

# Tabla de contenido

1.	Introducción.....	1
1.1.	Objetivos.....	2
1.1.1.	Objetivo general .....	2
1.1.2.	Objetivos específicos.....	2
1.2.	Alcances.....	2
2.	Revisión bibliográfica .....	3
2.1.	Tecnologías de almacenamiento.....	3
2.1.1.	Aplicaciones de los ESS .....	3
2.1.2.	Tipos de ESS .....	5
2.2.	Centrales de bombeo hidráulico PHS .....	12
2.2.1.	Descripción.....	12
2.2.2.	Clasificación de centrales PHS.....	13
2.2.3.	Estado actual a nivel internacional .....	17
2.3.	Operación de centrales PHS .....	20
2.3.1.	Chile .....	20
2.3.2.	Francia .....	21
2.3.3.	Alemania.....	21
2.3.4.	Bélgica .....	21
2.3.5.	Gran Bretaña.....	21
2.3.6.	Suiza .....	21
2.3.7.	Japón.....	22
2.3.8.	China.....	22
2.3.9.	Estados Unidos .....	22
2.4.	Funcionamiento del mercado eléctrico chileno .....	23
3.	Metodología.....	25
4.	Modelación del sistema .....	27
4.1.	Características del sistema eléctrico .....	27
4.1.1.	Generación.....	27
4.1.2.	Red de transmisión .....	28
4.1.3.	Demanda.....	28
4.1.4.	Perfiles ERNC .....	28
4.1.5.	Emisión de contaminantes .....	28

4.1.6. Hidrologías .....	29
4.1.7. Central en estudio .....	30
4.2. Modelos de despacho .....	31
4.2.1. AMEBA.....	31
4.2.2. Minimización de costos .....	31
4.2.3. Generación base.....	32
4.2.4. Maximización de utilidades.....	33
4.3. Índice de Lerner.....	35
5. Resultados y análisis.....	36
5.1. Minimización de costos incorporando central PHS y fotovoltaica .....	36
5.1.1. Impacto sistémico.....	36
5.1.2. Impacto en la generación .....	38
5.2. Operación con distintos modelos de despacho .....	45
5.2.1. Maximización de utilidades.....	45
5.2.2. Impacto sistémico .....	48
5.2.3. Impacto en la generación.....	50
5.2.4. Índice de Lerner.....	60
5.2.5. Efecto en las utilidades a nivel individual.....	65
5.2.6. Emisiones de contaminantes.....	66
6. Conclusiones.....	70
6.1. Trabajo futuro.....	72
Bibliografía.....	73
Anexos.....	75
Datos técnicos de centrales PV.....	75
Datos centrales Eólicas .....	76
Datos Centrales GNL .....	77
Datos Centrales Carbón .....	78
Datos Centrales Diésel.....	79
Datos Centrales Hidráulicas .....	81
Límite de transmisión de líneas del modelo: .....	83
Proyección de demandas utilizadas .....	84

## Índice de tablas

Tabla 2.1: Comparación de baterías [2] [3].	8
Tabla 2.2: Eficiencia de bombeo y generación [9].	13
Tabla 2.3: Comparación entre los tiempos transcurridos en cambios de operación [12].	15
Tabla 2.4: Comparación entre una máquina convencional a velocidad fija (máquina sincrónica) y una con velocidad variable (motor de inducción doblemente alimentado) [15].	16
Tabla 4.1: Matriz energética, año 2020.	27
Tabla 4.2: Datos demanda sistema utilizado.	28
Tabla 4.3: Emisiones promedio por tecnología.	29
Tabla 4.4: Volumen inicial y final de los embalses para las simulaciones.	30
Tabla 4.5: Parámetros técnicos central PHS.	30
Tabla 5.1: Promedio y desviación estándar de costos marginales, para el caso base y el de minimización de costos.	37
Tabla 5.2: Centrales de biomasa más afectadas, comparación caso base y minimización de costos.	42
Tabla 5.3: Centrales a carbón más afectadas, comparación caso base y minimización de costos.	43
Tabla 5.4: Promedio pago de la demanda según modo de despacho.	50
Tabla 5.5: Promedio margen operacional centrales eólicas, según modo de despacho.	53
Tabla 5.6: Promedio de energía anual inyectada por hidráulicas para los distintos modos de despacho.	54
Tabla 5.7: Promedio margen operacional centrales hidráulicas, según modo de despacho.	55
Tabla 5.8: Promedio de energía anual inyectada por hidráulicas para los distintos modos de despacho.	55
Tabla 5.9: Promedio margen operacional centrales de biomasa, según modo de despacho.	56
Tabla 5.10: Promedio de energía anual inyectada por carboneras para los distintos modos de despacho.	57
Tabla 5.11: Promedio margen operacional centrales carboneras, según modo de despacho.	58
Tabla 5.12: Promedio margen operacional centrales GNL, según modo de despacho.	59
Tabla 5.13: Promedio índice de Lerner según hidrología.	60
Tabla 5.14: Promedio de emisión de contaminantes, según modo de despacho.	69

# Índice de figuras

Figura 2.1: Potencia entregada en función del tiempo para las distintas tecnologías [1].....	5
Figura 2.2: ESS según forma de almacenamiento [1]. .....	6
Figura 2.3: Funcionamiento CAES [4].....	7
Figura 2.4: Principio funcionamiento planta CSP [5]. .....	9
Figura 2.5: Funcionamiento volantes de inercia [6]. .....	10
Figura 2.6: Nivel de desarrollo y requerimientos de capital por tecnología [1].....	11
Figura 2.7: Capacidad instalada para almacenamiento de energía a nivel mundial [7]. .....	11
Figura 2.8: Principio de funcionamiento central PHS [4]. .....	12
Figura 2.9: Esquema grupo binario [11].....	14
Figura 2.10: Esquema grupo terciario [11].....	15
Figura 2.11: Esquema de conexión máquina eléctrica con velocidad fija y variable [15]. .....	16
Figura 2.12: Potencia consumida para bombear en función de la altura del agua. Izquierda: velocidad fija; derecha: velocidad ajustable [14]. .....	17
Figura 2.13: Desarrollo de centrales nucleares y de centrales de bombeo [13]. .....	17
Figura 2.14: Capacidad instalada de PHS al año 2010. Unidades en GW [16].....	18
Figura 2.15: Costo de inversión para centrales europeas [4].....	19
Figura 2.16: Vista aérea central Okinawa Yanbaru [20]. .....	19
Figura 3.1: Metodología general. .....	25
Figura 3.2: Metodología caso de maximización de utilidades. ....	26
Figura 4.1: Capacidad instalada por tecnología, año 2020.....	27
Figura 4.2: Curva de duración de carga.....	28
Figura 4.3: Escenarios hidrológicos. ....	29
Figura 4.4: Ejemplificación de generación constante.....	33
Figura 4.5: Obtención de curvas de precio horaria.....	34
Figura 5.1: Comparación costo de operación caso base y minimización de costos. ....	36
Figura 5.2: Energía inyectada por las centrales fotovoltaica y PHS en el caso de minimización de costos. ....	37
Figura 5.3: Comparación pago de la demanda para el caso base y minimización de costos. ....	38
Figura 5.4: Distribución de ingresos caso minimización de costos, para la central PHS y fotovoltaica. ....	39
Figura 5.5: Comparación margen operacional y energía inyectada para plantas fotovoltaicas entre caso base y minimización de costos. ....	40
Figura 5.6: Comparación margen operacional y energía inyectada para plantas eólicas entre caso base y minimización de costos. ....	40
Figura 5.7: Comparación margen operacional y energía inyectada para centrales hidráulicas entre caso base y minimización de costos. ....	41
Figura 5.8: Comparación margen operacional y energía inyectada para centrales de biomasa entre caso base y minimización de costos. ....	42
Figura 5.9: Comparación margen operacional y energía inyectada para centrales carboneras entre caso base y minimización de costos. ....	43
Figura 5.10: Comparación margen operacional y energía inyectada para centrales a gas entre caso base y minimización de costos. ....	44
Figura 5.11: Comparación margen operacional y energía inyectada para centrales carboneras entre caso base y minimización de costos. ....	45

Figura 5.12: Comparación utilidades totales, caso maximización considerando PV y no.....	46
Figura 5.13: Energía inyectada por las centrales fotovoltaica y PHS caso maximización de utilidades.....	47
Figura 5.14: Energía anual inyectada por planta PHS y fotovoltaica para los distintos métodos de despacho. ....	48
Figura 5.15: Costo total de operación del sistema, según metodología de despacho.....	49
Figura 5.16: Comparación pago de la demanda según metodología de despacho. ....	50
Figura 5.17: Comparación margen operacional PHS y fotovoltaica según metodología de despacho. ....	50
Figura 5.18: Comparación energía anual inyectada por centrales fotovoltaicas según modo de despacho. ....	51
Figura 5.19: Margen operacional centrales fotovoltaicas para los distintos modos de despacho. ....	52
Figura 5.20: Energía inyectada por eólicas para los distintos modos de despacho. ....	52
Figura 5.21: Margen operacional eólicas según modo de despacho. ....	53
Figura 5.22: Energía inyectada por hidráulicas para los distintos modos de despacho.....	54
Figura 5.23: Margen operacional hidráulicas según modo de despacho. ....	54
Figura 5.24: Energía inyectada por centrales de biomasa para los distintos modos de despacho.....	55
Figura 5.25: Margen operacional centrales de biomasa según modo de despacho. ....	56
Figura 5.26: Energía inyectada por carboneras para los distintos modos de despacho.....	57
Figura 5.27: Margen operacional centrales carboneras según modo de despacho. ....	57
Figura 5.28: Energía inyectada por centrales GNL para los distintos modos de despacho.....	58
Figura 5.29: Margen operacional centrales a GNL según modo de despacho. ....	59
Figura 5.30: Energía inyectada por centrales diésel para los distintos modos de despacho.....	60
Figura 5.31: Cambio en la descarga al maximizar utilidades.....	61
Figura 5.32: Cambio en la carga al maximizar utilidades. ....	62
Figura 5.33: Frecuencia horaria índice de Lerner, para la carga en hidrología húmeda y media. ....	63
Figura 5.34: Frecuencia horaria índice de Lerner, para la descarga en hidrología húmeda y media. ....	64
Figura 5.35: Frecuencia horaria índice de Lerner, para la carga en hidrología seca. ....	65
Figura 5.36: Frecuencia horaria índice de Lerner, para la descarga en hidrología seca.....	65
Figura 5.37: Impacto a nivel individual para distintas centrales. ....	66
Figura 5.38: Impacto a nivel individual, para centrales con ingresos menores a 8 [MMUSD]. ...	66
Figura 5.39: Emisión de dióxido de carbono para los distintos modos de despacho. ....	67
Figura 5.40: Emisión de material particulado para los distintos modos de despacho. ....	67
Figura 5.41: Emisión de dióxido de óxidos de nitrógeno para los distintos modos de despacho. ....	68
Figura 5.42: Emisión de dióxido de azufre para los distintos modos de despacho. ....	68