

## Tabla de contenido

Resumen .....	i
Dedicatoria .....	ii
Agradecimientos .....	iii
Índice de ilustraciones .....	vii
1 Introducción .....	1
1.1 Motivación y antecedentes .....	1
1.2 Descripción del problema.....	2
1.3 Objetivos .....	3
1.3.1 Objetivo general .....	3
1.3.2 Objetivos específicos.....	3
1.4 Alcances .....	3
1.5 Estructura de la memoria.....	4
2 Revisión bibliográfica .....	5
2.1 El Sistema Eléctrico chileno .....	5
2.1.1 Descripción general.....	5
2.1.2 La Ley General de Servicios Eléctricos .....	6
2.1.3 Las principales instituciones .....	6
2.1.4 Los Sistemas Interconectados .....	7
2.1.5 El mercado eléctrico chileno .....	8
2.1.6 Tipos de clientes.....	9
2.1.7 Los sistemas de distribución .....	9
2.2 Tarifas eléctricas vigentes .....	11
2.2.1 Tarifas existentes.....	11
2.2.2 Definición de horas de punta.....	12
2.2.3 Condiciones de aplicación de las tarifas.....	12
2.2.4 Cargos tarifarios .....	13
2.2.5 Cargos por potencia.....	14
2.3 La Generación Distribuida en Chile.....	18
2.3.1 Definición del concepto .....	18
2.3.2 Esquemas tarifarios .....	18
2.3.3 Legislación vigente (Leyes 20.571 y 21.118) .....	19
2.3.4 Reglamentos y normativas técnicas vigentes .....	20
2.3.5 Aspectos comunitarios .....	23
2.3.6 Prohibiciones.....	23
2.3.7 Valorización de las inyecciones .....	23
2.3.8 Casos en Chile y en el extranjero .....	24

2.4	Energía fotovoltaica generada.....	26
3	Metodología de dimensionamiento y evaluación económica.....	30
3.1	Dimensionamiento para autoconsumo .....	30
3.1.1	Supuestos.....	32
3.1.2	Dimensionamiento espacial.....	32
3.1.3	Dimensionamiento energético.....	35
3.1.4	Dimensionamiento por límite de potencia.....	37
3.2	Metodología para la evaluación económica .....	38
3.2.1	Obtención de la curva de carga .....	38
3.2.2	Balance energético horario.....	39
3.2.3	Balance económico .....	40
3.2.4	Flujo de dinero .....	41
4	Herramienta de dimensionamiento y evaluación económica .....	42
4.1	Ingreso de datos.....	42
4.2	Pestañas de desarrollo .....	46
4.3	Pestaña de resultados.....	50
5	Caso de estudio .....	52
5.1	Identificación de la vivienda .....	52
5.2	Dimensionamiento de la instalación.....	54
5.3	Evaluación económica.....	60
5.3.1	Curva de carga del edificio.....	60
5.3.2	Balance energético .....	61
5.3.3	Cargos tarifarios .....	62
5.3.4	Cobros mensuales.....	64
5.3.5	Ahorros.....	67
5.3.6	Proyección de los costos anuales.....	69
5.3.7	Costos de inversión inicial .....	70
5.3.8	Costos de operación y mantenimiento.....	72
5.3.9	Flujo de dinero .....	72
5.4	Resultados finales.....	74
5.5	Análisis de sensibilidad.....	75
5.5.1	Caso 1: Sin restricciones de espacio.....	75
5.5.2	Caso 2: Modificando el consumo.....	76
5.5.3	Caso 3: Modificaciones al límite de potencia.....	80
5.5.4	Caso 4: Cambios al precio de la energía .....	81
6	Comparación con otras herramientas de dimensionamiento .....	82
6.1	Presentación de las herramientas.....	82

6.1.1	Herramienta de dimensionamiento óptimo .....	82
6.1.2	Explorador solar .....	84
6.2	Evaluación del caso de estudio.....	89
6.2.1	Herramienta de dimensionamiento óptimo .....	89
6.2.2	Explorador solar .....	91
6.3	Comparación con las herramientas anteriores.....	94
7	Conclusiones .....	98
	Bibliografía .....	103
	Anexo A .....	105

# Índice de ilustraciones

Fig. 2.1 – Esquema simplificado de un Sistema Eléctrico de Potencia. ....	5
Fig. 2.2 – Organigrama del Ministerio de Energía. ....	7
Fig. 2.3 – Capacidad instalada total de los tres sistemas interconectados principales del país, marzo 2020. ....	7
Fig. 2.4 – Concesionarias de distribución existentes a diciembre de 2018, y cantidad de clientes. ....	9
Fig. 2.5 – Esquema de cargos asociados a las tarifas en sus componentes de Generación, Transmisión y Distribución. ....	14
Fig. 2.6 – Resumen de cargos de facturación por energía y por potencia de las opciones tarifarias vigentes. ....	17
Fig. 2.7 – Procesos de solicitud de conexión y de puesta en servicio (trámite eléctrico 4). ....	21
Fig. 2.8 – Esquema de conexión de un EG según la NT NetBilling. ....	22
Fig. 2.9 – Evolución de la capacidad instalada (izquierda) y cantidad de instalaciones (derecha) entre 2015 y 2018. ....	24
Fig. 2.10 – Evolución de la potencia declarada ante la SEC, desde el 1 de enero de 2019 hasta el 31 de enero de 2020. ....	24
Fig. 2.11 – Comparativa de cantidad de proyectos y capacidad instalada por sector. ....	25
Fig. 2.12 – Ángulos de orientación e inclinación utilizados en generación fotovoltaica. ....	28
Fig. 3.1 – Distancias de referencia utilizadas en el dimensionamiento. ....	32
Fig. 3.2 – Sombra producida por un panel con inclinación $\beta$ , para una altura solar $\alpha$ . ....	33
Fig. 3.3 – Paneles acostados. ....	34
Fig. 3.4 – Paneles empinados. ....	34
Fig. 3.5 – Procedimiento de dimensionamiento espacial. ....	35
Fig. 3.6 – Procedimiento de dimensionamiento espacial y por requerimientos energéticos. ....	36
Fig. 3.7 – Procedimiento de dimensionamiento espacial, por requerimientos energéticos y por límite de potencia. ....	37
Fig. 3.8 – Curva de carga (azul) y curva de generación (rojo), para un día promedio de un mes. ....	39
Fig. 3.9 – Áreas bajo las curvas de carga y de generación (balance energético). ....	39
Fig. 4.1 – Ubicación de la vivienda e información de consumo. ....	42
Fig. 4.2 – Información de dimensiones espaciales de la vivienda, y ángulos de inclinación de los paneles en cada área. ....	43
Fig. 4.3 – Disposición de la vivienda y determinación del lado de referencia, hacia el cual se orientarán los paneles. ....	43
Fig. 4.4 – Perfiles de radiación necesarios, para el área 1. ....	44
Fig. 4.5 – Solicitud de perfiles mensuales de temperaturas ambiente. ....	44
Fig. 4.6 – Ingreso de los consumos de los últimos 12 meses. ....	44
Fig. 4.7 – Ingreso de la curva de carga promedio del edificio completo, para los 12 meses del año. ....	44
Fig. 4.8 – Información necesaria de las 5 opciones de paneles a evaluar. ....	45
Fig. 4.9 – Ingreso de cargos tarifarios vigentes. ....	45
Fig. 4.10 – Información para la facturación de las distintas tarifas. ....	46
Fig. 4.11 – Pestaña que obtiene los consumos totales de cada mes, y calcula el mes de mayor consumo. ....	46
Fig. 4.12 – Curva de carga generada y cálculo de potencias contratadas en las tarifas BT2, BT4.1 y BT4.2. ....	47
Fig. 4.13 – Obtención de la mínima elevación solar en la latitud de la instalación. ....	48
Fig. 4.14 – Pestaña de balance energético para 3 paneles diferentes, de un total de 5 paneles. ....	48
Fig. 4.15 – Pestaña de resultados obtenidos para el dimensionamiento. ....	50
Fig. 4.16 – Pestaña de resultados para la cuenta de electricidad mensual del primer año, para las 9 tarifas vigentes. ....	51
Fig. 4.17 – Pestaña de resultados para el tiempo de recuperación de la inversión. ....	51
Fig. 5.1 – Condominio Plaza Recoleta. ....	52
Fig. 5.2 – Identificación de las Torres A, B y C, vistas de Sur a Norte. ....	53
Fig. 5.3 – Identificación de las tres áreas disponibles de la Torre A, a partir del plano de aguas lluvias. ...	53
Fig. 5.4 - Vista hacia el norte, del área 2 al área 1, en que se aprecia la estructura del techo y los ductos de ventilación. ....	54
Fig. 5.5 – Identificación de la vivienda y de su consumo. ....	54

Fig. 5.6 – Dimensiones de las 3 áreas del techo. ....	55
Fig. 5.7 – Información de los 3 paneles solares utilizados en la evaluación. ....	55
Fig. 5.8 – Resultados del dimensionamiento espacial, para las 3 áreas y los 3 paneles estudiados. ....	56
Fig. 5.9 – Perfil de radiación global anual del lugar, incidente sobre una superficie con 0° de orientación e inclinada hacia la latitud del lugar. ....	56
Fig. 5.10 – Perfil anual de temperaturas ambiente promedio mensuales del lugar. ....	56
Fig. 5.11 – Consumos mensuales de energía de todo el departamento, en kWh por mes. ....	57
Fig. 5.12 – Energía mensual producida por cada panel en forma individual en cada área. ....	57
Fig. 5.13 – Procedimiento combinado de dimensionamiento espacial y por requerimientos energéticos. ....	58
Fig. 5.14 – Resultados del dimensionamiento combinado espacial y por requerimientos energéticos. ....	58
Fig. 5.15 – Cantidad máxima de paneles permitidos en la instalación. ....	59
Fig. 5.16 – Resultado del dimensionamiento espacial, energético y por límite de potencia. ....	59
Fig. 5.17 – Especificaciones individuales de paneles y áreas. ....	59
Fig. 5.18 – Resultados del dimensionamiento total. ....	60
Fig. 5.19- Curva de carga horaria, para el consumo mensual promedio. ....	61
Fig. 5.20 – Diferencia entre consumo y generación para el mes de agosto. ....	61
Fig. 5.21 – Diferencia entre consumo y generación para el mes de noviembre. ....	62
Fig. 5.22 – Consumos mensuales desde la red considerando el balance energético producido por los paneles 1. ....	62
Fig. 5.23 – Tarifas de suministro para Recoleta, en noviembre de 2019. ....	63
Fig. 5.24 – Valores nominales y máximos de potencia de los equipos comerciales para las tarifas de potencia contratada. ....	64
Fig. 5.25 – Cuentas mensuales de electricidad para todas las tarifas, sin contar con la instalación fotovoltaica. ....	65
Fig. 5.26 – Variación en las cuentas BT2, según calificación Presente (PP) o Parcialmente Presente (PPP) en Punta. ....	65
Fig. 5.27 – Variación en las cuentas BT3, según calificación Presente (PP) o Parcialmente Presente (PPP) en Punta. ....	66
Fig. 5.28 – Variación de las cuentas mensuales según calificación “Mixta”, “PP” y “PPP”, para BT2. ....	66
Fig. 5.29 – Cuentas mensuales de electricidad para todas las tarifas, contando con paneles del tipo 1. ....	67
Fig. 5.30 – Ahorros mensuales producidos por los paneles 1. ....	67
Fig. 5.31 – Porcentaje de ahorros mensuales producidos por los paneles 1. ....	68
Fig. 5.32 – Tarifas más convenientes en cada caso. ....	68
Fig. 5.33 – Cobros del primer año en millones de pesos, para las 9 tarifas, en los 4 casos estudiados. ....	69
Fig. 5.34 – Cobros y ahorros del primer año, en pesos, para las 9 tarifas, en los 4 casos estudiados. ....	69
Fig. 5.35 – Evolución anual de los factores de expansión de precios. ....	69
Fig. 5.36 – Valores trámite eléctrico 4 (TE4), para marzo 2020, en Recoleta. ....	71
Fig. 5.37 – Valores de los equipos cotizados. ....	71
Fig. 5.38 – Inversión inicial total y por departamento. ....	71
Fig. 5.39 – Precios por unidad de potencia instalada. ....	72
Fig. 5.40 – Costos de operación anual. ....	72
Fig. 5.41 – Primeros 10 años del flujo de dinero para el panel 1, considerando las 9 tarifas. ....	72
Fig. 5.42 – Tiempo de recuperación de la inversión de los 3 paneles estudiados, para las 9 tarifas. ....	73
Fig. 5.43 – Tasa interna de retorno de los 3 paneles, a 10 y 20 años, para las 9 tarifas. ....	73
Fig. 5.44 – Comparación entre precios de potencia y de energía (celeste), para las 9 tarifas y para energía inyectada. ....	74
Fig. 5.45 – Costo equivalente de la energía, para las 9 tarifas, en los 4 casos estudiados. ....	74
Fig. 5.46 – Costo equivalente de la energía para las 9 tarifas, en los 4 casos estudiados. ....	75
Fig. 5.47 – Valores totales de paneles, superficie, inversión inicial y ahorros del primer año en BT1a, por cantidad de clientes. ....	75
Fig. 5.48 – Modificación de la curva de carga. ....	76
Fig. 5.49 – Cuentas de primer año modificando la curva de carga. ....	77
Fig. 5.50 – Curvas de generación para agosto y noviembre. ....	77
Fig. 5.51 – Ahorros del primer año. ....	78
Fig. 5.52 – Cobros del primer año. ....	78

Fig. 5.53 – Variación de los ahorros anuales y el tiempo de recuperación de la inversión con la cantidad de pisos. ....	79
Fig. 5.54 – Variación de los ahorros anuales y la recuperación de la inversión con la cantidad de pisos (continuación). ....	79
Fig. 5.55 – Variación del tiempo de recuperación de la inversión (azul) y del ahorro anual (rojo) con la capacidad instalada. ....	80
Fig. 5.56 – Tiempo de recuperación de la inversión (años) y ahorro anual (rojo) en función de la capacidad instalada. ....	80
Fig. 5.57 – Ahorros y recuperación de la inversión para distintos precios de la energía. ....	81
Fig. 6.1 – Presentación y datos de entrada de la herramienta de dimensionamiento óptimo. ....	83
Fig. 6.2 – Resultados de la evaluación económica entregados por la herramienta de dimensionamiento óptimo. ....	83
Fig. 6.3 – Visualización del menú del Explorador Solar para estimar capacidad instalada. ....	84
Fig. 6.4 – Ventana de entrada del Explorador Solar para calcular el sistema fotovoltaico con el modelo simple. ....	85
Fig. 6.5 – Ventana de entrada del Explorador Solar para calcular el sistema fotovoltaico con el modelo avanzado. ....	86
Fig. 6.6 – Ejemplo de resultados obtenidos con el Explorador Solar. ....	87
Fig. 6.7 – Resultados generales de la herramienta para el cálculo de ahorro del Explorador Solar. ....	88
Fig. 6.8 – Ejemplo de la importancia del dimensionamiento espacial basado en superficies orientadas y no solo en superficie total disponible. ....	94
Fig. 6.9 – Cuadro comparativo de las características de las 3 herramientas comparadas. ....	97