

# Tabla de contenido

Capítulo 1 – Introducción .....	1
1.1. Motivación .....	1
1.2. Objetivos .....	1
1.3.1. Objetivos generales .....	1
1.3.2. Objetivos específicos .....	1
1.3. Alcances .....	2
Capítulo 2 – Estado del Arte .....	3
2.1. Antecedentes de los sistemas eléctricos de ambos países .....	3
2.1.1. Introducción .....	3
2.1.2. Sector eléctrico Chileno .....	4
2.1.3. Sector eléctrico Peruano .....	6
2.2. Tecnología HVDC .....	8
2.2.1. Enlaces HVDC .....	8
2.2.2. Ecuaciones de diseño y parámetros importantes .....	10
2.3. Antecedentes normativos .....	12
2.3.1. Autoridades y organismos del sector eléctrico Peruano .....	12
2.3.2. Normas y reglamentos de Perú .....	13
2.3.3. Especificaciones Norma técnica Chilena .....	14
2.3.4. Especificaciones Norma técnica Peruana .....	16
2.3.5. Clasificación de las instalaciones para Estudios Sistémicos .....	17
2.3.6. Mecanismos de expansión de los sistemas eléctricos en Perú .....	21
Capítulo 3 – Metodología y configuraciones iniciales .....	22
3.1. Metodología .....	22
3.2. Trabajo en DIgSILENT .....	23
3.3. Puntos de conexión .....	23
3.4. Definición del enlace HVDC .....	25
Capítulo 4 – Simulaciones y Resultados .....	26
4.1. Escenarios de operación .....	26
4.1. Flujos por el sistema conjunto en estado estacionario .....	29
4.2. Refuerzos base .....	31
4.3. Discusión de los criterios para selección contingencias .....	33
4.4. Contingencias a simular .....	34
4.5. Variables a monitorear .....	37
4.6. Criterios a verificar de normas técnicas .....	39

4.7.	Resultados de Simulaciones Dinámicas .....	40
4.6.1.	Análisis primer set de contingencias .....	41
4.6.2.	Refuerzos luego del primer set de contingencias .....	51
4.6.3.	Análisis segundo set de contingencias.....	53
4.8.	Eventos que producen la caída de las simulaciones .....	63
4.9.	Desempeño del software .....	68
4.10.	Evaluación económica.....	69
4.9.1.	Fuentes de datos .....	69
4.9.2.	Resumen .....	70
Capítulo 5 – Conclusiones.....		71
5.1.	Respecto a los objetivos y alcances .....	71
5.2.	Respecto del análisis de resultados .....	71
5.3.	Trabajo futuro .....	72
Bibliografía.....		74
Anexos.....		75

## Índice de Figuras

Figura 2.1 Frontera entre Chile y Perú .....	3
Figura 2.2 Evolución de la matriz energética entre los años 2014 a 2016 en el SIC .....	5
Figura 2.3 Evolución de la matriz energética entre los años 2014 a 2016 en el SING .....	5
Figura 2.4 Evolución de la matriz energética entre los años 2014 a 2016 en el SEIN (Perú).....	6
Figura 2.5 Esquemático de conexión HVDC de tipo monopolar .....	8
Figura 2.6 Esquemático de conexión HVDC de tipo bipolar .....	8
Figura 2.7 Esquemático de configuración de subestaciones HVDC de tipo Back to Back .....	9
Figura 2.8 Esquemático de configuración de subestaciones HVDC de tipo Multiterminal.....	10
Figura 2.9 Puente de Graetz .....	10
Figura 2.10 Resumen de instituciones del sector eléctrico Peruano .....	13
Figura 2.11 Área Operativa Norte (Fuente COES ) .....	19
Figura 2.12 Área operativa centro (Fuente COES) .....	19
Figura 2.13 Área Operativa Sur (Fuente: COES).....	20
Figura 3.1 Diagrama de flujo de la metodología .....	22
Figura 3.2 Subestaciones importantes en la interconexión.....	24
Figura 3.3 Bipolo modelado en DIgSILENT .....	25
Figura 4.1 Matriz energética de los sistemas 2024 en conjunto.....	27
Figura 4.2 Sistemas en la frontera eléctrica.....	28
Figura 4.3 Red de 500kV del sistema conjunto, y los flujos totales para el Caso 1 .....	29
Figura 4.4 Red de 500kV del sistema conjunto, y los flujos totales para el Caso 5.....	30
Figura 4.5 Entorno de contingencias en Perú .....	35
Figura 4.6 Entorno de contingencias alrededor del enlace HVDC.....	35
Figura 4.7 Entorno de contingencias alrededor de Alto Jahuel.....	36
Figura 4.8 Entorno de contingencias alrededor de Charrúa .....	36
Figura 4.9 Frecuencia en barras principales luego de falla bifásica a tierra en un circuito de Yaranamba-Montalvo, con hidrología húmeda y demanda máxima, importando 1500 MW desde Perú.....	42
Figura 4.10 Frecuencia en barras principales luego de desconexión en un circuito de Chilca-Planicie, con hidrología seca y demanda máxima, importando 1500 MW desde Perú.....	42
Figura 4.11 Frecuencia barras principales luego de falla bifásica en Montalvo, con hidrología seca y demanda mínima, importando 1500 MW desde Perú .....	43
Figura 4.12 Frecuencia en barras principales luego de desconexión de un circuito de Cumbres-Changos, con hidrología seca y demanda máxima, exportando 1000 MW hacia Perú.....	44
Figura 4.13 Frecuencia barras principales luego de desconexión de la central Santa María, con hidrología seca y demanda máxima, exportando 1000 MW hacia Perú .....	44
Figura 4.14 Flujo por circuito de línea en Cumbres-Changos, frente a distintos eventos y escenarios de operación .....	46
Figura 4.15 Tensión en barras principales luego de falla bifásica en San Juan, con hidrología húmeda y demanda mínima, importando 1500 MW desde Perú.....	47
Figura 4.16 Tensión en barras principales luego de falla bifásica en un circuito de Chilca-Planicie, con hidrología húmeda y demanda mínima, importando 1500 MW desde Perú.....	47
Figura 4.17 Tensión en barras principales luego de falla bifásica a tierra en un circuito de Chilca-Planicie, con hidrología húmeda y demanda mínima, importando 1500 MW desde Perú.....	48
Figura 4.18 Tensión en barras principales luego de desconexión en un circuito de Chilca-Planicie, con hidrología húmeda y demanda mínima, importando 1500 MW desde Perú .....	48
Figura 4.19 Tensión en barras principales luego de falla bifásica a tierra en Ventanillas, con hidrología seca y demanda máxima, importando 1000 MW desde Perú .....	49

Figura 4.20 Barras principales de 500 kV de ambos países, y líneas de refuerzos .....	52
Figura 4.21 Frecuencia en barras principales luego de falla bifásica a tierra en un circuito de Chilca-Planicie, con hidrología húmeda y demanda máxima, importando 1500 MW desde Perú	54
Figura 4.22 Frecuencia en barras principales luego de falla bifásica a tierra en un circuito de Yaranamba-Montalvo, con hidrología húmeda y demanda máxima, importando 1500 MW desde Perú.....	54
Figura 4.23 Frecuencia en barras principales luego de desconexión de un polo, con hidrología húmeda y demanda mínima, importando 1500 MW desde Perú.....	55
Figura 4.24 Frecuencia en barras principales luego de desconexión de un polo, con hidrología seca y demanda máxima, importando 1500 MW desde Perú.....	55
Figura 4.25 Frecuencia en barras principales luego de desconexión de un polo, con hidrología seca y demanda mínima, importando 1500 MW desde Perú .....	56
Figura 4.26 Frecuencia barras principales luego de falla bifásica en Montalvo, con hidrología seca y demanda mínima, importando 1500 MW desde Perú .....	56
Figura 4.27 Frecuencia en barras principales luego de falla bifásica en un circuito de Chilca-Planicie, con hidrología seca y demanda máxima, exportando 1000 MW hacia Perú.....	57
Figura 4.28 Frecuencia en barras principales luego de desconexión de un polo, con hidrología seca y demanda máxima, exportando 1000 MW hacia Perú .....	57
Figura 4.29 Flujo por circuito de línea en Cumbres-Changos, frente a distintos eventos y escenarios de operación .....	58
Figura 4.30 Tensiones en barras principales luego de falla bifásica a tierra en Ventanilla 220 kV (Perú), con hidrología húmeda y demanda máxima, importando 1500 MW desde Perú.....	59
Figura 4.31 Tensiones de las principales barras luego de falla bifásica a tierra en un circuito de Planicie-Carapongo, con hidrología húmeda y demanda mínima, importando 1500 MW desde Perú.....	60
Figura 4.32 Tensiones de las principales barras luego de falla bifásica a tierra en San Juan 220 kV (Perú), con hidrología seca y demanda máxima, importando 1500 MW desde Perú .....	60
Figura 4.33 Tensiones de las principales barras luego de falla bifásica a tierra en Alto Jahuel 220 kV, con hidrología seca y demanda máxima, exportando 1000 MW hacia Perú.....	61
Figura 4.34 Tensiones de las principales barras luego de falla bifásica a tierra en un circuito de Cumbres-Changos, con hidrología seca y demanda máxima, exportando 1000 MW hacia Perú. .	61
Figura 4.35 Tensión en barras principales luego de falla bifásica a tierra en Kimal 500 kV, con hidrología seca y demanda máxima, importando 1500 MW desde Perú .....	63
Figura 4.36 Flujo de potencia activa por un polo el enlace HVDC, y por un circuito de la línea Cumbres - Changos (tiene 3 circuitos) .....	64
Figura 4.37 Frecuencia en algunas barras de Chile y Perú.....	64
Figura 4.38 Tensiones de las principales barras luego de falla bifásica a tierra en un circuito de Cumbres-Changos, con hidrología húmeda y demanda máxima, importando 1500 MW desde Perú.....	65
Figura 4.39 Tensiones de las principales barras luego de falla bifásica a tierra en un circuito de Cumbres-Changos, con hidrología mínima y demanda mínima, importando 1500 MW desde Perú .....	65
Figura 4.40 Flujos luego de falla bifásica a tierra en Cumbres-Changos, bajo hidrología húmeda y demanda máxima.....	66
Figura 4.41 Flujos luego de falla bifásica a tierra en Cumbres-Changos, bajo hidrología seca y demanda mínima .....	66
Figura 4.42 Frecuencia barras principales luego de desconexión en un circuito de Changos-Cumbres, con hidrología húmeda y demanda mínima, importando 1500 MW desde Perú, sin la red de 500 kV reforzada .....	67

Figura 4.43 Resumen de costos interconexión Kimal - Montalvo ..... 70

## Índice de Tablas

Tabla 2-1 Matriz energética de Chile 2015 .....	4
Tabla 2-2 Participación de tecnologías térmicas en Chile en los primeros meses de 2015 .....	4
Tabla 2-3 Matriz energética de Perú.....	6
Tabla 2-4 Proyección de demanda del SEIN.....	7
Tabla 2-5 Energía producida en Perú por tecnología .....	7
Tabla 2-6 Participación de tecnologías térmicas en Perú durante el 2016 .....	7
Tabla 2-7 Niveles de Tensión. Fuente: Código Nacional de Electricidad.....	20
Tabla 3-1 Subestaciones importantes del norte de Chile.....	23
Tabla 4-1 Matriz energética de los sistemas 2024 en conjunto .....	27
Tabla 4-2 Flujo entre las Subestaciones Changos hacia Cumbres, y la participación por sistema de la potencia importada/exportada.....	28
Tabla 4-3 Líneas con sobrecarga en el sistema conjunto bajo régimen estacionario .....	31
Tabla 4-4 Transformadores con sobrecarga en el sistema conjunto bajo régimen estacionario ...	32
Tabla 4-5 Compensaciones para mejorar la tensión en barras .....	32
Tabla 4-6 Cantidad de máquinas sincrónicas medidas por escenario .....	37
Tabla 4-7 Líneas a monitorear en Chile .....	37
Tabla 4-8 Líneas a monitorear en Perú.....	38
Tabla 4-9 Barras a monitorear .....	39
Tabla 4-10 Criterios homologados de los estados de Emergencia y Alerta .....	40
Tabla 4-11 Contingencias que producen peor comportamiento en frecuencia .....	41
Tabla 4-12 Contingencias que producen sobrecarga de alguna línea.....	45
Tabla 4-13 Contingencias que producen peor comportamiento en tensión.....	46
Tabla 4-14 Tiempos de simulación para el primer set de contingencias.....	50
Tabla 4-15 Refuerzos a los sistemas de 500 kV de ambos países .....	51
Tabla 4-16 Contingencias que producen peor comportamiento en frecuencia .....	53
Tabla 4-17 Contingencias que producen sobrecarga de alguna línea.....	58
Tabla 4-18 Contingencias que producen peor comportamiento en tensión.....	59
Tabla 4-19 Tiempos de simulación para el segundo set de contingencias .....	62
Tabla 4-20 Valorización de subestaciones convertoras HVDC .....	69
Tabla 4-21 Resumen de costos interconexión Kimal - Montalvo .....	70