

## Tabla de contenido

1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Motivación.....	1
1.2. Alcances .....	2
1.3. Objetivo general.....	2
1.4. Objetivos específicos .....	3
1.5. Estructura del trabajo .....	3
2. EQUIPOS FACTS.....	4
2.1. Tipos de compensación .....	4
2.1.1. Compensación en paralelo.....	4
2.1.2. Compensación serie.....	5
2.1.3. Compensación angular.....	7
2.2. Beneficios de los FACTS en los sistemas eléctricos de potencia en estado estacionario .....	7
2.3. Valorización de las nuevas instalaciones .....	16
2.3.1. Líneas de transmisión .....	16
2.3.2. Equipos FACTS.....	17
2.4. Modelo de OPF que localiza FACTS para una condición de operación .....	20
2.4.1. Modelo del DCOPF .....	20
2.4.2. Modelo no lineal .....	21
2.4.3. Modelo MILP .....	22
2.4.4. Modelo lineal de dos etapas .....	23
2.4.5. Modelo que localiza a los FACTS.....	24
2.5. Modelo de OPF que permite expandir líneas .....	26
3. METODOLOGÍA .....	28
3.1. Modelo SIC-SING .....	30
3.2. Perfiles eólicos.....	33
3.3. Perfiles solares .....	33
3.4. Hidrologías.....	34
3.5. Demandas .....	34
3.6. Clusterización .....	35
3.7. Parque generador actualizado al año 2025.....	40

3.8.	Escenarios de generación a simular .....	42
3.8.1.	Escenario 1 .....	42
3.8.2.	Escenario 2 .....	44
3.8.3.	Escenario 3 .....	44
3.8.4.	Escenario 4 .....	44
3.8.5.	Escenario 5 .....	44
3.8.6.	Escenario 6 .....	45
3.8.7.	Comparación entre escenarios .....	45
3.8.8.	Escenario alternativo .....	45
3.9.	Formulación matemática del problema de optimización .....	46
3.9.1.	Modelo que localiza FACTS para varias condiciones de operación .....	46
3.9.2.	Modelo que localiza FACTS y expande tramos para más de una condición de operación .....	48
3.10.	Costos de la infraestructura .....	50
3.11.	Simulaciones .....	51
4.	RESULTADOS.....	53
4.1.	Infraestructura instalada.....	53
4.2.	Costos y ahorros obtenidos .....	55
4.3.	Vertimientos para los 6 escenarios .....	57
4.4.	Tiempos de convergencia .....	58
4.5.	Escenario Alternativo .....	59
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	61
5.1.	Escenario 1 .....	61
5.2.	Escenario 2 .....	69
5.3.	Escenario 3 .....	78
5.4.	Escenario 4 .....	86
5.5.	Escenario 5 .....	94
5.6.	Escenario 6 .....	102
5.7.	Escenario alternativo .....	111
5.8.	Discusión .....	119
6.	CONCLUSIONES .....	121
	BIBLIOGRAFÍA .....	123
	ANEXO I .....	127

ANEXO II .....	139
ANEXO III .....	143
ANEXO IV .....	147

## Índice de figuras

Figura 2.1: Condensadores conmutados por tiristores .....	6
Figura 2.2: Condensador controlado por tiristores.....	6
Figura 2.3: TCSC típico.....	6
Figura 2.4: Sistema ejemplo.....	7
Figura 2.5: Sistema de 3 barras con G2 solar .....	9
Figura 2.6: Sistema de 3 barras con G2 carbonera .....	14
Figura 2.7: Costos de inversión típicos para distintos equipos FACTS.....	18
Figura 3.1: Metodología de trabajo.....	28
Figura 3.2: Red eléctrica utilizada .....	32
Figura 3.3: Ejercicio de clusterización .....	37
Figura 3.4: Duración de cada bloque en horas.....	38
Figura 3.5: Potencias normalizadas de generación solar para cada zona (p.u en eje derecho, MW en el izquierdo) .....	39
Figura 3.6: Potencias normalizadas de generación eólica para cada zona (p.u en eje derecho, MW en el izquierdo) .....	39
Figura 3.7: Potencias normalizadas de generación hidráulica para todas las zonas (p.u en eje derecho, MW en el izquierdo) .....	40
Figura 3.8: Distribución del parque generador por tipo de central, en GW y en %.....	41
Figura 3.9: Pasos lógicos para cada simulación.....	52
Figura 4.1: Infraestructura instalada para los 6 escenarios .....	54
Figura 4.2: Infraestructura instalada para los 6 escenarios .....	55
Figura 4.3: Costo de la función objetivo (costos de operación y de inversión) para el año 2025.....	56
Figura 4.4: Costos de operación para el año 2025.....	56
Figura 4.5: Ahorro porcentual en los costos de operación al considerar FACTS en la expansión del sistema.....	57
Figura 4.6: Tiempos de cómputo para los 6 escenarios simulados .....	59
Figura 5.1: Dirección normal de los flujos y FACTS instalados, escenario 1 .....	66
Figura 5.2: Compensaciones de los 4 primeros FACTS y nivel de carga en de las líneas, escenario 1 .....	68
Figura 5.3: Compensaciones de los 3 últimos FACTS y nivel de carga en de las líneas, escenario 1 .....	69
Figura 5.4: Dirección normal de los flujos y FACTS instalados, escenario 2 .....	75

Figura 5.5: Compensaciones de los FACTS y nivel de carga en de las líneas, escenario 2.....	77
Figura 5.6: Dirección normal de los flujos y FACTS instalados, escenario 3 .....	83
Figura 5.7: Compensaciones de los FACTS y nivel de carga en de las líneas, escenario 3.....	85
Figura 5.8: Direcciones normal de los flujos y FACTS instalados, escenario 4.....	91
Figura 5.9: Compensaciones de los 4 primeros FACTS y nivel de carga en de las líneas, escenario 4 .....	93
Figura 5.10: Compensaciones de los 3 últimos FACTS y nivel de carga en de las líneas, escenario 4 .....	94
Figura 5.11: Direcciones normal de los flujos y FACTS instalados, escenario 5.....	99
Figura 5.12: Compensaciones de los 4 primeros FACTS y nivel de carga en de las líneas, escenario 5.....	101
Figura 5.13: Compensaciones de los 3 últimos FACTS y nivel de carga en de las líneas, escenario 5 .....	102
Figura 5.14: Dirección normal de los flujos y FACTS instalados, escenario 6 .....	107
Figura 5.15: Compensaciones de los 4 primeros FACTS y nivel de carga en de las líneas, escenario 6.....	109
Figura 5.16: Compensaciones de los 4 últimos FACTS y nivel de carga en de las líneas, escenario 6 .....	110
Figura 5.17: Dirección normal de los flujos y FACTS instalados, escenario alternativo .....	115
Figura 5.18: Compensaciones de los 5 primeros FACTS y nivel de carga en de las líneas, escenario alternativo.....	117
Figura 5.19: Compensaciones de los 4 últimos FACTS y nivel de carga en de las líneas, escenario alternativo .....	118

## Índice de tablas

Tabla 2.1: Valores obtenidos para cada bloque .....	10
Tabla 2.2: Potencias máximas de cada central para los 3 bloques .....	10
Tabla 2.3: Potencias generadas para cada central .....	11
Tabla 2.4: Flujos por L2 y L3 .....	11
Tabla 2.5: Flujos por las líneas al instalar una línea entre las barras 2 y 3 .....	13
Tabla 2.6: Potencias máximas de cada central para los 3 bloques, ejemplo 2 .....	14
Tabla 2.7: Potencias generadas al resolver el problema de flujo DC con G2 carbonera .....	14
Tabla 2.8: Potencias generadas al resolver el problema de flujo DC con FACTS en línea 2, compensación del 70 [%] .....	15
Tabla 3.1: Características del sistema .....	30
Tabla 3.2: Reactancia por unidad de distancia para distintos niveles de tensión, considerando líneas de doble circuito .....	31
Tabla 3.3: Lugar de medición de la velocidad del viento .....	33
Tabla 3.4: Lugares de medición de la Irradiancia solar .....	33
Tabla 3.5: Tasas de crecimiento de la demanda por zonas, de acuerdo, a los ITD .....	35
Tabla 3.6: Demanda prevista, de acuerdo a las tasas de crecimiento .....	35
Tabla 3.7: Tecnologías térmicas .....	41
Tabla 3.8: Centrales hidroeléctricas en construcción .....	42
Tabla 3.9: Centrales solares en construcción .....	43
Tabla 3.10: Centrales eólicas en construcción .....	44
Tabla 3.11: Potencias instaladas (en MW) para los 6 escenarios .....	45
Tabla 3.12: Costos para líneas de doble circuito en 500 [kV] y 220 [kV] .....	51
Tabla 3.13: Costos para transformadores 500/220 [kV] .....	51
Tabla 4.1: Vertimientos por tecnología para todas las simulaciones .....	58
Tabla 4.2: Costos totales del DCOPF y del DCOPF que localiza equipos FACTS .....	59
Tabla 4.3: Costos de operación del DCOPF y del DCOPF que localiza equipos FACTS .....	59
Tabla 4.4: Vertimientos para el DCOPF y para el DCOPF que localiza FACTS .....	60
Tabla 4.5: FACTS a instalar .....	60
Tabla 5.1: Generación anual para cada tipo de central, escenario 1 .....	61
Tabla 5.2: Nivel de utilización y tiempo de saturación para cada tramo, escenario 1 .....	63
Tabla 5.3: Expansiones a realizar sin considerar FACTS, escenario 1 .....	64

Tabla 5.4: Expansiones a realizar considerando FACTS, escenario 1 .....	64
Tabla 5.5: FACTS a instalar, escenario 1 .....	64
Tabla 5.6: Vertimientos renovables, escenario 1 .....	65
Tabla 5.7: Generación anual por tipo de central, escenario 2.....	70
Tabla 5.8: Nivel de utilización y tiempo de saturación para cada tramo, escenario 2 ....	72
Tabla 5.9: Expansiones a realizar sin FACTS, escenario 2 .....	73
Tabla 5.10: Expansiones a realizar con FACTS, escenario 2.....	73
Tabla 5.11: FACTS a instalar, escenario 2.....	73
Tabla 5.12: Vertimientos renovables, escenario 2 .....	74
Tabla 5.13: Generación anual por tipo de central, escenario 3.....	79
Tabla 5.14: Nivel de utilización y tiempo de saturación para cada tramo, escenario 3 ..	80
Tabla 5.15: Expansiones a realizar sin FACTS, escenario 3 .....	81
Tabla 5.16: Expansiones a realizar considerando FACTS, escenario 3 .....	81
Tabla 5.17: FACTS a instalar, escenario 3.....	81
Tabla 5.18: Vertimientos renovables, escenario 3 .....	82
Tabla 5.19: Generación anual por tipo de central, escenario 4.....	87
Tabla 5.20: Nivel de utilización y tiempo de saturación para cada tramo, escenario 4 ..	88
Tabla 5.21: Expansiones a realizar sin FACTS, escenario 4 .....	89
Tabla 5.22: Expansiones a realizar considerando FACTS, escenario 4 .....	89
Tabla 5.23: FACTS a instalar, escenario 4.....	89
Tabla 5.24: Vertimientos renovables, escenario 4 .....	90
Tabla 5.25: Generación anual por tipo de central, escenario 5.....	95
Tabla 5.26: Nivel de utilización y tiempo de saturación para cada tramo, escenario 5 ..	96
Tabla 5.27: Expansiones a realizar sin FACTS, escenario 5 .....	97
Tabla 5.28: Expansiones a realizar considerando FACTS, escenario 5 .....	97
Tabla 5.29: FACTS a instalar, escenario 5.....	97
Tabla 5.30: Vertimientos renovables, escenario 5.....	98
Tabla 5.31: Generación anual por tipo de central, escenario 6.....	103
Tabla 5.32: Nivel de utilización y tiempo de saturación para cada tramo, escenario 6	104
Tabla 5.33: Expansiones a realizar sin FACTS, escenario 6 .....	105
Tabla 5.34: Expansiones a realizar considerando FACTS, escenario 6 .....	105
Tabla 5.35: FACTS a instalar, escenario 6.....	105
Tabla 5.36: Vertimientos renovables, escenario 6.....	106

Tabla 5.37: Generación anual por tipo de central, escenario alternativo .....	112
Tabla 5.38: Nivel de utilización y tiempo de saturación para cada tramo, escenario alternativo .....	113
Tabla 5.39: FACTS a instalar, escenario alternativo.....	114
Tabla 5.40: Vertimientos renovables para las barras del sistema.....	114