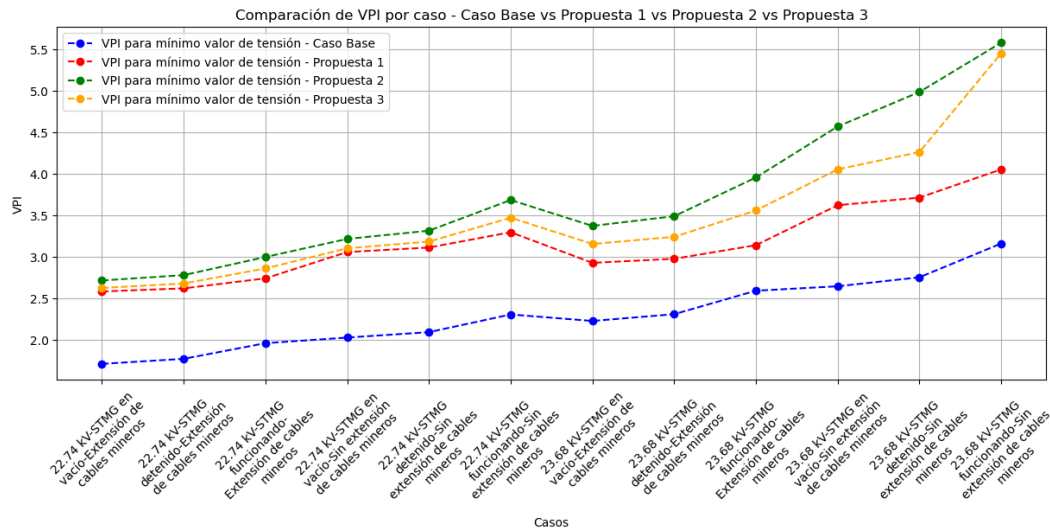


Figura 5.37: Comparativa VPI para mínimo nivel de tensión - Caso base vs propuesta 1 vs propuesta 2 vs propuesta 3.

Al aplicar el mismo análisis mediante la ecuación 5.1, se observa que a menores pérdidas por transmisión de reactivos, necesarias para compensar las caídas de tensión, se obtienen mejores perfiles de tensión. Esto explica por qué la propuesta 2 es la mejor, seguida de la propuesta 3 y, finalmente, la propuesta 1. En resumen, cuanto más cercana esté la compensación reactiva a las cargas, menores son las pérdidas por transmisión y mejor será la regulación y estabilidad de la tensión.

### 5.3. Evaluación económica

En la siguiente sección se presentará la evaluación económica de cada propuesta de infraestructura. En donde se evaluarán los VPN, TIR y periodo de retorno de capital de cada proyecto, además se realizarán los respectivos análisis de sensibilidades con respecto a la inversión y a los ingresos. Antes de entregar los resultados se deben presentar las siguientes consideraciones:

- Ingresos.
- Capex y Opex.

#### 5.3.1. Ingresos

Con respecto a los ingresos, estos serán captados gracias al aumento de productividad debido a demoras no programadas, estas demoras son producidas por la actuación de las protecciones debido a sub-tensiones y sobre-tensiones en las palas y perforadoras y el despeje de dichas fallas. Esto afecta directamente el tiempo operativo tal cual como se ve en la siguiente imagen:

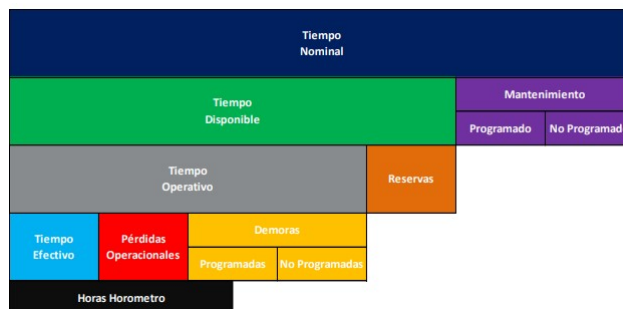


Figura 5.38: Estructura de tiempos AMSA [18].

Se pueden definir las clasificaciones y sub-clasificaciones de tiempo como sigue:

- Tiempo Nominal: tiempo en que se produce la medición.
- Tiempo Disponible: tiempo en que el equipo se encuentra mecánicamente habilitado para cumplir con su función de diseño.
- Tiempo Operativo: tiempo en que el equipo se encuentra mecánicamente habilitado, con operador y cumpliendo con las actividades asignadas asociadas a la operación.

- **Tiempo Efectivo:** tiempo en que el equipo se encuentra desarrollando las actividades asignadas, de acuerdo con su función de diseño y para las cuales ha sido adquirido por La Compañía.
- **Mantenimiento:** tiempo en que el equipo se encuentra fuera de servicio o no disponible, ya sea por una mantención programada, no programada o imprevistos operacionales.
- **Reserva:** tiempo en que el equipo se encuentra mecánicamente apto para cumplir su función de diseño, pero no tiene operador que lo utilice, no es requerido por la operación o está bajo una condición específica por la cual no puede ser operado (MP10 o Factor climático).
- **Demoras Programadas:** tiempo en que el equipo no cumple su función de diseño debido a actividades de las cuales se tiene certeza del momento y la duración de su ocurrencia.
- **Demoras No Programadas:** tiempo en que el equipo no puede cumplir con su función de diseño, debido a actividades propias de la operación pero que no se tiene certeza del momento y la duración de su ocurrencia.
- **Pérdidas Operacionales:** tiempo en que el equipo no cumple con su función de diseño debido a interferencias en su ciclo de trabajo ocasionadas por otro equipo o condiciones externas provenientes de la operación.

En total, entre las palas y perforadoras, se tuvieron en el año 2023 en total 335 horas por demoras no programadas, 89 horas para las palas y 246 para las perforadoras. Al reducir estas horas a de demoras no programadas a 0, se genera un aumento del tiempo operativo lo que significa que existirá un aumento UEBD (Utilización efectiva sobre base disponible).

La UEBD se define como: el porcentaje de horas disponibles en que la flota o equipo se encuentra realizando su función de diseño. Dicho indicador provee información sobre la eficacia operacional del proceso.

$$(\%) \mathbf{UEBD} = \frac{\text{Tiempo Efectivo}}{\text{Tiempo Disponible}} \times 100 \quad (5.2)$$

Este indicador es utilizado por las calculadoras financieras para obtener los siguientes ingresos anuales por el aumento de UEBD:

- Ingresos palas: \$64.900.
- Ingresos perforadoras: \$168.912.

### 5.3.2. Capex y Opex

El capex o costo por inversión de capital de un STATCOM está dado por el precio de compra del equipo y el precio de instalación por obras civiles e ingeniería. Este se puede ver en la siguiente tabla:

Tabla 5.1: Costos de capital, obras civiles e ingeniería para STATCOM[19].

Precio de compra STATCOM o $C_{STATCOM}(\$/kVar)$	50
Obras civiles e ingeniería (\$)	150.000

Con respecto al costo de operación u opex está dados por el costo de mantenimiento anual del equipo, estos corresponden a un 5 % del capex inicial [20].

La primera propuesta de infraestructura corresponde a la compra de un STATCOM de  $\pm 30$  MVar en 23 kV. La segunda, la compra de dos STATCOM de  $\pm 10$  MVar cada uno en 6.9 kV. Por último, la tercera, corresponde a la compra de dos STATCOM de  $\pm 10$  MVar cada uno en 23 kV. De esta manera, en la siguiente tabla resumen se pueden ver los capex y opex de cada propuesta de infraestructura:

Tabla 5.2: Resumen de Capex y Opex por propuesta.

Propuesta	Capex (\$)	Opex (\$)
Propuesta de infraestructura 1	1.650.000	82.500
Propuesta de infraestructura 2	1.150.000	57.500
Propuesta de infraestructura 3	1.150.000	57.500

Por último, se debe mencionar que la tasa de descuento será de un 8 % pues es la tasa utilizada para la evaluación de proyectos en AMSA. Además, se supondrá un horizonte de evaluación para los proyectos de 20 años la cual es utilizada para la evaluación de proyectos de AMSA, una tasa de impuestos de un 26 % según [22] y una depreciación lineal del activo de 10 años [23].

### 5.3.3. Resultados

Los resultados de la evaluación económica son los siguientes:

#### 5.3.3.1. Caso base

La gráfica de barras 5.39 muestra el valor presente neto (VPN) para el caso base, observamos diferencias significativas entre las propuestas. La propuesta 1 muestra un VPN negativo de \$-265.383, indicando una pérdida neta y, por lo tanto, una inviabilidad financiera. En contraste, las propuestas 2 y 3 presentan un VPN positivo de \$307.097, demostrando una alta rentabilidad y viabilidad financiera. Ambas propuestas ofrecen el mismo potencial de generación de valor neto, haciéndolas opciones más atractivas.

La tasa interna de retorno (TIR) también muestra claras diferencias entre las propuestas. La propuesta 1 no tiene una TIR reportada, lo que refuerza su inviabilidad financiera y su incapacidad para generar retornos suficientes para recuperar la inversión inicial. Por otro lado, las propuestas 2 y 3 muestran una TIR de 12 %, lo que indica un rendimiento aceptable y atractivo. Esta tasa sugiere que ambas propuestas no solo son viables, sino que también ofrecen un rendimiento relativo significativo, haciendo que estas inversiones sean más atractivas.

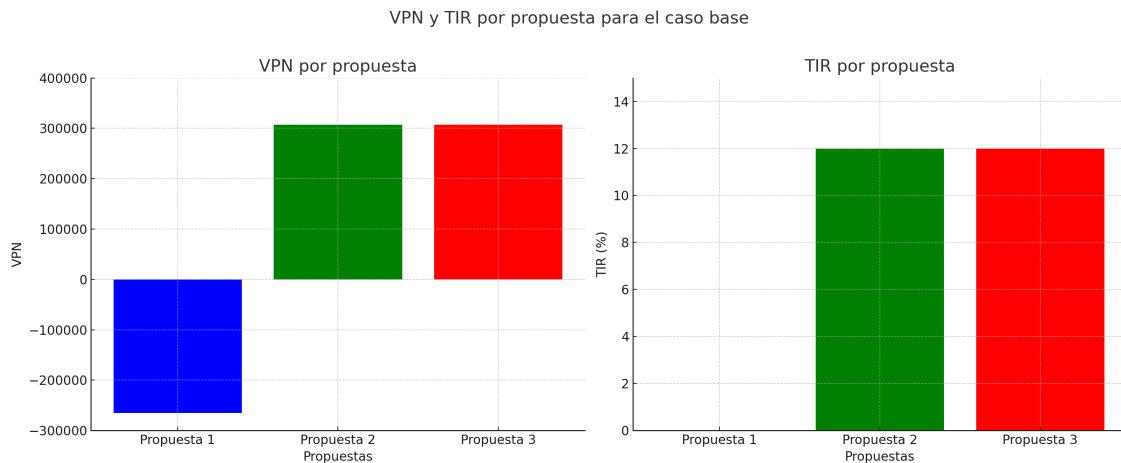


Figura 5.39: VPN y TIR por propuesta para el caso base

La tabla 5.3 muestra el período de recuperación de capital (PRC), la propuesta 1 no tiene un PRC reportado, lo que nuevamente indica su inviabilidad financiera. Las propuestas 2 y 3, por otro lado, tienen un PRC de 12 años. Este período de recuperación es razonable y sugiere que la inversión se recuperará en un plazo moderado, reforzando la viabilidad de estas dos propuestas.

Tabla 5.3: PRC por propuesta.

<b>Caso Base</b>	<b>PRC</b>
<b>Propuesta 1</b>	-
<b>Propuesta 2</b>	12 años
<b>Propuesta 3</b>	12 años

### 5.3.3.2. Análisis de sensibilidad para los ingresos

En el análisis de sensibilidad del valor presente neto (VPN) con respecto a los ingresos presente en la imagen 5.40, se observan variaciones significativas entre las propuestas bajo escenarios de ingresos reducidos y aumentados. Con una reducción del 5% en los ingresos, la propuesta 1 muestra un VPN negativo de \$-362.916, indicando una pérdida neta y, por lo tanto, una inviabilidad financiera. En contraste, las propuestas 2 y 3 presentan un VPN positivo de \$228.449, demostrando una mejor resistencia a la disminución de ingresos y manteniendo su viabilidad. Cuando los ingresos aumentan en un 5%, la Propuesta 1 muestra una mejora en su VPN a \$-167.850, aunque sigue siendo negativo e inviable. Las propuestas 2 y 3 aumentan su VPN a \$385.745, lo que refuerza su atractivo financiero con ingresos incrementados.

La tasa interna de retorno (TIR) también muestra variaciones bajo diferentes escenarios de ingresos. Con una reducción del 5% en los ingresos, la propuesta 1 no tiene una TIR reportada, lo que refuerza su inviabilidad financiera. Las Propuestas 2 y 3 muestran una TIR de 11%, lo que indica un rendimiento aceptable incluso con ingresos reducidos. En el escenario de aumento del 5% en los ingresos, la propuesta 1 sigue sin tener una TIR reportada, lo que subraya su incapacidad para generar retornos suficientes. Las propuestas 2 y 3, por otro lado, tienen una TIR de 13%, indicando un rendimiento excelente y reafirmando su solidez financiera con ingresos incrementados.

VPN y TIR por propuesta para el análisis de sensibilidad de los ingresos

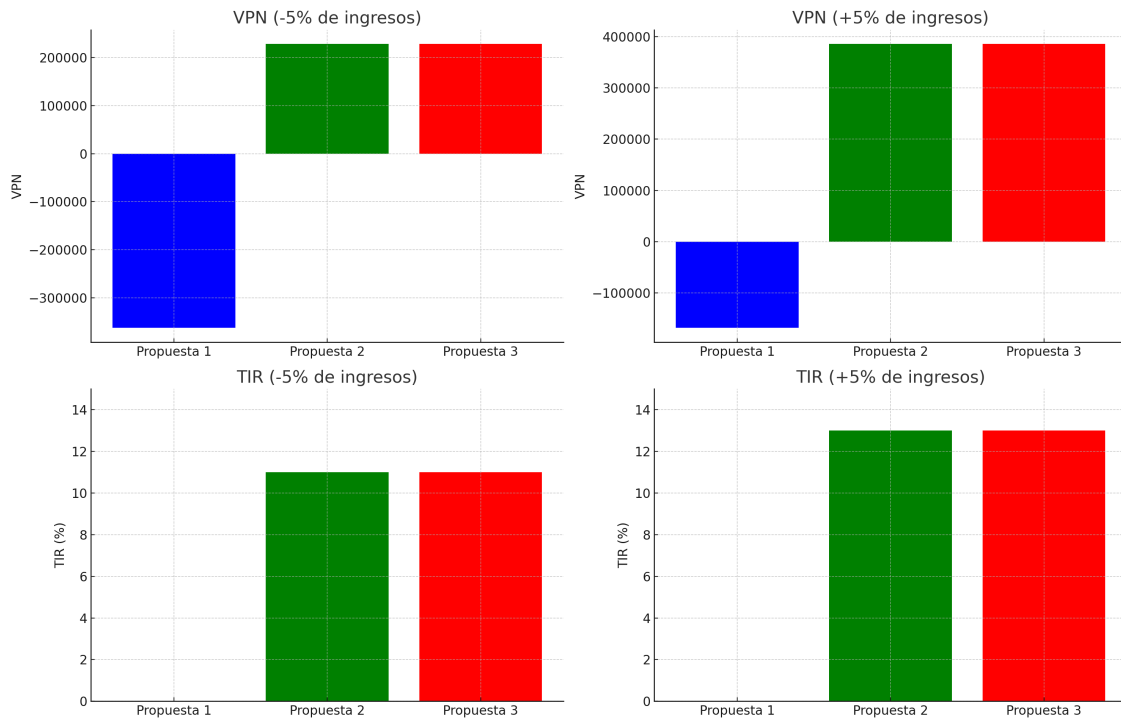


Figura 5.40: VPN y TIR por propuesta para el análisis de sensibilidad para los ingresos

El período de recuperación de capital (PRC) refleja cómo varía el tiempo de recuperación bajo diferentes escenarios de ingresos. Con una reducción del 5% en los ingresos, la propuesta 1 no tiene PRC reportado, lo que nuevamente indica su inviabilidad financiera. Las propuestas 2 y 3 tienen un PRC de 13 años, lo que indica un tiempo de recuperación moderado de la inversión. Con un aumento del 5% en los ingresos, la propuesta 1 sigue sin tener PRC reportado, reafirmando su inviabilidad. Las propuestas 2 y 3 tienen un PRC de 11 años, mostrando que la recuperación es razonablemente rápida y refuerza la viabilidad de estas dos propuestas.

Tabla 5.4: PRC por propuesta para el análisis de sensibilidad de los ingresos.

<b>-5 % de ingresos</b>	<b>PRC</b>	<b>+5 % de ingresos</b>	<b>PRC</b>
<b>Propuesta 1</b>	-	<b>Propuesta 1</b>	-
<b>Propuesta 2</b>	13 años	<b>Propuesta 2</b>	11 años
<b>Propuesta 3</b>	13 años	<b>Propuesta 3</b>	11 años



### 5.3.3.3. Análisis de sensibilidad para las inversiones

En el análisis de sensibilidad del valor presente neto (VPN) con respecto a la inversión mostrado en la imagen 5.41, se observan diferencias significativas entre las propuestas bajo escenarios de inversión reducida y aumentada. Con una reducción del 5% en la inversión, la propuesta 1 muestra un VPN negativo de \$-154.580, indicando una pérdida neta y, por lo tanto, una inviabilidad financiera. En contraste, las propuestas 2 y 3 presentan un VPN de \$370.390, demostrando una alta rentabilidad. Cuando la inversión aumenta en un 5%, la propuesta 1 muestra un VPN aún más negativo de \$-376.185, lo que refuerza su inviabilidad financiera. Las propuestas 2 y 3 mantienen un VPN positivo de \$243.804, aunque menor que en el escenario de inversión reducida.

La tasa interna de retorno (TIR) también muestra variaciones bajo diferentes escenarios de inversión. Con una reducción del 5% en la inversión, la propuesta 1 no tiene una TIR reportada, lo que refuerza su inviabilidad financiera. Las propuestas 2 y 3 muestran una TIR de 13%, lo que indica un rendimiento excelente con una menor inversión. En el escenario de aumento del 5% en la inversión, la propuesta 1 sigue sin tener una TIR reportada, lo que subraya su incapacidad para generar retornos suficientes. Las propuestas 2 y 3, por otro lado, tienen una TIR de 11%, ligeramente menor pero aún bastante atractiva, demostrando solidez en su rendimiento con mayor inversión.

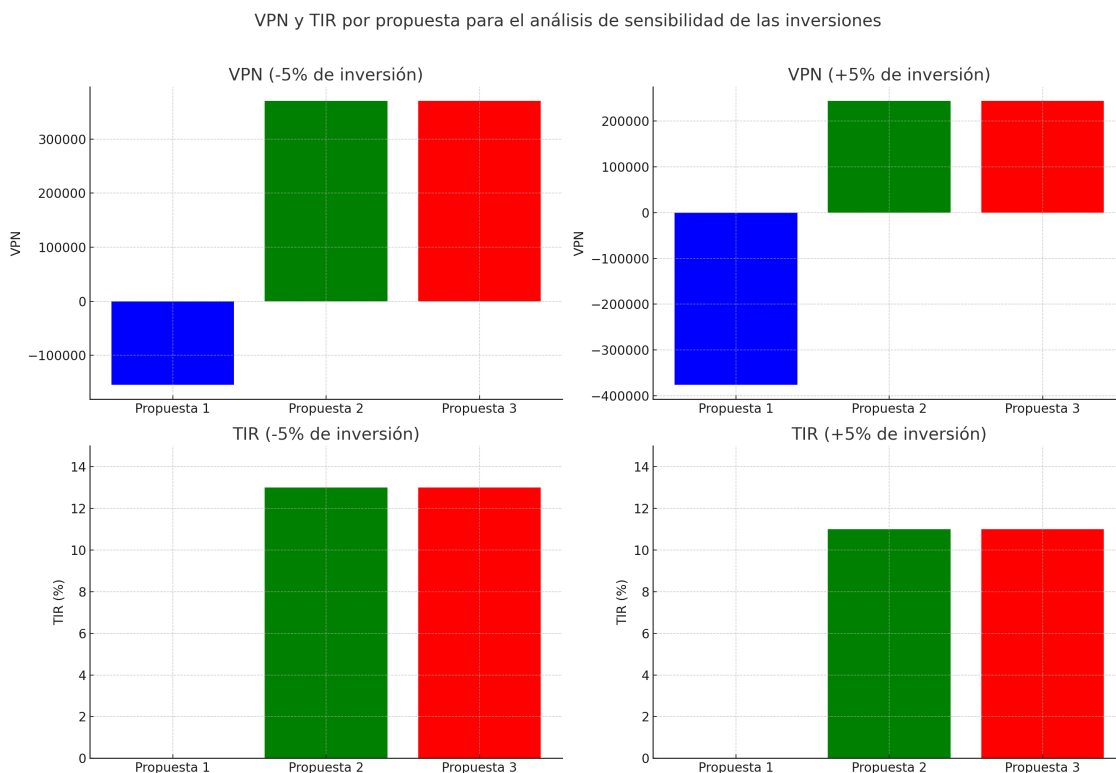


Figura 5.41: VPN y TIR por propuesta para el análisis de sensibilidad para las inversiones

El período de recuperación de capital (PRC) refleja cómo varía el tiempo de recuperación bajo diferentes escenarios de inversión. Con una reducción del 5 % en la inversión, la propuesta 1 no tiene PRC reportado, lo que nuevamente indica su inviabilidad financiera. Las propuestas 2 y 3 tienen un PRC de 11 años, lo que indica una recuperación rápida de la inversión. Con un aumento del 5 % en la inversión, la propuesta 1 sigue sin tener PRC reportado, reafirmando su inviabilidad. Las propuestas 2 y 3 tienen un PRC de 13 años, mostrando que la recuperación es un poco más lenta en comparación con el escenario de inversión reducida, pero sigue siendo razonablemente rápida y viable.

Tabla 5.5: PRC por propuesta para el análisis de sensibilidad de las inversiones.

<b>-5 % de inversión</b>	<b>PRC</b>	<b>+5 % de inversión</b>	<b>PRC</b>
<b>Propuesta 1</b>	-	<b>Propuesta 1</b>	-
<b>Propuesta 2</b>	11 años	<b>Propuesta 2</b>	13 años
<b>Propuesta 3</b>	11 años	<b>Propuesta 3</b>	13 años

En resumen, las mejores propuestas de infraestructura en términos económicos son las propuestas 2 y 3, seguidos de la propuesta 1 que ni siquiera logro ser viable económicamente en ningún escenario.

# Capítulo 6

## Conclusiones

Dentro de las conclusiones, lo primero que podemos mencionar es que los objetivos de esta memoria fueron cumplidos con éxito.

El primer objetivo fue modelar el sistema eléctrico a estudiar, incluyendo las cargas críticas del sistema (palas y perforadoras) y capturando los escenarios de operación adecuados para el análisis. Esto permitió reflejar la realidad operacional donde ocurren fallas por sub-tensiones y sobre-tensiones, generando pérdidas económicas.

El segundo objetivo fue definir las propuestas de infraestructura, en la cual se establecieron sectores del sistema a considerar, concentrados en las salas eléctricas del STMG, los parrones de maniobra del loop mina y los transformadores móviles del loop mina. Además, se estableció que el equipo para compensar reactivos corresponde STATCOM. Se logró optimizar la ubicación y capacidad de los STATCOM a utilizar.

El tercer objetivo consistió en analizar distintas propuestas de infraestructura. Se demostró que estos equipos son eficientes en la regulación de tensión gracias a su flexibilidad y rápida respuesta, mejorando la estabilidad de tensión mediante el aumento del margen de cargabilidad y la mejora en los perfiles de tensión, como se evidenció con el indicador VPI.

El cuarto objetivo fue realizar un análisis económico de las propuestas de infraestructura. Capturando ingresos por demoras no programadas en los equipos críticos (palas y perforadoras) y considerando correctamente los capex y opex, se pudo realizar un análisis económico detallado de cada propuesta con sus respectivas sensibilidades en ingresos e inversiones. Se demostró que dos propuestas (2 y 3) son rentables económicamente.

Respecto a las principales conclusiones del análisis técnico, se puede determinar que la longitud de los cables influye significativamente en la regulación de tensión. Una mayor longitud de cables provoca una peor regulación, tanto por debajo (mínimos valores de tensión producto del máximo consumo) como por arriba (máximos valores de tensión producto de la máxima regeneración).

En el caso del STMG, cuando está en vacío, la regulación por debajo es peor y la regulación por arriba es mejor. Esto se debe a que en el primer caso se incrementan los consumos generales de la red, mientras que en el segundo caso estos se compensan. Cuando el STMG

está detenido, no hay diferencias significativas entre la regulación por debajo y por arriba. Sin embargo, cuando está funcionando, la regulación por debajo mejora, ya que compensa los consumos generales de la red, mientras que la regulación por arriba empeora debido al aumento de las regeneraciones generales de la red.

En cuanto a los valores de tensión en la sala N°1, se observa que a menor tensión, la regulación por arriba es mejor, mientras que a mayor tensión, la regulación por debajo mejora. Todo este comportamiento puede explicarse mediante la ecuación de regulación de tensión.

Por otro lado, la mejor propuesta técnica corresponde a la propuesta 2 (STATCOM en transformadores móviles #7 y #7), seguido de la propuesta 3 (STATCOM en parrones del loop mina PM-Patio Cable y PM-7) y por último la propuesta 1 (STATCOM en sala N°12). Con respecto a los márgenes de cargabilidad la propuesta 2 por lejos es la mejor, seguido de la propuesta 3 y luego la 1, esto es debido a que la propuesta 2 es la más cercana a las cargas y genera menores pérdidas por transmisión de energía. Ahora analizando los perfiles de tensión y el VPI la propuesta 2 sigue siendo la mejor, luego viene la propuesta 3 y por último la propuesta 1. Esto debido nuevamente a que la compensación de tensión local es mejor debido a menores pérdidas por transmisión.

Las conclusiones generales de la evaluación económica de las propuestas demuestran que capturar ingresos por las demoras programadas tanto de las palas como de las perforadoras es suficiente para mejorar la rentabilidad operacional. Nuevamente, se confirma que las propuestas de infraestructura más cercanas a las cargas críticas son más favorables, ahora en términos económicos, ya que requieren menores capacidades de los equipos para cumplir con los requerimientos técnicos, lo que resulta en un menor capex y opex. En orden de preferencia, la propuesta 2 es la más rentable empatada de la propuesta 3. En cambio, la propuesta 1 no resulta económicamente viable.

De todo el análisis anterior, podemos concluir que la mejor propuesta de infraestructura, tanto a nivel técnico como económico, es la propuesta 2. Sin embargo, existen limitaciones operacionales no abordadas en esta memoria, relacionadas con la dificultad de acceso para realizar el mantenimiento del equipo debido a las ubicaciones consideradas, influenciadas por las condiciones geográficas y climáticas. Esto también aplica a la propuesta de infraestructura 3, que es la segunda mejor opción.

Por otro lado, la propuesta 1 actualmente no puede ser considerada viable económicamente. No obstante, esta situación podría cambiar si se lograran capturar nuevas fuentes de ingresos, como la disminución de pérdidas por transmisión y el aumento de la flexibilidad operativa, debido a la capacidad de extender la longitud de los cables mineros a 4.5 km, lo cual impactaría directamente en la reducción de los tiempos de transporte de equipos.

Es por estas razones que nunca se propuso como objetivo definir la mejor propuesta en términos económicos y técnicos.

## 6.1. Trabajo futuro

Respecto de los trabajos futuros en términos técnicos, queda propuesto evaluar el comportamiento en términos transitorios de las propuestas de infraestructura, es decir, ver como permite mejorar la estabilidad transitoria del sistema.

Por otro lado, queda propuesto a futuro evaluar en como mejora la rentabilidad económica de las propuestas considerando capturar ingresos mediante la disminución por perdidas de transmisión y el aumento de la flexibilidad que permite disminuir los movimientos de equipos.

Por último, queda pendiente evaluar operacionalmente las ventajas y desventajas de cada propuesta, lo cual es fundamental definir la selección definitiva.

# Bibliografía

- [1] L. Morán, J. Espinoza, and R. Burgos, “Voltage Regulation in Mine Power Distribution Systems: Problems and Solutions,” in 2014 IEEE Industry Application Society Annual Meeting, Vancouver, BC, Canada, pp. 1-7, 2014, doi: 10.1109/IAS.2014.6978453.
- [2] P. Darling, “Electric Power Distribution and Utilization,” in SME Mining Engineering Handbook, 3rd ed., American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, 2014.
- [3] P. Aqueveque, E. P. Wiechmann, J. A. Henríquez, and L. Muñoz, “Energy Quality and Efficiency of an Open Pit Mine Distribution System: Evaluation and Solution,” in 2016 IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 52, no. 1, pp. 580-588, 2016, doi: 10.1109/TIA.2015.2464172.
- [4] P. Kundur, “Power System Stability and Control,” McGraw-Hill, 1994.
- [5] M. Bollen, “Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions,” 2000, doi:10.1109/9780470546840.
- [6] B. Ismail, N.I.A. Wahab, M.L. Othman, M.A.M Radzi, K. Naidu, M.N.M Naain, “The optimal location and sizing of single and multiple STATCOM using analytical approaches under high loading occasion,” Journal of Engineering Science and Technology, 2022.
- [7] W. Christie, R. Palma-Behnke, B. Blanco-Contreras, D. Espín-Sarzosa, “Atrapando el Sol en los Sistemas Eléctricos de Potencia,” 2018.
- [8] T.M.L. Assis, A.R. Nunes, F. Djalma, “Mid and Long-Term Voltage Stability Assessment using Neural Networks and Quasi-Steady-State Simulation,” 2007, doi:10.1109/LESCPE.2007.4437381.
- [9] L. F. León, M. Martínez, L. J. Ontiveros and P. E. Mercado, “Devices and control strategies for voltage regulation under influence of photovoltaic distributed generation. A review,” in IEEE Latin America Transactions, vol. 20, no. 5, pp. 731-745, 2022, doi: 10.1109/TLA.2022.9693557.
- [10] M. Srivastava, S. K. Goyal, A. Saraswat, R. S. Shekhawat and G. Gangil, “A Review on Power Quality Problems, Causes and Mitigation Techniques,” 2022 1st International Conference on Sustainable Technology for Power and Energy Systems (STPES), SRINAGAR, India, pp. 1-6, 2022, doi: 10.1109/STPES54845.2022.10006587.
- [11] T. Sukanth, S. Jayanthu and A. Jayalaxmi, “Mitigation of power quality problem in underground mine using different control strategies,” 2016 IEEE Region 10 Humanitarian Technology Conference (R10-HTC), Agra, India, pp. 1-4, 2016, doi: 10.1109/R10-HTC.2016.7906798.

- [12] A. S. Telang and P. P. Bedekar, "Systematic approach for optimal placement and sizing of STATCOM to assess the voltage stability," 2016 International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT), Nagercoil, India, pp. 1-6, 2016, doi: 10.1109/ICCPCT.2016.7530132.
- [13] Komatsu, "Electric Mining Shovel Estimated Electrical Power Parameters," Global Technical Bulletin No: GTB1303 B2 – Procedure Improvement, 2022.
- [14] P&H Mining Equipment Inc., "Manual del Sistema Eléctrico Centurion CA," Peak Services, Version 03, 2012.
- [15] P&H Mining Equipment Inc., "Manual del Sistema Eléctrico Centurion DC," 2022.
- [16] Epiroc, ÜS080153 PV351E RCS Parts Catalog".
- [17] J. J. Grainger and W. D. Stevenson, "Power System Analysis," McGraw-Hill, 1994.
- [18] "Directriz Reportabilidad de Tiempos e Índices para Equipos Mineros," Antofagasta Minerals S.A., 2017.
- [19] S. A. Salimon, Q. O. Lawal, O. W. Adebisi, and M. O. Okelola, "Cost-Benefit of Optimal Allocation of DSTATCOM in Distribution Networks Using Ant-Lion Optimization Algorithm," Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science, pp. 350–360, 2022.
- [20] F. Nepsha, V. Voronin, R. Belyaevsky, V. Efremenko, K. Varnavskiy, "Application of FACTS Devices in Power Supply Systems of Coal Mines," E3S Web of Conferences, 2020, doi: 10.1051/e3sconf/202017403026.
- [21] L. Tamblay, M. Jorratt. Apunte de clases Evaluación de Proyectos. Flujo de caja.
- [22] Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, "Royalty Minero", [Online]. Disponible: <https://www.bcn.cl/portal/leyfacil/recurso/royalty-minero>.
- [23] Servicio de Impuestos Internos (SII), "Tabla de Vida Útil de Bienes," [Online]. Disponible: [https://www.sii.cl/pagina/valores/bienes/tabla\\_vida\\_enero.htm](https://www.sii.cl/pagina/valores/bienes/tabla_vida_enero.htm)
- [24] D. V. Tien, P. Hawliczek, R. Gono, and Z. Leonowicz, "Analysis and Modeling of STATCOM for Regulate the Voltage in Power Systems", 2017.
- [25] DigSILENT GmbH, "PowerFactory 2021 User Manual," Version 2021, Online Edition, DIgSILENT GmbH, Gomaringen, Germany, 2021. [Online]. Available: <https://www.digsilent.de>.
- [26] L. Tamblay, M. Jorratt. Apunte de clases Evaluación de Proyectos. Matemáticas Financieras y Criterios de Decisión.

# Anexos

En la siguiente sección se presentan las gráficas no utilizada para el análisis técnico y que pueden ser revisadas para verificar la información resumida que fue presentada en este.



# Anexo A. Caso base

## A.1. Curvas PV

### A.1.1. Tensión en sala N°12 en 22.74 kV

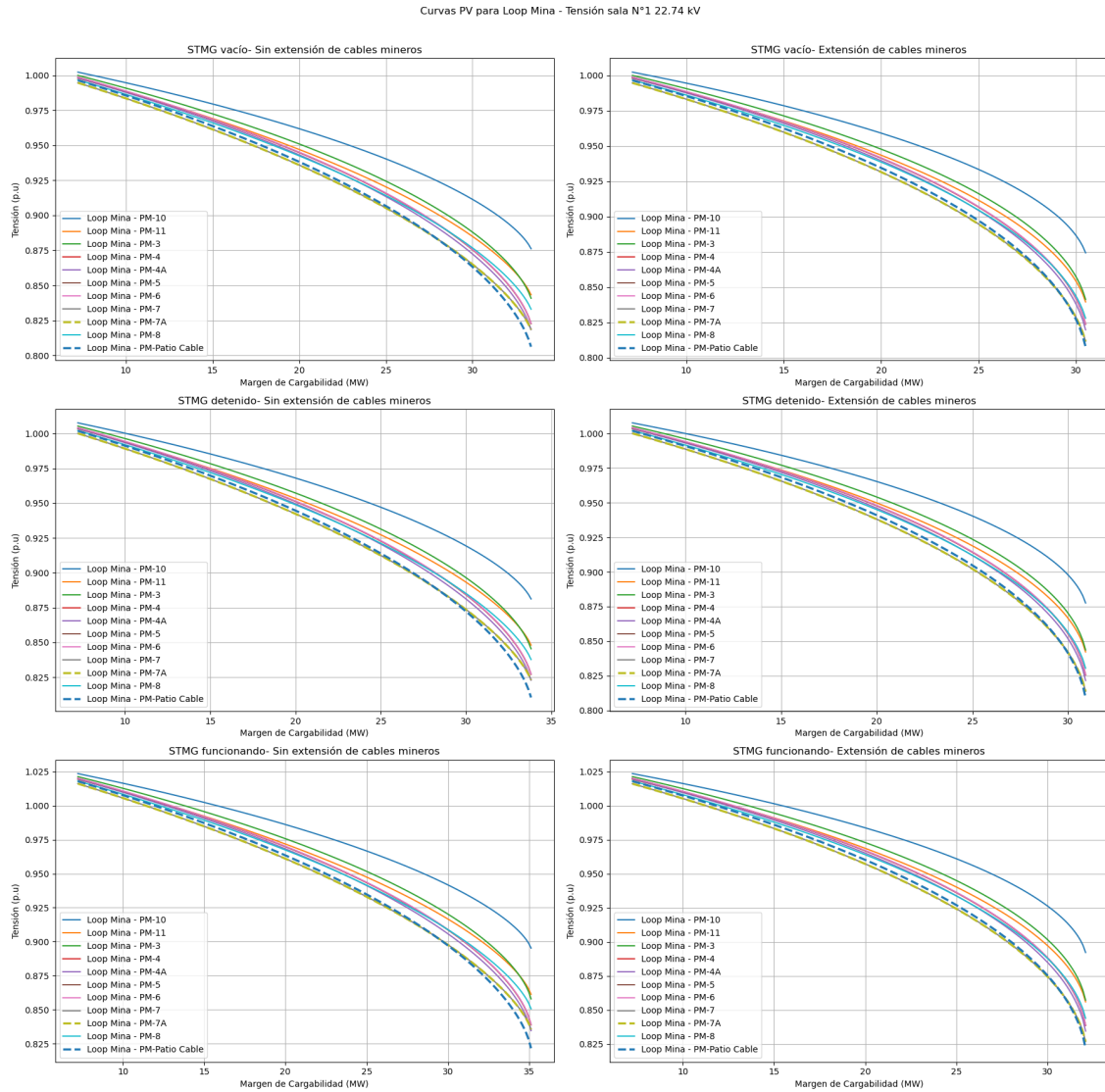


Figura A.1: Curva PV para loop mina - Tensión sala N°1 22.74 kV - Caso base.

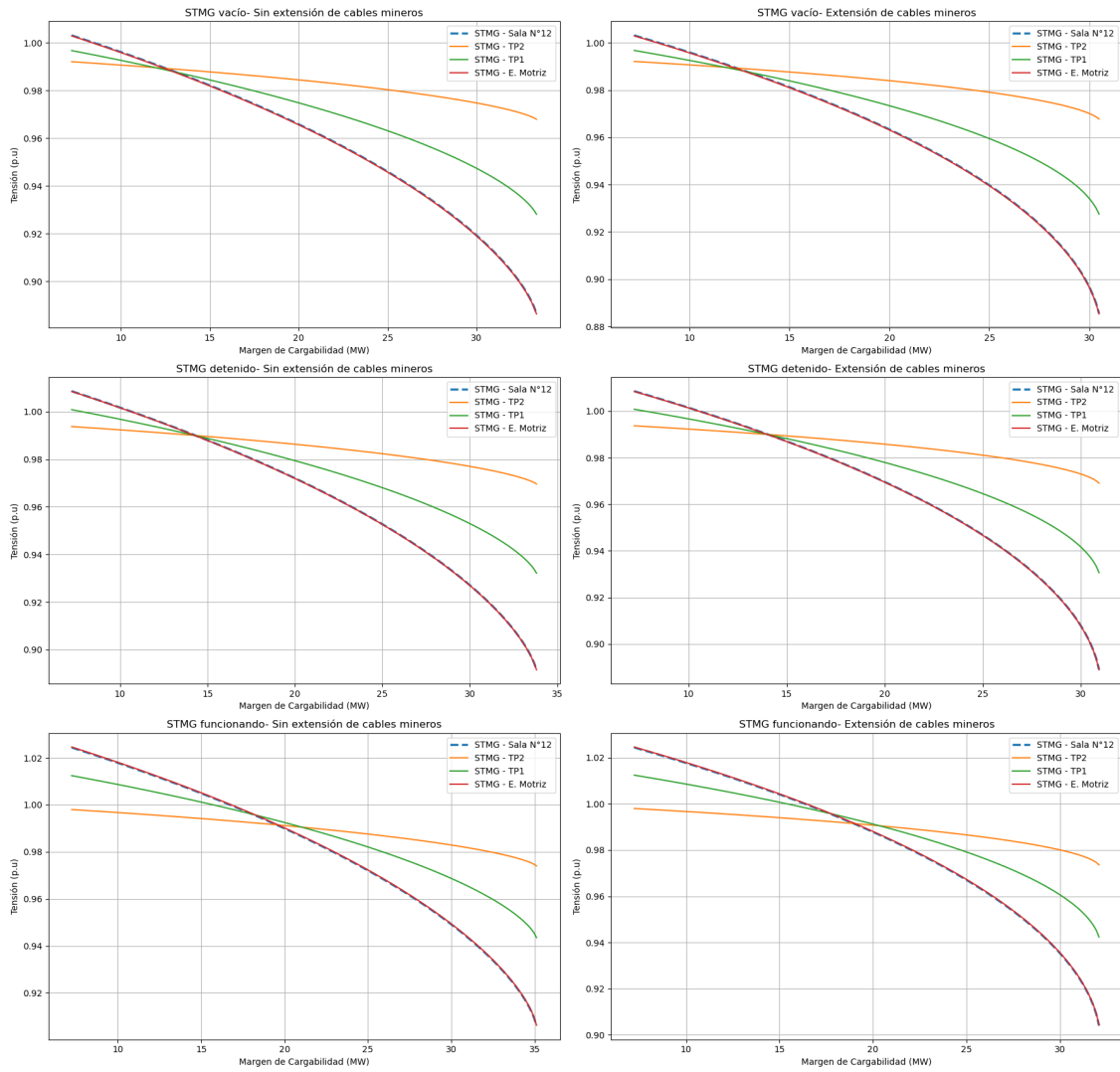


Figura A.2: Curva PV para STMG - Tensión sala N°1 22.74 kV - Caso base.

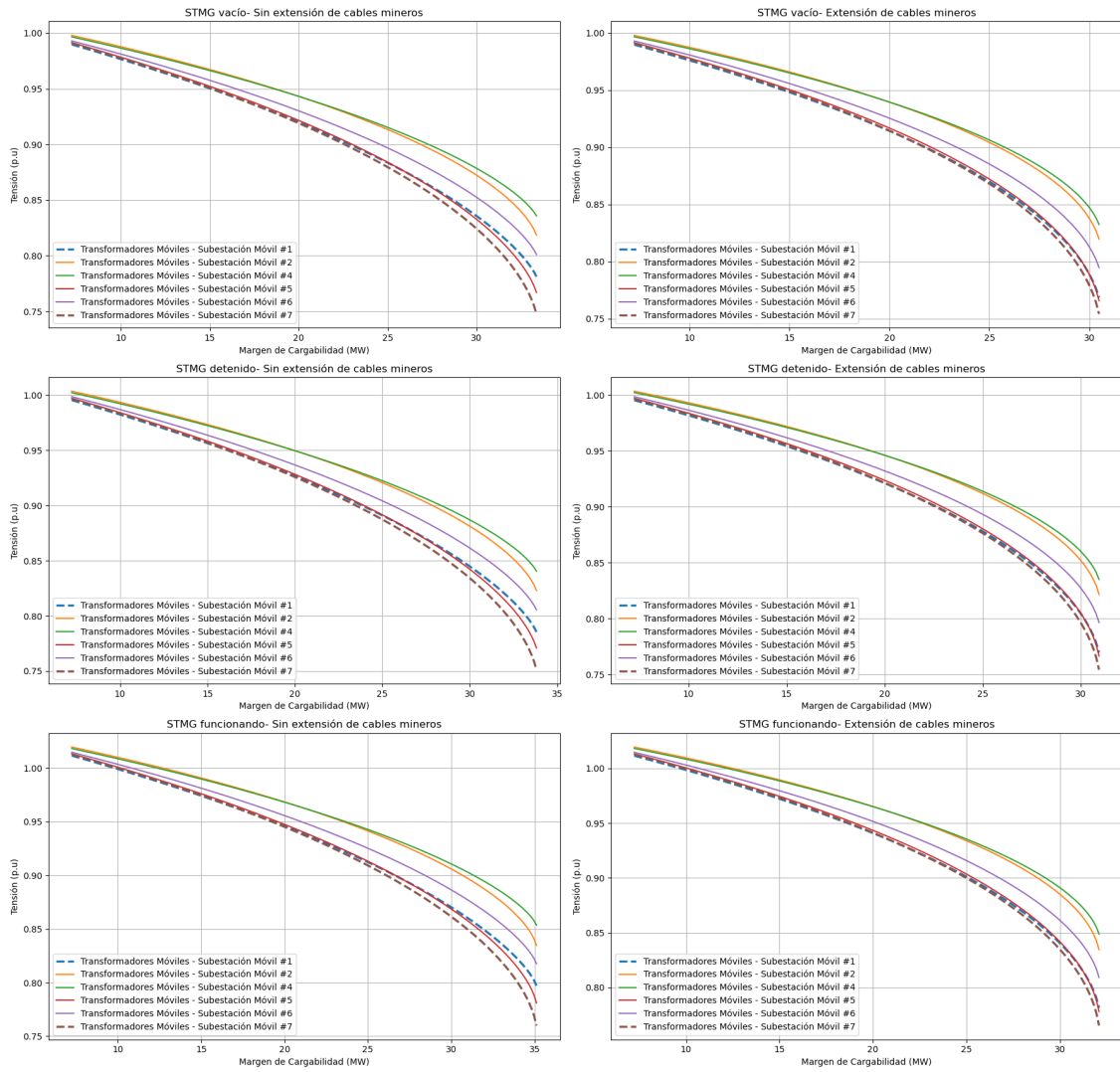


Figura A.3: Curva PV para transformadores móviles - Tensión sala N°1 22.74 kV - Caso base.

## A.1.2. Tensión en sala N°12 en 23.68 kV

Curvas PV para Loop Mina - Tensión sala N°1 23.68 kV

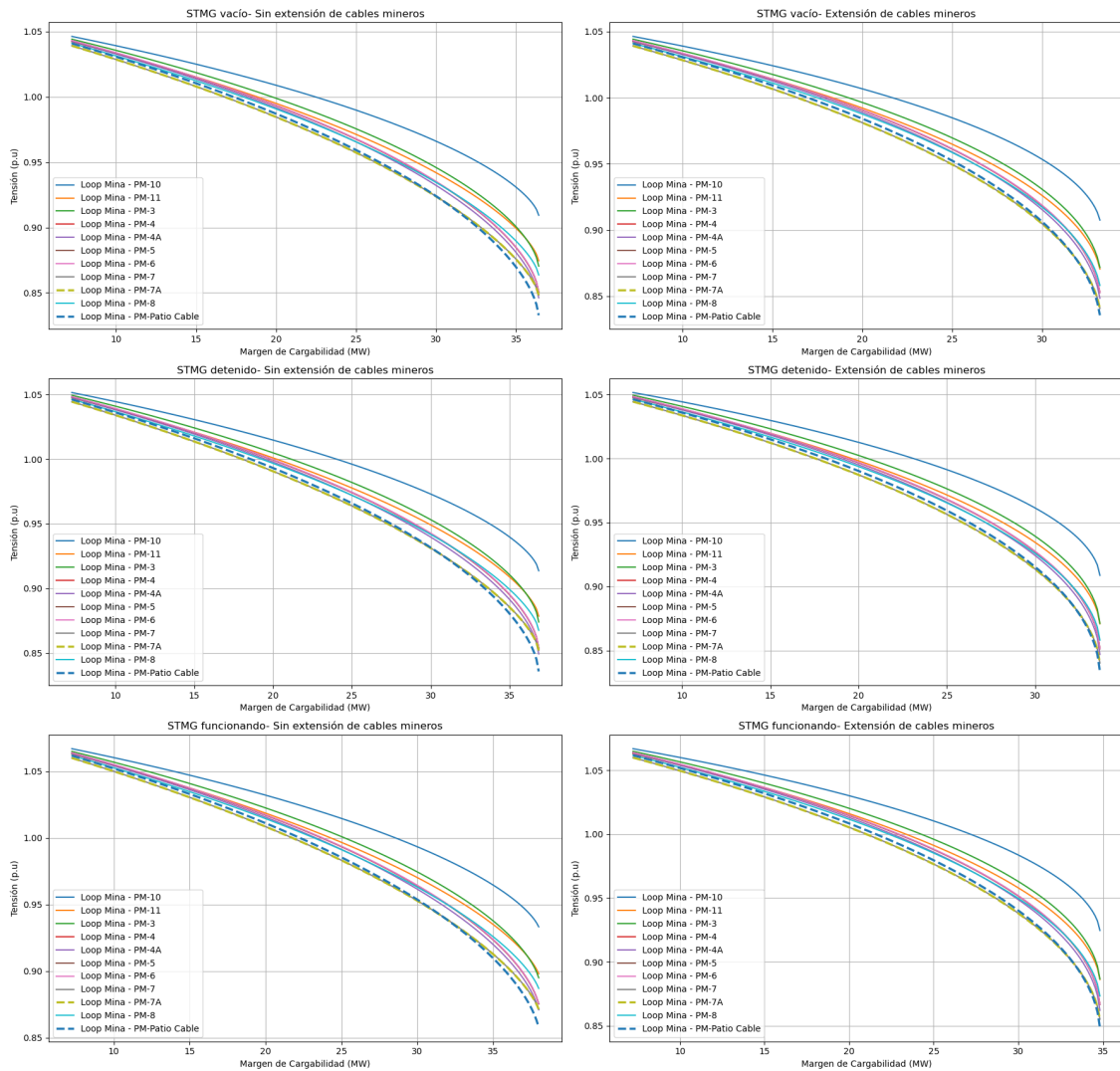


Figura A.4: Curva PV para loop mina - Tensión sala N°1 23.68 kV - Caso base.

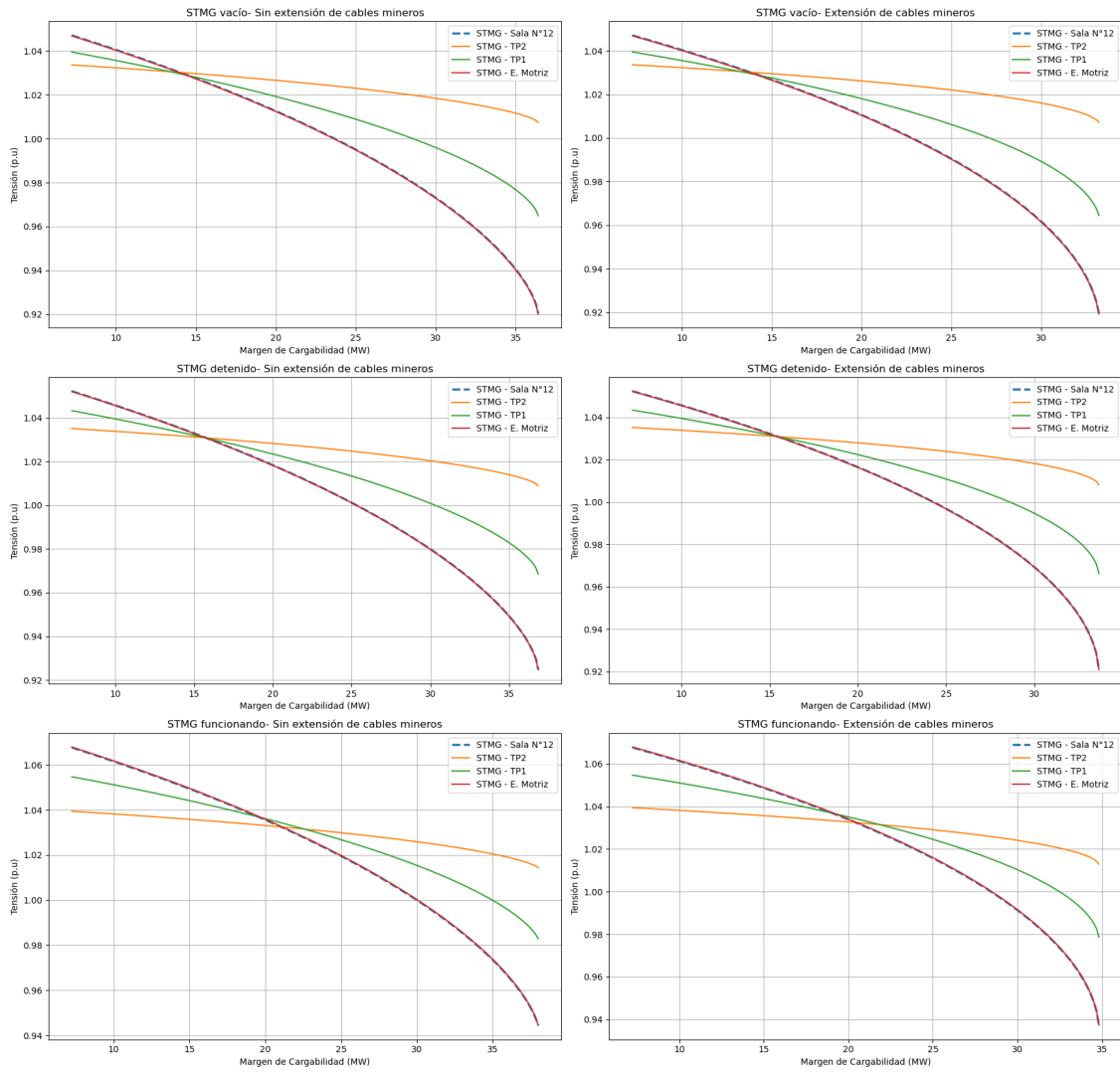


Figura A.5: Curva PV para STMG - Tensión sala N°1 23.68 kV - Caso base.

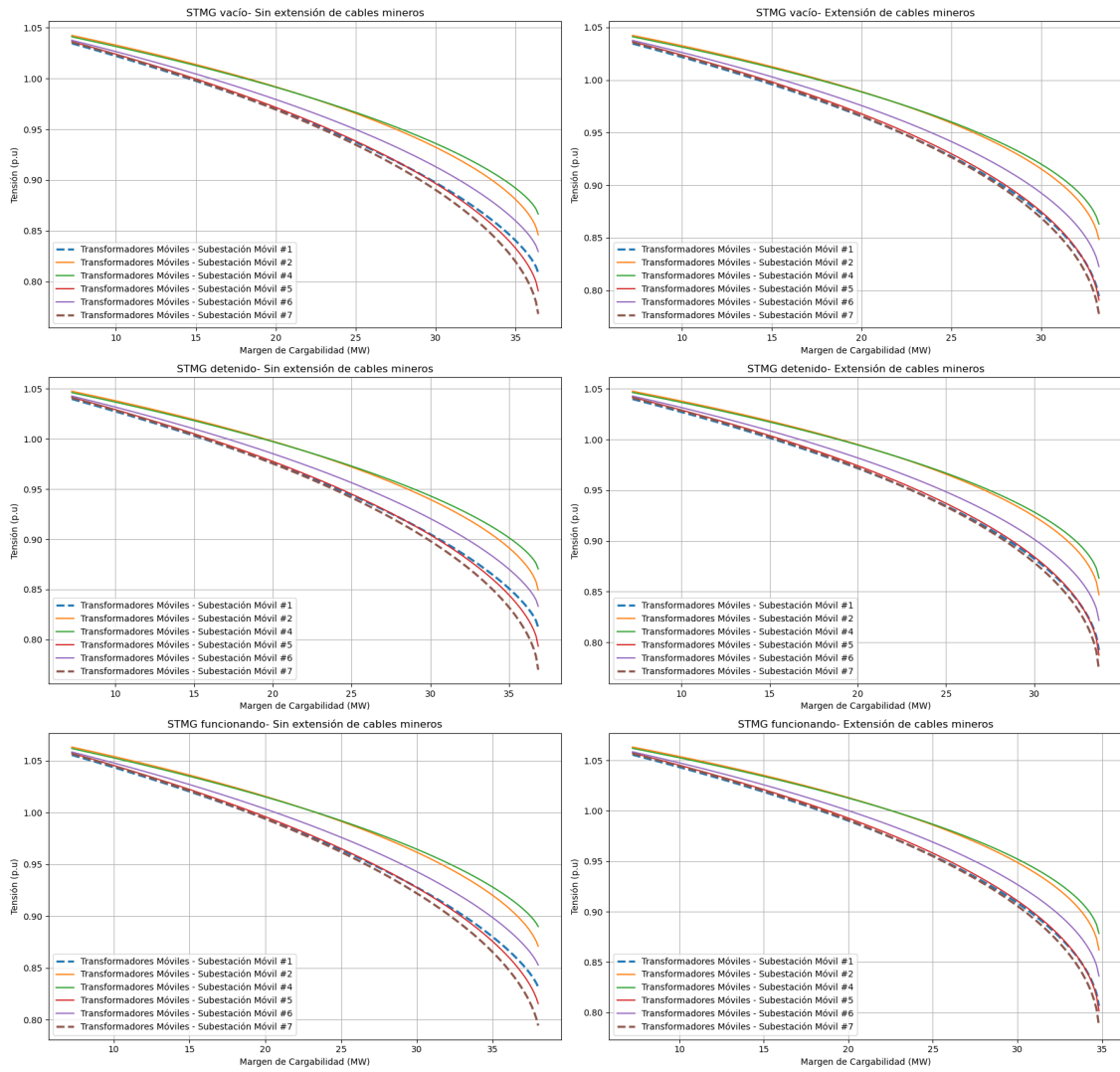


Figura A.6: Curva PV para transformadores móviles - Tensión sala N°1 23.68 kV - Caso base.

# Anexo B. Propuesta de infraestructura 1

## B.1. Tensión en sala N°12 en 22.74 kV

### B.1.1. Niveles de tensión

Niveles de Tensión de Palas para Caso Base vs Propuesta de Infraestructura 1 - Tensión sala N°1 en 22.74 kV

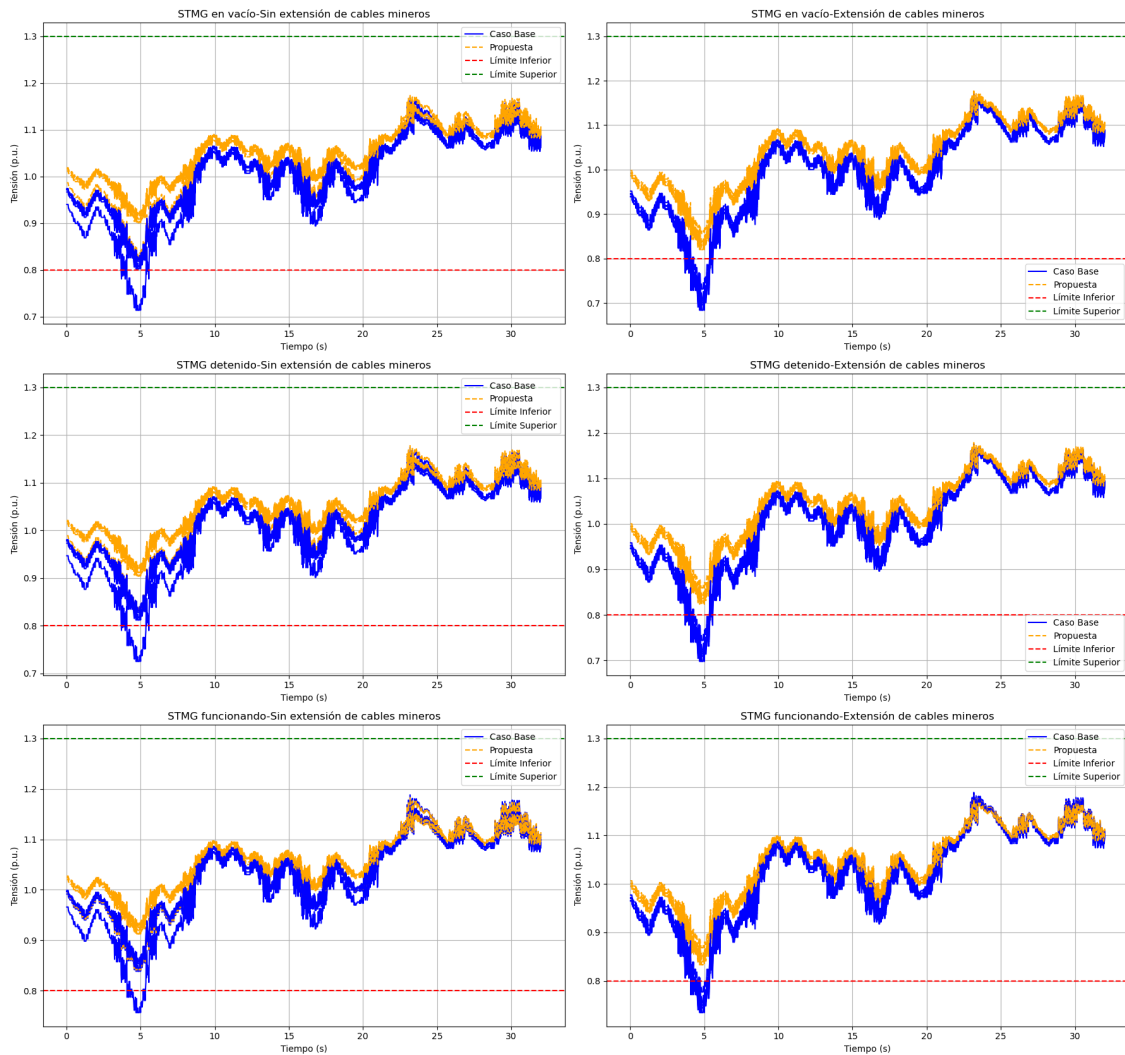


Figura B.1: Niveles de tensión de palas para caso base vs propuesta de infraestructura 1 - Tensión en sala N°1 22.74 kV.

Niveles de Tensión de Perforadoras para Caso Base vs Propuesta de Infraestructura 1 - Tensión sala N°1 en 22.74 kV

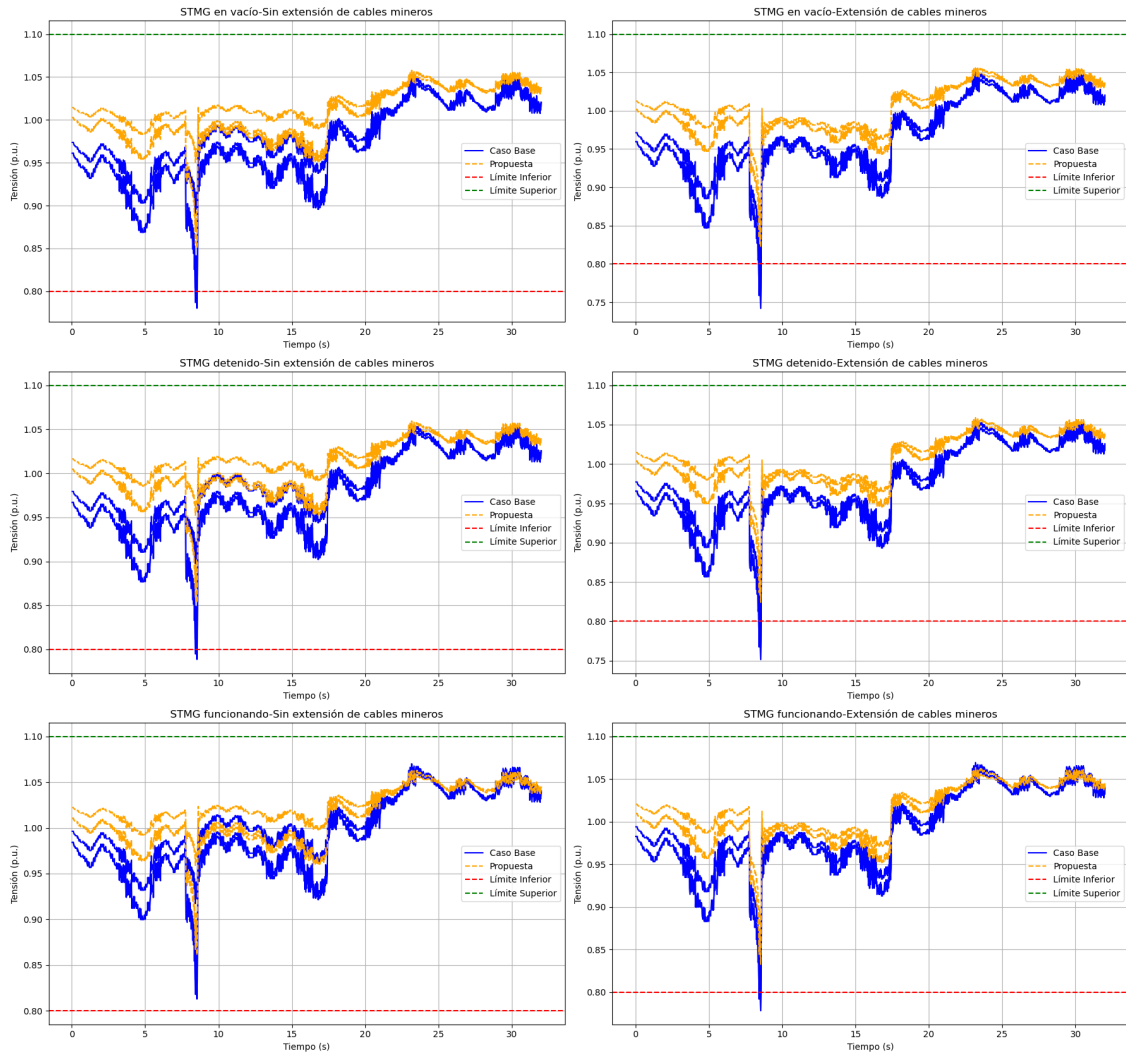


Figura B.2: Niveles de tensión de perforadoras para caso base vs propuesta de infraestructura 1 - Tensión en sala N°1 22.74 kV.



Niveles de Tensión de Loop Mina para Caso Base vs Propuesta de Infraestructura 1 - Tensión sala N°1 en 22.74 kV

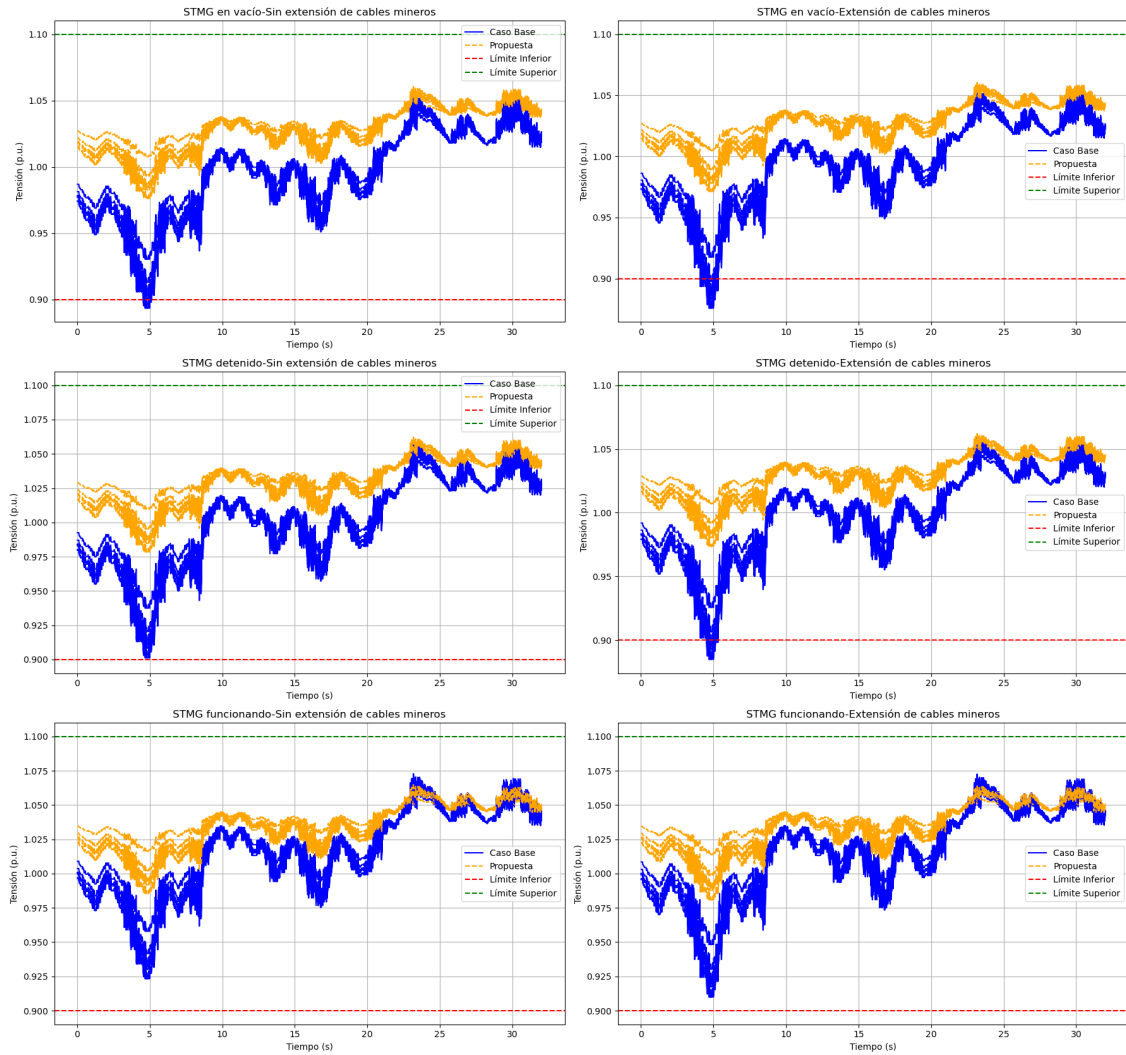


Figura B.3: Niveles de tensión de loop mina para caso base vs propuesta de infraestructura 1 - Tensión en sala N°1 22.74 kV.

Niveles de Tensión de STMG para Caso Base vs Propuesta de Infraestructura 1 - Tensión sala N°1 en 22.74 kV

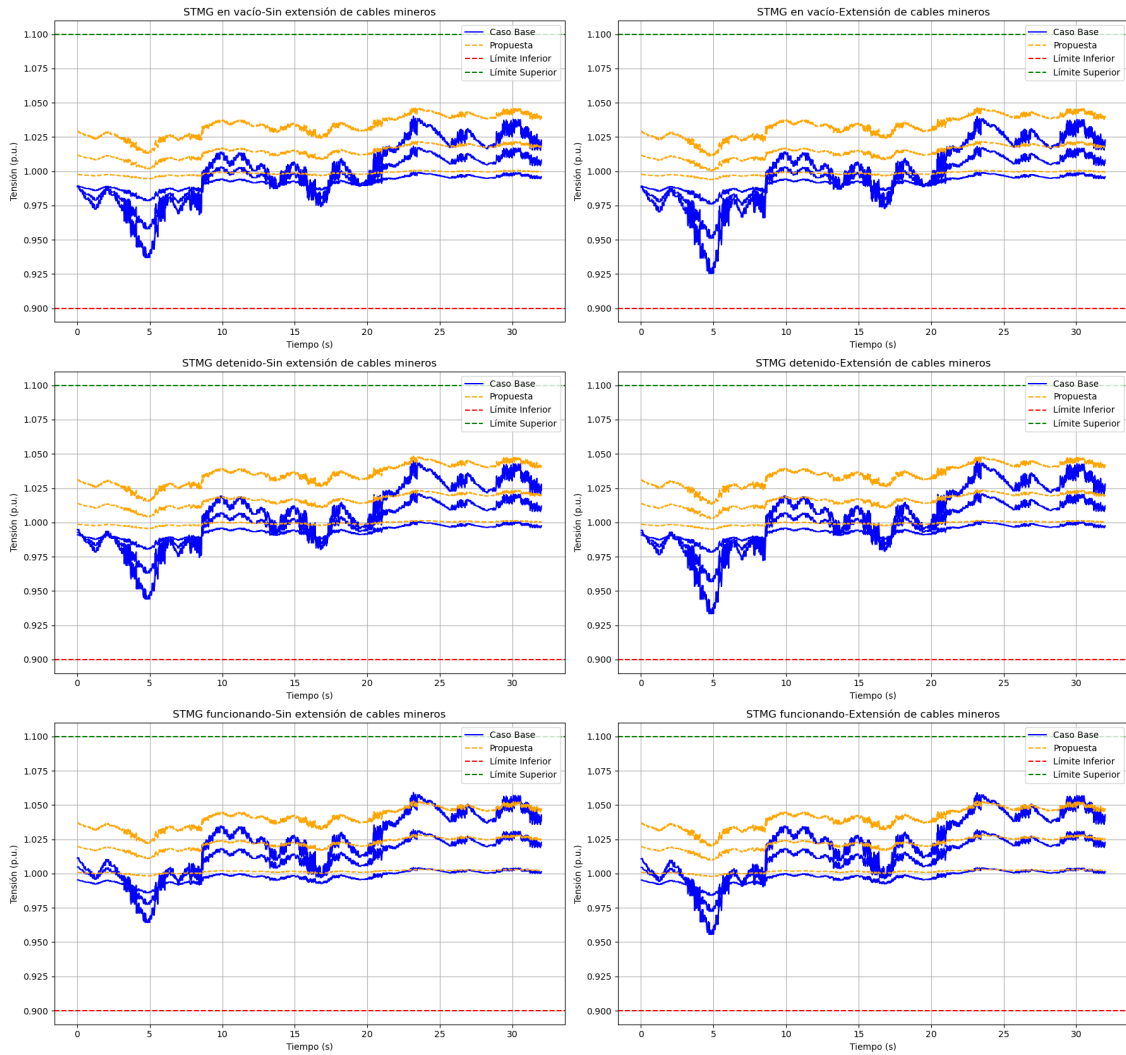


Figura B.4: Niveles de tensión STMG para caso base vs propuesta de infraestructura 1 - Tensión en sala N°1 22.74 kV.

Potencia Reactiva entregada por Statcom en 23 kV conectado a Sala N°12 (Propuesta de Infraestructura 1) - Tensión sala N°1 en 22.74 kV

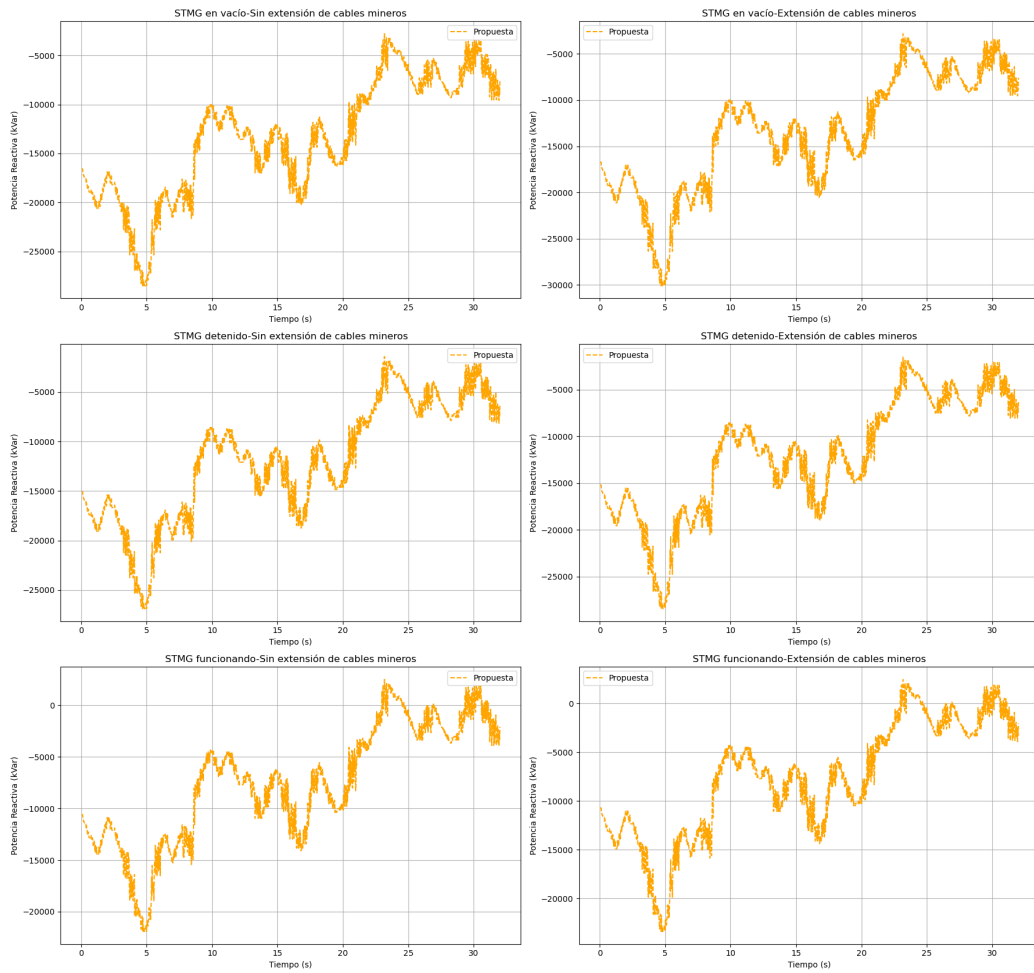


Figura B.5: Potencia Reactiva entregada por STATCOM en 23 kV conectado a sala N°12 (propuesta de infraestructura 1) - Tensión en sala N°1 22.74 kV.

## B.1.2. Curvas PV

Curvas PV para Loop Mina - Tensión sala N°1 22.74 kV

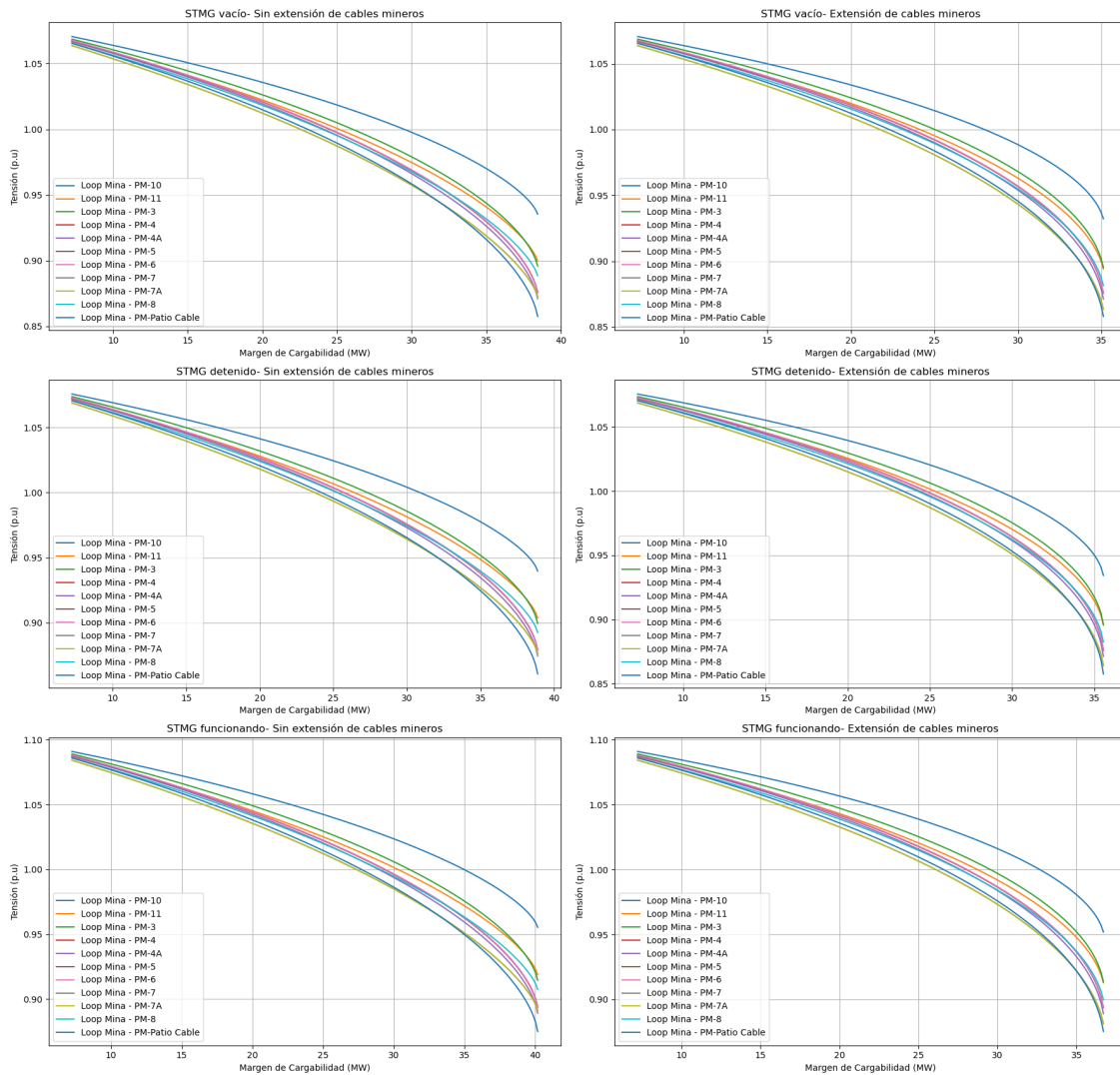


Figura B.6: Curva PV para loop mina - Tensión sala N°1 22.74 kV - Propuesta de infraestructura 1.

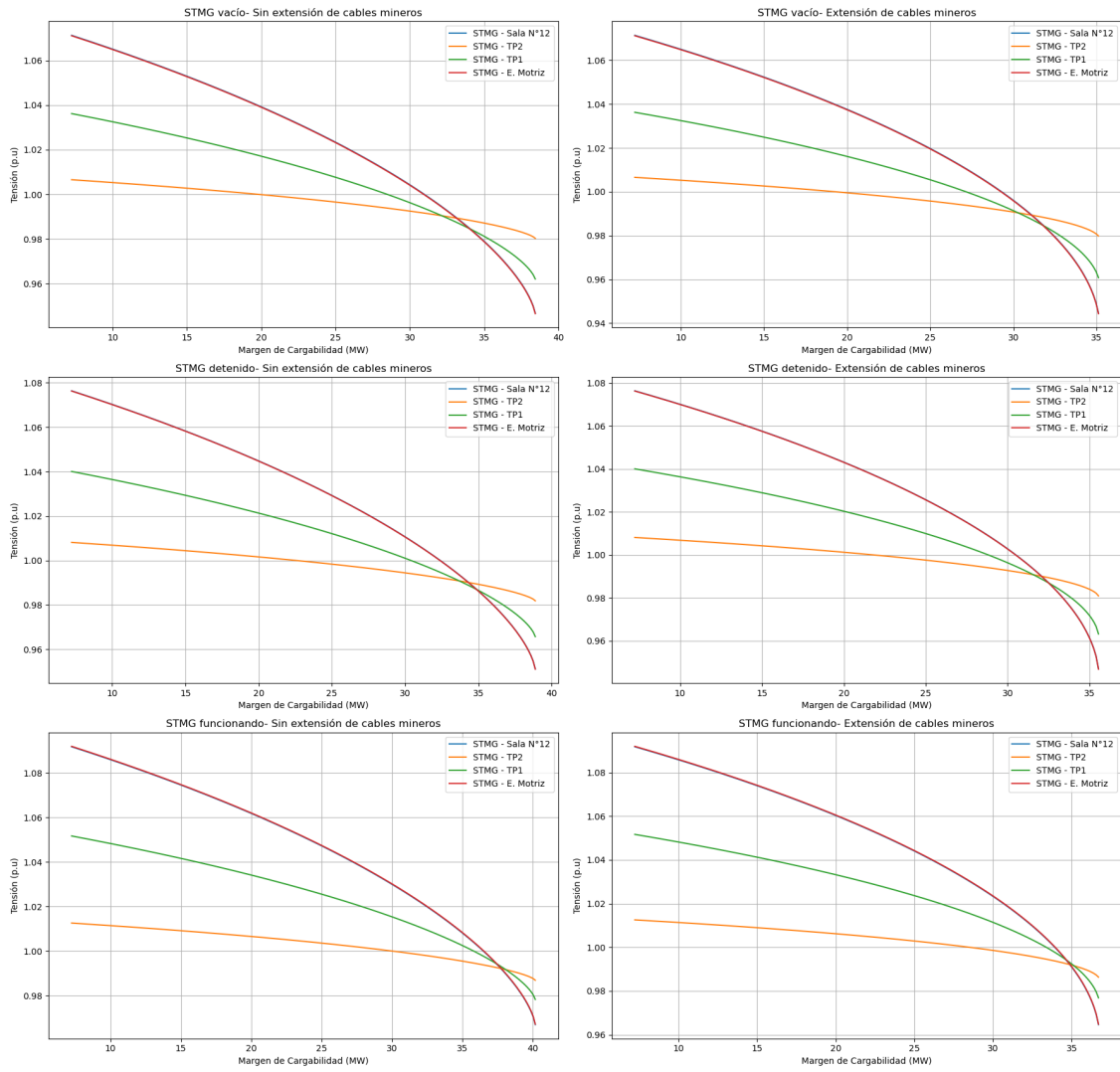


Figura B.7: Curva PV para STMG - Tensión sala N°1 22.74 kV - Propuesta de infraestructura 1.

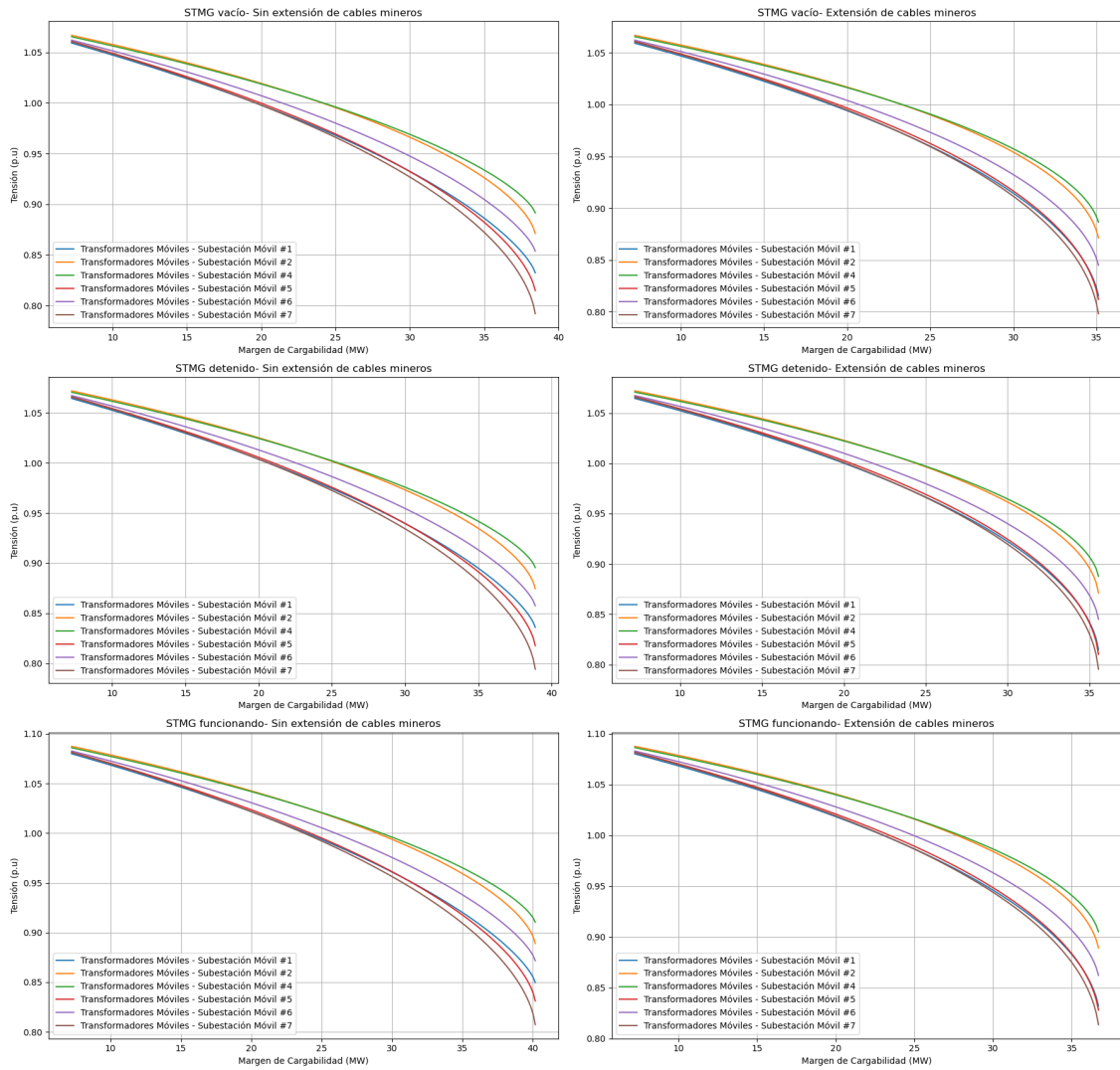


Figura B.8: Curva PV para transformadores móviles - Tensión sala N°1 22.74 kV - Propuesta de infraestructura 1.

### B.1.3. Tensión en sala N°12 en 23.68 kV

### B.1.4. Niveles de tensión

Niveles de Tensión de Palas para Caso Base vs Propuesta de Infraestructura 1 - Tensión sala N°1 en 23.68 kV

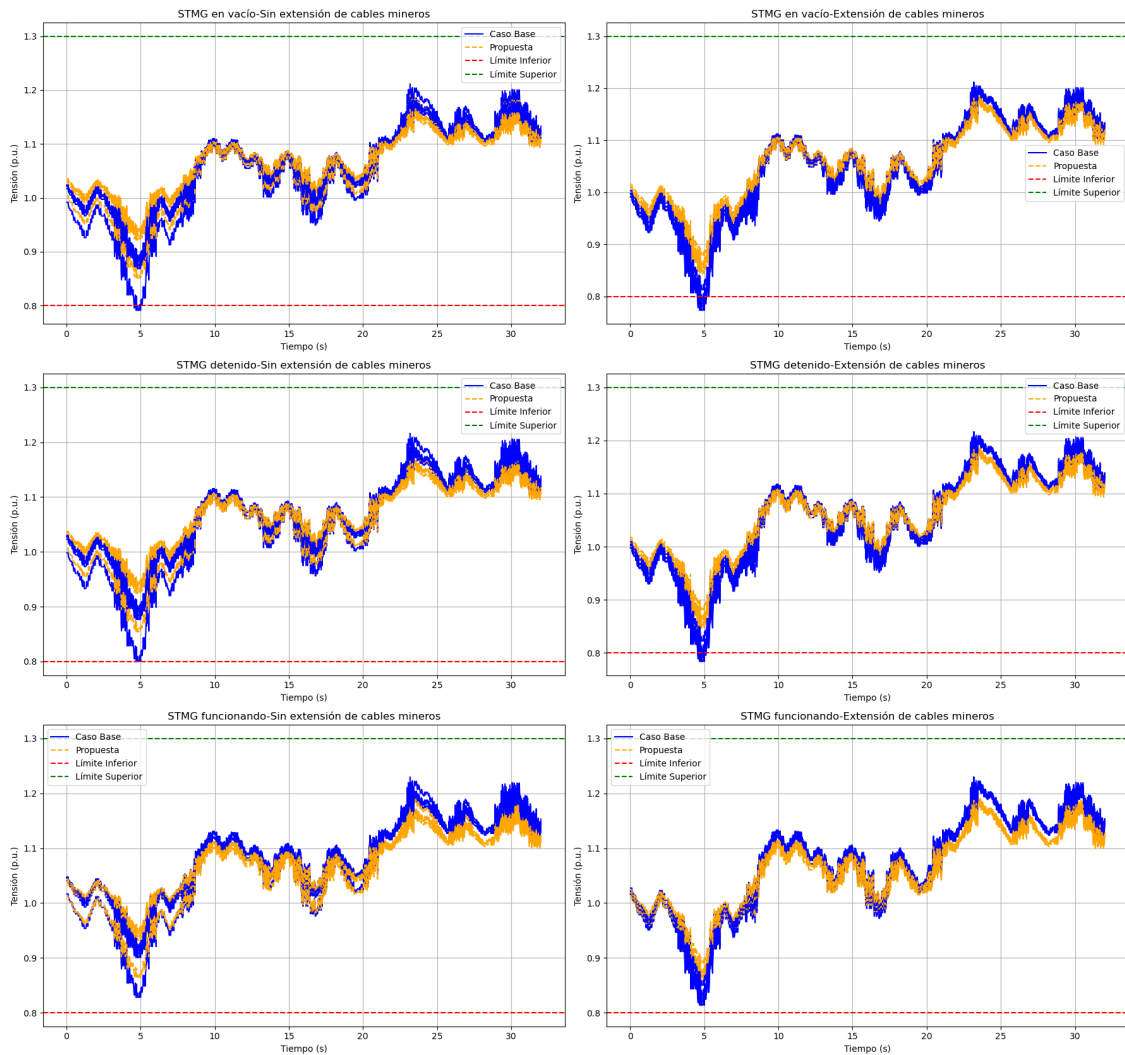


Figura B.9: Niveles de tensión de palas para caso base vs propuesta de infraestructura 1 - Tensión en sala N°1 23.68 kV.

Niveles de Tensión de Perforadoras para Caso Base vs Propuesta de Infraestructura 1 - Tensión sala N°1 en 23.68 kV

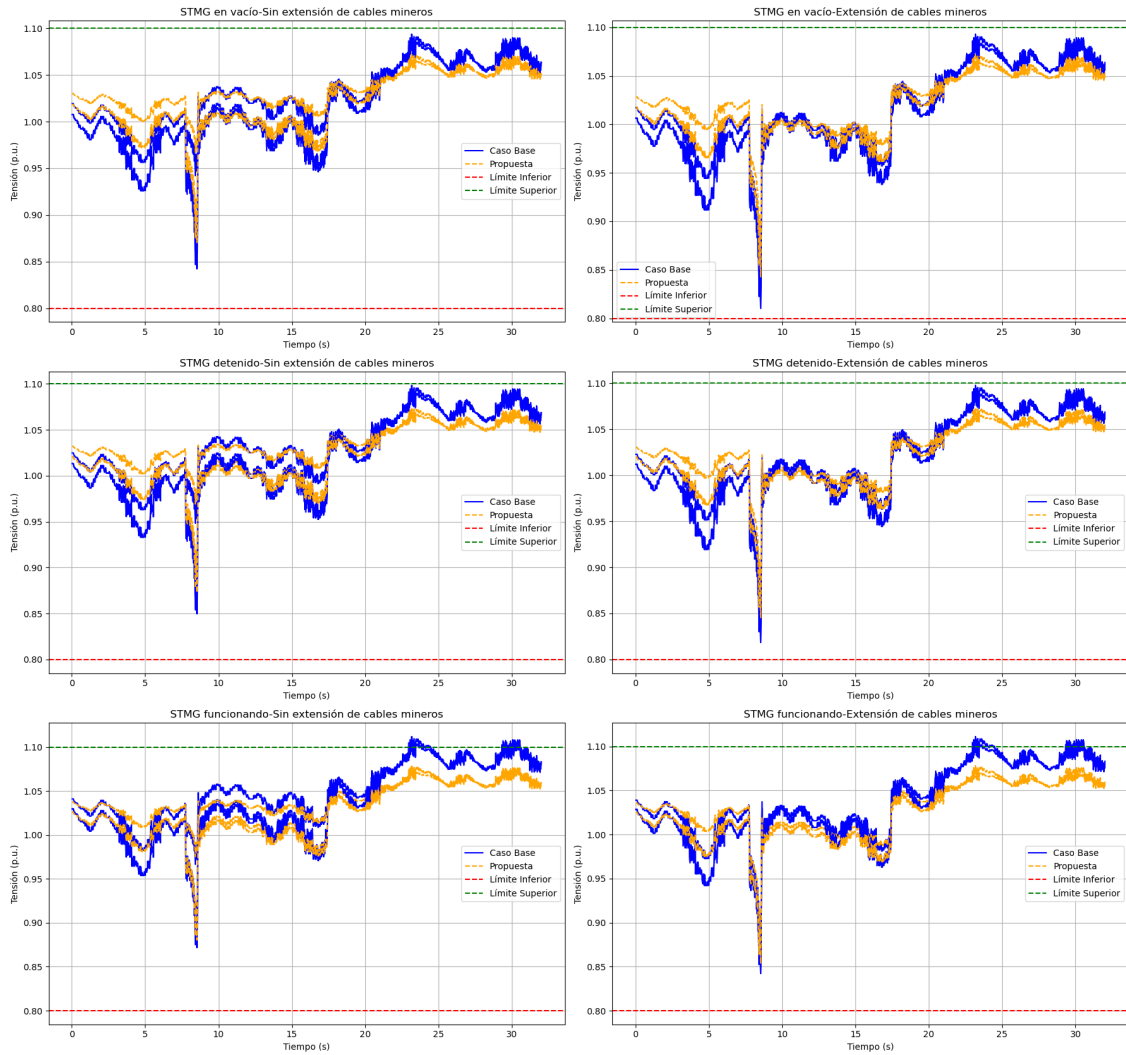


Figura B.10: Niveles de tensión de perforadoras para caso base vs propuesta de infraestructura 1 - Tensión en sala N°1 23.68 kV.



Niveles de Tensión de Loop Mina para Caso Base vs Propuesta de Infraestructura 1 - Tensión sala N°1 en 23.68 kV

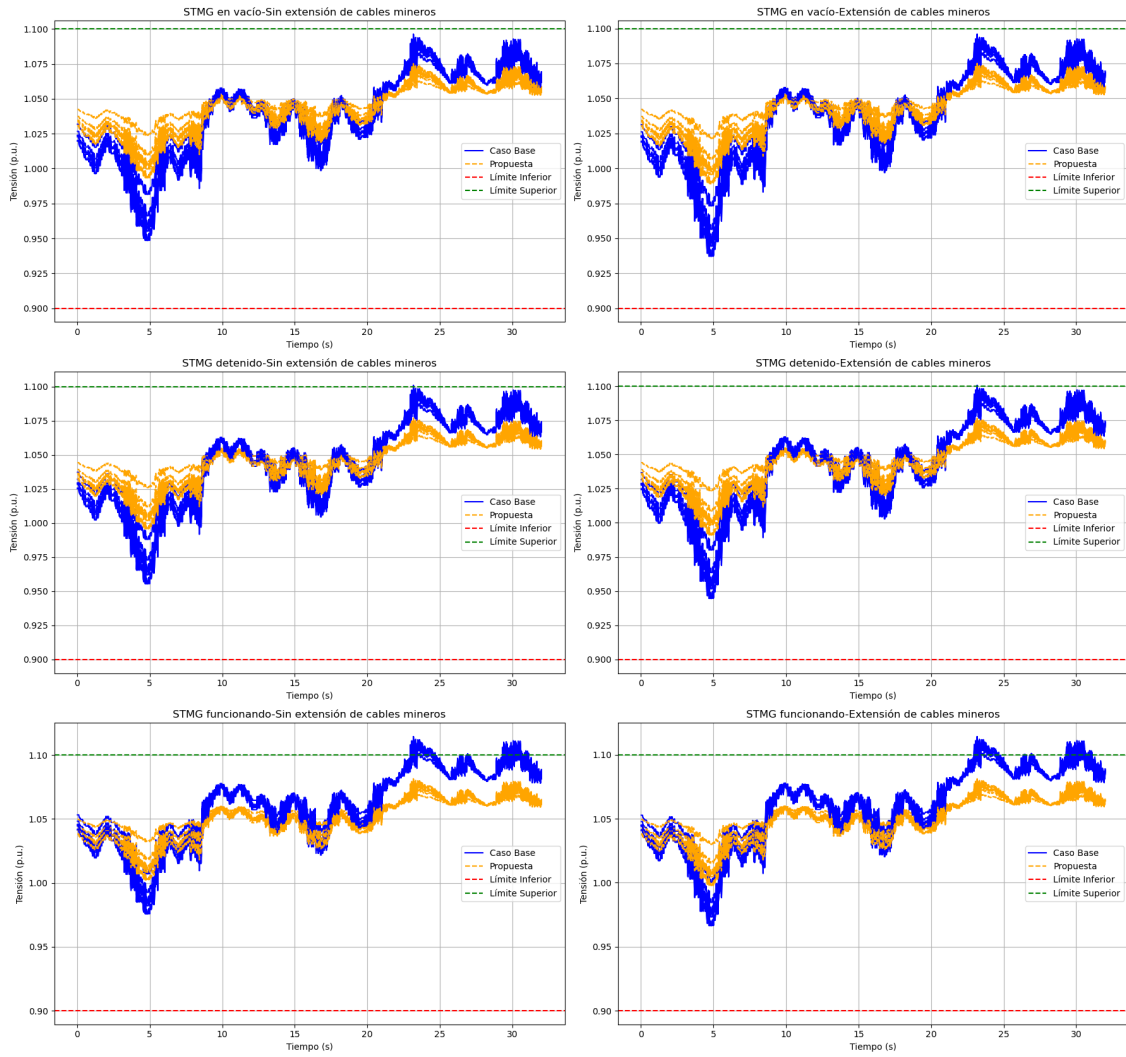


Figura B.11: Niveles de tensión de loop mina para caso base vs propuesta de infraestructura 1 - Tensión en sala N°1 23.68 kV.

Niveles de Tensión de STMG para Caso Base vs Propuesta de Infraestructura 1 - Tensión sala N°1 en 23.68 kV

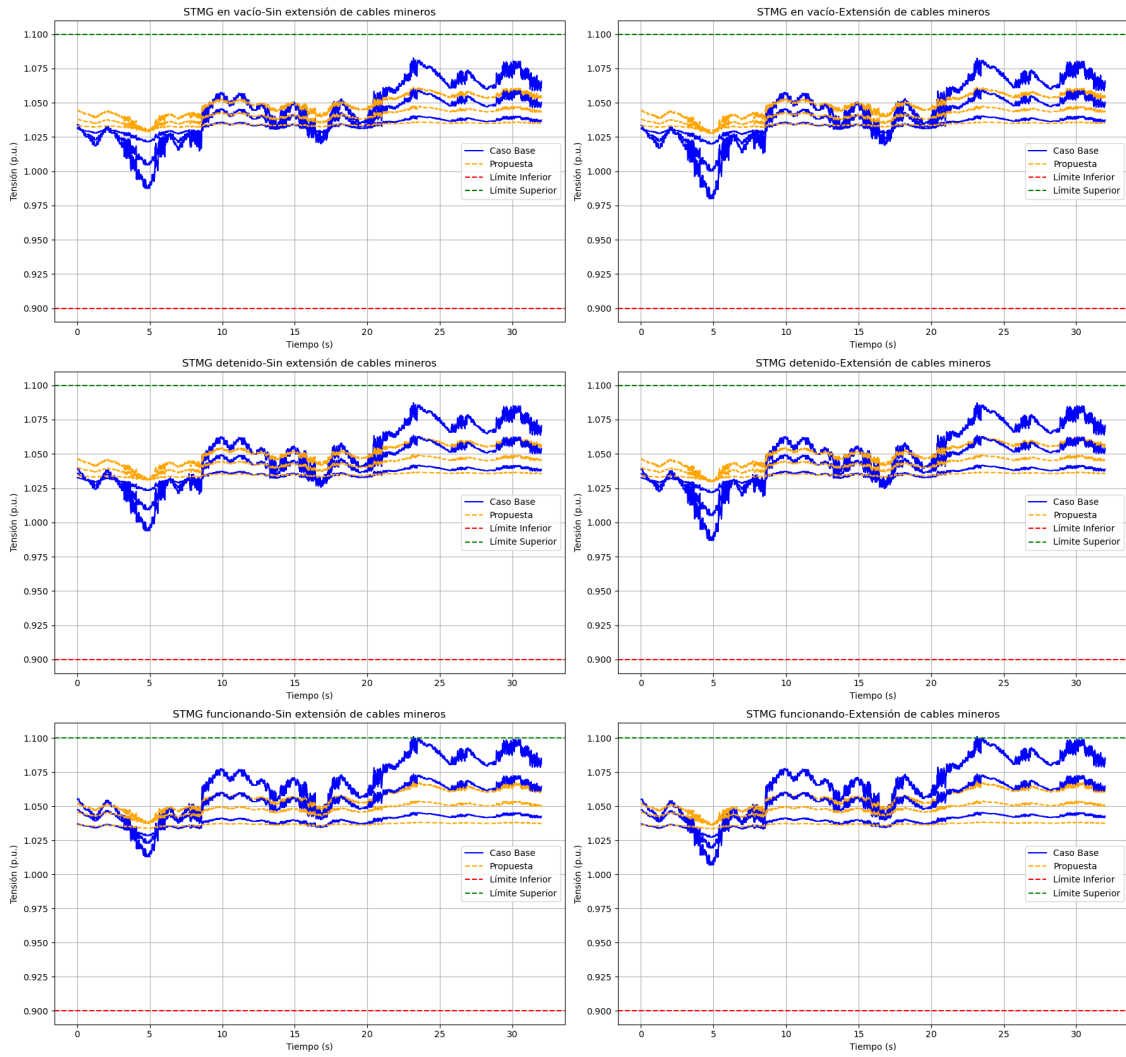


Figura B.12: Niveles de tensión de STMG para caso base vs propuesta de infraestructura 1 - Tensión en sala N°1 23.68 kV.

Potencia Reactiva entregada por Statcom en 23 kV conectado a Sala N°12 (Propuesta de Infraestructura 1) - Tensión sala N°1 en 23.68 kV

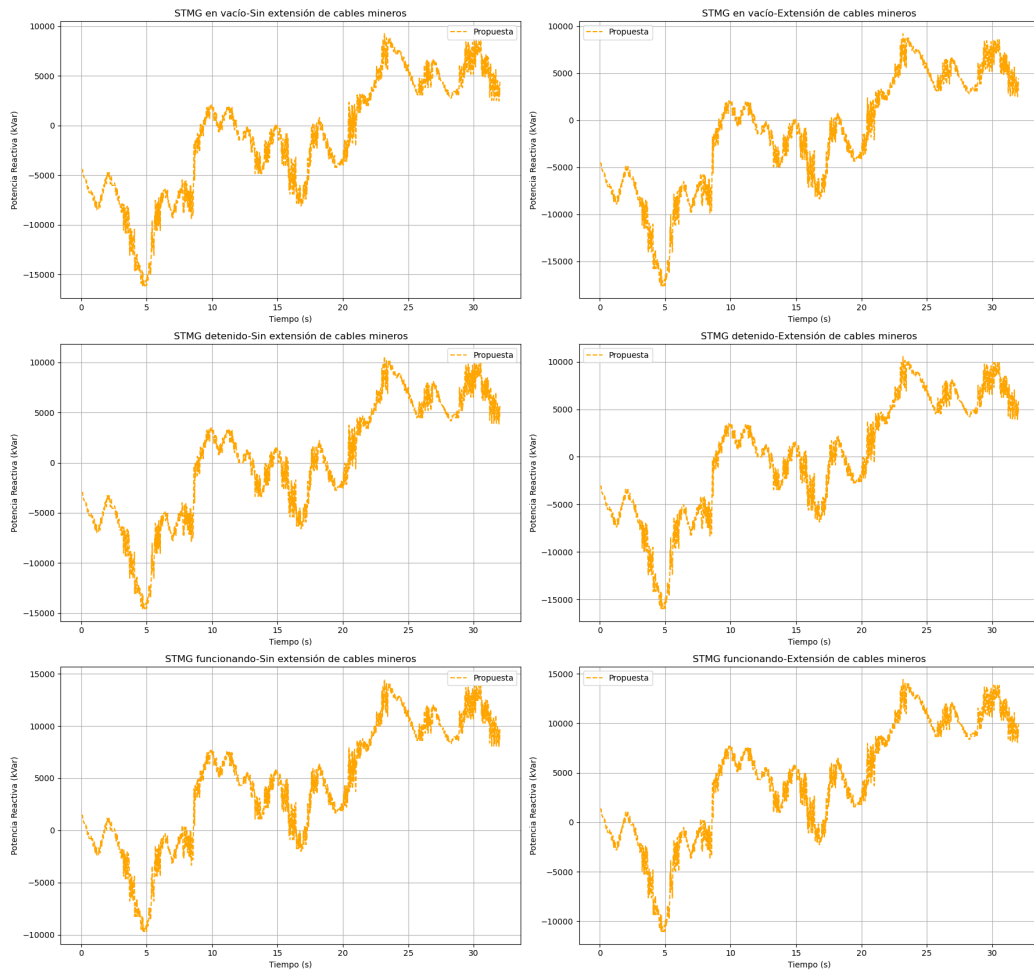


Figura B.13: Potencia reactiva entregada por STATCOM en 23 kV conectado a Sala N°12 (Propuesta de Infraestructura 1) - Tensión en sala N°1 23.68 kV.

## B.1.5. Curvas PV

Curvas PV para Loop Mina - Tensión sala N°1 22.74 kV

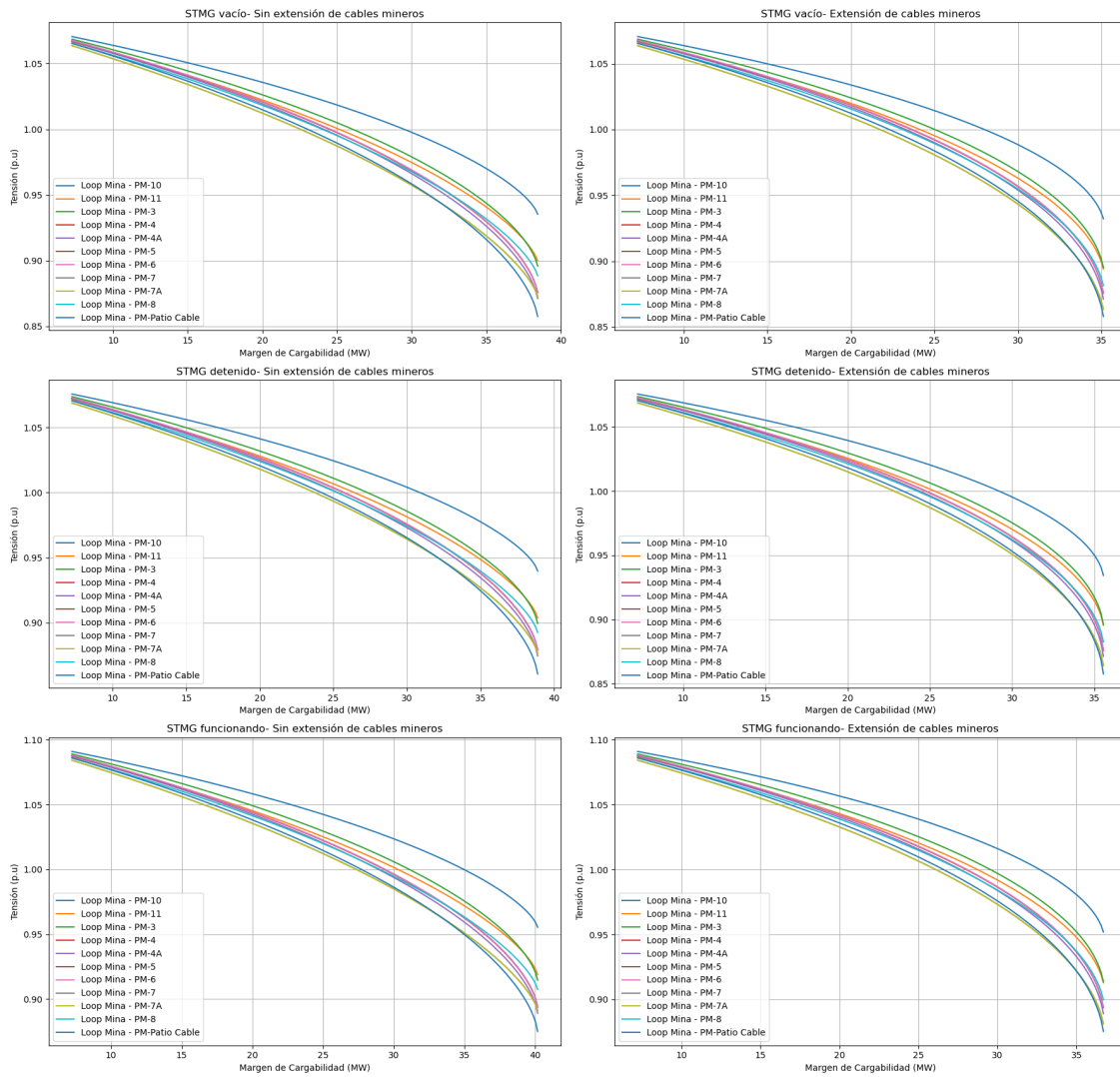


Figura B.14: Curva PV para loop mina - Tensión sala N°1 23.68 kV - Propuesta de infraestructura 1.

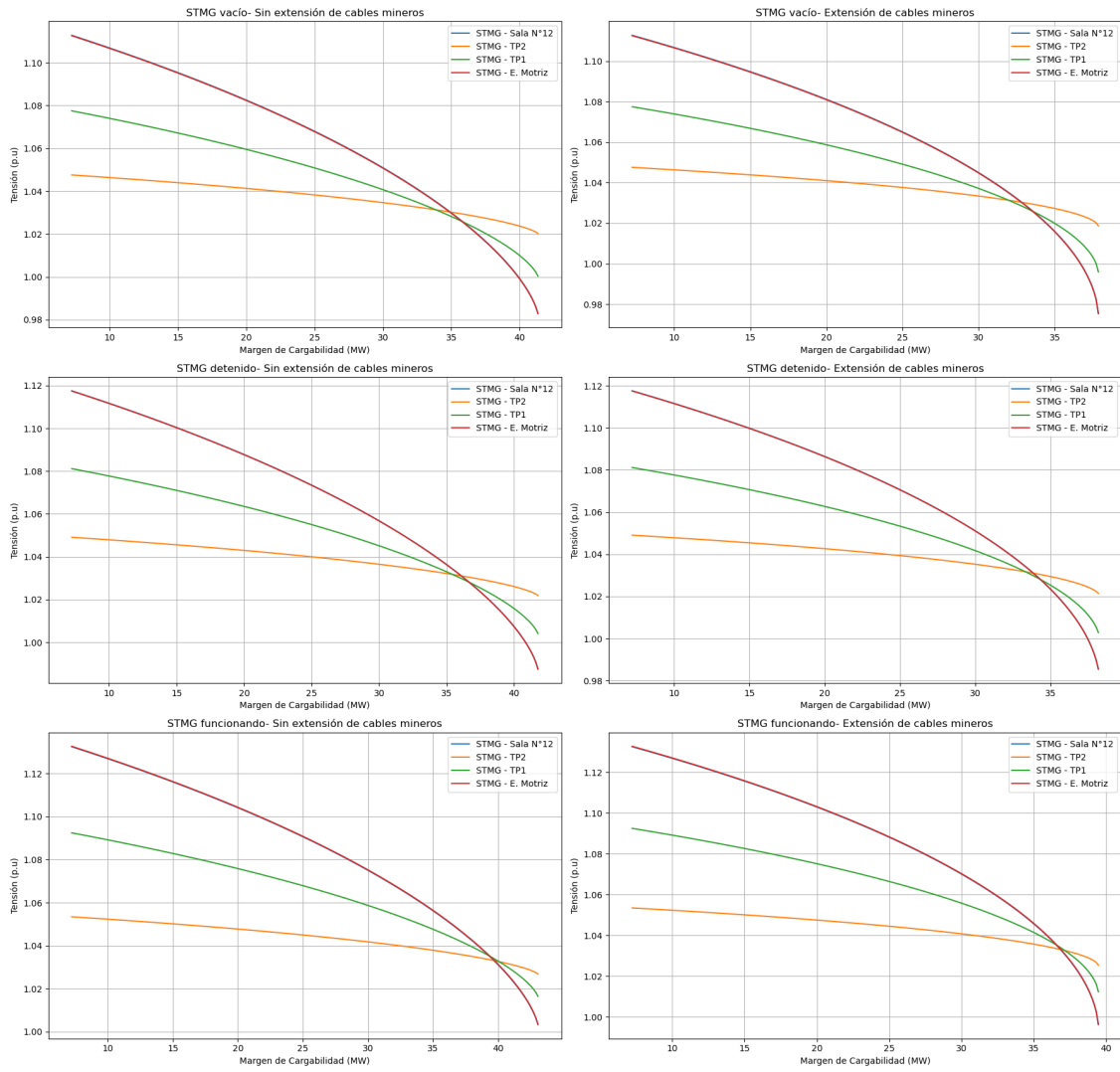


Figura B.15: Curva PV para STMG - Tensión sala N°1 23.68 kV - Propuesta de infraestructura 1.

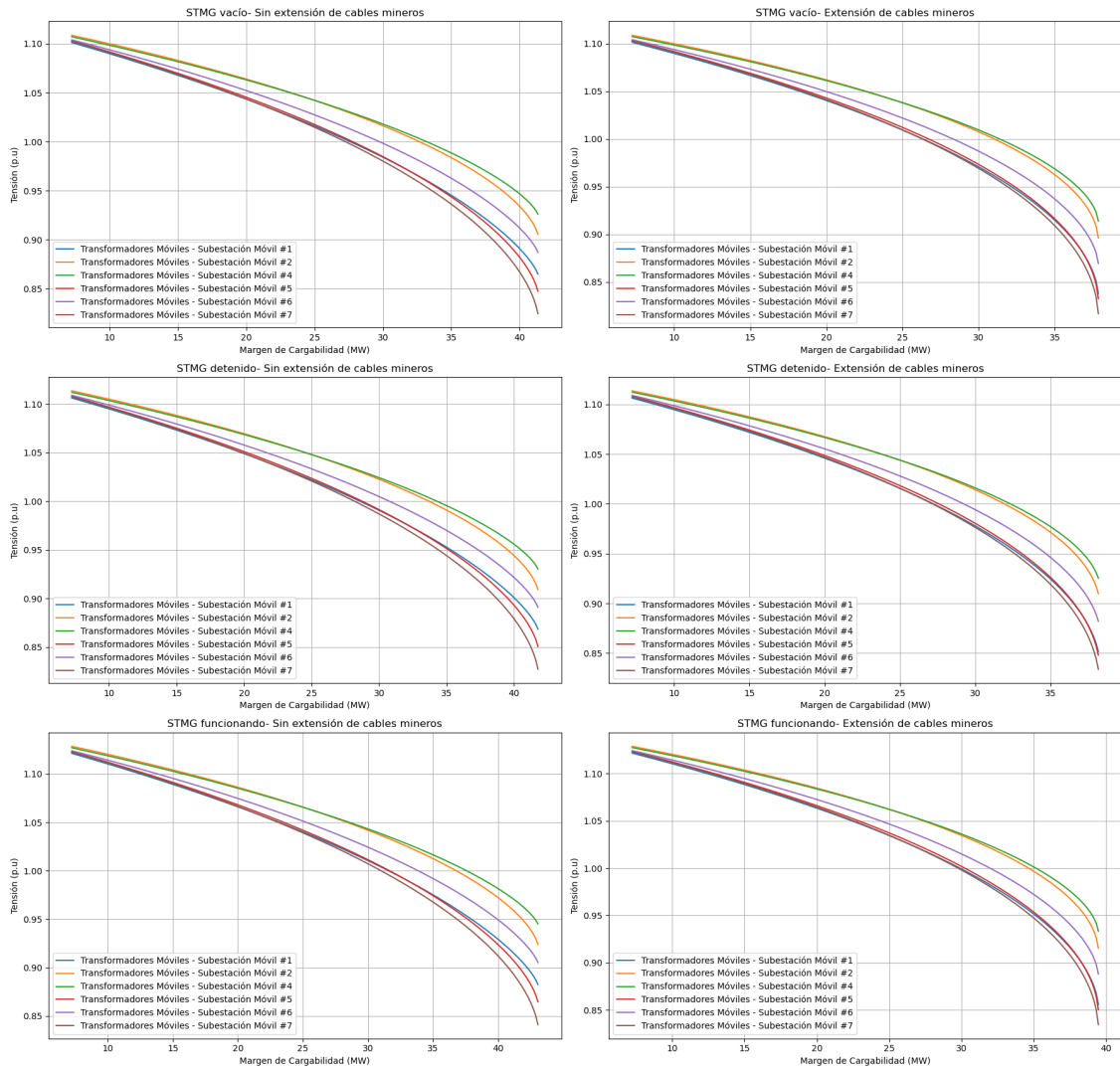


Figura B.16: Curva PV para transformadores móviles - Tensión sala N°1 23.68 kV - Propuesta de infraestructura 1.

# Anexo C. Propuesta de Infraestructura 2

## C.1. Tensión en sala N°12 en 22.74 kV

### C.1.1. Niveles de tensión

Niveles de Tensión de Palas para Caso Base vs Propuesta de Infraestructura 2 - Tensión sala N°1 en 22.74 kV

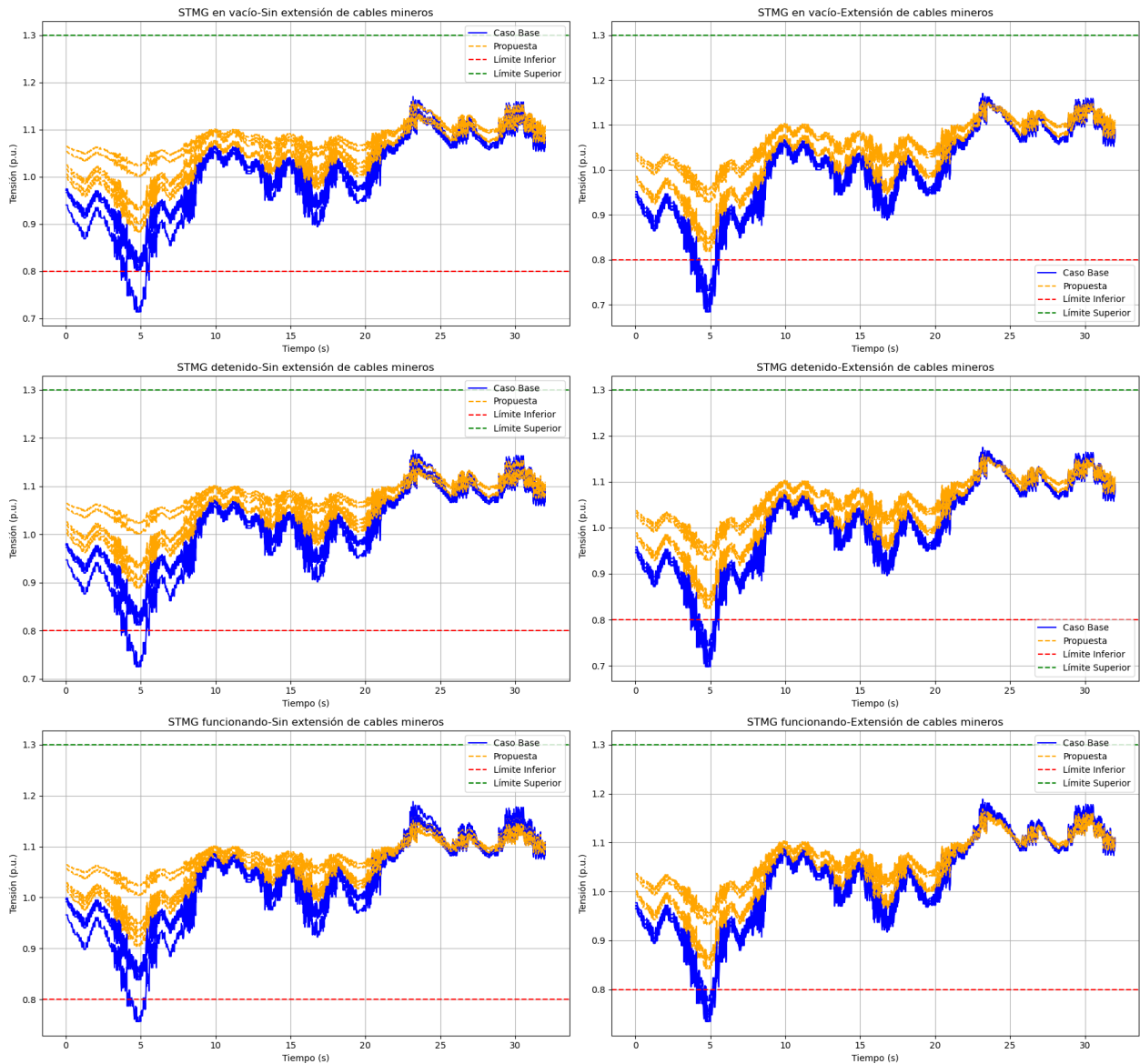


Figura C.1: Niveles de tensión de palas para caso base vs propuesta de infraestructura 2 - Tensión en sala N°1 22.74 kV.

Niveles de Tensión de Perforadoras para Caso Base vs Propuesta de Infraestructura 2 - Tensión sala N°1 en 22.74 kV

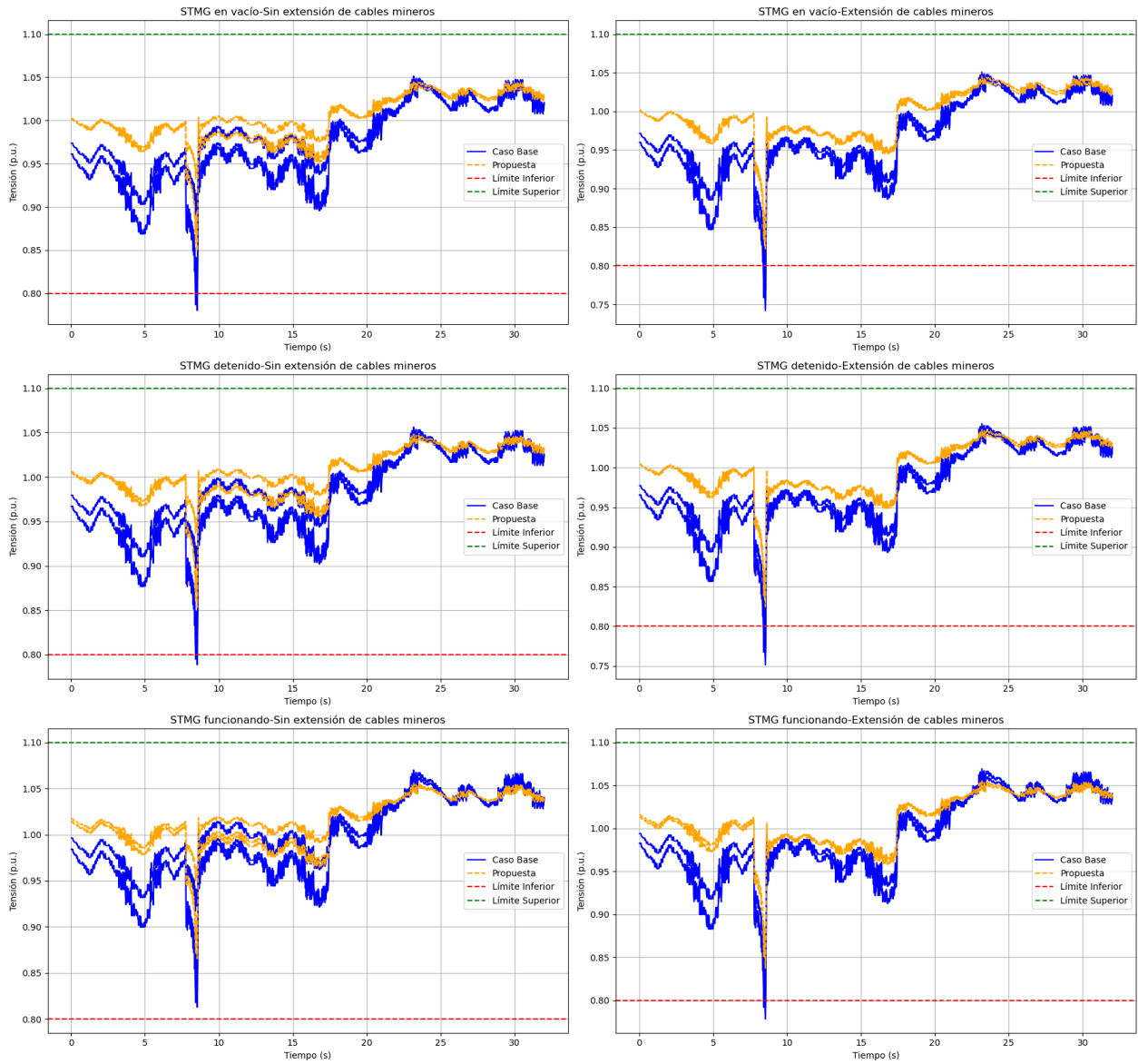


Figura C.2: Niveles de tensión de perforadoras para caso base vs propuesta de infraestructura 2 - Tensión en sala N°1 22.74 kV.



Niveles de Tensión de Loop Mina para Caso Base vs Propuesta de Infraestructura 2 - Tensión sala N°1 en 22.74 kV

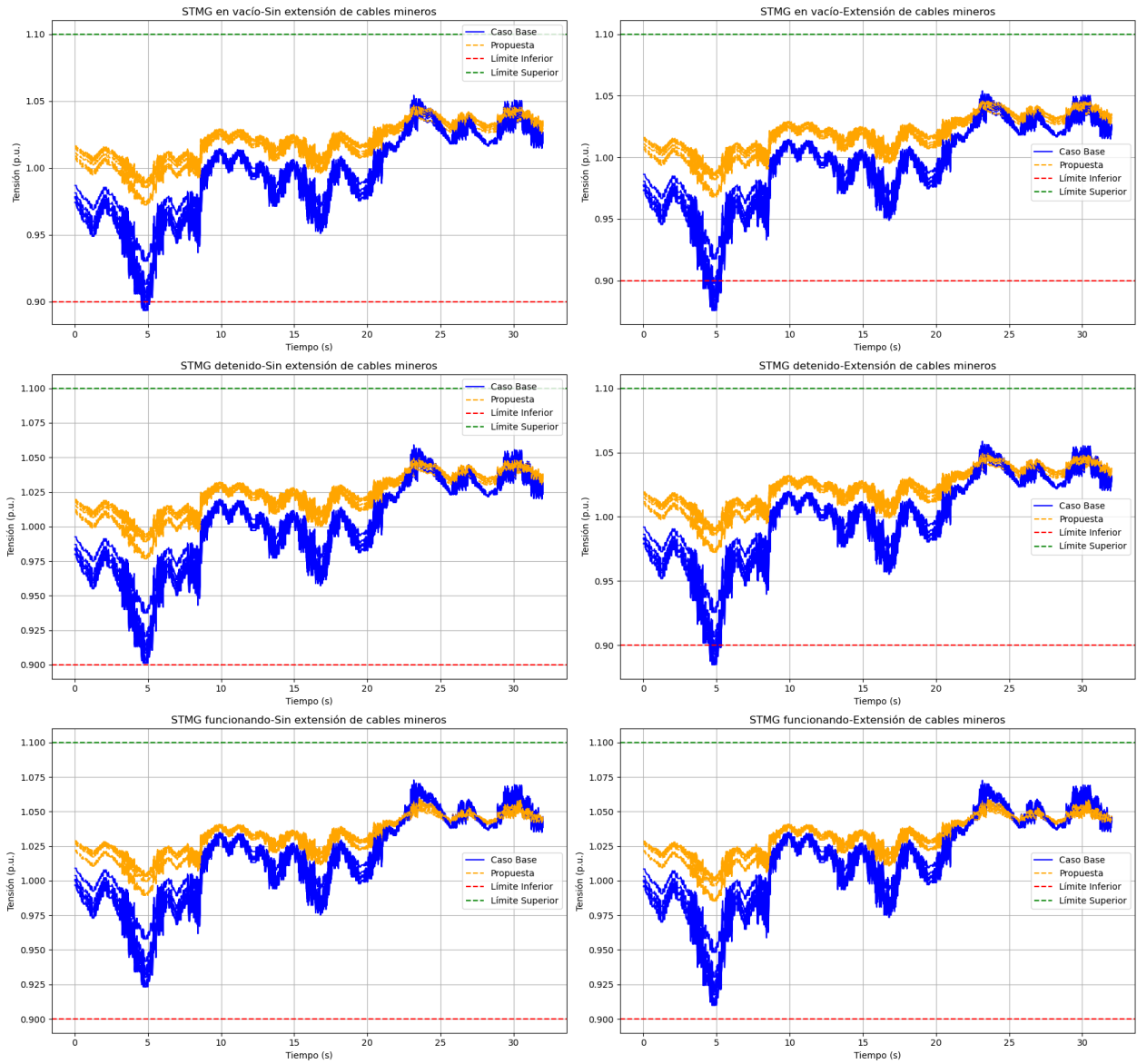


Figura C.3: Niveles de tensión de loop mina para caso base vs propuesta de infraestructura 2 - Tensión en sala N°1 22.74 kV.

Niveles de Tensión de STMG para Caso Base vs Propuesta de Infraestructura 2 - Tensión sala N°1 en 22.74 kV

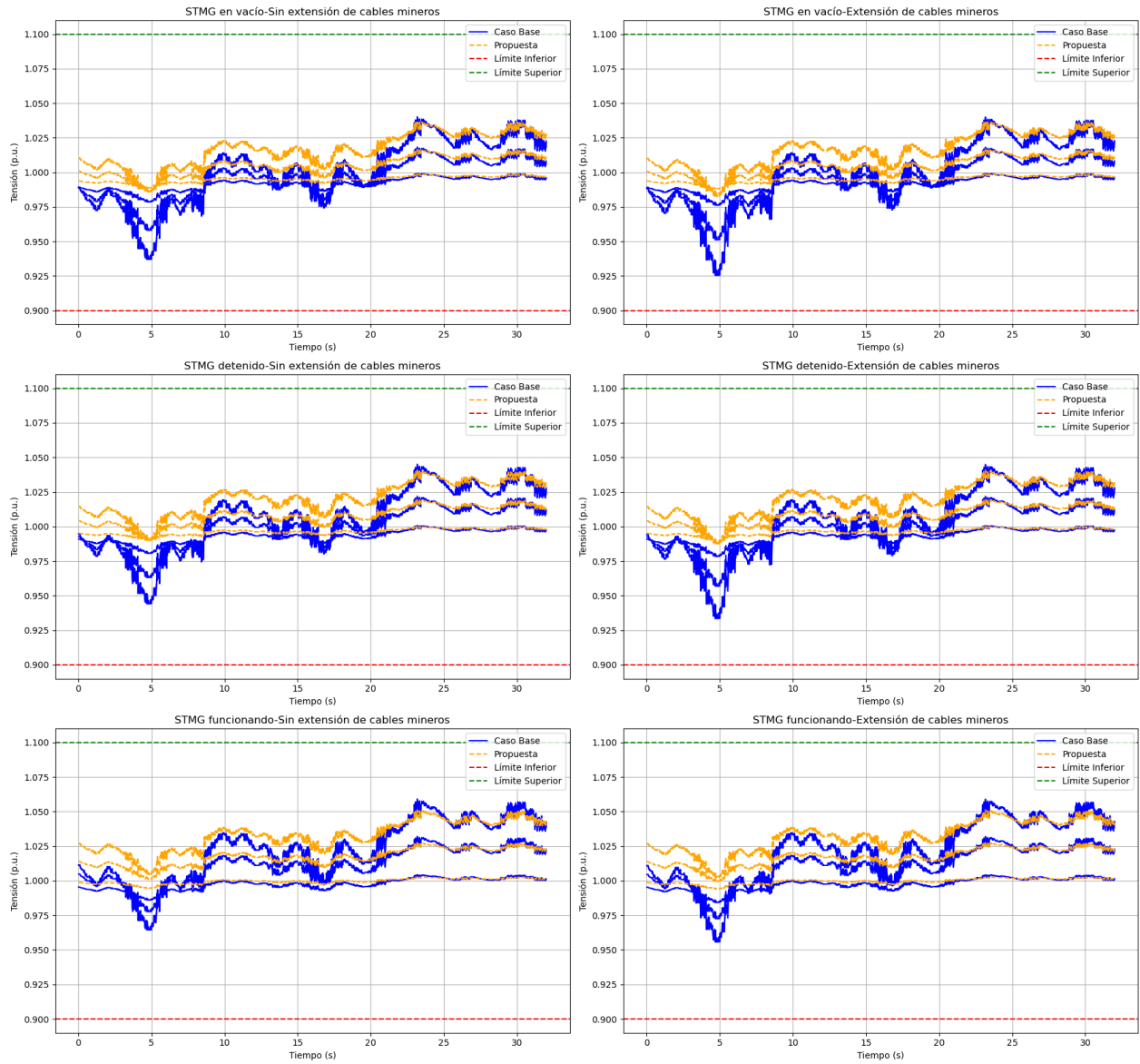


Figura C.4: Niveles de tensión de STMG para caso base vs propuesta de infraestructura 2 - Tensión en sala N°1 22.74 kV.

Potencia Reactiva entregada por Statcom en 6.9 kV conectado a Transformador Móvil #7 (Propuesta de Infraestructura 2) - Tensión sala N°1 en 22.74 kV

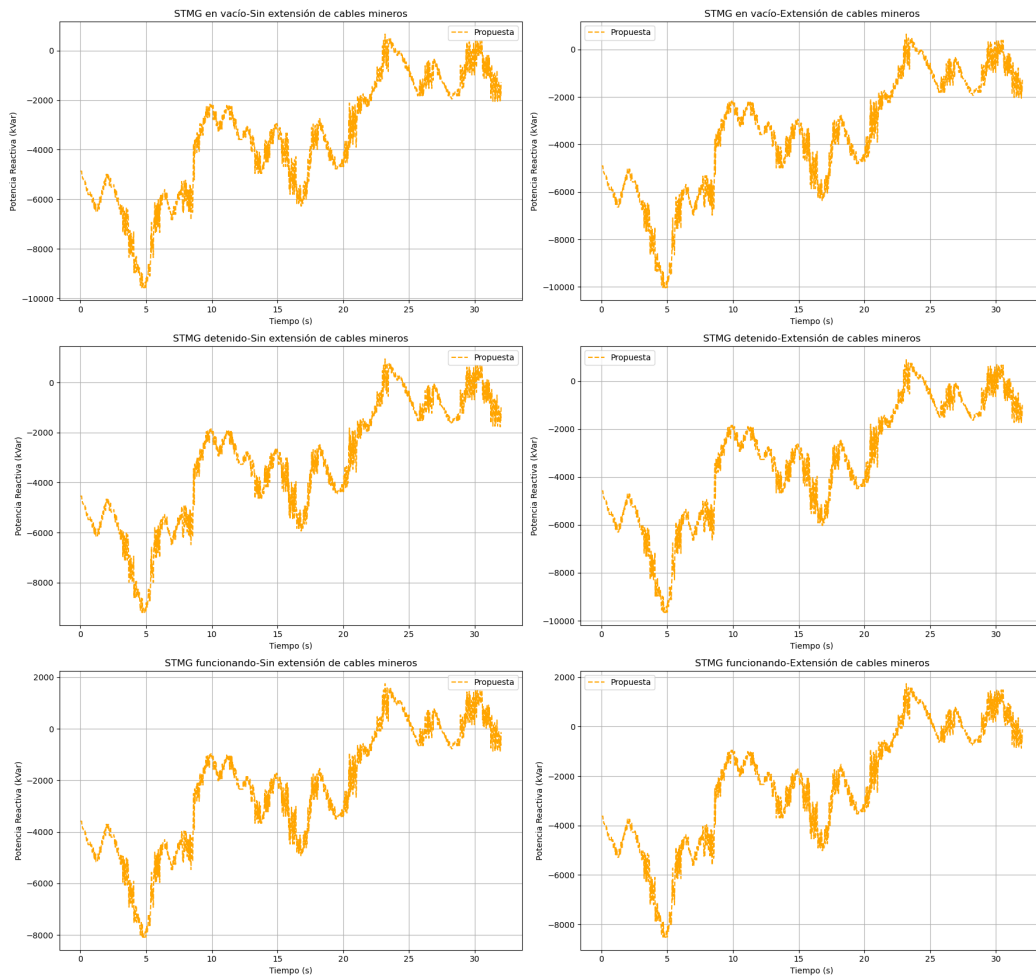


Figura C.5: Potencia reactiva entregada por STATCOM en 23 kV conectado a PM-Patio Cable (propuesta de infraestructura 2) - Tensión en sala N°1 22.74 kV.

Potencia Reactiva entregada por Statcom en 6.9 kV conectado a Transformador Móvil #1 (Propuesta de Infraestructura 2) - Tensión sala N°1 en 22.74 kV

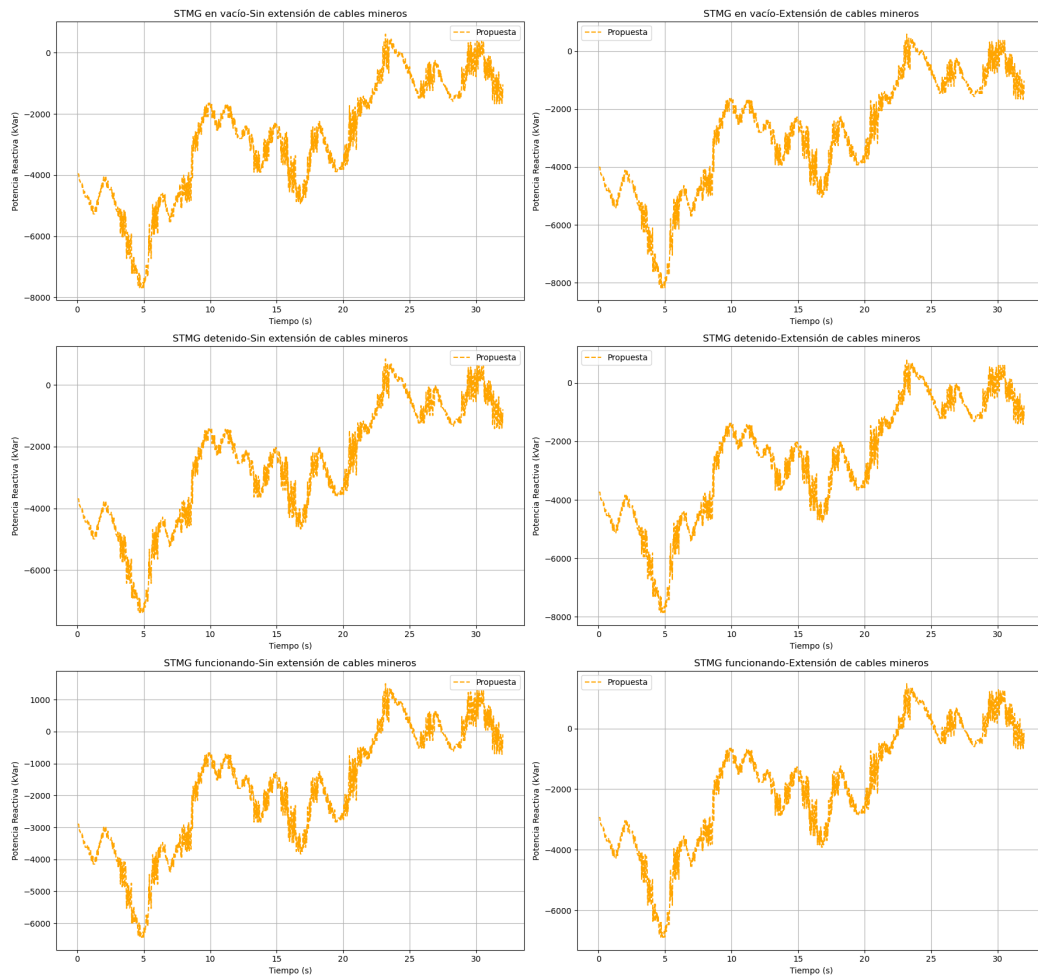


Figura C.6: Potencia reactiva entregada por STATCOM en 23 kV conectado a PM-7A (propuesta de infraestructura 2) - Tensión en sala N°1 22.74 kV.

## C.1.2. Curvas PV

Curvas PV para Loop Mina - Tensión sala N°1 22.74 kV

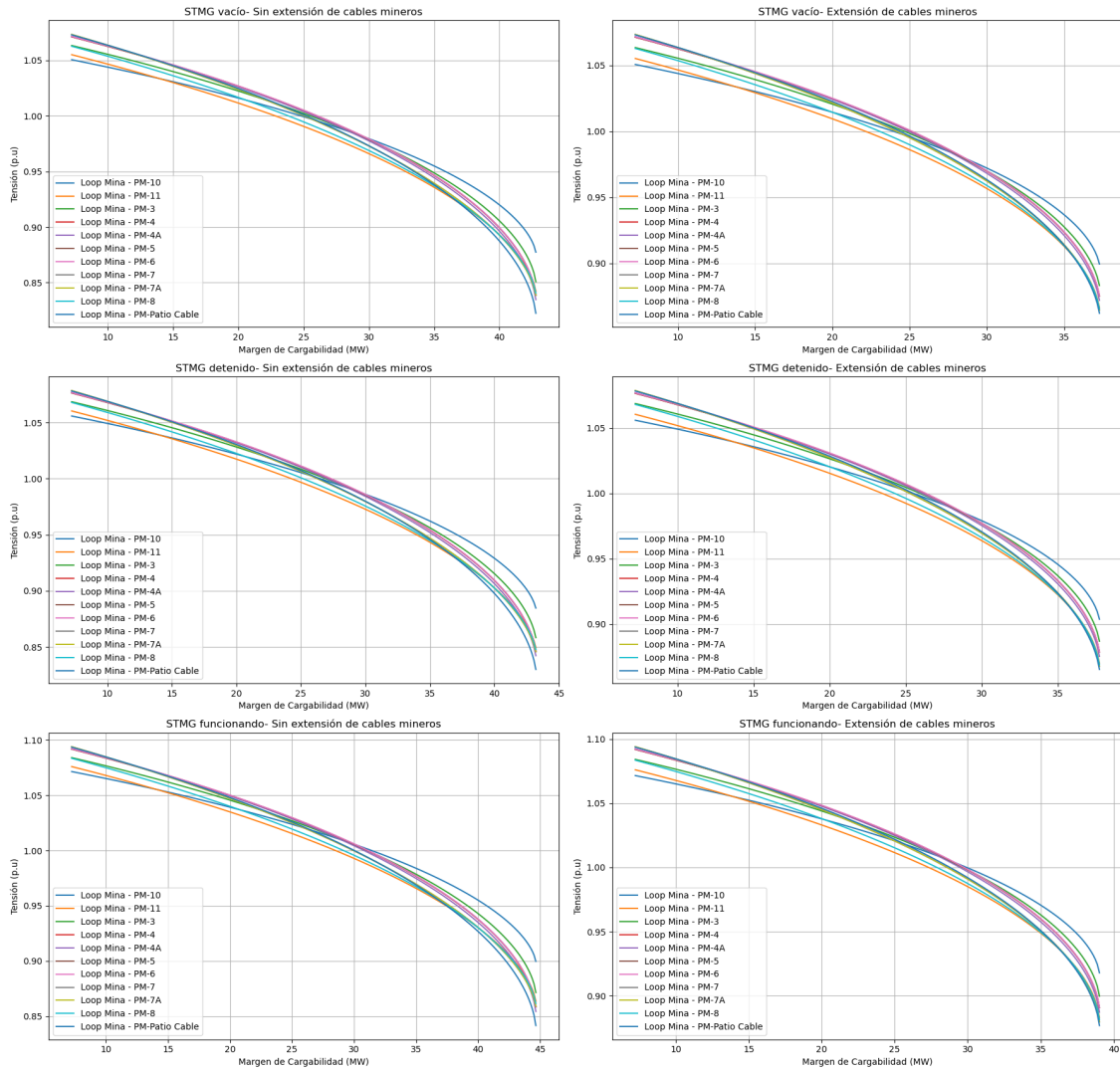


Figura C.7: Curva PV para loop mina - Tensión sala N°1 22.74 kV - Propuesta de infraestructura 2.

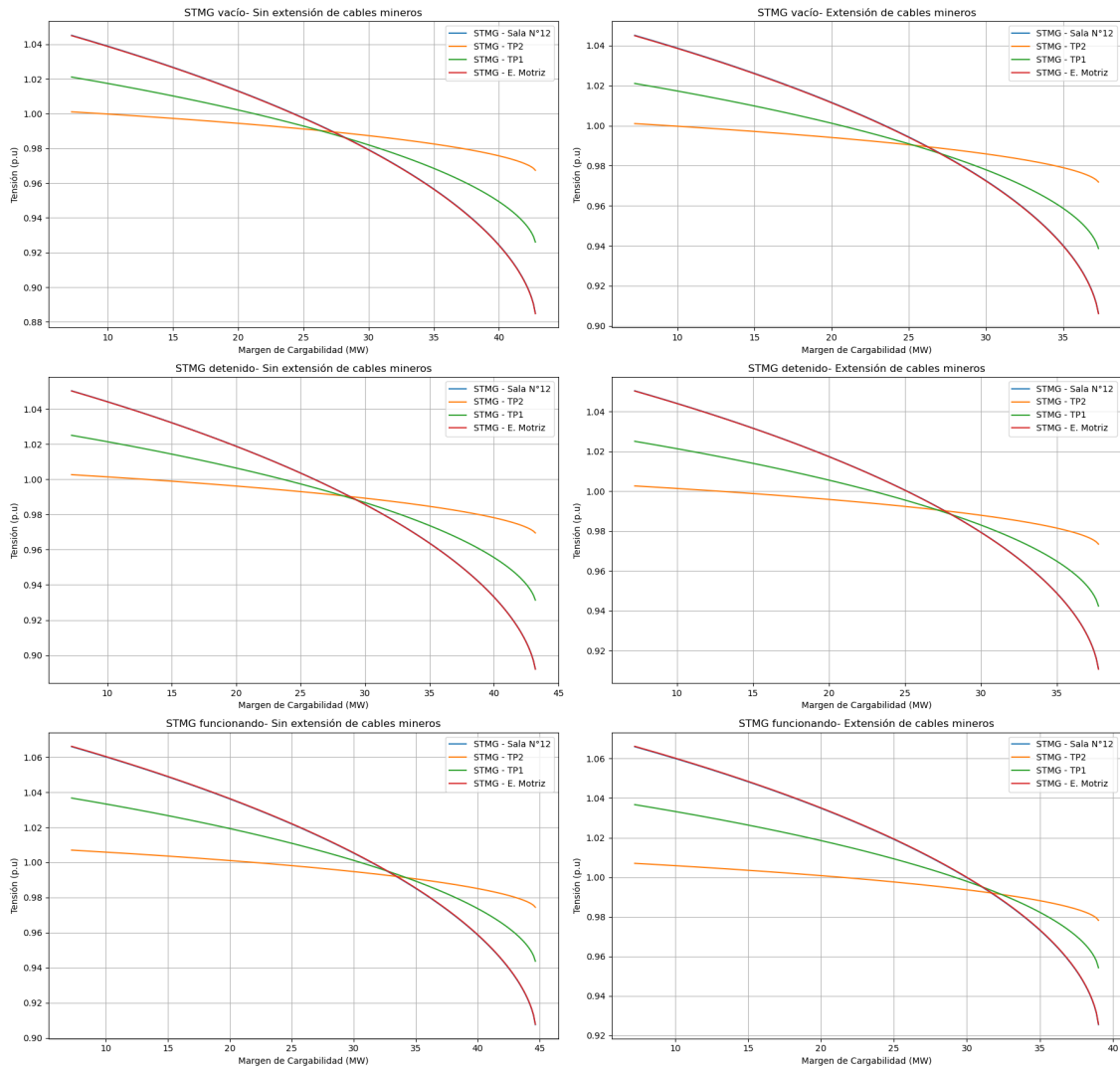


Figura C.8: Curva PV para STMG - Tensión sala N°1 22.74 kV - Propuesta de infraestructura 2.

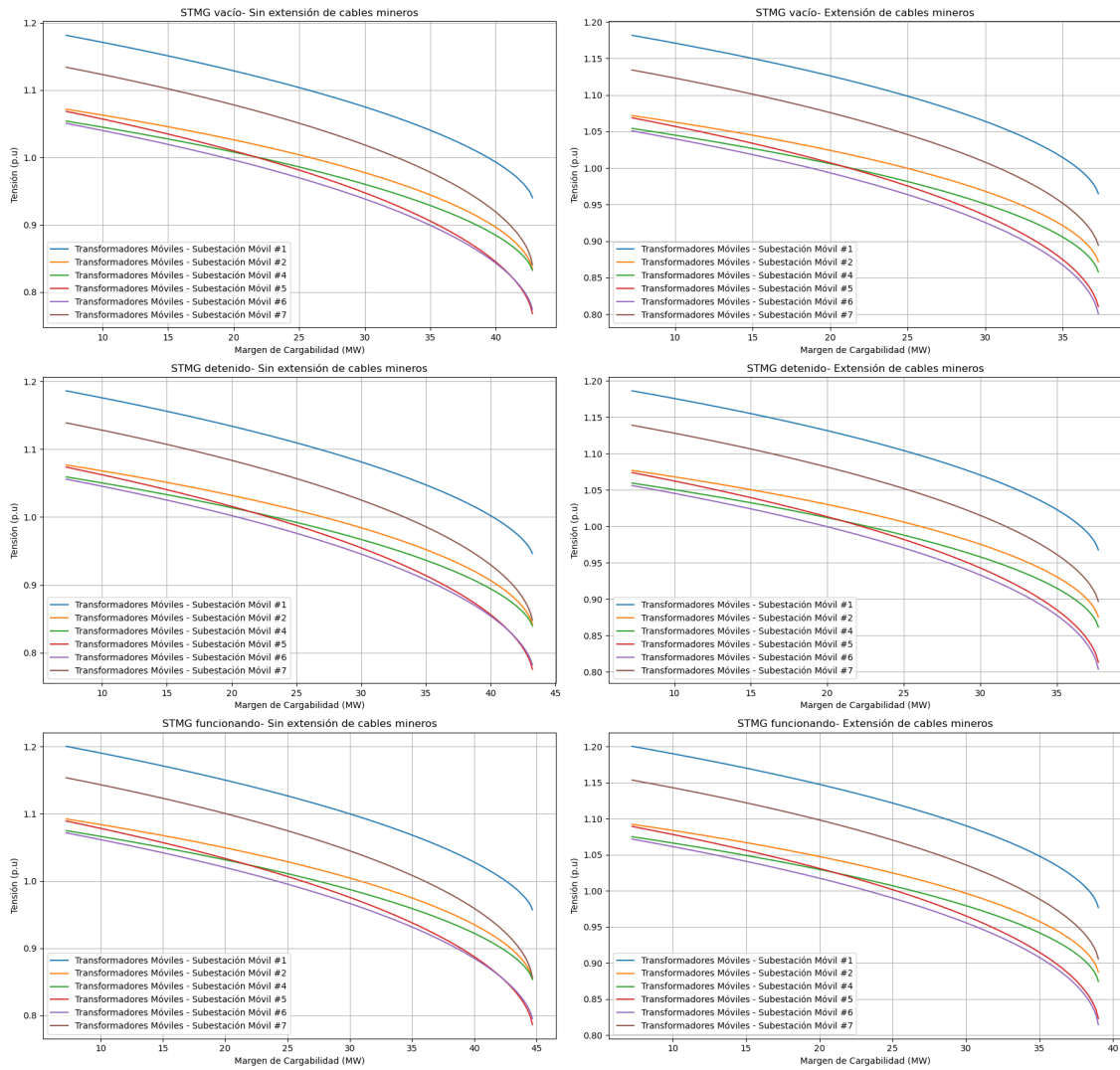


Figura C.9: Curva PV para transformadores móviles - Tensión sala N°1 22.74 kV - Propuesta de infraestructura 2.

## C.2. Tensión en sala N°12 en 23.68 kV

### C.2.1. Niveles de tensión

Niveles de Tensión de Palas para Caso Base vs Propuesta de Infraestructura 2 - Tensión sala N°1 en 23.68 kV

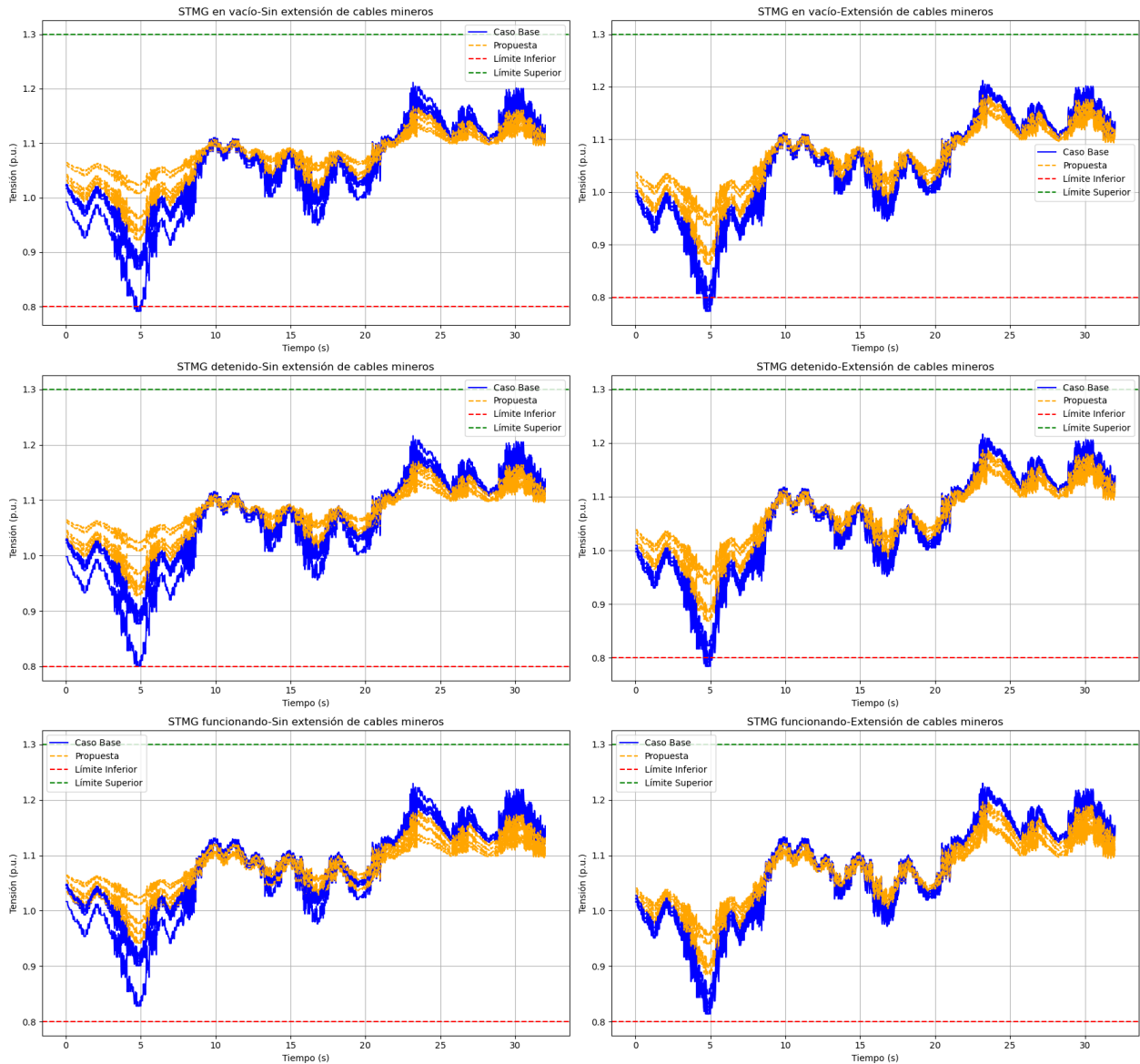


Figura C.10: Niveles de tensión de palas para caso base vs propuesta de infraestructura 2 - Tensión en sala N°1 23.68 kV.



Niveles de Tensión de Perforadoras para Caso Base vs Propuesta de Infraestructura 2 - Tensión sala N°1 en 23.68 kV

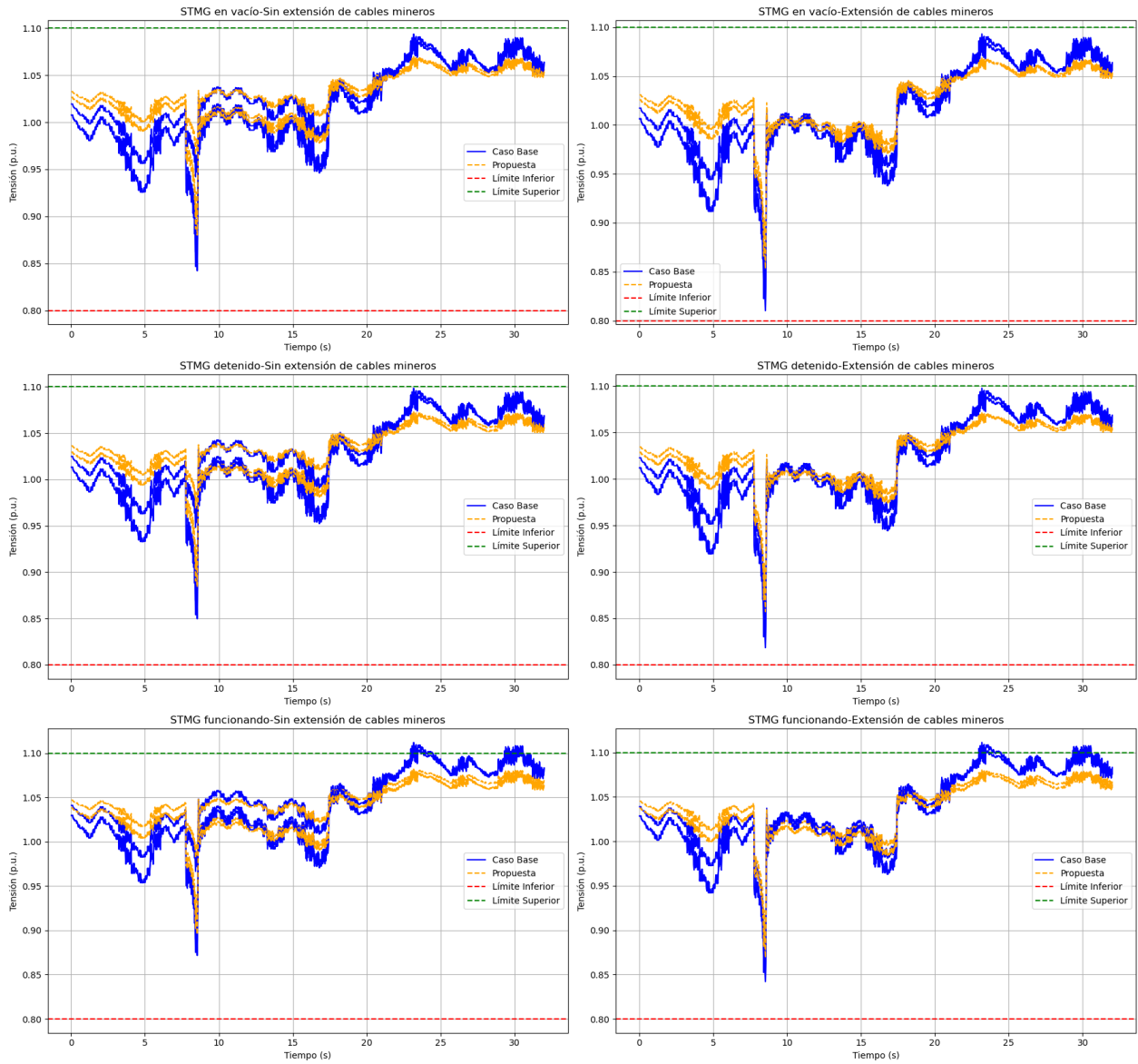


Figura C.11: Niveles de tensión de perforadoras para caso base vs propuesta de infraestructura 2 - Tensión en sala N°1 23.68 kV.

Niveles de Tensión de Loop Mina para Caso Base vs Propuesta de Infraestructura 2 - Tensión sala N°1 en 23.68 kV

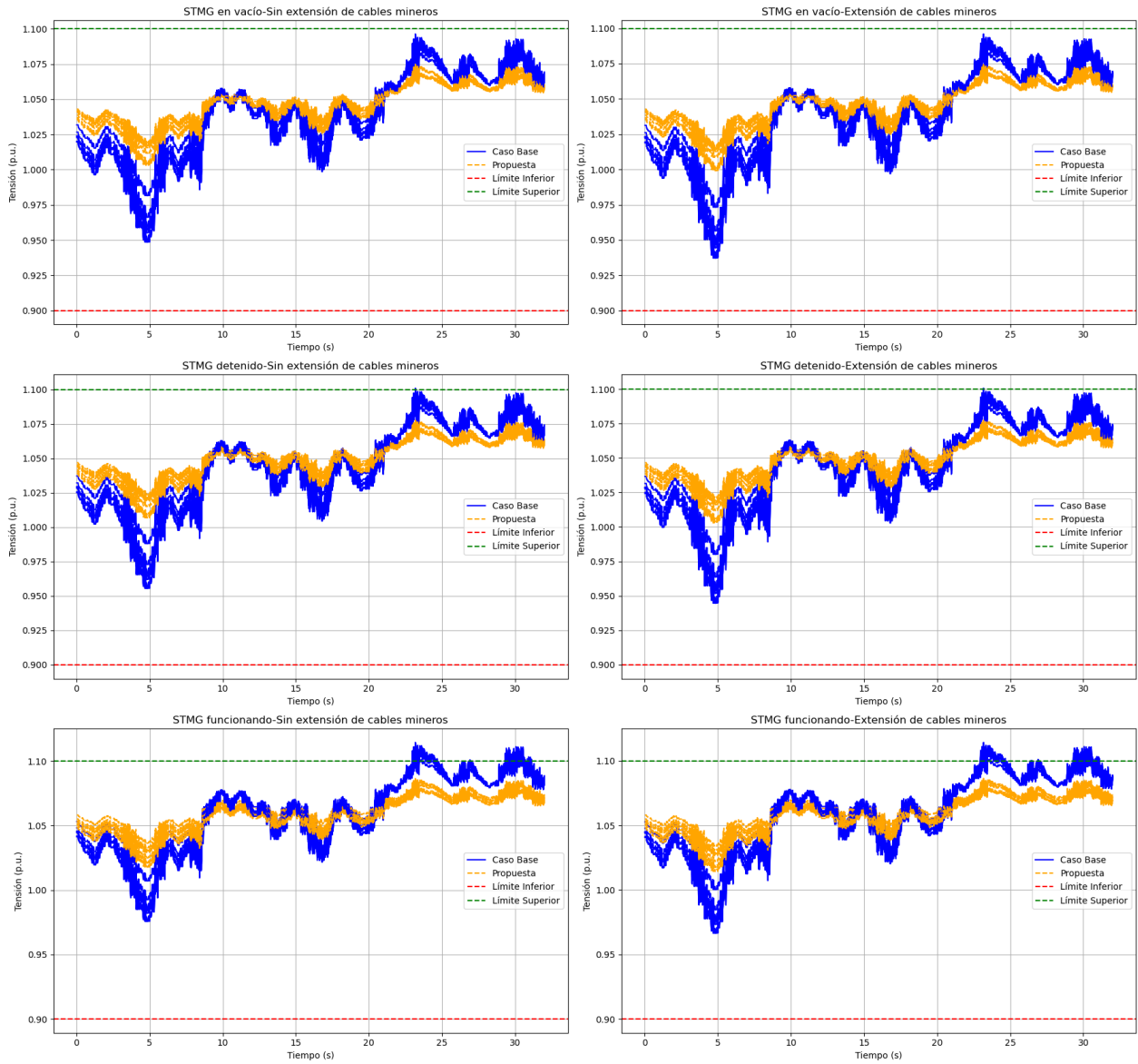


Figura C.12: Niveles de tensión de loop mina para caso base vs propuesta de infraestructura 2 - Tensión en sala N°1 23.68 kV.

Niveles de Tensión de STMG para Caso Base vs Propuesta de Infraestructura 2 - Tensión sala N°1 en 23.68 kV

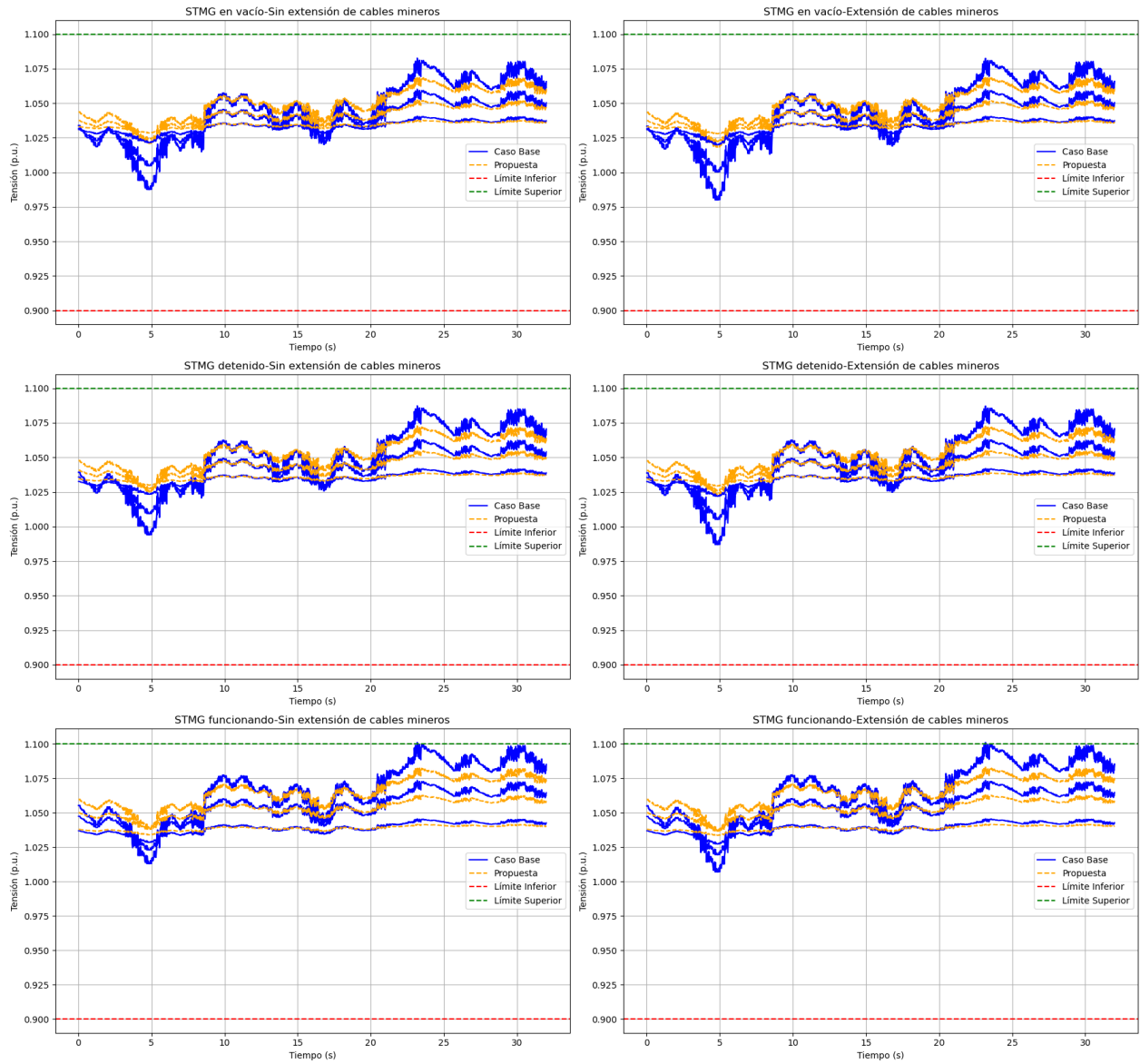


Figura C.13: Niveles de tensión de STMG para caso base vs propuesta de infraestructura 2 - Tensión en sala N°1 23.68 kV.

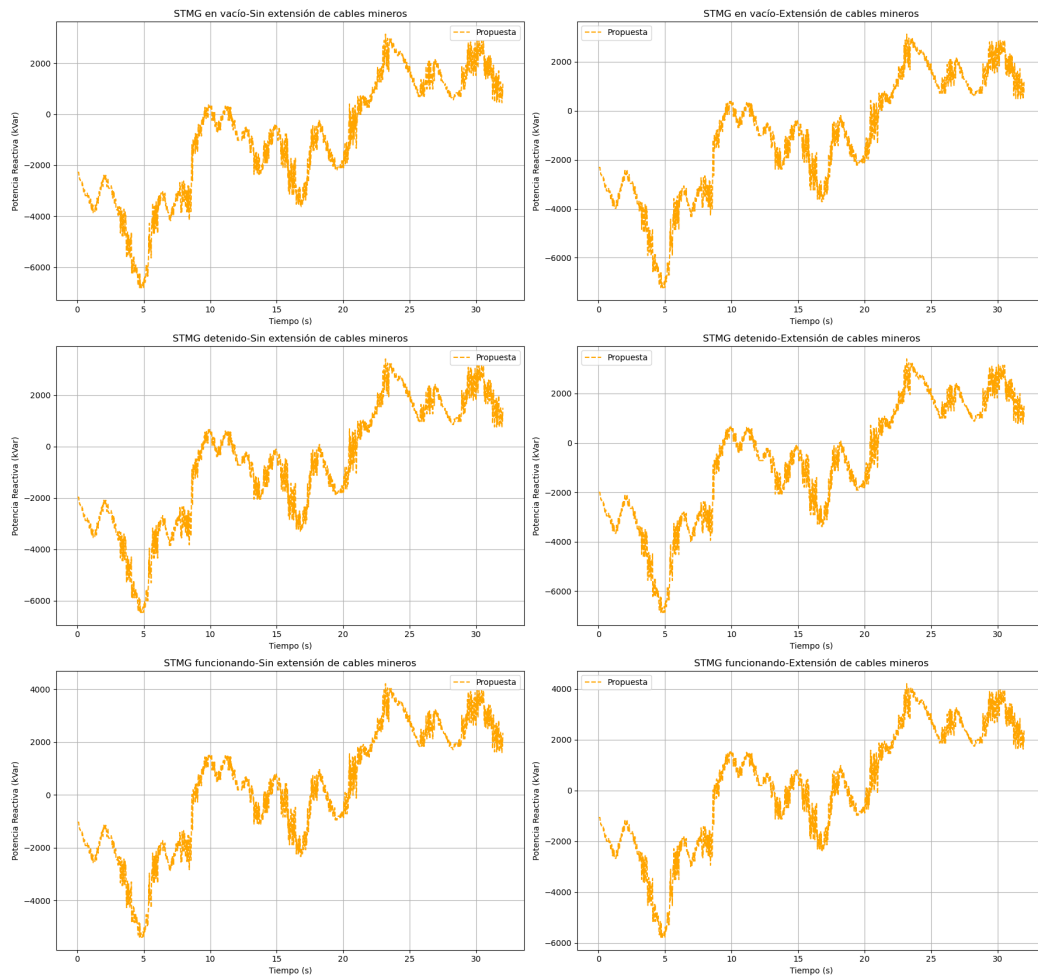


Figura C.14: Potencia reactiva entregada por STATCOM en 23 kV conectado a PM-Patio Cable (propuesta de infraestructura 2) - Tensión en sala N°1 23.68 kV.

Potencia Reactiva entregada por Statcom en 6.9 kV conectado a Transformador Móvil #1 (Propuesta de Infraestructura 2) - Tensión sala N°1 en 23.68 kV

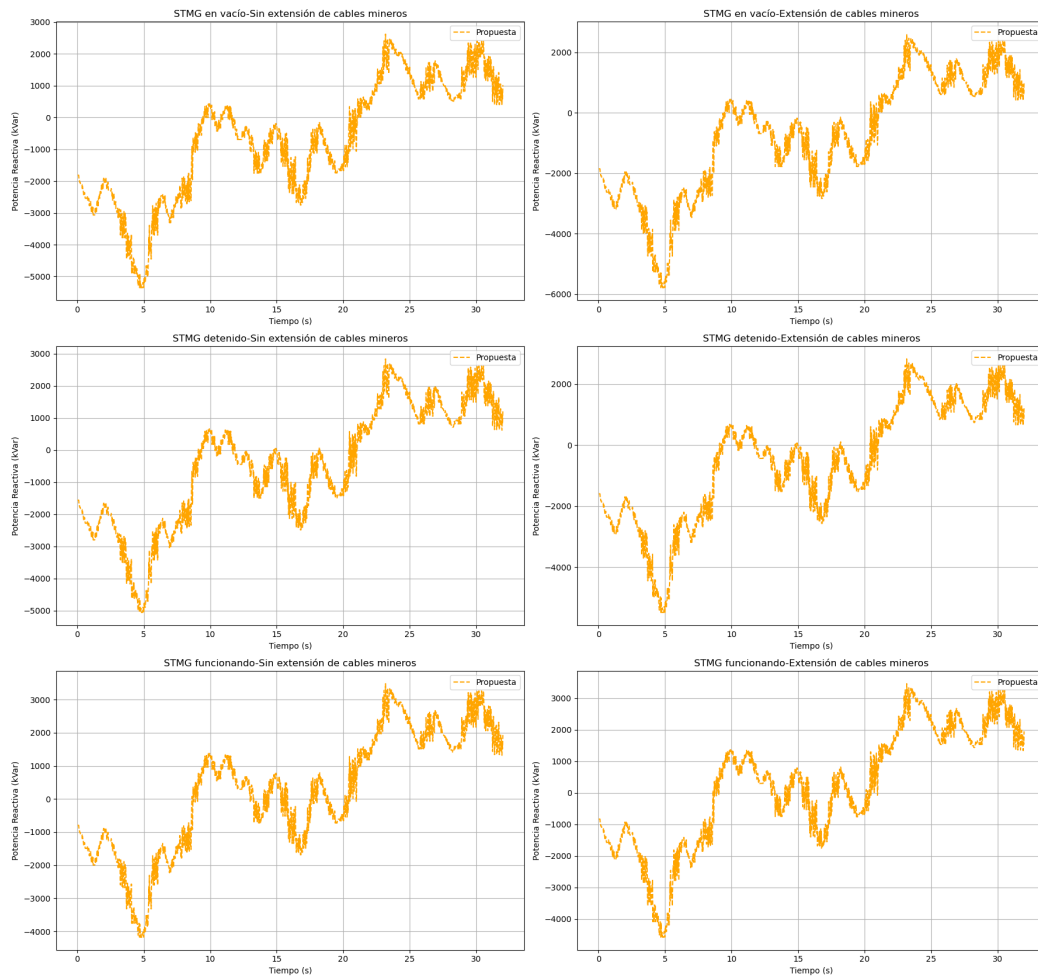


Figura C.15: Potencia reactiva entregada por STATCOM en 23 kV conectado a PM-7A (propuesta de infraestructura 2) - Tensión en sala N°1 23.68 kV.

## C.2.2. Curvas PV

Curvas PV para Loop Mina - Tensión sala N°1 22.74 kV

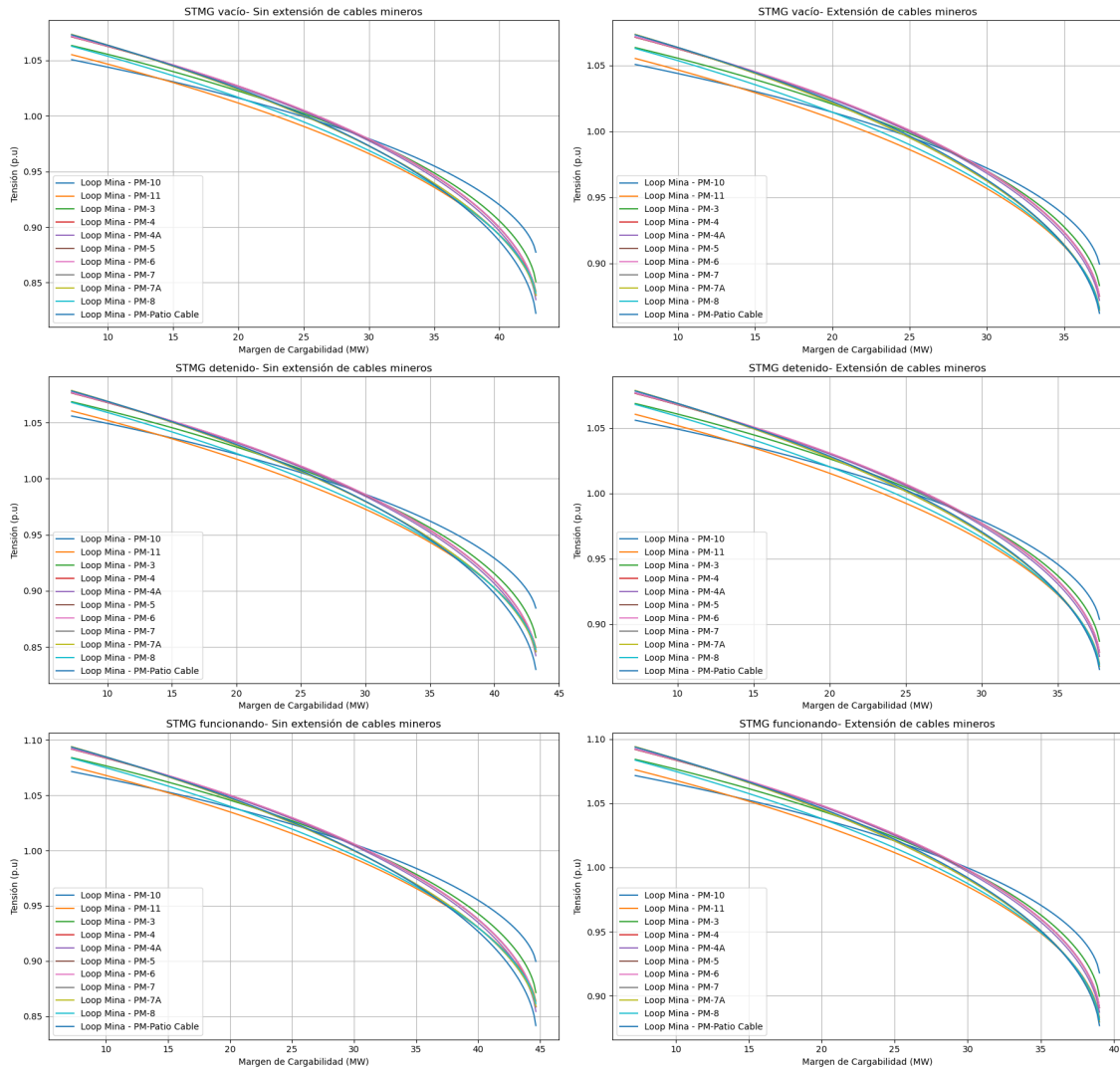


Figura C.16: Curva PV para loop mina - Tensión sala N°1 23.68 kV - Propuesta de infraestructura 2.

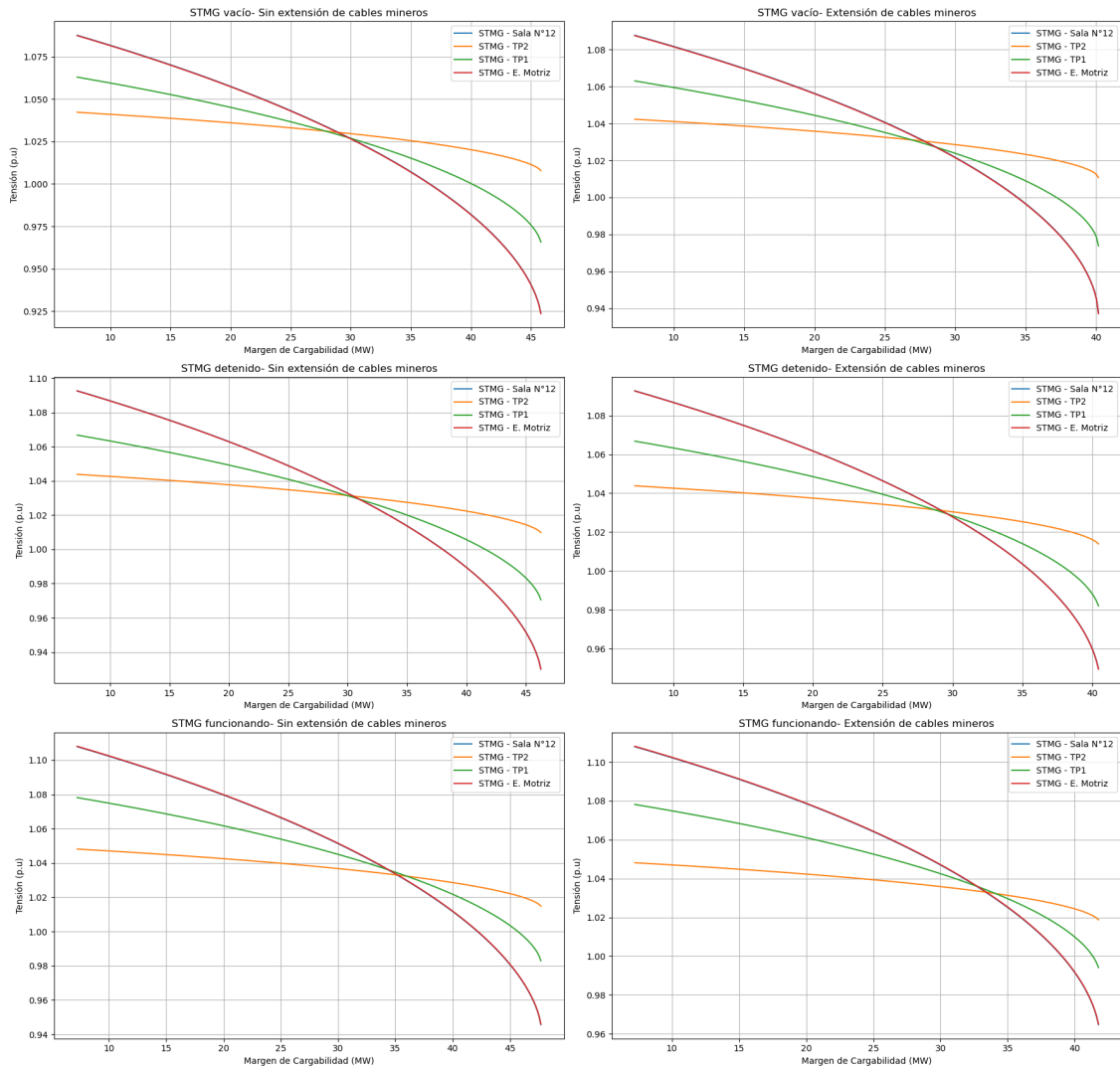


Figura C.17: Curva PV para STMG - Tensión sala N°1 23.68 kV - Propuesta de infraestructura 2.

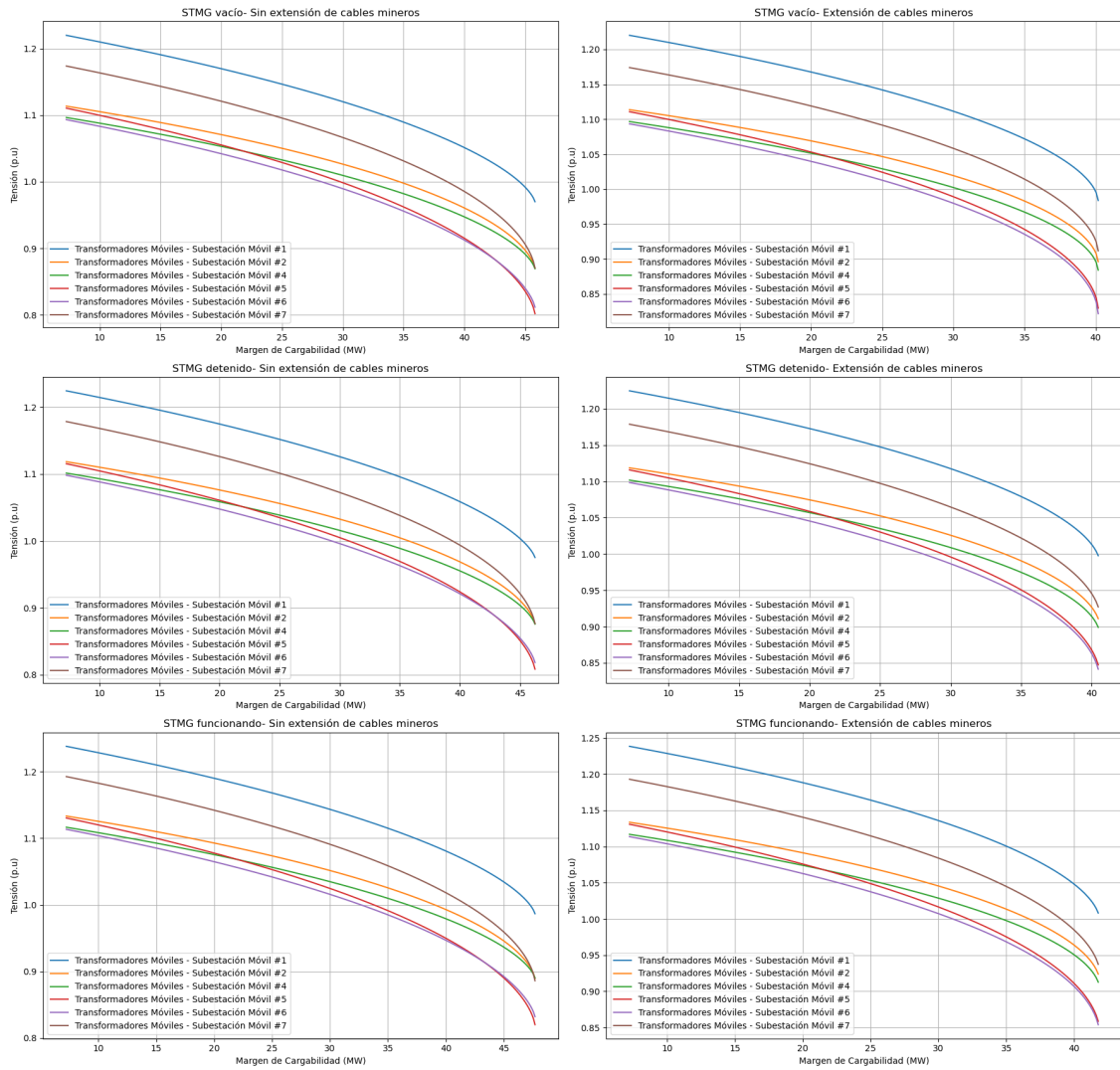


Figura C.18: Curva PV para transformadores móviles - Tensión sala N°1 23.68 kV - Propuesta de infraestructura 2.



# Anexo D. Propuesta de Infraestructura 3

## D.1. Tensión en sala N°12 en 22.74 kV

### D.1.1. Niveles de tensión

Niveles de Tensión de Palas para Caso Base vs Propuesta de Infraestructura 3 - Tensión sala N°1 en 22.74 kV

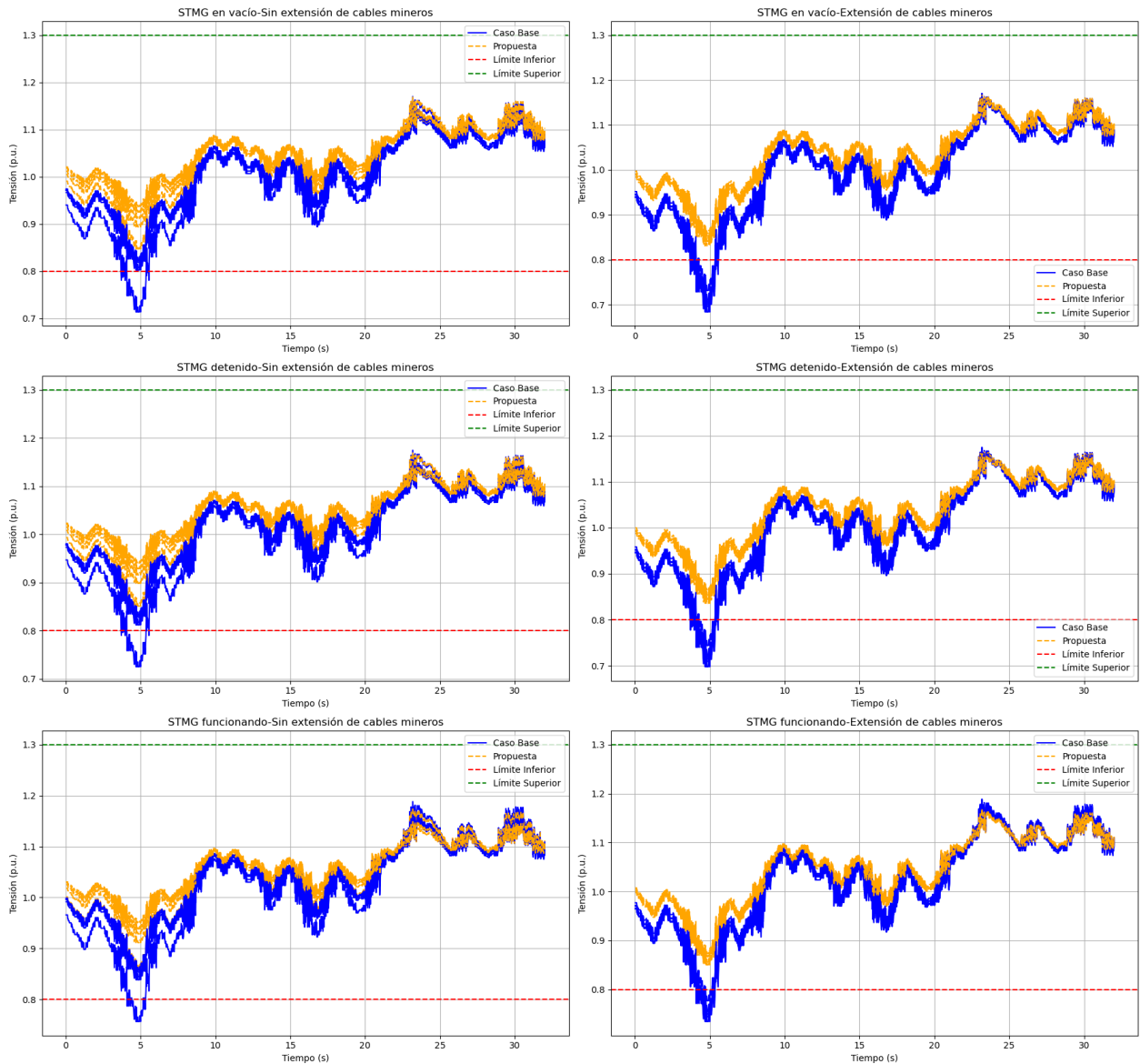


Figura D.1: Niveles de tensión de palas para caso base vs propuesta de infraestructura 3 - Tensión en sala N°1 22.74 kV.

Niveles de Tensión de Perforadoras para Caso Base vs Propuesta de Infraestructura 3 - Tensión sala N°1 en 22.74 kV

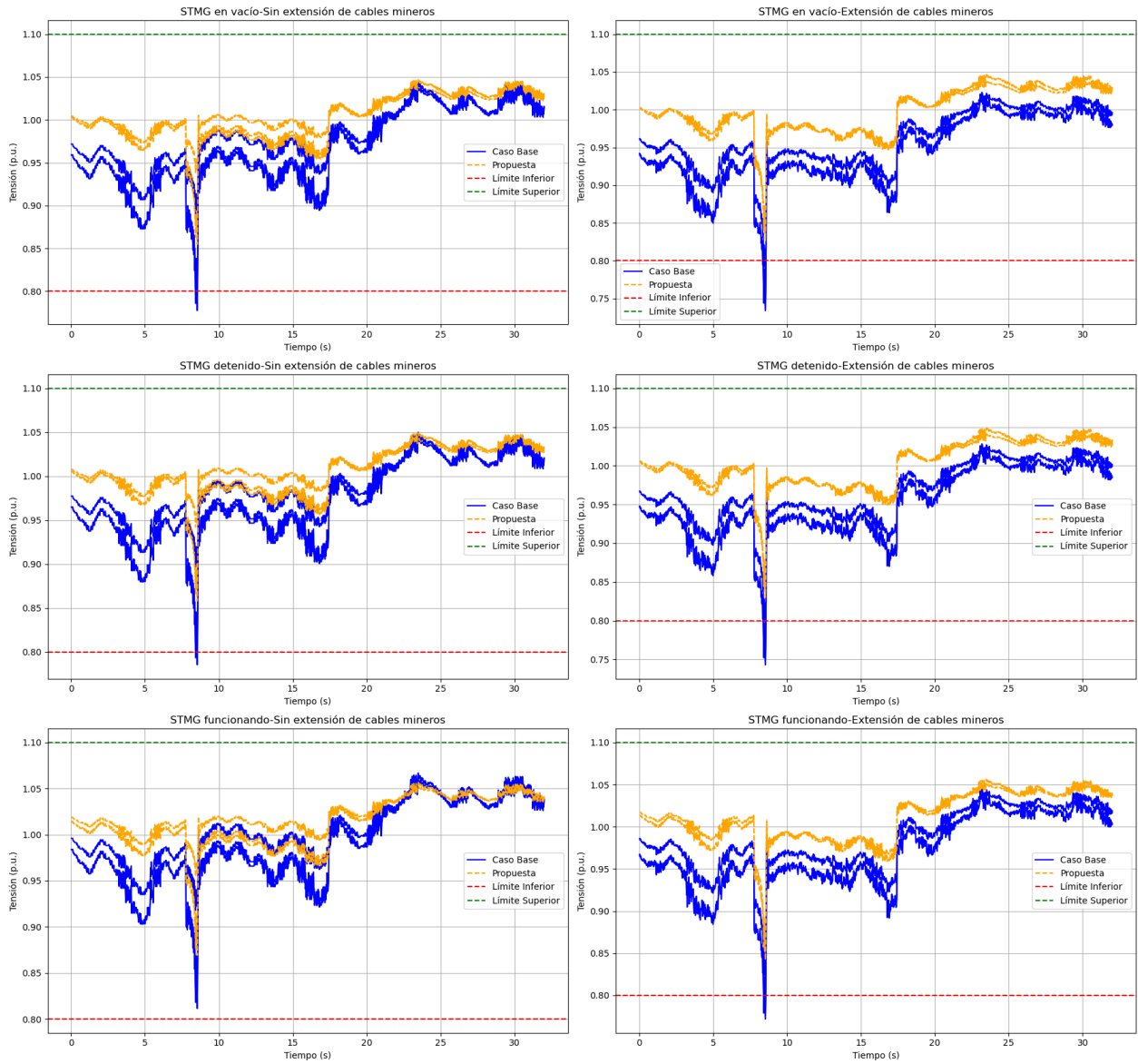


Figura D.2: Niveles de tensión de perforadoras para caso base vs propuesta de infraestructura 3 - Tensión en sala N°1 22.74 kV.

Niveles de Tensión de Loop Mina para Caso Base vs Propuesta de Infraestructura 3 - Tensión sala N°1 en 22.74 kV

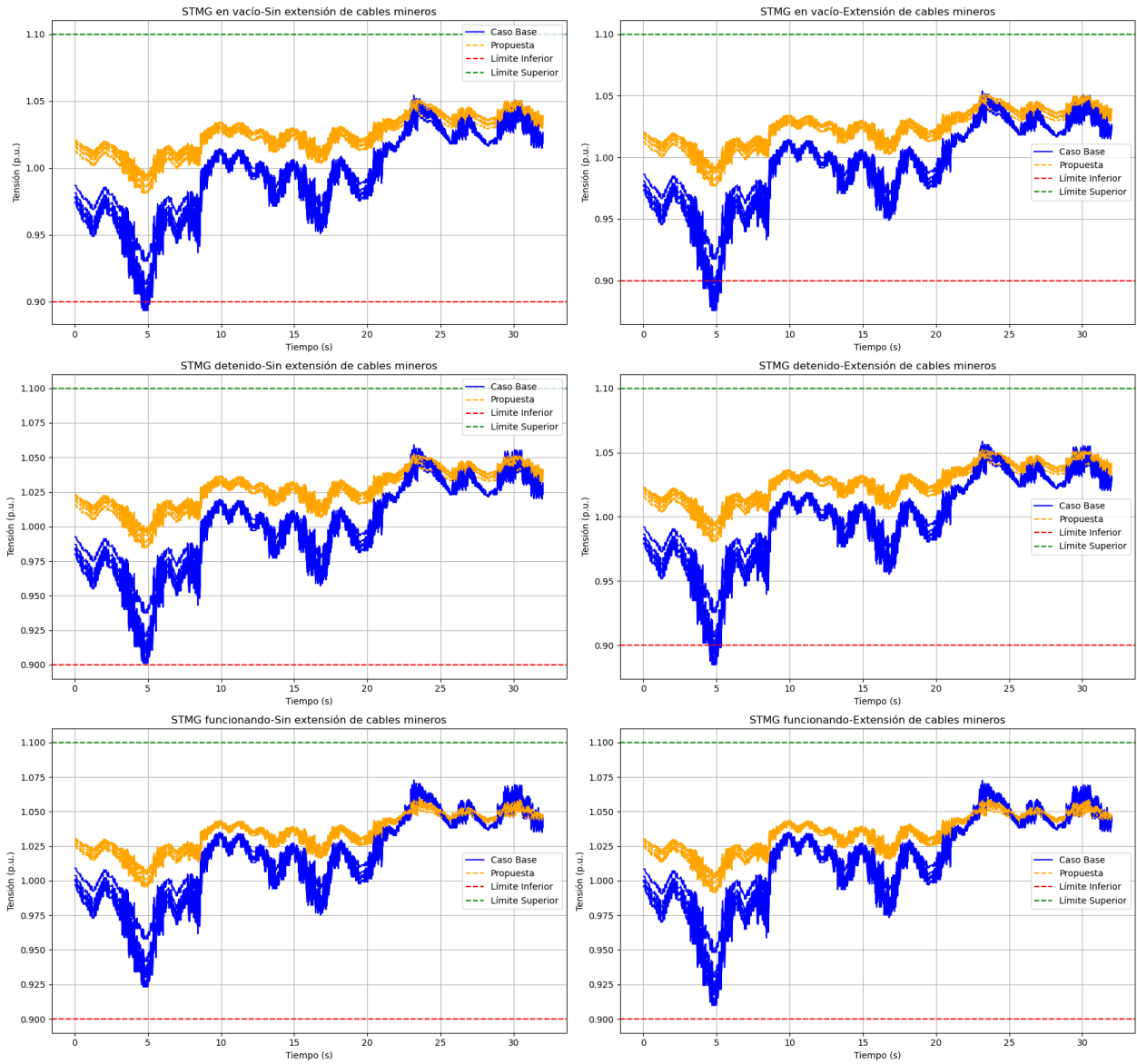


Figura D.3: Niveles de tensión de loop mina para caso base vs propuesta de infraestructura 3 - Tensión en sala N°1 22.74 kV.

Niveles de Tensión de STMG para Caso Base vs Propuesta de Infraestructura 3 - Tensión sala N°1 en 22.74 kV

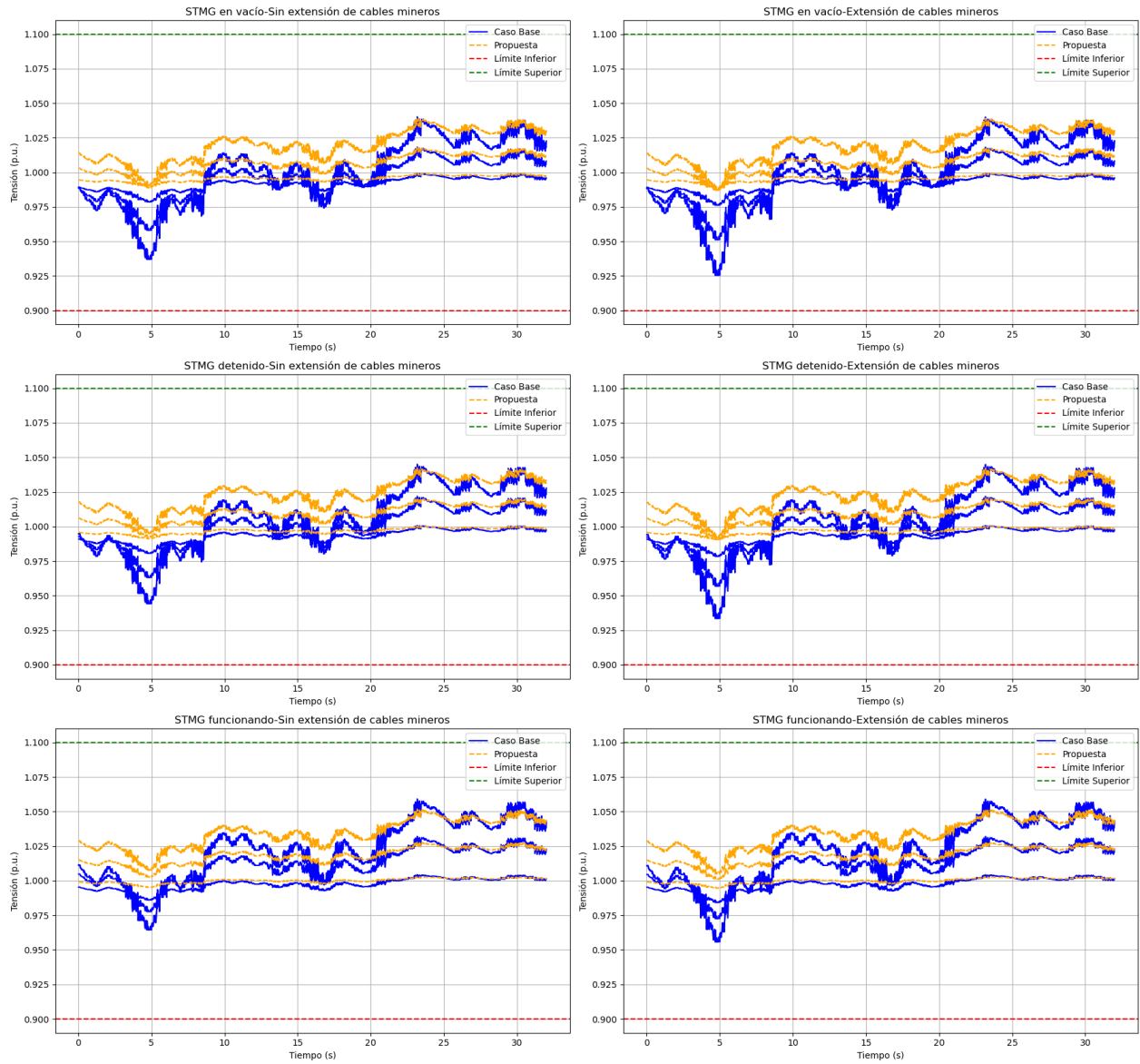


Figura D.4: Niveles de tensión de STMG mina para caso base vs propuesta de infraestructura 3 - Tensión en sala N°1 22.74 kV.

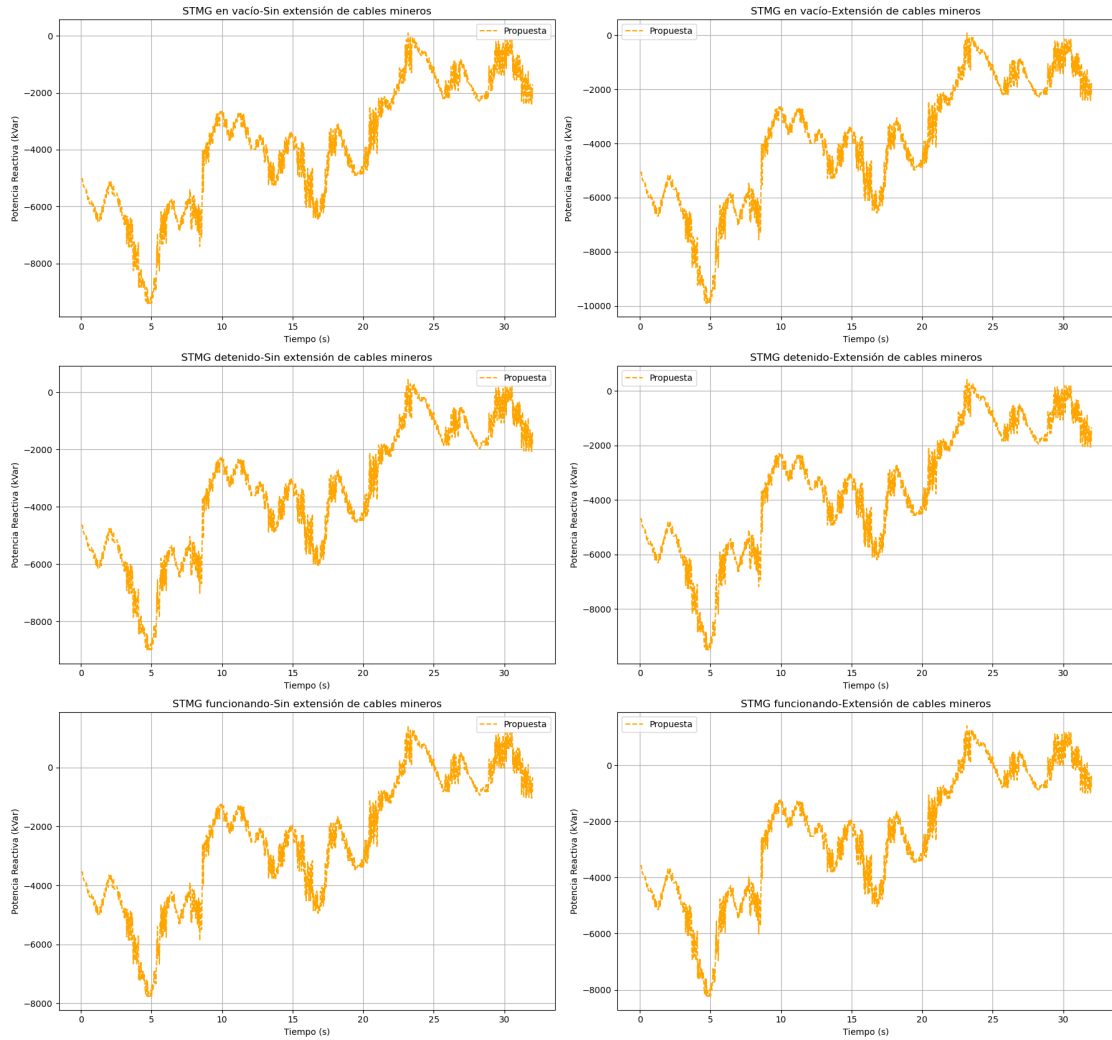


Figura D.5: Potencia reactiva entregada por STATCOM en 6.9 kV conectado a transformador móvil #7 (propuesta de infraestructura 3) - Tensión en sala N°1 22.74 kV.

Potencia Reactiva entregada por Statcom en 23 kV conectado a PM-7A (Propuesta de Infraestructura 3) - Tensión sala N°1 en 22.74 kV

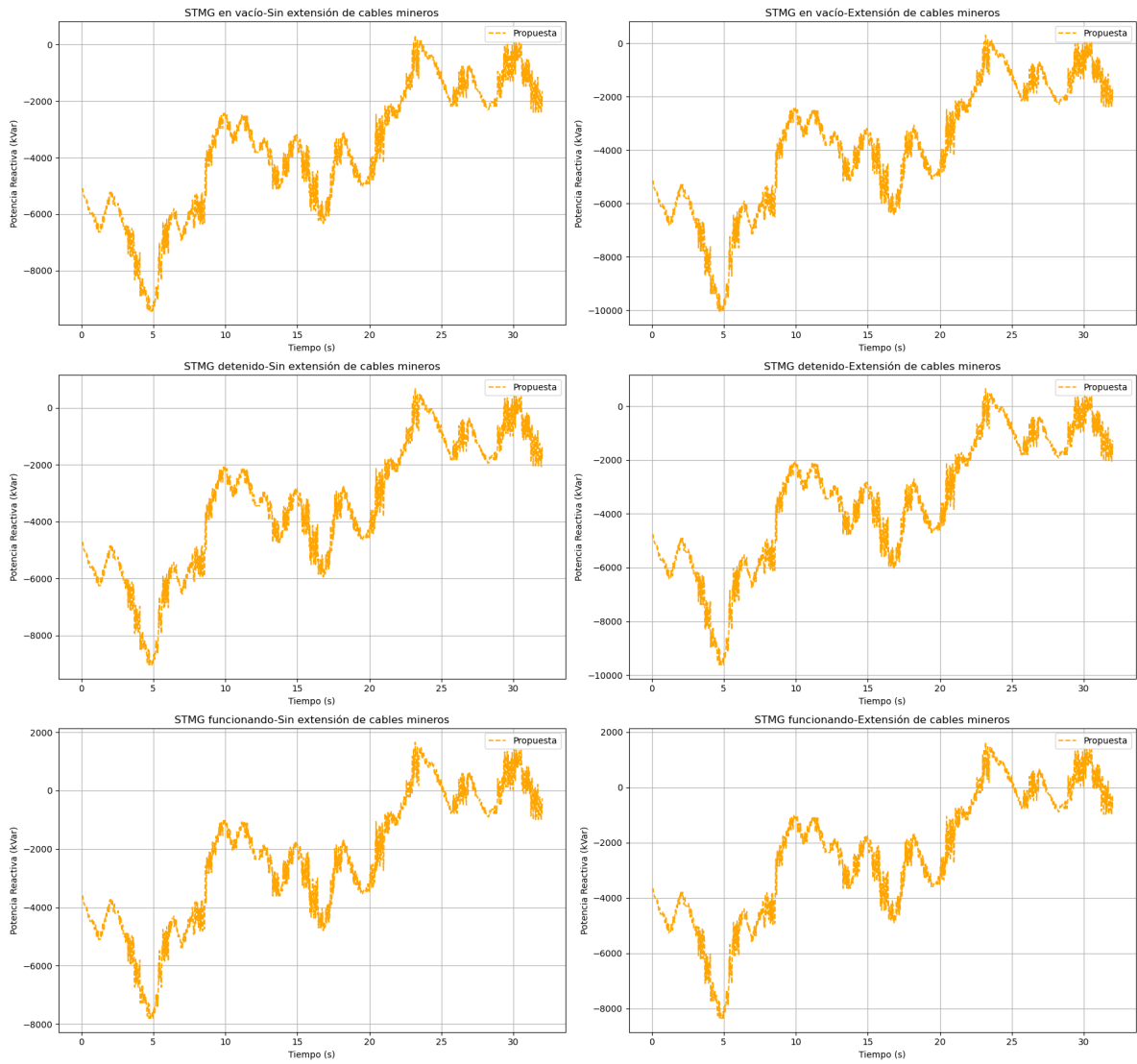


Figura D.6: Potencia reactiva entregada por STATCOM en 6.9 kV conectado a transformador móvil #1 (propuesta de infraestructura 3) - Tensión en sala N°1 22.74 kV.

## D.1.2. Curvas PV

Curvas PV para Loop Mina - Tensión sala N°1 22.74 kV

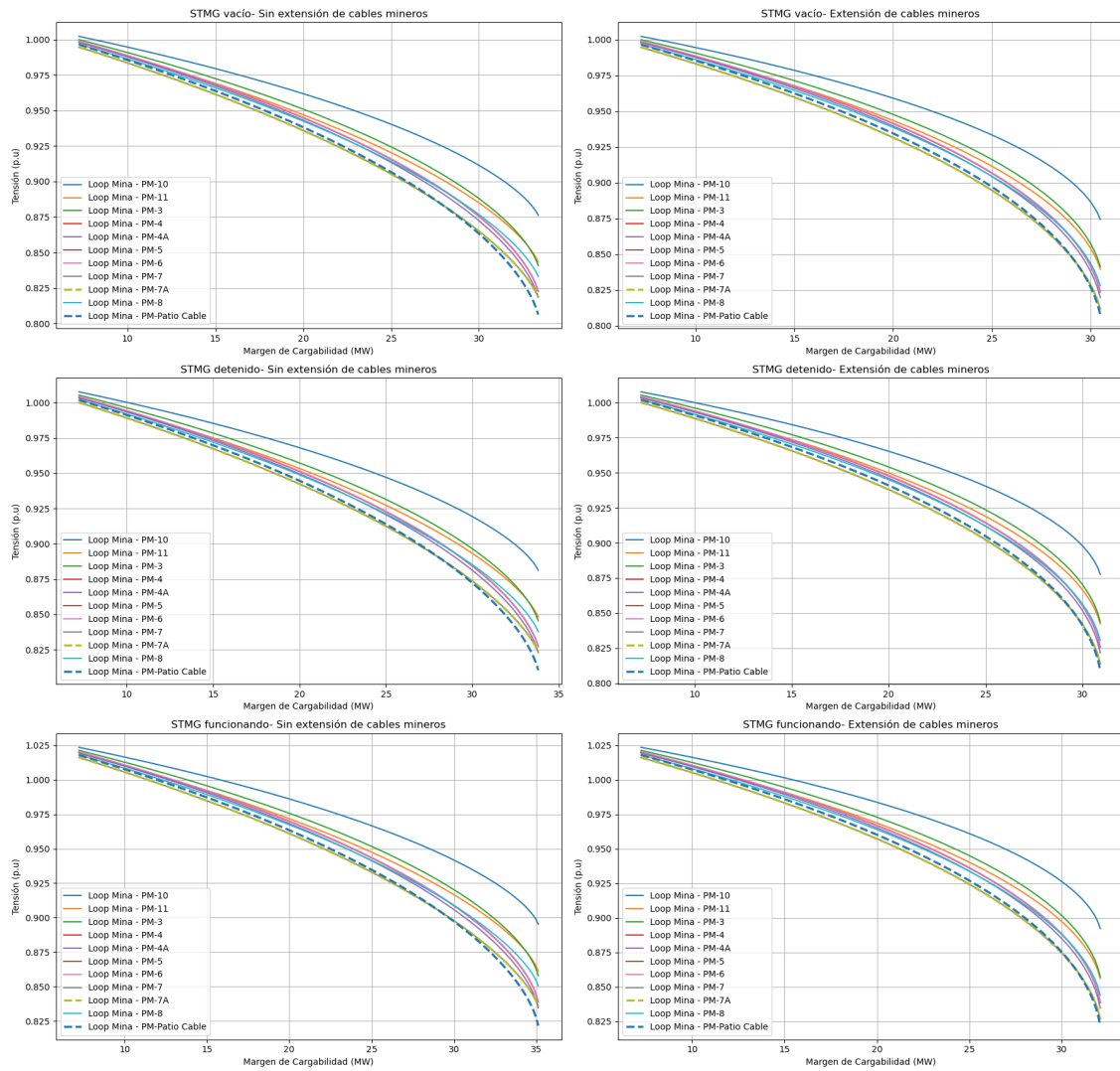


Figura D.7: Curva PV para loop mina - Tensión sala N°1 22.74 kV - Propuesta de infraestructura 3.

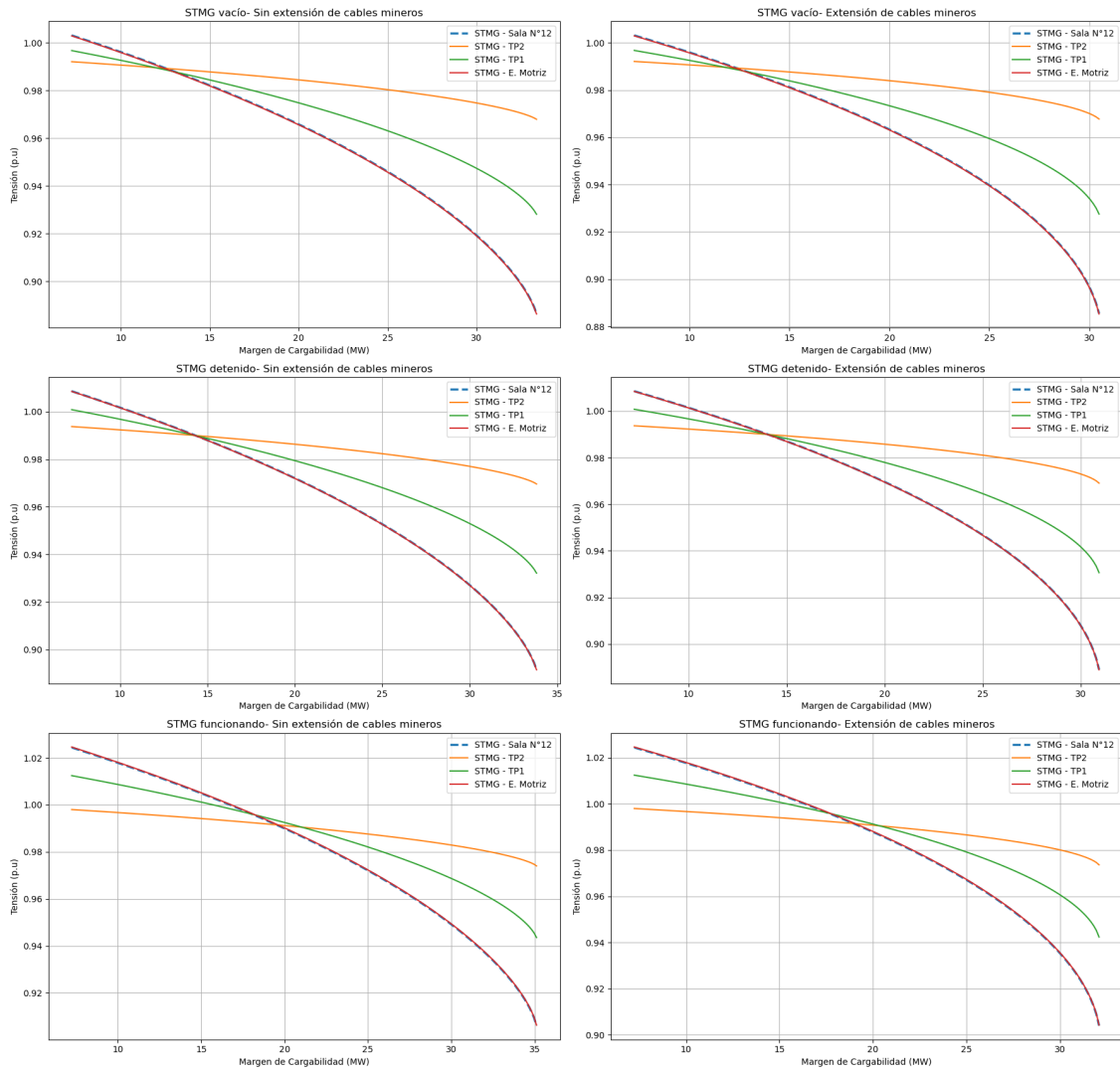


Figura D.8: Curva PV para STMG - Tensión sala N°1 22.74 kV - Propuesta de infraestructura 3.



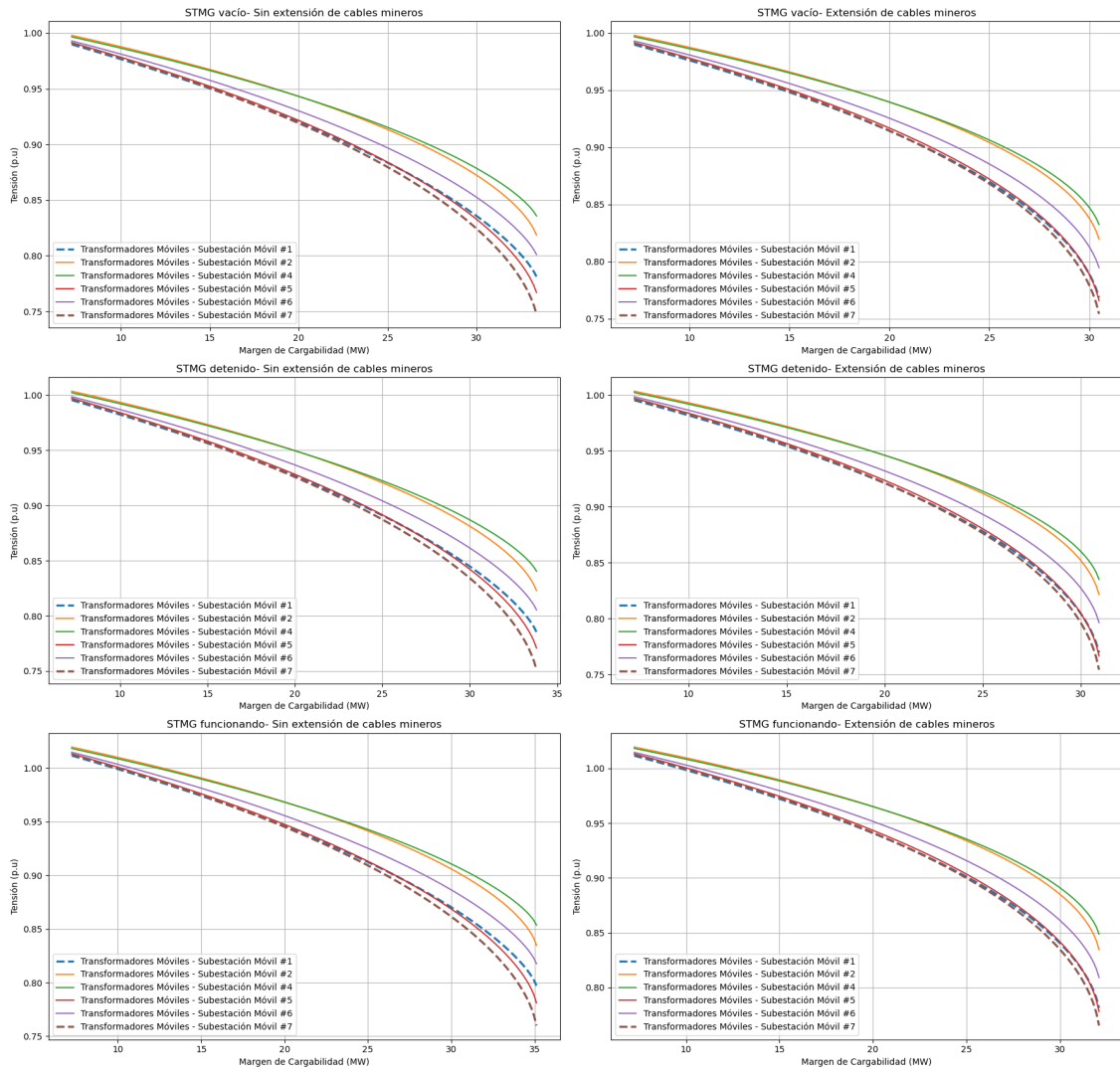


Figura D.9: Curva PV para transformadores móviles - Tensión sala N°1 22.74 kV - Propuesta de infraestructura 3.

## D.2. Tensión en sala N°12 en 23.68 kV

### D.2.1. Niveles de tensión

Niveles de Tensión de Palas para Caso Base vs Propuesta de Infraestructura 3 - Tensión sala N°1 en 23.68 kV

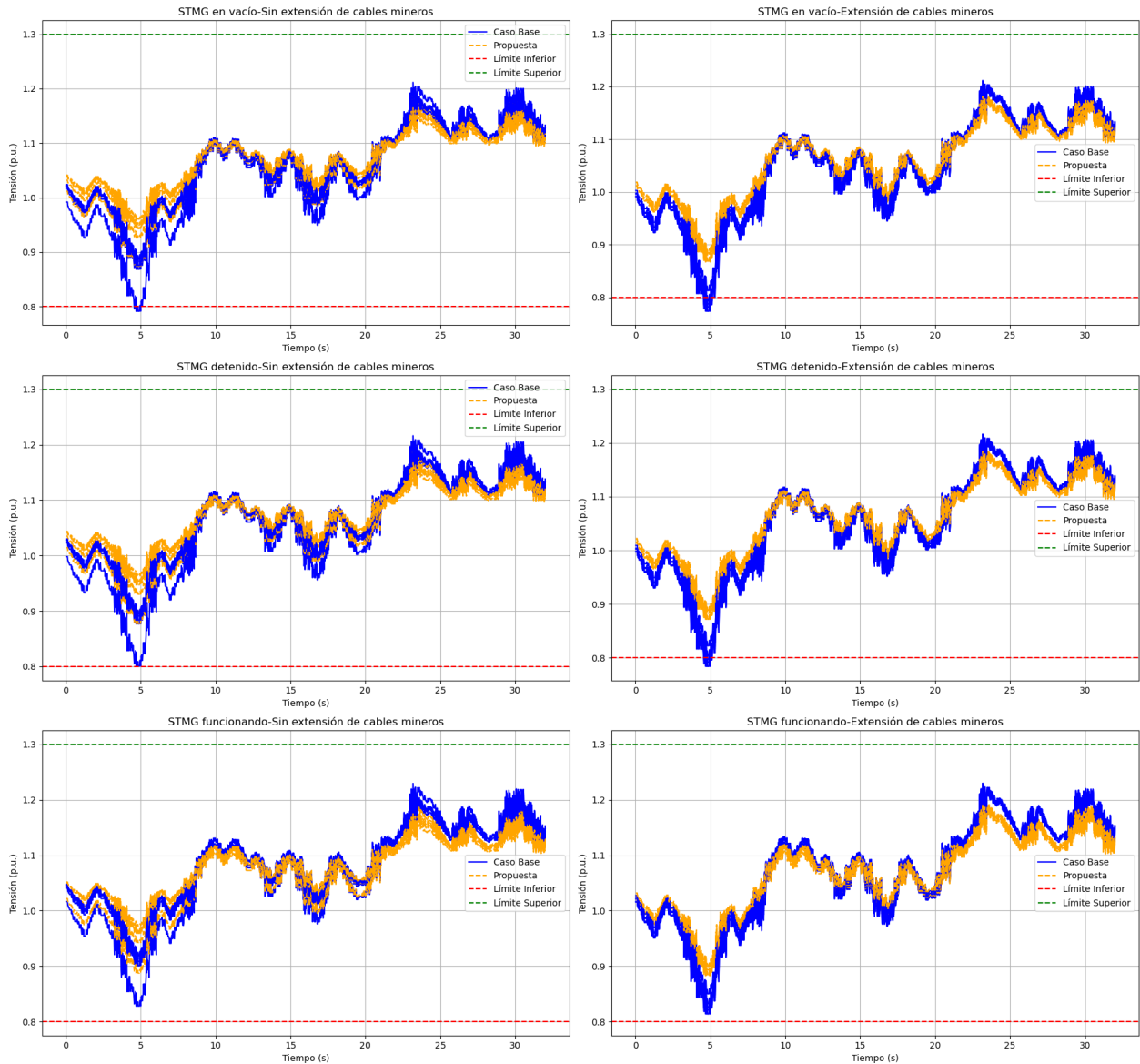


Figura D.10: Niveles de tensión de palas para caso base vs propuesta de infraestructura 3 - Tensión en sala N°1 23.68 kV.

Niveles de Tensión de Perforadoras para Caso Base vs Propuesta de Infraestructura 3 - Tensión sala N°1 en 23.68 kV

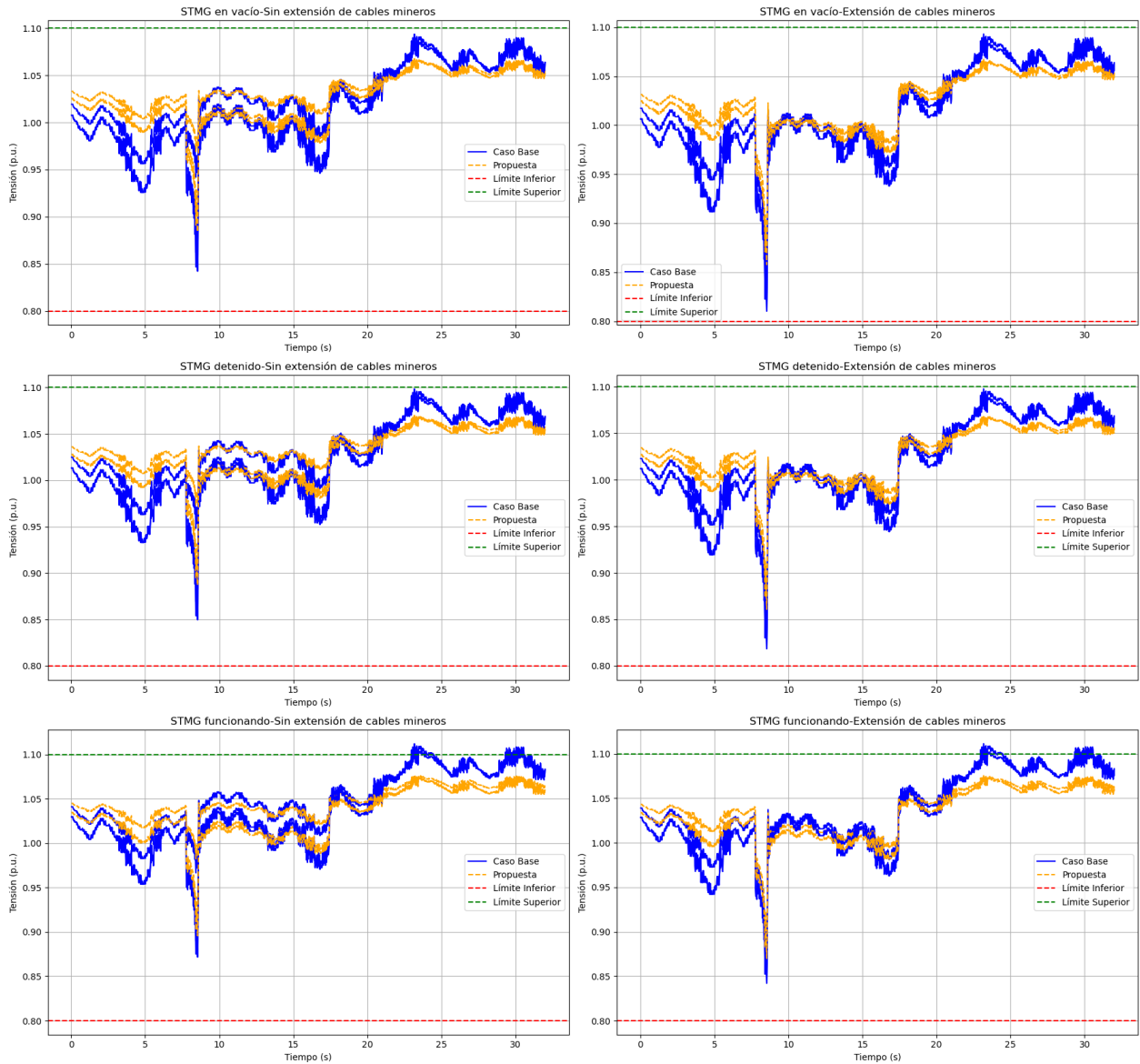


Figura D.11: Niveles de tensión de perforadoras para caso base vs propuesta de infraestructura 3 - Tensión en sala N°1 23.68 kV.

Niveles de Tensión de Loop Mina para Caso Base vs Propuesta de Infraestructura 3 - Tensión sala N°1 en 23.68 kV

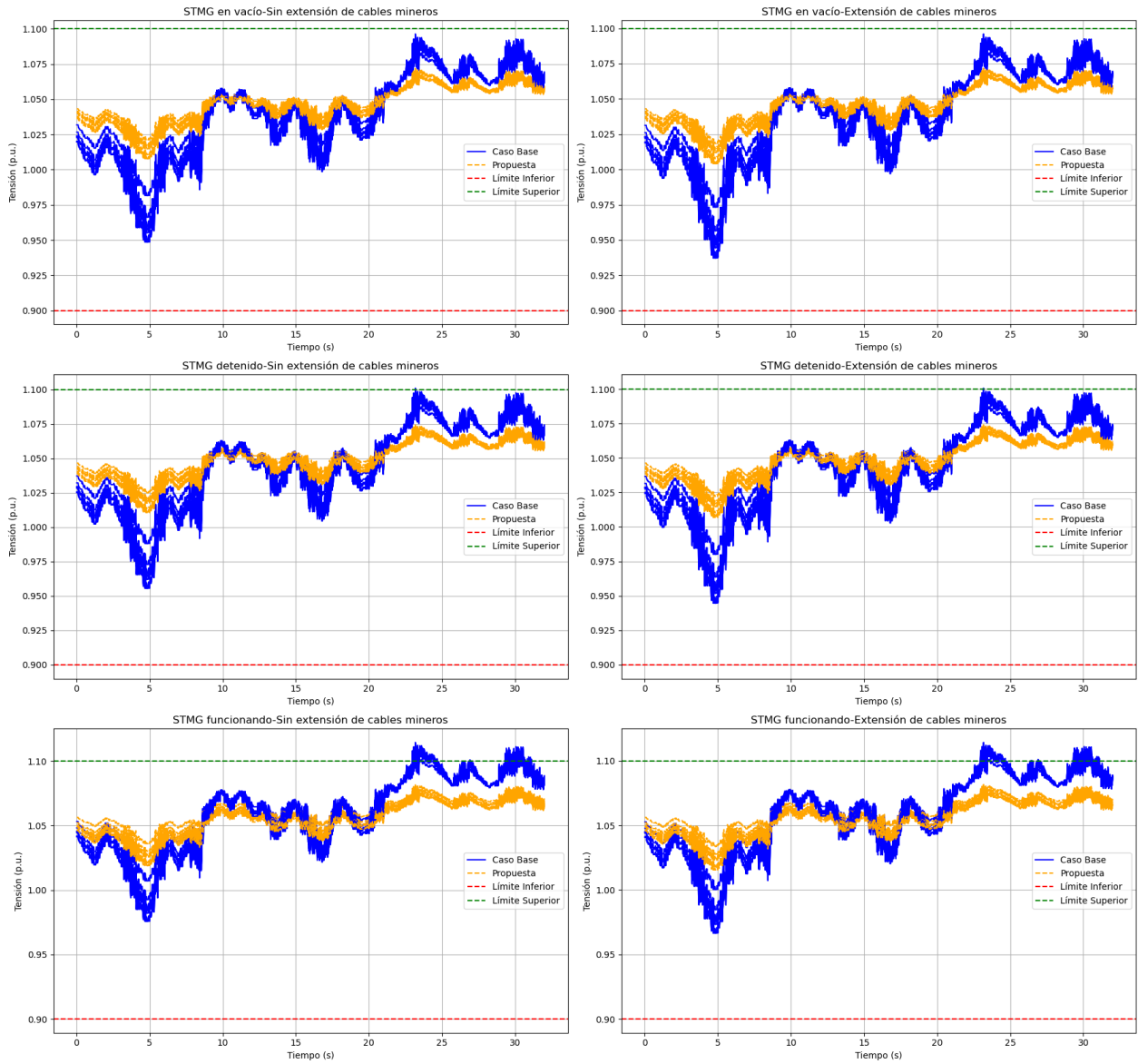


Figura D.12: Niveles de tensión de loop mina para caso base vs propuesta de infraestructura 3 - Tensión en sala N°1 23.68 kV.

Niveles de Tensión de STMG para Caso Base vs Propuesta de Infraestructura 3 - Tensión sala N°1 en 23.68 kV

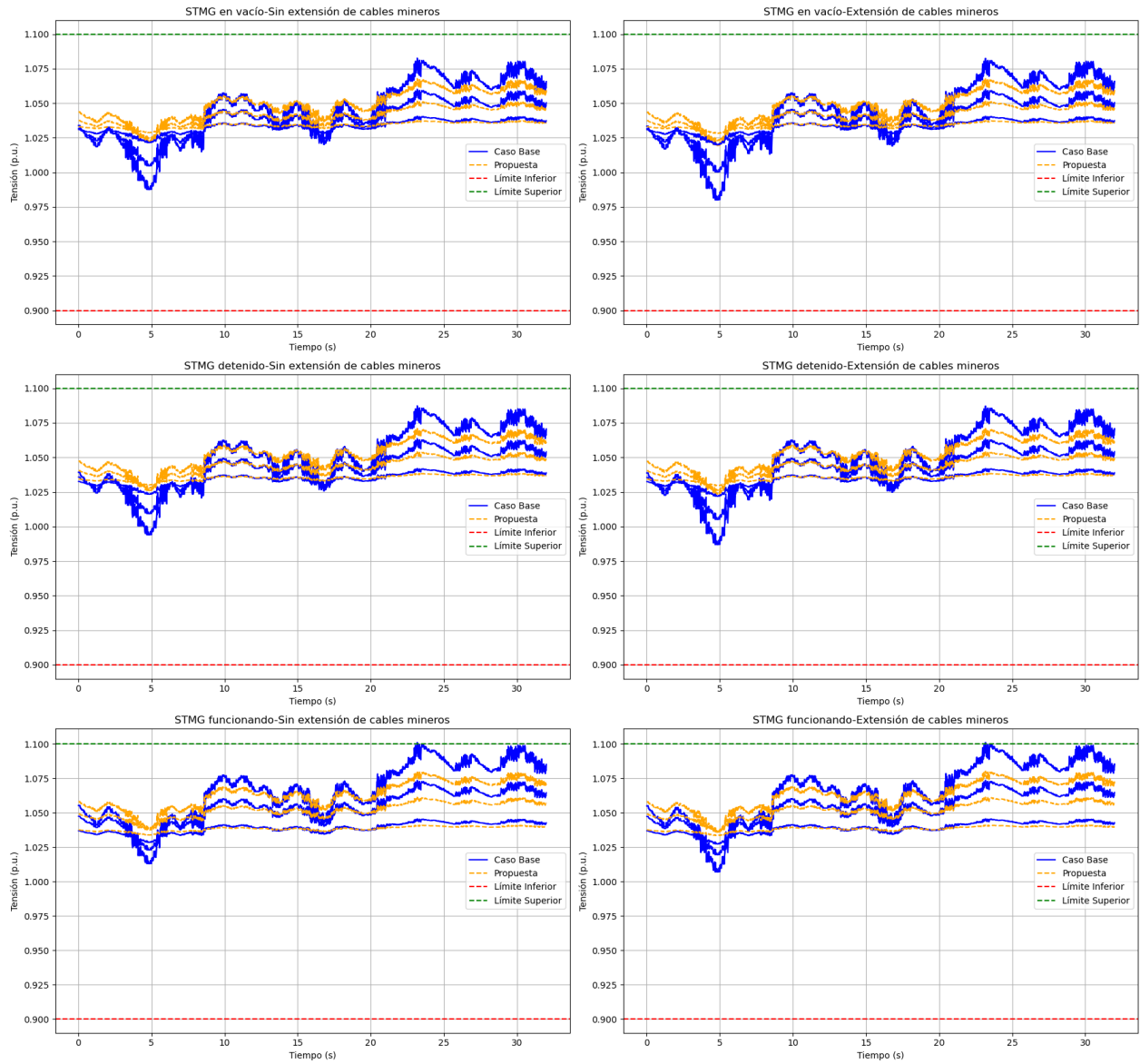


Figura D.13: Niveles de tensión de STMG para caso base vs propuesta de infraestructura 3 - Tensión en sala N°1 23.68 kV.

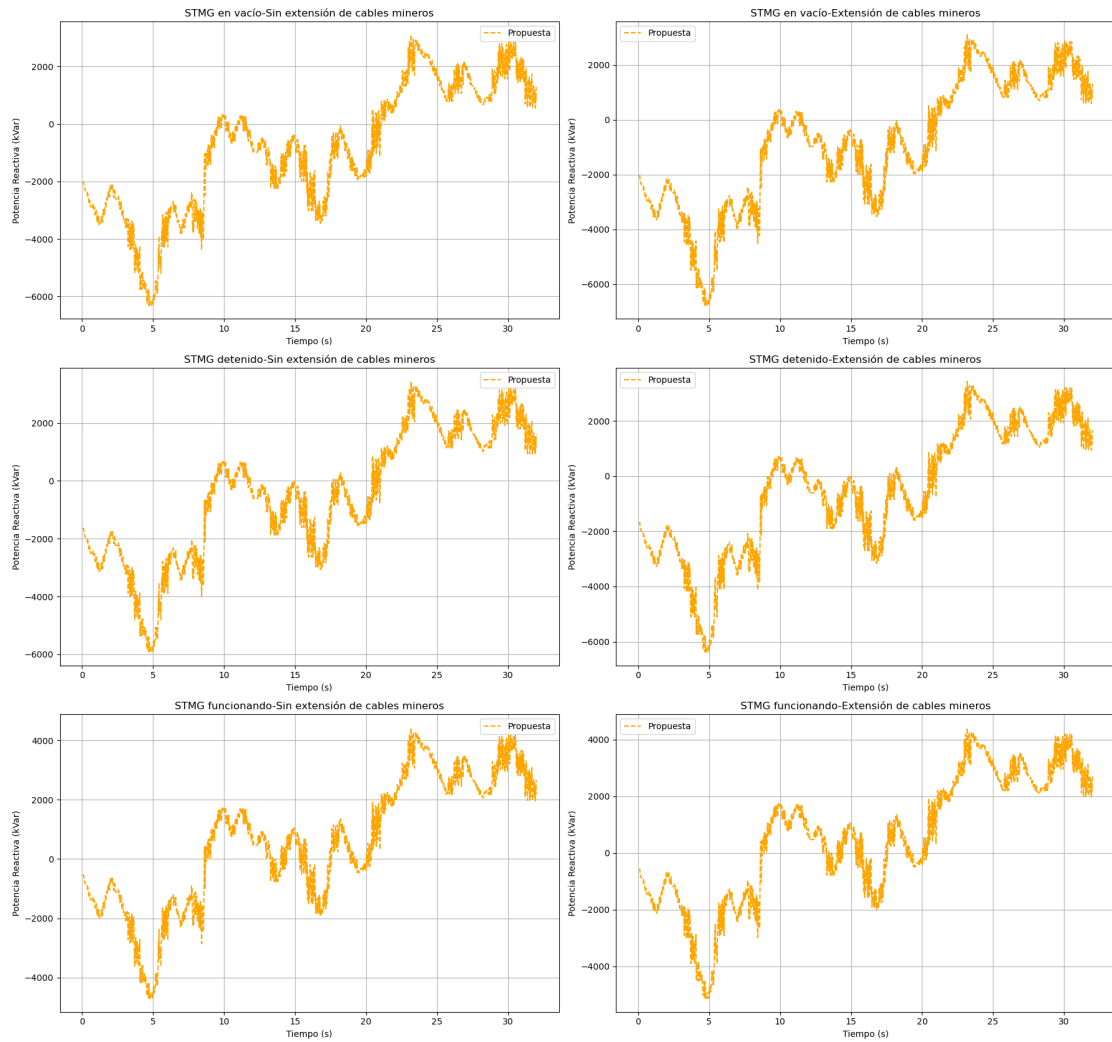


Figura D.14: Potencia reactiva entregada por STATCOM en 6.9 kV conectado a transformador móvil #7 (propuesta de infraestructura 3) - Tensión en sala N°1 23.68 kV.

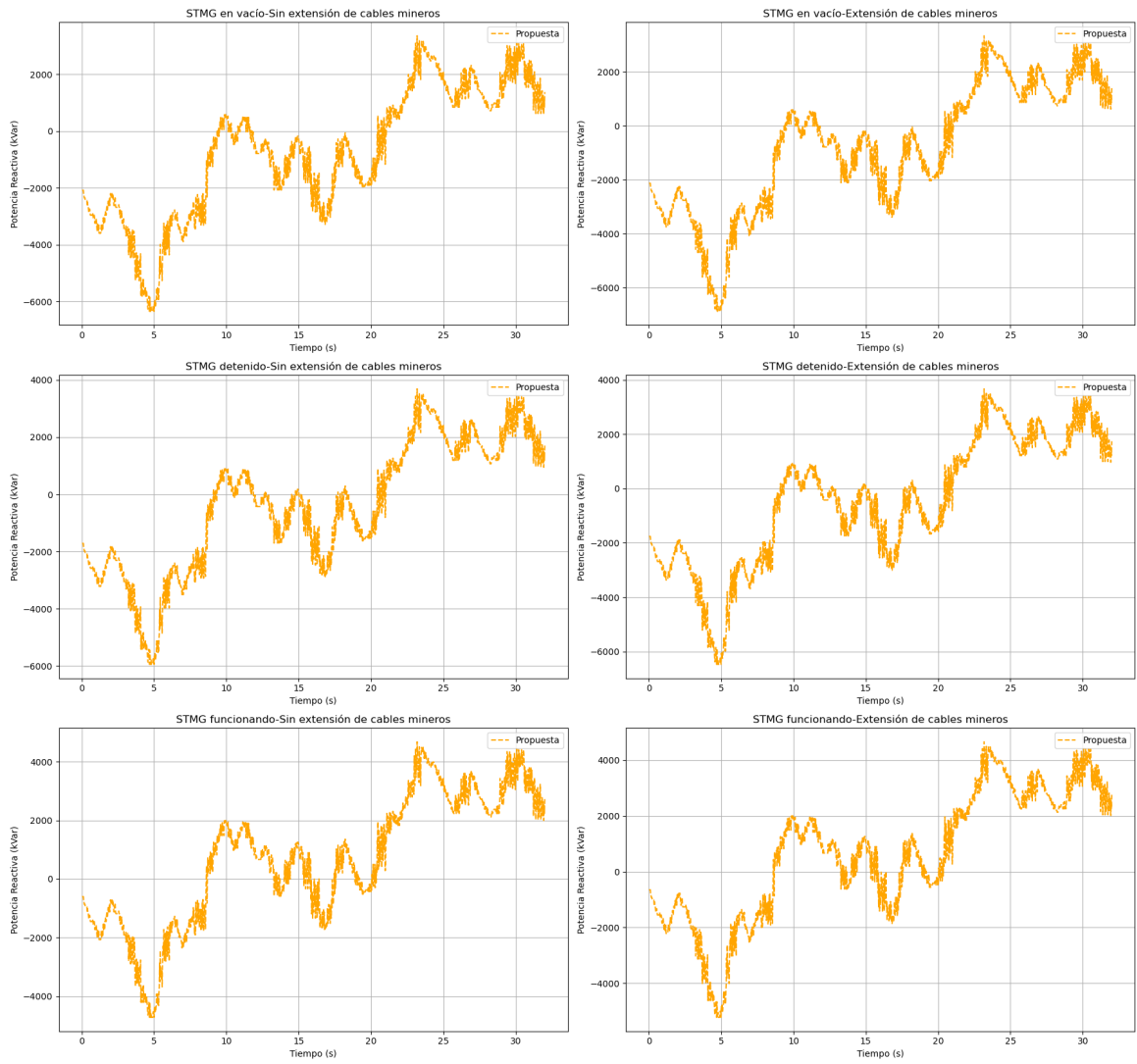


Figura D.15: potencia reactiva entregada por STATCOM en 6.9 kV conectado a transformador móvil #1 (propuesta de infraestructura 3) - Tensión en sala N°1 23.68 kV.

## D.2.2. Curvas PV

Curvas PV para Loop Mina - Tensión sala N°1 22.74 kV

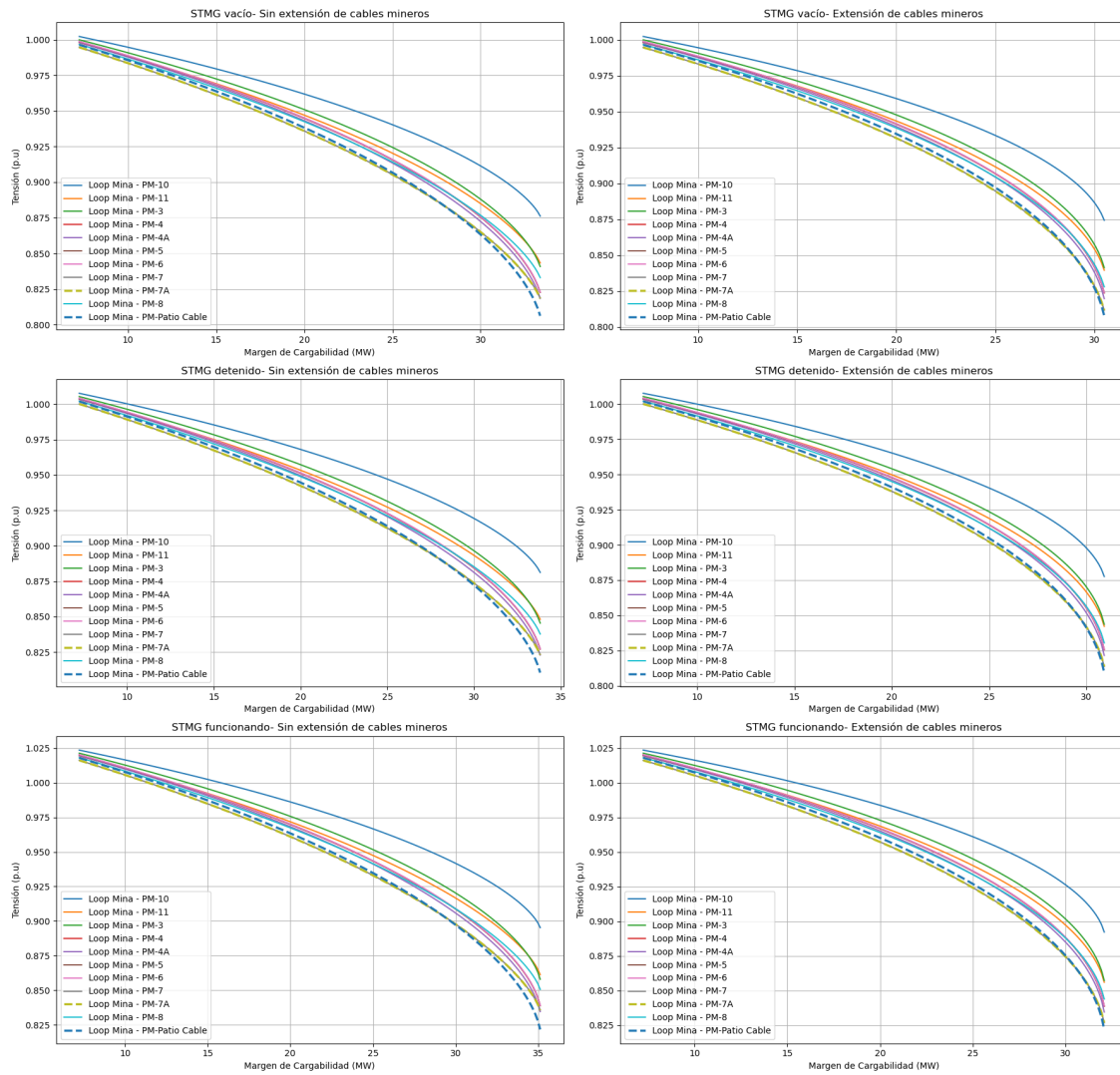


Figura D.16: Curva PV para loop mina - Tensión sala N°1 23.68 kV - Propuesta de infraestructura 3.



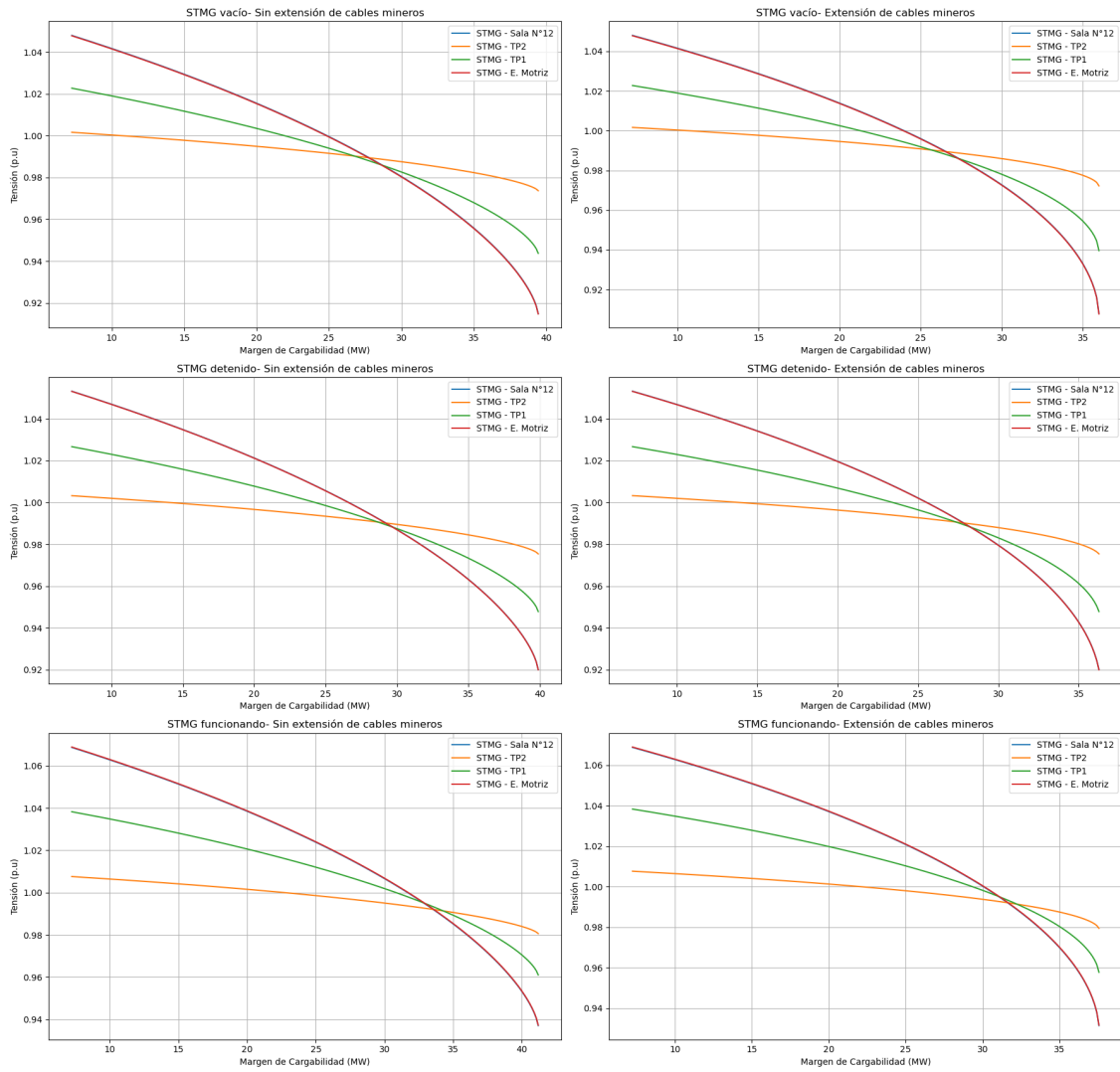


Figura D.17: Curva PV para STMG - Tensión sala N°1 23.68 kV - Propuesta de infraestructura 3.

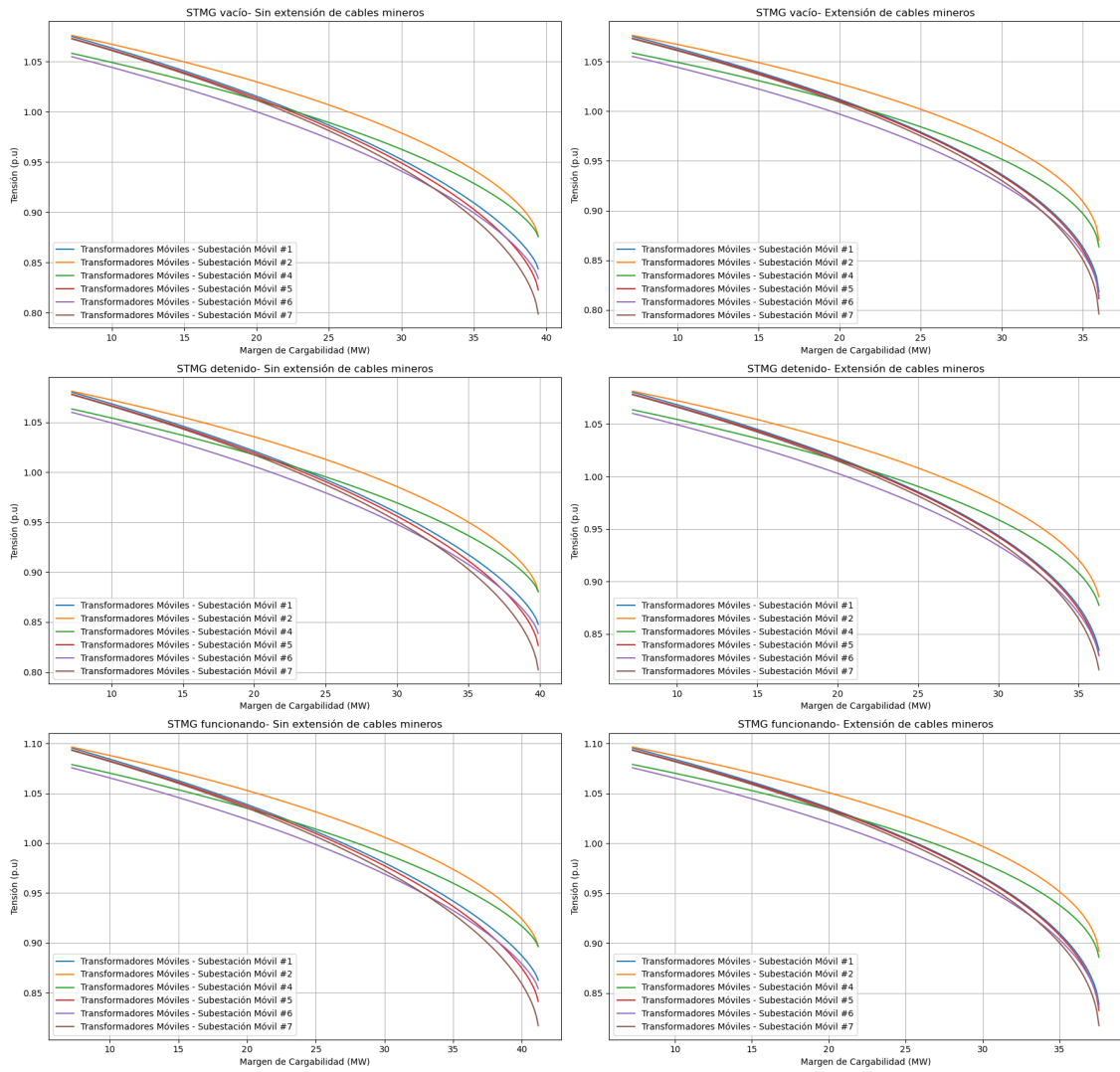


Figura D.18: Curva PV para transformadores móviles - Tensión sala N°1 23.68 kV - Propuesta de infraestructura 3.

# Anexo E. Propuesta descartada

Comparación de Niveles de Tensión - Caso Base vs Propuesta 4 - Tensión en sala N°1 22.74 kV

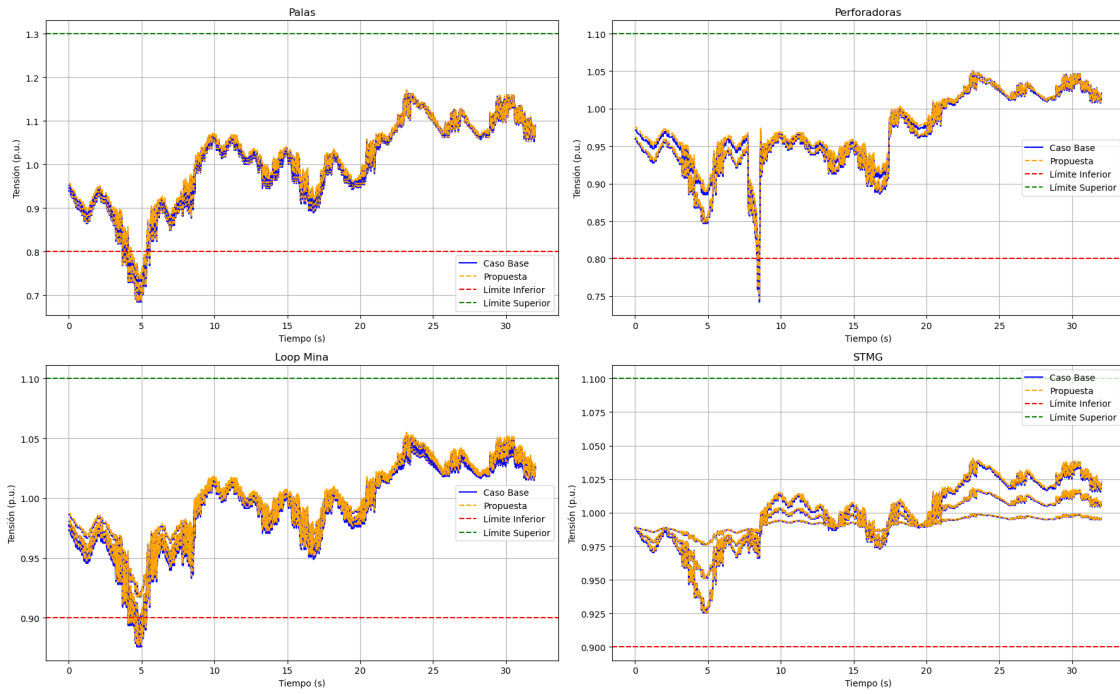


Figura E.1: Niveles de tensión para propuesta descartada en el peor escenario de operación.

## Anexo F. Datos del modelo

Name	SS/AA Correas 1.25 MVA 23/0.4 kV Dy1	
Technology	Three Phase Transformer	
Rated Power	1.25	MVA
Nominal Frequency	50.	Hz
Rated Voltage		
HV-Side	23.	kV
LV-Side	0.4	kV
Vector Group		
HV-Side	D	
LV-Side	YN	
Phase Shift	1.	*30deg
Name	Dyn1	
Positive Sequence Impedance		
Short-Circuit Voltage uk	6.09	%
Copper Losses	0.	kW
Zero Sequence Impedance		
Short-Circuit Voltage uk0	3.	%
SHC-Voltage (Re(uk0)) uk0r	0.	%

Figura F.1: Transformador SS/AA TP2 y TP1.

Name	SS/AA Correas 2.3 MVA 23/0.4 kV Dy1	
Technology	Three Phase Transformer	
Rated Power	2.3	MVA
Nominal Frequency	50.	Hz
Rated Voltage		
HV-Side	23.	kV
LV-Side	0.4	kV
Vector Group		
HV-Side	D	
LV-Side	YN	
Phase Shift	0.	*30deg
Name	Dyn0	
Positive Sequence Impedance		
Short-Circuit Voltage uk	5.75	%
Copper Losses	0.	kW
Zero Sequence Impedance		
Short-Circuit Voltage uk0	3.	%
SHC-Voltage (Re(uk0)) uk0r	0.	%

Figura F.2: Transformador SS/AA E. Motriz.

Name	[transformador Correa 3.5 MVA Dyn5]	
Technology	Three Phase Transformer	
Rated Power	3.5	MVA
Nominal Frequency	50.	Hz
Rated Voltage		Vector Group
HV-Side	23.	kV
LV-Side	2.9	kV
Positive Sequence Impedance		Phase Shift
Short-Circuit Voltage uk	12.3	%
Copper Losses	0.	kW
Zero Sequence Impedance		Name
Short-Circuit Voltage uk0	3.	%
SHC-Voltage (Re(uk0)) uk0r	0.	%
		Dyn5

Figura F.3: Transformador motores TP2, TP1 y E. motriz.

Name	Transformador Correa 3.5 MVA Dd0	
Technology	Three Phase Transformer	
Rated Power	3.5	MVA
Nominal Frequency	50.	Hz
Rated Voltage		Vector Group
HV-Side	23.	kV
LV-Side	2.9	kV
Positive Sequence Impedance		Phase Shift
Short-Circuit Voltage uk	12.3	%
Copper Losses	0.	kW
Zero Sequence Impedance		Name
Short-Circuit Voltage uk0	3.	%
SHC-Voltage (Re(uk0)) uk0r	0.	%
		Dd0

Figura F.4: Transformador motores TP2, TP1 y E. motriz.

Name	5 MVA Chancador N° 2	
Technology	Three Phase Transformer	
Rated Power	5.	MVA
Nominal Frequency	50.	Hz
Rated Voltage		Vector Group
HV-Side	23.	kV
LV-Side	3.45	kV
Positive Sequence Impedance		Phase Shift
Short-Circuit Voltage uk	6.3	%
Copper Losses	0.	kW
Zero Sequence Impedance		Name
Short-Circuit Voltage uk0	3.	%
SHC-Voltage (Re(uk0)) uk0r	0.	%
		Dyn1

Figura F.5: Transformador chancador 1 y 2.

Name	1 MVA 23/0.4 kV Dy1	
Technology	Three Phase Transformer	
Rated Power	1.	MVA
Nominal Frequency	50.	Hz
Rated Voltage		Vector Group
HV-Side	23.	kV
LV-Side	0.4	kV
Positive Sequence Impedance		HV-Side
Short-Circuit Voltage uk	5.6	%
Copper Losses	0.	kW
Zero Sequence Impedance		LV-Side
Short-Circuit Voltage uk0	3.	%
SHC-Voltage (Re(uk0)) uk0r	0.	%
		Phase Shift
		1. *30deg
		Name
		Dy1

Figura F.6: Transformador SS/AA chancador 1 y 2.

General	Advanced	Automatic Dispatch
Use for calculation		
Max. Values		
Short-Circuit Power Sk'max	1237.98	MVA
Short-Circuit Current Ik'max	31.43131	kA
c-Factor (max.)	1.1	
R/X Ratio (max.)	0.16	
Impedance Ratio		
Z2/Z1 max.	1.	
X0/X1 max.	1.	
R0/X0 max.	0.1	
Min. Values		
Short-Circuit Power Sk'min	712.0496	MVA
Short-Circuit Current Ik'min	18.07837	kA
c-Factor (min.)	1.	
R/X Ratio (min.)	0.15	
Impedance Ratio		
Z2/Z1 min.	1.	
X0/X1 min.	1.	
R0/X0 min.	0.1	
<input type="checkbox"/> Consider for region spinning reserve		
Generation shift key	100.	%

Figura F.7: Red equivalente en sala N°1.

General		Measurement Report	Zero Sequence/Neutral Conductor
Name	3		
Terminal	52-2/52-18\Terminal(14)\Cub_1	Terminal(14)	
Zone	→		
Area	→		
<input type="checkbox"/> Out of Service			
System Type	AC	Technology	3PH-Y
Rated Voltage	23. kV		
Shunt Type	R-L-C1-C2,Rp		
Input Mode	Layout Parameter	...	
Controller			
Max. No. of Steps	1	Max. Rated Reactive Power	2.203129 Mvar
Act.No. of Step	1	Actual Reactive Power	2.203129 Mvar
Design Parameter (per Step)		Layout Parameter (per Step)	
Rated Reactive Power, L-C	2.203129 Mvar	Capacitance C1	51.465 uF
Resonant Frequency	142.0993 Hz	Capacitance C2	15.001 uF
Quality Factor (at fr)	2.841919	Inductance	108. mH
		Resistance	33.93 Ohm
		Parallel Resistance	187.28 Ohm

Figura F.8: Filtro 3º armónica.

General		Measurement Report	Zero Sequence/Neutral Conductor
Name	5		
Terminal	52-2/52-18\Terminal(14)\Cub_2	Terminal(14)	
Zone	→		
Area	→		
<input type="checkbox"/> Out of Service			
System Type	AC	Technology	3PH-Y
Rated Voltage	23. kV		
Shunt Type	R-L-C Rp		
Input Mode	Layout Parameter	...	
Controller			
Max. No. of Steps	1	Max. Rated Reactive Power	3.498734 Mvar
Act.No. of Step	1	Actual Reactive Power	3.498734 Mvar
Design Parameter (per Step)		Layout Parameter (per Step)	
Rated Reactive Power, L-C	3.498734 Mvar	Capacitance	20.176 uF
Resonant Frequency	245.0336 Hz	Inductance	20.91 mH
Quality Factor (at fr)	4.899978	Resistance	6.57 Ohm
		Parallel Resistance	187.23 Ohm

Figura F.9: Filtro 5º armónica.



General		Measurement Report		Zero Sequence/Neutral Conductor	
Name	<input type="text" value="7"/>				
Terminal	52-2/52-18(Terminal(27))Cub_1				Terminal(27)
Zone	→				
Area	→				
<input type="checkbox"/> Out of Service					
System Type	AC	Technology	3PH-Y		
Rated Voltage	23. kV				
Shunt Type	R-L-C,Rp				
Input Mode	Layout Parameter				
Controller					
Max. No. of Steps	<input type="text" value="1"/>	Max. Rated Reactive Power	1.999016 Mvar		
Act.No. of Step	<input type="text" value="1"/>	Actual Reactive Power	1.999016 Mvar		
Design Parameter (per Step)			Layout Parameter (per Step)		
Rated Reactive Power, L-C	<input type="text" value="1.999016"/>	Mvar	Capacitance	<input type="text" value="11.776"/>	
Resonant Frequency	<input type="text" value="345.1138"/>	Hz	Inductance	<input type="text" value="18.06"/>	
Quality Factor (at fr)	<input type="text" value="6.9068"/>		Resistance	<input type="text" value="5.67"/>	
			Parallel Resistance	<input type="text" value="151.85"/>	

Figura F.10: Filtro 7<sup>o</sup> armónica.

General		Measurement Report		Zero Sequence/Neutral Conductor	
Name	<input type="text" value="11"/>				
Terminal	52-2/52-18(Terminal(27))Cub_2				Terminal(27)
Zone	→				
Area	→				
<input type="checkbox"/> Out of Service					
System Type	AC	Technology	3PH-Y		
Rated Voltage	23. kV				
Shunt Type	R-L-C,Rp				
Input Mode	Layout Parameter				
Controller					
Max. No. of Steps	<input type="text" value="1"/>	Max. Rated Reactive Power	5.498324 Mvar		
Act.No. of Step	<input type="text" value="1"/>	Actual Reactive Power	5.498324 Mvar		
Design Parameter (per Step)			Layout Parameter (per Step)		
Rated Reactive Power, L-C	<input type="text" value="5.498324"/>	Mvar	Capacitance	<input type="text" value="32.806"/>	
Resonant Frequency	<input type="text" value="544.9502"/>	Hz	Inductance	<input type="text" value="2.6"/>	
Quality Factor (at fr)	<input type="text" value="10.85666"/>		Resistance	<input type="text" value="0.82"/>	
			Parallel Resistance	<input type="text" value="47.54"/>	

Figura F.11: Filtro 11<sup>o</sup> armónica.

General	Measurement Report	Zero Sequence/Neutral Conductor												
Name	13°													
Terminal	52-2/52-18,Terminal(6)\Cub_5	Terminal(6)												
Zone	→													
Area	→													
<input type="checkbox"/> Out of Service														
System Type	AC	Technology 3PH-Y'												
Rated Voltage	23. kV													
Shunt Type	R-L-CRp													
Input Mode	Layout Parameter													
Controller														
Max. No. of Steps	1	Max. Rated Reactive Power 3.996362 Mvar												
Act.No. of Step	1	Actual Reactive Power 3.996362 Mvar												
Design Parameter (per Step)	<table border="1"> <tr> <td>Rated Reactive Power, L-C</td> <td>3.996362</td> <td>Mvar</td> </tr> <tr> <td>Resonant Frequency</td> <td>639.6926</td> <td>Hz</td> </tr> <tr> <td>Quality Factor (at fr)</td> <td>12.69513</td> <td></td> </tr> </table>		Rated Reactive Power, L-C	3.996362	Mvar	Resonant Frequency	639.6926	Hz	Quality Factor (at fr)	12.69513				
Rated Reactive Power, L-C	3.996362	Mvar												
Resonant Frequency	639.6926	Hz												
Quality Factor (at fr)	12.69513													
Layout Parameter (per Step)	<table border="1"> <tr> <td>Capacitance</td> <td>23.9</td> <td>uF</td> </tr> <tr> <td>Inductance</td> <td>2.59</td> <td>mH</td> </tr> <tr> <td>Resistance</td> <td>0.82</td> <td>Ohm</td> </tr> <tr> <td>Parallel Resistance</td> <td>31.</td> <td>Ohm</td> </tr> </table>		Capacitance	23.9	uF	Inductance	2.59	mH	Resistance	0.82	Ohm	Parallel Resistance	31.	Ohm
Capacitance	23.9	uF												
Inductance	2.59	mH												
Resistance	0.82	Ohm												
Parallel Resistance	31.	Ohm												

Figura F.12: Filtro 13° armónica.

Name	Chancador N° 2
Rated voltage	3.3 kV
Input Mode	<input checked="" type="radio"/> Slip-Torque/Current Characteristic <input type="radio"/> Electrical parameter
Power rating	<input type="radio"/> Rated apparent power 865.7815 kVA <input checked="" type="radio"/> Rated mechanical power 746. kW
Rated power factor	0.9069993
Efficiency at rated operation	94.99999 %
Nominal frequency	50. Hz
Rated speed	494. rpm
No of pole pairs	6
Connection	D

Figura F.13: Motor chancador 2 y 1 (110-CR-001A).

Name: 400 kW/3.45 kV

Rated voltage: 3.45 kV

Input Mode:  
 Slip-Torque/Current Characteristic  
 Electrical parameter

Power rating:  
 Rated apparent power: 489.2847 kVA  
 Rated mechanical power: 400 kW

Rated power factor: 0.88

Efficiency at rated operation: 92.9 %

Nominal frequency: 50 Hz

Rated speed: 2975 rpm

No of pole pairs: 1

Connection: D

Figura F.14: Motor chancador 1 (110-CV-001A y 110-CV-001B).

Name: 237 kW/3.45 kV/1/D

Rated voltage: 3.45 kV

Input Mode:  
 Slip-Torque/Current Characteristic  
 Electrical parameter

Power rating:  
 Rated apparent power: 268.9026 kVA  
 Rated mechanical power: 237 kW

Rated power factor: 0.92

Efficiency at rated operation: 95.8 %

Nominal frequency: 50 Hz

Rated speed: 2980 rpm

No of pole pairs: 1

Connection: D

Figura F.15: Motor chancador 1 (110-CP-001A y 110-CP-001B).

Tabla F.1: Consumos STMG.

Consumo	Potencia (MW)	Factor de Potencia
COM	0.4	0.9
Eq motores STMG (TP2, TP1 y E. Motriz)	0.39	0.92
SS/AA chancadores (chancador 1 y 2)	0.3	0
Eq motores STMG (TP2, TP1 y E. Motriz) vacío	0.333/0.375/0.375	1
Eq motores STMG (TP2, TP1 y E. Motriz) funcionando	-2.2/-2.2/-2.2	1
Consumo Fondo Mina	0.425	0.2

Name: 25 kV 3x250MCM UV  
 Rated Voltage: 25 kV  
 Rated Current: 0.446 kA (in ground) Rated Current (in air): 0.442 kA  
 Cable / OHL: Cable  
 System Type: AC Phases: 3 Number of Neutrals: 0  
 Nominal Frequency: 50 Hz  
 Parameters per Length 1,2-Sequence:  
 AC-Resistance R(20°C): 0.185 Ohm/km  
 Reactance X': 0.184 Ohm/km  
 Parameters per Length Zero Sequence:  
 AC-Resistance R0': 0.168 Ohm/km  
 Reactance X0': 0.072 Ohm/km

Figura F.16: 25 kV 3x250MCM UV y 25 kV 1x250MCM UV

Name: 25 kV 3x350MCM UV  
 Rated Voltage: 25 kV  
 Rated Current: 0.375 kA (in ground) Rated Current (in air): 0.435 kA  
 Cable / OHL: Cable  
 System Type: AC Phases: 3 Number of Neutrals: 0  
 Nominal Frequency: 50 Hz  
 Parameters per Length 1,2-Sequence:  
 AC-Resistance R(20°C): 0.133 Ohm/km  
 Reactance X': 0.177 Ohm/km  
 Parameters per Length Zero Sequence:  
 AC-Resistance R0': 0.125 Ohm/km  
 Reactance X0': 0.066 Ohm/km

Figura F.17: 25 kV 3x350MCM UV y 25 kV 1x350MCM UV

Name	25 kV 3x500MCM UV		
Rated Voltage	25	kV	
Rated Current	0.646	(in ground)	Rated Current (in air) 0.676 kA
Cable / OHL	Cable		
System Type	AC	Phases 3	Number of Neutrals 0
Nominal Frequency	50 Hz		
Parameters per Length 1,2-Sequence		Parameters per Length Zero Sequence	
AC-Resistance R'(20°C)	0.096	AC-Resistance R0'	0.093 Ohm/km
Reactance X'	0.173	Reactance X0'	0.06 Ohm/km

Figura F.18: 25 kV 3x500MCM UV y 25 kV 1x500MCM UV

Name: 25 kV 3x750MCM UV

Rated Voltage: 25. kV

Rated Current: 0.872 kA (in ground) Rated Current (in air): 0.676 kA

Cable / OHL: Cable

System Type: AC Phases: 3 Number of Neutrals: 0

Nominal Frequency: 50. Hz

Parameters per Length 1,2-Sequence

AC-Resistance R'(20°C)	0.0647 Ohm/km
Reactance X'	0.362 Ohm/km

Parameters per Length Zero Sequence

AC-Resistance R0'	0.093 Ohm/km
Reactance X0'	0.06 Ohm/km

Figura F.19: 25 kV 3x750MCM UV y 25 kV 1x750MCM UV

Name: 25 kV 3x1000MCM UV

Rated Voltage: 25. kV

Rated Current: 0.92 kA (in ground) Rated Current (in air): 1.028 kA

Cable / OHL: Cable

System Type: AC Phases: 3 Number of Neutrals: 0

Nominal Frequency: 50. Hz

Parameters per Length 1,2-Sequence

AC-Resistance R'(20°C)	0.051 Ohm/km
Reactance X'	0.16 Ohm/km

Parameters per Length Zero Sequence

AC-Resistance R0'	0.053 Ohm/km
Reactance X0'	0.0497 Ohm/km

Figura F.20: 25 kV 3x1000MCM UV y 25 kV 1x1000MCM UV

Name: 4 km Cable desnudo de cobre 250 MCM

Type: Libreria\Cables\Tower Geometry Type

Terminal i: Loop Mina\Terminal(57)\Cub\_2 Terminal(57)

Terminal j: Loop Mina\Terminal(38)\Cub\_2 Terminal(38)

Zone: Terminal i

Area: Terminal i

Out of Service

Number of parallel Lines: 1

Parameters

Thermal Rating: [dropdown]

Length of Line: 4. km

Derating Factor: 1.

Resulting Values

Nominal Current (act.)	0.415 kA
Pos. Seq. Impedance, Z1	1.511431 Ohm
Pos. Seq. Impedance, Angle	67.5982 deg
Pos. Seq. Resistance, R1	0.5760055 Ohm
Pos. Seq. Reactance, X1	1.397369 Ohm
Zero Seq. Resistance, R0	1.126508 Ohm
Zero Seq. Reactance, X0	5.511876 Ohm
Earth-Fault Current, Ice	0.2012562 A
Earth Factor, Magnitude	0.9155056
Earth Factor, Angle	14.78115 deg

Type of Line: Tower Geometry Type

Line Model:  Lumped Parameter (PI)  Distributed Parameter

Overhead Line Configuration

Type of phase conductors: ...snudos\250 MCM CU 19 hebras

Max.sag, phase conductors: 0. m

Earth resistivity: 20. Ohm\*m

Figura F.21: Cable de linea 4-0 CU

Name: 0.25 km 1x375 mm tipo ACSR

Type: Libreria\Cables\Tower Geometry Type

Terminal i: Loop Mina\Terminal(23)\Cub\_1 Terminal(23)

Terminal j: Loop Mina\Terminal(20)\Cub\_3 Terminal(20)

Zone: Terminal i

Area: Terminal i

Out of Service

Number of parallel Lines: 1

Parameters

Thermal Rating: [dropdown]

Length of Line: 0.25 km

Derating Factor: 1.

Resulting Values

Nominal Current (act.)	0.415 kA
Pos. Seq. Impedance, Z1	0.09446442 Ohm
Pos. Seq. Impedance, Angle	67.5982 deg
Pos. Seq. Resistance, R1	0.03600034 Ohm
Pos. Seq. Reactance, X1	0.08733557 Ohm
Zero Seq. Resistance, R0	0.07040672 Ohm
Zero Seq. Reactance, X0	0.3444922 Ohm
Earth-Fault Current, Ice	0.01257851 A
Earth Factor, Magnitude	0.9155056
Earth Factor, Angle	14.78115 deg

Type of Line: Tower Geometry Type

Line Model:  Lumped Parameter (PI)  Distributed Parameter

Overhead Line Configuration

Type of phase conductors: ...snudos\250 MCM CU 19 hebras

Max.sag. phase conductors: 0. m

Earth resistivity: 20. Ohm\*m

Sections/Line Loads: [button]

Figura F.22: 1x375 mm tipo ACSR

Name: 4 km Cable desnudo de cobre 250 MCM

Type: Libreria\Cables\Tower Geometry Type

Terminal i: Loop Mina\Terminal(57)\Cub\_2 Terminal(57)

Terminal j: Loop Mina\Terminal(38)\Cub\_2 Terminal(38)

Zone: Terminal i

Area: Terminal i

Out of Service

Number of parallel Lines: 1

Parameters

Thermal Rating: [dropdown]

Length of Line: 4. km

Derating Factor: 1.

Resulting Values

Nominal Current (act.)	0.415 kA
Pos. Seq. Impedance, Z1	1.511431 Ohm
Pos. Seq. Impedance, Angle	67.5982 deg
Pos. Seq. Resistance, R1	0.5760055 Ohm
Pos. Seq. Reactance, X1	1.397369 Ohm
Zero Seq. Resistance, R0	1.126508 Ohm
Zero Seq. Reactance, X0	5.511876 Ohm
Earth-Fault Current, Ice	0.2012562 A
Earth Factor, Magnitude	0.9155056
Earth Factor, Angle	14.78115 deg

Type of Line: Tower Geometry Type

Line Model:  Lumped Parameter (PI)  Distributed Parameter

Overhead Line Configuration

Type of phase conductors: ...snudos\250 MCM CU 19 hebras

Max.sag. phase conductors: 0. m

Earth resistivity: 20. Ohm\*m

Sections/Line Loads: [button]

Figura F.23: Cable desnudo de cobre 250 MCM

Name	4/0 AWG	
Rated Voltage	15.	kV
Rated Current	0.326	kA (in ground)
Rated Current (in air)	0.326	kA
Cable / OHL	Cable	
System Type	AC	Phases 3
Number of Neutrals	0	
Nominal Frequency	50.	
Parameters per Length 1,2-Sequence		
AC-Resistance R'(20°C)	0.233	Ohm/km
Reactance X'	0.094876	Ohm/km
Parameters per Length Zero Sequence		
AC-Resistance R0'	0.	Ohm/km
Reactance X0'	0.	Ohm/km

Figura F.24: Cable minero 4/0 AWG para palas

Name	2/0 AWG	
Rated Voltage	15.	kV
Rated Current	0.248	kA (in ground)
Rated Current (in air)	0.248	kA
Cable / OHL	Cable	
System Type	AC	Phases 3
Number of Neutrals	0	
Nominal Frequency	50.	
Parameters per Length 1,2-Sequence		
AC-Resistance R'(20°C)	0.371	Ohm/km
Reactance X'	0.106814	Ohm/km
Parameters per Length Zero Sequence		
AC-Resistance R0'	0.	Ohm/km
Reactance X0'	0.	Ohm/km

Figura F.25: Cable minero 2/0 AWG para perforadoras

Name	HB 7 MVA/8 MVA S/E movil N° 5/6/7	
Technology	Three Phase Transformer	
Rated Power	8.	MVA
Nominal Frequency	50.	
Rated Voltage		
HV-Side	23.	kV
LV-Side	6.9	kV
Positive Sequence Impedance		
Short-Circuit Voltage uk	6.6	%
Copper Losses	0.	kW
Zero Sequence Impedance		
Short-Circuit Voltage uk0	3.	%
SHC-Voltage (Re(uk0)) ukOr	0.	%
Vector Group		
HV-Side	D	
LV-Side	YN	
Phase Shift	1.	*30deg
Name	Dyn1	

Figura F.26: Transformadores móviles 5-6-7.



Name	HB 5 MVA/6.25 MVA S/E movil N° 1/2/3/4	
Technology	Three Phase Transformer	
Rated Power	5.	MVA
Nominal Frequency	50.	Hz
Rated Voltage		Vector Group
HV-Side	23.	kV
LV-Side	6.9	kV
		HV-Side D
		LV-Side YN
Positive Sequence Impedance		Phase Shift 1. *30deg
Short-Circuit Voltage uk	6.6	%
Copper Losses	0.	kW
Zero Sequence Impedance		Name Dyn1
Short-Circuit Voltage uk0	3.	%
SHC-Voltage (Re(uk0)) uk0r	0.	%

Figura F.27: Transformadores móviles 1-2-3-4.

Name	transformador Statcom 23 kV	
Technology	Three Phase Transformer	
Rated Power	30.	MVA
Nominal Frequency	50.	Hz
Rated Voltage		
HV-Side	23.	kV
LV-Side	0.4	kV
Positive Sequence Impedance		
Short-Circuit Voltage uk	10.	%
Copper Losses	100.	kW
Zero Sequence Impedance		
Short-Circuit Voltage uk0	10.	%
SHC-Voltage (Re(uk0)) uk0r	0.	%
Vector Group		
HV-Side	YN	
LV-Side	D	
Phase Shift	1.	*30deg
Name	YNd1	

Figura F.28: Transformador STATCOM 23 kV para propuesta 1.

General		Advanced	
Name	Convertidor PWM Statcom		
Terminal AC	52-2/52-18\Nodo de Baja Tensión\Cub_1	Nodo de Baja Tensión	
Terminal DC	52-2/52-18\Nodo DC\Cub_1	Nodo DC	
Zone	Terminal AC		
Area	Terminal AC		
<input type="checkbox"/> Out of Service			
Number of parallel converters	1	Converter type	Two-level converter
Ratings		Modulation	
Rated AC-voltage	0.4 kV	<input checked="" type="radio"/> Sinusoidal PWM	
Rated DC-voltage (DC)	1. kV	<input type="radio"/> Rectangular PWM	
Rated power	30. MVA	<input type="radio"/> No modulation	
Series reactor			
Short circuit impedance	5. %	R0/R1 ratio	1.
Copper losses	0. kW	X0/X1 ratio	1.
Category	Others	Subcategory	
Model	52-2/52-18\STATCOM		

Figura F.29: Convertidor PWM STATCOM 23 kV para propuesta 1.

Name:

Terminal:  Nodo DC

Zone:

Area:

Out of Service

System Type:

Rated Voltage:  kV

Shunt Type:

Input Mode:

Controller

Max. No. of Steps: <input type="text" value="1"/>	Max. Rated Reactive Power: 30. Mvar
Act.No. of Step: <input type="text" value="1"/>	Actual Reactive Power: 30. Mvar

Design Parameter (per Step)

Rated Reactive Power, C: <input type="text" value="30."/> Mvar	Loss Factor, tan(delta): <input type="text" value="0."/>
--	--

Layout Parameter (per Step)

Capacitance: <input type="text" value="127324."/> uF	Parallel Conductance: <input type="text" value="0."/>
--	---

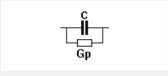


Figura F.30: Capacitancia DC STATCOM 23 kV para propuesta 1.

Name:

Type:

HV-Side:  - Subestación Móvil :

LV-Side:  Nodo de Baja Tensik

Zone:

Area:

Out of Service

Number of parallel Transformers:  Flip Connections

Thermal Rating:

Rating Factor:  Nominal Power (act.) 10. MVA

Supplied Elements

Figura F.31: Transformador STATCOM 6.9 kV para propuesta 2.

Name:

Terminal AC:  Nodo de Baja Tensik

Terminal DC:  Nodo DC 3

Zone:

Area:

Out of Service

Number of parallel converters:

Converter type:

Ratings:

Rated AC-voltage:  kV

Rated DC-voltage (DC):  kV

Rated power:  MVA

Modulation:

Sinusoidal PWM

Rectangular PWM

No modulation

Series reactor:

Short circuit impedance:  %

R0/R1 ratio:

Copper losses:  kW

X0/X1 ratio:

Category:

Subcategory:

Model:

Figura F.32: Convertidor PWM STATCOM 23 kV para propuesta 2.

Name:

Terminal:  Nodo DC 3

Zone:

Area:

Out of Service

System Type:

Rated Voltage:  kV

Shunt Type:

Input Mode:

Controller:

Max. No. of Steps:  Max. Rated Reactive Power 10. Mvar

Act.No. of Step:  Actual Reactive Power 10. Mvar

Design Parameter (per Step):

Rated Reactive Power, C:  Mvar

Loss Factor, tan(delta):

Layout Parameter (per Step):

Capacitance:  uF

Parallel Conductance:  uS

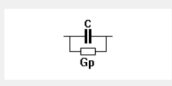


Figura F.33: Capacitancia DC STATCOM 23 kV para propuesta 2.

Name	transformador Statcom 23 kV 2	
Technology	Three Phase Transformer	
Rated Power	20.	MVA
Nominal Frequency	50.	Hz
Rated Voltage		Vector Group
HV-Side	23.	kV
LV-Side	0.4	kV
Positive Sequence Impedance		Phase Shift
Short-Circuit Voltage uk	10.	%
Copper Losses	100.	kW
Zero Sequence Impedance		Name
Short-Circuit Voltage uk0	10.	%
SHC-Voltage (Re(uk0)) uk0r	0.	%
		YNd1

Figura F.34: Transformador STATCOM 23 kV para propuesta 3.

Name	Convertidor PWM Statcom 1	
Terminal AC	Loop Mina/Nodo de Baja Tensión 1\Cub_1	Nodo de Baja Tensio
Terminal DC	Loop Mina/Nodo DC 1\Cub_1	Nodo DC 1
Zone	Terminal AC	
Area	Terminal AC	
<input type="checkbox"/> Out of Service		
Number of parallel converters	1	Converter type
Ratings		Modulation
Rated AC-voltage	0.4	kV
Rated DC-voltage (DC)	1.	kV
Rated power	10.	MVA
Series reactor		
Short circuit impedance	5.	%
Copper losses	0.	kW
R0/R1 ratio	1.	
X0/X1 ratio	1.	
Category	Others	Subcategory
Model	Loop Mina\STATCOM 1	

Figura F.35: Convertidor PWM STATCOM 23 kV para propuesta 3.

Name:

Terminal:   [Loop Mina/Nodo DC 1\Cub\\_2](#) Nodo DC 1

Zone:

Area:

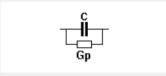
Out of Service

System Type:  DC

Rated Voltage:  kV

Shunt Type:  C

Input Mode:  Default ...



Controller

Max. No. of Steps	<input type="text" value="1"/>	Max. Rated Reactive Power	60. Mvar
Act.No. of Step	<input type="text" value="1"/>	Actual Reactive Power	60. Mvar

Design Parameter (per Step)		Layout Parameter (per Step)	
Rated Reactive Power, C	<input type="text" value="60."/> Mvar	Capacitance	<input type="text" value="254647.9"/> uF
Loss Factor, tan(delta)	<input type="text" value="0."/> Mvar	Parallel Conductance	<input type="text" value="0."/> uS

Figura F.36: Capacitancia DC STATCOM 23 kV para propuesta 3.