

# Tabla de contenido

1.	Introducción .....	1
1.1.	Motivación .....	1
1.2.	Alcance .....	2
1.3.	Objetivos .....	3
1.3.1.	Objetivo General .....	3
1.3.2.	Objetivos Específicos.....	3
1.4.	Estructura del trabajo.....	4
2.	Revisión bibliográfica .....	5
2.1.	Introducción .....	5
2.2.	Operación económica .....	5
2.2.1.	Definición de operación económica.....	5
2.2.2.	Formulación general del problema de operación económica .....	7
2.2.3.	Modelo de embalse a cota final conocida.....	9
2.3.	Análisis del sistema eléctrico mediano .....	12
2.3.1.	Definición de sistema mediano .....	12
2.3.2.	Topología del Sistema Mediano de Aysén. ....	12
2.3.3.	Hidrología del sistema mediano de Aysén .....	12
2.3.4.	Tecnologías y características presentes en el Sistema Mediano de Aysén.....	13
2.3.5.	Particularidades de la operación.....	29
2.4.	Modelo de despacho económico .....	31
2.5.	Propuesta modelo despacho.....	35
2.5.1.	Modificaciones asociadas a la función objetivo (F.O.) y restricciones de potencia mínima y máxima por tramos. ....	36
2.5.2.	Pérdidas asociadas al sistema de transmisión. ....	39
2.5.3.	Reservas zonales .....	41
2.5.4.	Comentarios finales.....	41
3.	Implementación del modelo .....	42
3.1.	Introducción .....	42
3.2.	Modelo del sistema .....	42
3.3.	Algoritmo.....	45
3.4.	Validación e implementación.....	46

3.4.1.	Antecedentes utilizados para la validación del modelo propuestos .....	48
3.4.2.	Resultados .....	50
3.4.3.	Comentarios finales.....	61
4.	Caso de estudio .....	64
4.1.	Introducción .....	64
4.2.	Datos .....	64
4.2.1.	Operación real.....	65
4.2.2.	Caso de estudio y metodología de generación de programas diarios de despacho del SIA69	
4.3.	Resultados y análisis.....	73
4.3.1.	Despacho de las unidades de generación del caso de estudio .....	73
4.3.2.	Pérdidas de energía y flujos por el sistema de transmisión.....	76
4.3.3.	Nivel de cota del embalse .....	78
4.3.4.	Consumo de combustible.....	79
4.3.5.	Tiempo de ejecución del modelo de despacho.....	79
4.4.	Comentarios finales.....	80
5.	Conclusiones y Trabajo futuro .....	82
5.1.	Conclusiones generales.....	82
5.2.	Trabajo futuro .....	88
5.3.	Comentarios finales y recomendaciones .....	89
6.	Bibliografía .....	90
7.	Anexos.....	91
7.1.	Cuestionario para levantamiento de información técnica, y de criterios de operación del sistema de Aysén aplicado al operador del sistema .....	91
7.2.	Resultados obtenidos para la validación del modelo propuesto.....	97
7.3.	Tiempo de consumo del agua para distintos niveles de cota y potencia constante. ....	123
7.4.	Datos de generación real .....	124
7.5.	Resultados del caso de estudio .....	131

# Índice de tablas

Tabla 2-1: Fechas de puesta en servicio de las unidades generadoras del sistema de Aysén.....	16
Tabla 2-2: Tipo de central, fuente de energía y punto de conexión. ....	17
Tabla 2-3: Resumen de parámetros de operación de las centrales térmicas. ....	19
Tabla 2-4: Resumen de unidades por central con sus respectivos costos variables combustibles, no combustibles y costo variables total a plena carga.....	20
Tabla 2-5: Resumen de unidades por central con sus respectivos costos variables combustibles, no combustibles y costo variables total a mínimo técnico. ....	20
Tabla 2-6: Resumen de parámetros de operación de las centrales hidráulicas. ....	22
Tabla 2-7: Potencia bruta y neta de las unidades Eólicas. ....	26
Tabla 3-1: Potencia mínima y máxima de despacho de las unidades generadoras y sus rendimientos a plena carga .....	44
Tabla 3-2: Costos variable de operación asociados a la unidad térmica para dos condiciones de operación. ....	44
Tabla 3-3: Característica del sistema de transmisión del caso de prueba. ....	44
Tabla 3-4: Tensión y capacidad de las líneas del caso académico .....	44
Tabla 3-5: Resumen de generación, pérdidas, ENS y Combustible utilizado en los escenarios de estudio.	50
Tabla 3-6: Porcentaje de pérdida de energía para cada escenario.....	54
Tabla 3-7: Pérdidas de energía diarias. ....	55
Tabla 3-8: Costo de operación de los escenarios evaluados.....	60
Tabla 3-9: tiempo de ejecución de los escenarios utilizando el modelo de despacho propuesto. ....	61
Tabla 4-1: Cuadro resumen de las variables de control correspondiente a mayo de 2015. ....	65
Tabla 4-2: Resumen de la operación de las unidades de generación en mayo de 2015. ....	67
Tabla 4-3: Resumen de generación buta, hidráulica, eólica, térmica, pérdidas y combustible para cada escenario en estudio. ....	73
Tabla 4-4: Resumen de la generación por unidad generadora en MWh. ....	74
Tabla 4-5: Número de horas despachadas las unidades de generación. ....	75
Tabla 4-6: Consumo de combustible en litros de la central térmica Tehuelche, Térmica de Aysén y Chacabuco durante la operación real y de los escenarios de estudio. ....	79
Tabla 4-7: Tiempo de ejecución del modelo para cada uno de los escenarios en estudio.....	80
Tabla 7-1: Preguntas fundamentales a realizar a operarios .....	94
Tabla 7-2: Tiempo de consumo del agua en función de la potencia generada por la central Lago Atravesado .....	123
Tabla 7-3: Generación por unidad de central Tehuelche.....	124
Tabla 7-4: Generación por unidad de la central Lago Atravesado y Monreal .....	125
Tabla 7-5: Generación por unidad de central Chacabuco y Térmica de Aysén. ....	126
Tabla 7-6: Generación por unidad de central de Puerto Aysén.....	127
Tabla 7-7: Generación de la central Alto Baguales. ....	128
Tabla 7-8: Generación por zona y por tipo de tecnología.....	129
Tabla 7-9: Nivel de cota, volumen y caudal asociado al embalse. ....	130
Tabla 7-10: Resumen diario de generación para los escenarios del caso de estudio.....	132
Tabla 7-11: Transferencia de energía en MWh por las líneas del sistema para los escenarios 1, 2 y 3. ....	143

Tabla 7-12: Transferencia de energía en MWh por las líneas del sistema para los escenarios 4 y 5. ....143  
Tabla 7-13: Transferencia de energía en MWh por las líneas del sistema para los escenarios 6 y 7. ....144

# Índice de Figuras

Figura 2-1: Relación entre costos de operación y seguridad de un SEP [2] .....	6
Figura 2-2: Representación del sistema de Aysén como dos subsistemas interconectados. ....	12
Figura 2-3: Energía afluente mensual en el sistema Aysén.....	13
Figura 2-4: Energía afluente acumulada en el sistema Aysén.....	13
Figura 2-5: Porcentaje de participación según tipo de tecnología del parque generador.....	14
Figura 2-6: Ubicación de las centrales del Sistema Mediano de Aysén. ....	14
Figura 2-7: Energía producida por tipo de tecnología durante el año 2015. ....	18
Figura 2-8: Consumo de combustible y energía generada por las centrales térmicas .....	21
Figura 2-9: Cantidad de combustible utilizado para generación desde el 2010 al 2015. ....	21
Figura 2-10: Restricción de cotas del embalse Lago Atravesado [18].....	22
Figura 2-11: Tiempos de consumo del agua para distintos caudales turbinados. ....	24
Figura 2-12: Energía generada por las centrales hidráulicas. ....	25
Figura 2-13: Energía generada por la central Alto Baguales. ....	26
Figura 2-14: Energía transferida por la interconexión. ....	27
Figura 2-15: Diagrama unilineal del sistema de Aysén [19]. ....	28
Figura 2-16: Energía y demanda máxima entre los años 1999 y 2015 .....	29
Figura 2-17: Representación de la curva de consumo diésel con dos tramos de operación.....	36
Figura 2-18: Representación de un sistema eléctrico con pérdidas. ....	39
Figura 3-1: Sistema de prueba del modelo de despacho propuesto. ....	43
Figura 3-2: Modelo del embalse del caso de estudio.....	43
Figura 3-3: Curva de demanda del caso académico de 336 horas.....	45
Figura 3-4: Procedimiento realizado durante la validación del modelo propuesto. ....	48
Figura 3-8: Energía no suministrada <i>Escenario 7</i> y <i>Escenario 8</i> . ....	54
Figura 3-10: Flujos por la línea 12 y línea 13 en los <i>Escenarios 2</i> y <i>Escenario 3</i> .....	56
Figura 3-11: Flujos por la línea 12 y línea 13 en los <i>Escenarios 3</i> y <i>Escenario 6</i> .....	56
Figura 3-12: Nivel de cota promedio diario del <i>Escenarios 1</i> y el <i>Escenario 2</i> y su variación con respecto al nivel de cota promedio del <i>Escenario Base</i> .....	57
Figura 3-13: Nivel de cota promedio diario del <i>Escenarios 3</i> y el <i>Escenario 4</i> y su variación con respecto al nivel de cota promedio del <i>Escenario Base</i> y el afluente promedio diario.....	58
Figura 3-14: Nivel de cota promedio diario del <i>Escenarios 5</i> y el <i>Escenario 6</i> y su variación con respecto al nivel de cota promedio del <i>Escenario Base</i> .....	58
Figura 3-15: Nivel de cota promedio diario del <i>Escenarios 7</i> y el <i>Escenario 8</i> y su variación con respecto al nivel de cota promedio del <i>Escenario Base</i> .....	59
Figura 4-1: Curva de generación zonal.....	65
Figura 4-2: Curva de potencia transferida por la interconexión. ....	66
Figura 4-3: Curva de demanda del sistema de Aysén durante mayo 2015.....	66
Figura 4-4: Operación real de las centrales del sistema mediano de Aysén durante mayo de 2015. ....	68
Figura 4-5: Potencia generada y nivel de cota del embalse de la central Lago Atravesado durante mayo de 2015.....	68
Figura 4-6: Caudal afluente total asociado al embalse de CHLA durante mayo de 2015. ....	70
Figura 4-7: Diagrama unilineal del sistema de Aysén. ....	72

Figura 7-1: Despacho de las unidades del sistema en el <i>Escenario Base</i> .....	98
Figura 7-2: Despacho de las unidades del sistema en el <i>Escenario 1</i> .....	98
Figura 7-3: Despacho de las unidades del sistema en el <i>Escenario 2</i> .....	98
Figura 7-4: Despacho de las unidades del sistema en el <i>Escenario 3</i> .....	99
Figura 7-5: Despacho de las unidades del sistema en el <i>Escenario 4</i> .....	99
Figura 7-6: Despacho de las unidades del sistema en el <i>Escenario 5</i> .....	99
Figura 7-7: Despacho de las unidades del sistema en el <i>Escenario 6</i> .....	100
Figura 7-8: Despacho de las unidades del sistema en el <i>Escenario 7</i> .....	100
Figura 7-9: Despacho de las unidades del sistema en el <i>Escenario 8</i> .....	100
Figura 7-10: Despacho de la unidad térmica del sistema en el <i>Escenario Base</i> .....	101
Figura 7-11: Despacho de la unidad térmica del sistema en el <i>Escenario 1</i> .....	101
Figura 7-12: Despacho de la unidad térmica del sistema en el <i>Escenario 2</i> .....	101
Figura 7-13: Despacho de la unidad térmica del sistema en el <i>Escenario 3</i> .....	102
Figura 7-14: Despacho de la unidad térmica del sistema en el <i>Escenario 4</i> .....	102
Figura 7-15: Despacho de la unidad térmica del sistema en el <i>Escenario 5</i> .....	102
Figura 7-16: Despacho de la unidad térmica del sistema en el <i>Escenario 6</i> .....	103
Figura 7-17: Despacho de la unidad térmica del sistema en el <i>Escenario 7</i> .....	103
Figura 7-18: Despacho de la unidad térmica del sistema en el <i>Escenario 8</i> .....	103
Figura 7-19: Despacho de la unidad hidráulica del sistema en el <i>Escenario Base</i> .....	104
Figura 7-20: Despacho de la unidad hidráulica del sistema en el <i>Escenario 1</i> .....	104
Figura 7-21: Despacho de la unidad hidráulica del sistema en el <i>Escenario 2</i> .....	104
Figura 7-22: Despacho de la unidad hidráulica del sistema en el <i>Escenario 3</i> .....	105
Figura 7-23: Despacho de la unidad hidráulica del sistema en el <i>Escenario 4</i> .....	105
Figura 7-24: Despacho de la unidad hidráulica del sistema en el <i>Escenario 5</i> .....	105
Figura 7-25: Despacho de la unidad hidráulica del sistema en el <i>Escenario 6</i> .....	106
Figura 7-26: Despacho de la unidad hidráulica del sistema en el <i>Escenario 7</i> .....	106
Figura 7-27: Despacho de la unidad hidráulica del sistema en el <i>Escenario 8</i> .....	106
Figura 7-28: Cota de operación, cota mínima, cota máxima, afluente asociado al embalse del sistema en el <i>Escenario Base</i> .....	108
Figura 7-29: Cota de operación, cota mínima, cota máxima, afluente asociado al embalse del sistema en el <i>Escenario 1</i> .....	108
Figura 7-30: Cota de operación, cota mínima, cota máxima, afluente asociado al embalse de sistema en el <i>Escenario 2</i> .....	108
Figura 7-31: Cota de operación, cota mínima, cota máxima, afluente asociado al embalse de sistema en el <i>Escenario 3</i> .....	109
Figura 7-32: Cota de operación, cota mínima, cota máxima, afluente asociado al embalse de sistema en el <i>Escenario 4</i> .....	109
Figura 7-33: Cota de operación, cota mínima, cota máxima, afluente asociado al embalse de sistema en el <i>Escenario 5</i> .....	109
Figura 7-34: Cota de operación, cota mínima, cota máxima, afluente asociado al embalse de sistema en el <i>Escenario 6</i> .....	110
Figura 7-35: Cota de operación, cota mínima, cota máxima, afluente asociado al embalse de sistema en el <i>Escenario 7</i> .....	110

Figura 7-36: Cota de operación, cota mínima, cota máxima, afluente asociado al embalse de sistema en el <i>Escenario 8</i> .	110
Figura 7-37: Niveles de cota y generación hidráulica en el <i>Escenario Base</i> .	111
Figura 7-38: Niveles de cota y generación hidráulica en el <i>Escenario 1</i> .	111
Figura 7-39: Niveles de cota y generación hidráulica en el <i>Escenario 2</i> .	111
Figura 7-40: Niveles de cota y generación hidráulica en el <i>Escenario 3</i> .	112
Figura 7-41: Niveles de cota y generación hidráulica en el <i>Escenario 4</i> .	112
Figura 7-42: Niveles de cota y generación hidráulica en el <i>Escenario 5</i> .	112
Figura 7-43: Niveles de cota y generación hidráulica en el <i>Escenario 6</i> .	113
Figura 7-44: Niveles de cota y generación hidráulica en el <i>Escenario 7</i> .	113
Figura 7-45: Niveles de cota y generación hidráulica en el <i>Escenario 8</i> .	113
Figura 7-46: Flujos por el sistema de transmisión del <i>Escenario Base</i> .	114
Figura 7-47: Flujos por el sistema de transmisión del <i>Escenario 1</i> .	114
Figura 7-48: Flujos por el sistema de transmisión del el <i>Escenario 2</i> .	114
Figura 7-49: Flujos por el sistema de transmisión del el <i>Escenario 3</i> .	115
Figura 7-50: Flujos por el sistema de transmisión del el <i>Escenario 4</i> .	115
Figura 7-51: Flujos por el sistema de transmisión del el <i>Escenario 5</i> .	115
Figura 7-52: Flujos por el sistema de transmisión del el <i>Escenario 6</i> .	116
Figura 7-53: Flujos por el sistema de transmisión del el <i>Escenario 7</i> .	116
Figura 7-54: Flujos por el sistema de transmisión del el <i>Escenario 8</i> .	116
Figura 7-55: Ángulo de las barras del el <i>Escenario 1</i> .	117
Figura 7-56: Ángulo de las barras del el <i>Escenario 2</i> .	117
Figura 7-57: Ángulo de las barras del el <i>Escenario 3</i> .	117
Figura 7-58: Ángulo de las barras del el <i>Escenario 4</i> .	118
Figura 7-59: Ángulo de las barras del el <i>Escenario 5</i> .	118
Figura 7-60: Ángulo de las barras del el <i>Escenario 6</i> .	118
Figura 7-61: Ángulo de las barras del el <i>Escenario 7</i> .	119
Figura 7-62: Ángulo de las barras del el <i>Escenario 8</i> .	119
Figura 7-63: Reserva en giro aportada por la unidad hidráulica en el <i>Escenario 5</i> .	121
Figura 7-64: Reserva en giro aportada por la unidad hidráulica en el <i>Escenario 6</i> .	121
Figura 7-65: Reserva en giro aportada por la unidad hidráulica en el <i>Escenario 7</i> .	121
Figura 7-66: Reserva en giro aportada por la unidad hidráulica en el <i>Escenario 8</i> .	122
Figura 7-67: Despacho de las unidades de generación del <i>Escenario 1</i> .	133
Figura 7-68: Despacho de las unidades de generación del <i>Escenario 2</i> .	133
Figura 7-69: Despacho de las unidades de generación del <i>Escenario 3</i> .	133
Figura 7-70: Despacho de las unidades de generación del <i>Escenario 4</i> .	134
Figura 7-71: Despacho de las unidades de generación del <i>Escenario 5</i> .	134
Figura 7-72: Despacho de las unidades de generación del <i>Escenario 6</i> .	134
Figura 7-73: Despacho de las unidades de generación del <i>Escenario 7</i> .	135
Figura 7-74: Evolución de cota y afluente en el <i>Escenario 1</i> .	137
Figura 7-75: Evolución de cota y afluente en el <i>Escenario 2</i> .	137
Figura 7-76: Evolución de cota y afluente en el <i>Escenario 3</i> .	137
Figura 7-77: Evolución de cota y afluente en el <i>Escenario 4</i> .	138

Figura 7-78: Evolución de cota y afluente en el Escenario 5.....	138
Figura 7-79: Evolución de cota y afluente en el Escenario 6.....	138
Figura 7-80: Evolución de cota y afluente en el Escenario 7.....	139
Figura 7-81: Evolución de cota y potencia generada para el Escenario 1.....	140
Figura 7-82: Evolución de cota y potencia generada para el Escenario 2.....	140
Figura 7-83: Evolución de cota y potencia generada para el Escenario 3.....	140
Figura 7-84: Evolución de cota y potencia generada para el Escenario 4.....	141
Figura 7-85: Evolución de cota y potencia generada para el Escenario 5.....	141
Figura 7-86: Evolución de cota y potencia generada para el Escenario 6.....	141
Figura 7-87: Evolución de cota y potencia generada para el Escenario 7.....	142
Figura 7-88: Flujo por las líneas desde Aysén a Tehuelche para el Escenario 1. ....	145
Figura 7-89: Flujo por las líneas desde Aysén a Tehuelche para el Escenario 2. ....	145
Figura 7-90: Flujo por las líneas desde Aysén a Tehuelche para el Escenario 3. ....	145
Figura 7-91: Flujo por las líneas desde Aysén a Tehuelche para el Escenario 4. ....	146
Figura 7-92: Flujo por las líneas desde Aysén a Tehuelche para el Escenario 5. ....	146
Figura 7-93: Flujo por las líneas desde Aysén a Tehuelche para el Escenario 6. ....	146
Figura 7-94: Flujo por las líneas desde Aysén a Tehuelche para el Escenario 7. ....	147
Figura 7-95: Flujo por las líneas desde Chacabuco a Baguales para el Escenario 1.....	148
Figura 7-96: Flujo por las líneas desde Chacabuco a Baguales para el Escenario 2.....	148
Figura 7-97: Flujo por las líneas desde Chacabuco a Baguales para el Escenario 3.....	148
Figura 7-98: Flujo por las líneas desde Chacabuco a Baguales para el Escenario 4.....	149
Figura 7-99: Flujo por las líneas desde Chacabuco a Baguales para el Escenario 5.....	149
Figura 7-100: Flujo por las líneas desde Chacabuco a Baguales para el Escenario 6.....	149
Figura 7-101: Flujo por las líneas desde Chacabuco a Baguales para el Escenario 7.....	150
Figura 7-102: Flujo por las líneas desde Monreal y Lago Atravesado hacia Tehuelche para el Escenario 1. ....	151
Figura 7-103: Flujo por las líneas desde Monreal y Lago Atravesado hacia Tehuelche para el Escenario 2. ....	151
Figura 7-104: Flujo por las líneas desde Monreal y Lago Atravesado hacia Tehuelche para el Escenario 3. ....	151
Figura 7-105: Flujo por las líneas desde Monreal y Lago Atravesado hacia Tehuelche para el Escenario 4. ....	152
Figura 7-106: Flujo por las líneas desde Monreal y Lago Atravesado hacia Tehuelche para el Escenario 5. ....	152
Figura 7-107: Flujo por las líneas desde Monreal y Lago Atravesado hacia Tehuelche para el Escenario 6. ....	152
Figura 7-108: Flujo por las líneas desde Monreal y Lago Atravesado hacia Tehuelche para el Escenario 7. ....	153
Figura 7-109: Reserva en giro de la central térmica Tehuelche para el Escenario 3. ....	154
Figura 7-110: Reserva en giro de la central térmica Chacabuco y Puerto Aysén para el Escenario 3. ....	154
Figura 7-111: Reserva en giro de la central térmica Tehuelche para el Escenario 4. ....	154
Figura 7-112: Reserva en giro de la central térmica Chacabuco y Puerto Aysén para el Escenario 4. ....	155