



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**FORTALECIMIENTO DE LA RESILIENCIA DEL SECTOR ENERGÉTICO
NACIONAL: ANÁLISIS TÉCNICO ECONÓMICO DE OPCIONES PARA
MEJORAR LA RESPUESTA ANTE DESASTRES.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO

DANIEL PASCAL GASMAN GUIN-PO

PROFESOR GUÍA:
Rigoberto Torres Avila

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
Andrés Caba Rutte
Manuel Diaz Romero

SANTIAGO DE CHILE
2024

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
ELÉCTRICO
POR: DANIEL PASCAL GASMAN GUIN-PO
FECHA: 2024
PROF. GUÍA: RIGOBERTO TORRES

FORTALECIMIENTO DE LA RESILIENCIA DEL SECTOR ENERGÉTICO NACIONAL: ANÁLISIS TÉCNICO ECONÓMICO DE OPCIONES PARA MEJORAR LA RESPUESTA ANTE DESASTRES.

Una de las consecuencias del cambio climático es el incremento de eventos climáticos extremos de baja probabilidad y alto impacto, los cuales pueden tener efectos altamente perjudiciales. En este ámbito, se plantea la problemática de como estos eventos pueden afectar a los sistemas energéticos, así como las adaptaciones y metodologías que pueden desarrollarse con tal de mejorar su resiliencia frente al cambio climático. En este contexto, a pesar de los avances existentes la implementación de dichas adaptaciones aún se encuentra en una fase incipiente, lo que resalta la necesidad de generar contribuciones para su avance.

A partir de lo anterior, surge el objetivo principal de este trabajo de título, el cual es proponer y clasificar un conjunto de alternativas, según parámetros definidos, que puedan mejorar la resiliencia del sistema energético nacional y que sean suficientes para afrontar los distintos eventos extremos que puedan afectarlo.

La metodología empleada se puede resumir en tres puntos principales. En primer lugar, se hace una revisión bibliográfica con el fin de definir los eventos extremos que impactan a Chile y para identificar medidas de aporte de resiliencia. El segundo paso es hacer una clasificación y caracterización de dichas medidas, junto con una propuesta metodológica que permita utilizar la clasificación hecha y así aplicar medidas a casos específicos. Por último se presentan casos de estudio dentro del contexto chileno, utilizando la metodología propuesta.

Este estudio presenta como resultados un catastro de medidas que aportan resiliencia de infraestructura y de servicio. Destacan las medidas de resiliencia de infraestructura al prevenir la falta de suministro y además evitar costos por daños al sistema. Junto con esto se entrega una clasificación de las medidas encontradas, en donde se subraya la escasa información disponible en esta materia, al existir pocos estudios donde sean estudiadas en profundidad. Específicamente, destaca la falta de información en cuanto al sector hidrocarburos, al estar muchos estudios centrados en el sector eléctrico. Por último, se propone una metodología para la aplicación de medidas en casos reales, acompañada de casos de estudios hechos siguiendo esta metodología. Esta metodología permite, según los parámetros considerados, determinar la conveniencia de implementar medidas. En cuanto a los resultados de los casos de estudio, se destaca que el costo asociado a la pérdida de suministro suele ser mayor que el de daño a infraestructura. Sin embargo, no resulta óptimo implementar medidas enfocadas en asegurar el servicio sin proteger la infraestructura vulnerable. Cabe señalar que dados los supuestos utilizados, la optimalidad de las medidas se pueda ver afectada, aunque esto no compromete la plausibilidad de la metodología y depende del nivel de precisión que se quiera utilizar.

*Gracias a todos los que siempre creyeron en mí,
no hubiera podido sin ustedes.*

Agradecimientos

A mis padres por darme siempre su apoyo incondicional y motivarme a dar lo mejor de mí.

A mis amigos por brindar alegría todos los días.

A Rigoberto mi profesor guía, cuya disposición y ayuda fue clave para el desarrollo de este trabajo.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Descripción del Problema	2
1.3. Objetivos	2
1.3.1. Objetivo General	2
1.3.2. Objetivos Específicos	2
1.4. Alcances	2
1.5. Estructura del Documento	3
2. Marco Teórico y Estado del Arte	5
2.1. Cambio Climático	5
2.2. Resiliencia	9
2.3. Antecedentes en Chile	14
2.3.1. Política Energética Nacional (PEN)	14
2.3.2. Plan de Adaptación al Cambio Climático para el Sector Energía 2018-2023	14
2.3.3. Política Nacional para la Reducción del Riesgo de Desastres 2020 - 2030	15
2.3.4. Estrategia Climática de Largo Plazo de Chile	15
2.3.5. Atlas de Riesgo Climático	15
2.4. Antecedentes Internacionales	15
2.4.1. Climate Resilience (International Energy Agency)	15
2.4.2. Advancing towards climate resilience in Europe (European Environment Agency)	16
2.4.3. Adaptation challenges and opportunities for the European energy system (European Environment Agency)	17
2.4.4. Adaptation Case Studies in the Energy Sector (Ouranos)	19
2.4.5. Países posiblemente preparados	19
2.5. Síntesis de Información Presentada	20
3. Metodología	21
4. Revisión de Fuentes de Información: Eventos y Medidas	24
4.1. Introducción	24
4.2. Eventos Geoclimáticos Extremos en Chile	24
4.3. Identificación de Medidas para Mejorar Resiliencia	29
4.3.1. Revisión de Literatura Internacional	30
4.3.2. Revisión de Experiencias Internacionales	32
4.3.2.1. Medidas de Adaptación	32

4.3.2.2. Casos de Estudio	33
5. Propuesta Metodológica: Clasificación y Aplicación	36
5.1. Introducción	36
5.2. Efecto de Eventos Extremos Considerados	36
5.3. Clasificación de Medidas	37
5.4. Metodología para Evaluación en Casos Reales	45
6. Casos de Estudio Aplicados	49
6.1. Introducción	49
6.2. Incendios en la Provincia de Arauco	50
6.3. Tsunami en Viña del Mar	58
6.4. Inundaciones por Desborde de Ríos en Illapel	64
7. Conclusiones y Trabajos Futuros	68
7.1. Conclusiones	68
7.2. Trabajos Futuros	69
Bibliografía	71

Índice de Tablas

4.1.	Resumen medidas de resiliencia de infraestructura	30
4.2.	Resumen medidas de resiliencia del servicio	31
5.1.	Resumen de eventos y efectos en sistema	37
5.2.	Eventos extremos vs medidas de resiliencia de infraestructura	38
5.3.	Eventos extremos vs medidas de resiliencia del servicio	39
5.4.	Clasificación según características de medidas.	41
5.5.	Comentarios sobre medidas encontradas.	42
5.6.	Valores comunes para casos de estudio	48
6.1.	Posibles elementos dañados por incendio.	51
6.2.	Largo secciones destacadas.	52
6.3.	Posibles pérdidas económicas por falta de suministro por incendio.	53
6.4.	Generación centrales en zonas afectadas por incendios.	53
6.5.	Demanda no suministrada considerando centrales PMGD.	54
6.6.	Costo de arreglo de líneas en caso de incendio.	54
6.7.	Valor presente de conductores según año de falla.	55
6.8.	Valor presente de costo de falla según año de falla.	55
6.9.	Valor presente de tramos de conductores según año de falla.	56
6.10.	Valor presente de costo total de falla según año de falla.	56
6.11.	Costos de alternativas de protección de líneas ante incendio.	57
6.12.	Valor presente de alternativas según año de falla.	57
6.13.	Costo de alternativas para evitar pérdida de suministro ante incendio.	58
6.14.	Posibles elementos dañados por tsunami.	59
6.15.	Demanda no suministrada y costo de falla ante posible tsunami.	60
6.16.	Costo de reparación de subestaciones en caso de inundación por tsunami.	61
6.17.	Valor presente de daño a subestación por tsunami según año de falla.	61
6.18.	Valor presente de costo de falla por tsunami según año de falla.	61
6.19.	Valor presente de costo total de falla por tsunami según año de falla.	62
6.20.	Costo de alternativas de protección de subestaciones en peligro de tsunami.	63
6.21.	Demanda no suministrada y costo de falla ante posible inundación.	65
6.22.	Costo de reparación de subestación en caso de inundación por desborde de río.	66
6.23.	Valor presente de daño a subestación por inundación según año de falla.	66
6.24.	Valor presente de costo de falla por inundación según año de falla.	66
6.25.	Valor presente de costo total de falla por inundación según año de falla.	67
6.26.	Costo de alternativas de protección de subestaciones en peligro de inundación.	67

Índice de Ilustraciones

2.1.	Efectos dados por un incremento en la temperatura 1. Extraído de: [1]	5
2.2.	Efectos dados por un incremento en la temperatura 2. Extraído de: [1]	6
2.3.	Posibles incrementos en temperatura. Extraído de: [1]	6
2.4.	Resumen de impactos del cambio climático en el sistema energético. Extraído de: [2]	7
2.5.	Impacto de efectos climáticos en sistemas eléctricos de potencia. Extraído de: [3]	8
2.6.	Concepto de resiliencia como proceso dinámico, IEEE 2018. Extraído de: [6] .	10
2.7.	Clasificación de aplicaciones de resiliencia según la separación temporal con el evento. Extraído de: [15]	11
2.8.	Trilema de portafolios de inversión en resiliencia. Extraído de: [9].	12
2.9.	Cuadro de resiliencia según referencia. Extraído de: [8].	12
2.10.	Cuadro de resiliencia según referencia. Extraído de: [10].	13
2.11.	Cuadro rendimiento vs tiempo. Extraído de: [10].	14
2.12.	Instrumentos de políticas de adaptación en países miembros de la EEA 2005-2022, EEA 2022. Extraído de:[12]	17
2.13.	Medidas tomadas ante cambio climático por países miembros de la EEA, sector energía, EEA 2019. Extraído de:[13]	18
2.14.	Tabla presentada en informe de Análisis de Infraestructura Resiliente a la Crisis Climática para el Sector Energético Extraído de: [14]	19
3.1.	Diagrama de flujo, metodología.	23
4.1.	Índice de sequía en Chile. Extraído de: [16]	25
4.2.	Olas de calor en Chile. Izquierda: temporada 2021-2022. Derecha: tendencia de olas de calor entre 1981-2022. Extraído de: [16]	26
4.3.	Megaincendios en Chile 1985-2018. Extraído de: [18]	26
5.1.	Diagrama de flujo, metodología de evaluación de medidas.	47
6.1.	Leyenda mapa SEN del CEN.	49
6.2.	Mapa de zonas con peligro de incendio. Fuente: Visor Chile Preparado, SENAPRED	50
6.3.	Leyenda incendios de Figura 6.2 para periodo 2019-2023	50
6.4.	Instalaciones en peligro de sistema eléctrico nacional. Fuente: CEN	51
6.5.	Secciones de líneas con mayor peligro de incendio. Fuente: CEN	52
6.6.	Zona con riesgo de tsunami junto con instalaciones en peligro, Viña del Mar. Fuentes: Visor Chile Preparado, SENAPRED. CEN	59
6.7.	Muros a construir en subestaciones.	63
6.8.	Mapas de zonas en peligro de inundación por desborde de ríos. Fuente: ARCLIM	64
6.9.	Imagen de ciudad de Illapel, destacando el río Illapel y los elementos del sistema energético en riesgo de inundación. Fuente: CEN	65
6.10.	Muros a construir en subestación Illapel.	67

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

El cambio climático actual puede impactar al planeta y la sociedad de diversas maneras, tanto a nivel individual como en el funcionamiento de sistemas u organizaciones. Uno de los fenómenos asociados al cambio climático, es el incremento en la ocurrencia de eventos extremos de baja probabilidad y alto impacto. Estos, son eventos climáticos que se dan con muy baja frecuencia, pero que pueden generar grandes daños o afectar significativamente el funcionamiento de ciertos servicios. Existe una gran variedad de eventos extremos y Chile, al ser un país extenso y con una gran diversidad geográfica se puede ver particularmente afectado por esto.

El incremento en la ocurrencia de estos eventos plantea importantes desafíos en múltiples ámbitos, ya sea para poder combatirlo o adaptarse a las consecuencias que puedan derivar. Dentro de este contexto, surge el cuestionamiento sobre como puede afectar el cambio climático al sistema energético chileno y que adaptaciones deberían ser necesarias para que este pueda resistir y seguir brindando sus servicios correctamente.

Siguiendo lo anterior, es que en muchas partes del mundo se desarrollan nuevas definiciones y características que los sistemas deben cumplir, para poder seguir operando de manera eficaz y brindar los servicios que ofrecen. Entre estas definiciones cae la resiliencia, la cual según el Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) puede definirse como: “Capacidad de un sistema social, económico o ambiental para soportar un evento crítico, tendencia o perturbación, respondiendo o reorganizándose de manera tal que se mantengan sus funciones esenciales, identidad y estructura, mientras también se mantiene la capacidad de adaptación, aprendizaje y transformación”. Este concepto está siendo aplicado en la planificación de muchos sistemas energéticos a nivel mundial, incluido Chile, como respuesta a los retos impuestos en gran parte por el cambio climático. No obstante, aún queda un largo camino para tener sistemas resilientes en el país y en el resto del mundo, lo que subraya la importancia de contribuir a su desarrollo en estudios presentes y futuros.

1.2. Descripción del Problema

De acuerdo con lo expuesto anteriormente, se reconoce la necesidad de contar con un sistema energético resiliente al cambio climático, hecho con el cual se desarrolla la problemática central de este trabajo. Este problema puede interpretarse como la falta de una caracterización y modos de aplicación de elementos que puedan aportar resiliencia al sistema energético nacional. Esto porque a pesar de identificarse eventos críticos que puedan afectar el sistema y de existir objetivos específicos para tener un sistema energético resiliente, falta el conocimiento y aplicación de alternativas que puedan aportar en este sentido. En consecuencia, destaca el problema de que todavía se está en una etapa temprana del desarrollo de la resiliencia en los sistemas energéticos, lo que subraya la falta de una definición y caracterización formal de medidas que puedan aportar resiliencia a estos.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Proponer y caracterizar según parámetros definidos un conjunto de alternativas que puedan aportar resiliencia al sistema energético nacional, el cual sea suficiente para cubrir los diferentes eventos extremos que puedan afectarlo.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Definir en profundidad las características de cada una de las alternativas propuestas, esto es especificando los costos asociados, los eventos por sobre los cuales estas pueden aportar resiliencia, tiempos necesarios para aplicarlas, los sectores del sistema que cubren y parámetros adicionales de ser necesario.
- Proponer una metodología para evaluar la factibilidad de aplicación de las medidas encontradas dentro de casos específicos y poder hacer contraste entre ellas según parámetros definidos.
- Analizar con criterios técnicos y económicos la aplicación de estas soluciones encontradas sobre casos específicos en Chile. Casos definidos por una localización específica y por eventos críticos que se deseen cubrir con las soluciones encontradas.

1.4. Alcances

La información recopilada en este estudio puede verse limitada, en primer lugar, por las fuentes que se utilizaron, las cuales no necesariamente abarcan la totalidad de la evidencia disponible. En este sentido, es posible que existan medidas útiles en ciertas situaciones que no hayan sido consideradas en este análisis. Por otro lado, dado que la aplicación de resiliencia en el sistema energético es un área de estudio emergente, la cantidad de estudios que aborden esta temática y ofrezcan diversas perspectivas es reducida. En específico, se nota una falta de información en cuanto al sector hidrocarburos, al ser escasos los estudios que toquen esta temática.

Siguiendo lo anterior, la clasificación de medidas también se puede ver limitada por la disponibilidad de fuentes de información. Debido a que la temática de este trabajo esté en desarrollo actual, en muchas fuentes se cita la existencia de diversas aplicaciones, sin embargo no proporcionan una descripción exhaustiva de estas y generalmente no se detallan los costos o tiempos necesarios para su aplicación. Por tanto, algunos de los cálculos realizados o valores utilizados son estimaciones basadas en los datos disponibles.

En cuanto a los casos de estudio, los costos calculados que se asocian a la pérdida de suministro y al daño de infraestructura pueden diferir de un escenario real, ya que a pesar de utilizar valores obtenidos de fuentes oficiales, los daños o tiempos utilizados son estimaciones. Por otro lado, la veracidad de los casos desarrollados se ve condicionada por la precisión de los mapas utilizados. Por último, la frecuencia de eventos y el tiempo de falla en la realidad son variables aleatorias que se asocian a distribuciones probabilísticas, sin embargo, ante la ausencia de esta información, se asignan valores según cada caso.

1.5. Estructura del Documento

El trabajo de título presentado a continuación consta de siete capítulos. En el primer capítulo se tiene la introducción al trabajo, presentando la motivación, la descripción del problema, los objetivos y los alcances de este.

En el segundo capítulo, se presentan estudios previos que sirven como base para el desarrollo del trabajo de título. En esta sección, primero se presentan elementos clave a conocer antes de analizar el trabajo de título. Luego, se presentan antecedentes tanto nacionales como internacionales, con énfasis en documentos que indiquen progresos en materias de resiliencia o que establezcan objetivos a futuro respecto a la aplicación de resiliencia en sistemas energéticos.

En el tercer capítulo, se describe la metodología utilizada para desarrollar el estudio. En este apartado se presenta y detalla como se desarrolla el trabajo con tal de cumplir con los objetivos propuestos.

El cuarto capítulo presenta la información recopilada de la revisión bibliográfica. La revisión se enfoca primero en la identificación y descripción de eventos extremos que se den en Chile junto con sus efectos. Luego en alternativas que puedan aportar resiliencia al sistema energético. En cuanto a estas alternativas, la búsqueda se separa en literatura enfocada en investigaciones académicas y la revisión de experiencias internacionales.

El quinto capítulo aborda la clasificación y caracterización de las medidas encontradas y de los eventos extremos. Para esto se presenta la información principalmente en tablas, acompañadas de las referencias utilizadas para su elaboración. Por último, se presenta una propuesta metodológica a seguir en los casos de estudio dentro de Chile.

En el sexto capítulo se realiza la revisión de casos de estudio, en los cuales sea aplica lo desarrollado a lo largo del trabajo de título, los cuales están organizados según los eventos extremos y las zonas consideradas.

Por último, en el séptimo capítulo se exponen las conclusiones del trabajo de título, así como los posibles trabajos futuros que podrían proseguir los avances acá presentados.

Capítulo 2

Marco Teórico y Estado del Arte

2.1. Cambio Climático

El continuo calentamiento global asociado al cambio climático trae consigo una gran variedad de consecuencias negativas para el planeta, dentro de estas se encuentra el incremento en la ocurrencia de eventos extremos de baja probabilidad y alto impacto. Según el reporte *Climate Change 2021* de la IPCC, con cada aumento en la temperatura del planeta, aumenta la frecuencia e intensidad con la que se dan ciertos eventos, tales como olas de calor o sequías. En las figuras 2.1 y 2.2 se puede apreciar como un aumento de temperatura mundial puede influir en la intensidad y frecuencia de ciertos eventos extremos.

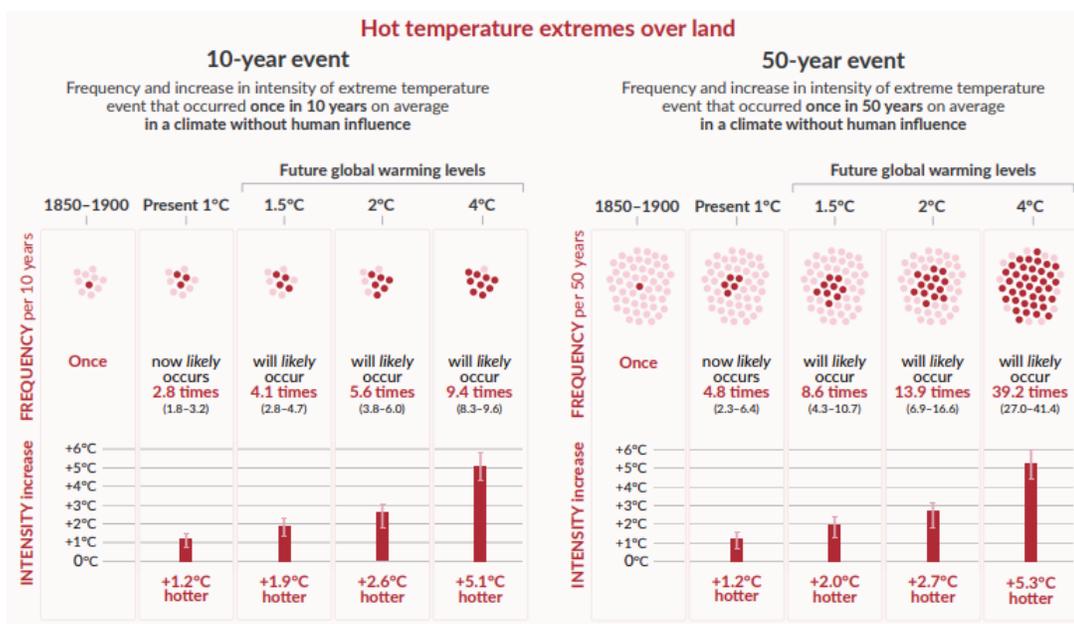


Figura 2.1: Efectos dados por un incremento en la temperatura 1. Extraído de: [1]

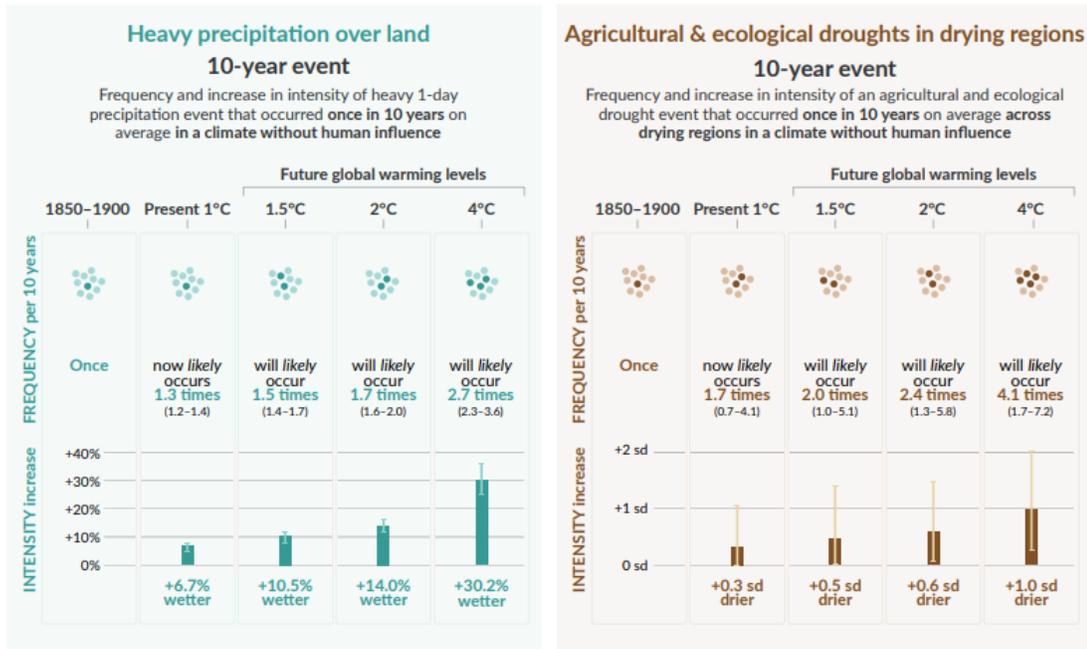


Figura 2.2: Efectos dados por un incremento en la temperatura 2. Extraído de: [1]

En la figura vista a continuación se puede ver como se espera que sea el aumento de temperatura antes mencionado según diferentes escenarios socioeconómicos globales o SSPs (Shared Socioeconomic Pathways). Estos van desde SSP1 hasta SSP5, donde estos límites significan desde un desarrollo futuro sustentable hasta uno centrado en combustibles fósiles respectivamente.

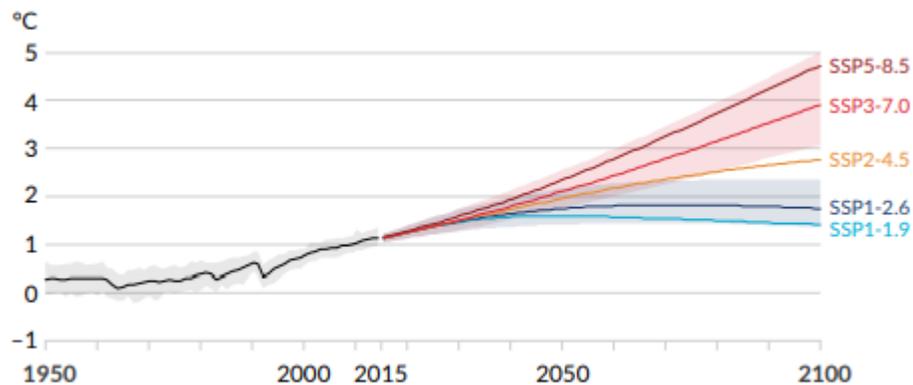


Figura 2.3: Posibles incrementos en temperatura. Extraído de: [1]

Los efectos negativos del cambio climático se pueden ver reflejados también en un sistema energético, dependiendo de la zona del sistema que se esté considerando y el tipo de evento. En [2] se presenta un cuadro resumen con los posibles impactos del cambio climático en el sistema energético, el cual se presenta a continuación:

Aumento		T°	PP	Q	Otras Variables					Eventos Extremos									
		Aumento	Disminución	Disminución	Alza NMM	Radiación	Nubosidad	Humedad	Viento	Olas de calor	T° extremas	Sequia	Incendios forestales	Heladas	Marejadas	Precipitaciones intensas	Inundaciones	Aluviones	Vientos extremos
Recurso	Agua	-	-	-	0	0	0	0	0	0	-	-	0	0	0	0	0	0	0
	Solar	0	0	0	0	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Viento	0	0	0	0	0	0	0	TD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Biomasa	-	-	-	0	0	0	0	0	-	-	-	-	0	0	0	-	-	0
Generación	Hidroeléctrica	-	-	-	0	0	0	0	0	0	0	-	0	0	0	-	-	-	0
	Solar	-	0	0	0	+	TD	TD	0	-	-	0	0	0	0	-	-	-	-
	Eólica	0	0	0	0	0	0	0	TD	0	0	0	0	+	-	0	-	-	TD
	Termoeléctrica	-	0	-	0	0	0	0	0	-	0	-	0	0	-	0	-	0	0
Transporte de Energía	Infraestructura Eléctrica	-	0	0	0	0	0	TD	0	-	0	0	0	TD	0	0	-	-	-
	Infraestructura Combustibles	TD	0	0	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0	0	-	0
Demanda de Energía	Calor	+	0	0	0	0	0	0	0	+	+	0	0	0	0	0	0	0	0
	Refrigeración	-	0	0	0	0	0	0	0	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0
	Otros usos finales	-	0	-	0	0	0	0	0	-	-	-	0	0	-	0	0	0	0

Escala	Indicador
0	Sin información de impactos
+/-	Impactos + o - sin validación nacional
+/-	Impactos + o - estudiados en Chile
TD	Se esperan cambios, pero con tendencia desconocida

Figura 2.4: Resumen de impactos del cambio climático en el sistema energético. Extraído de: [2]

Por otra parte, centrándose únicamente en un sistema eléctrico, en [3] se presenta un diagrama que muestra de manera más específica los efectos que pueden tener diferentes eventos climáticos en los componentes de un sistema eléctrico.

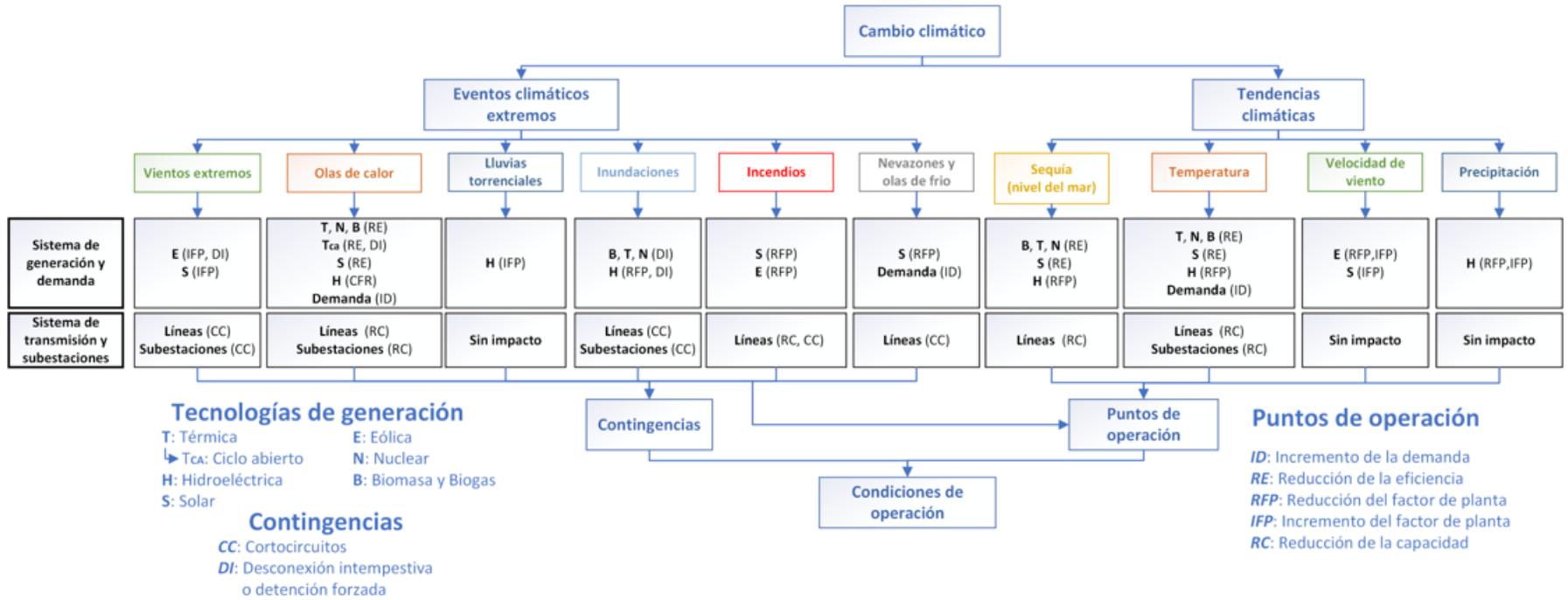


Figura 2.5: Impacto de efectos climáticos en sistemas eléctricos de potencia. Extraído de: [3]

Sumado a esto, se puede tomar lo mencionado por la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC, 1992), quienes describen a Chile como un país altamente vulnerable, dado que debido a su gran variedad de geografías y climas, posee las siguientes zonas vulnerables:[4]

- zonas costeras bajas
- zonas áridas y semiáridas
- zonas con cobertura forestal y zonas expuestas al deterioro forestal
- zonas propensas a los desastres socionaturales
- zonas expuestas a la sequía y a la desertificación
- zonas de alta contaminación atmosférica urbana
- zonas de ecosistemas frágiles

Sumando esto al diagrama visto anteriormente, se puede decir que el sistema energético chileno está predispuesto a sufrir de gran manera por el cambio climático, al quedar a disposición de los efectos negativos que puedan ser ocasionados en todas las distintas zonas vulnerables mencionadas.

Por último, al considerar los eventos extremos vistos, es importante mencionar que además de los acá propuestos en el caso de Chile es importante tener en cuenta eventos tales como terremotos y tsunamis para un análisis de eventos extremos. Esto debido a que a pesar de no ser afectados por el cambio climático, Chile está situado en una zona geográfica muy susceptible a sufrir por estos eventos, lo que ha causado grandes estragos en el pasado.

2.2. Resiliencia

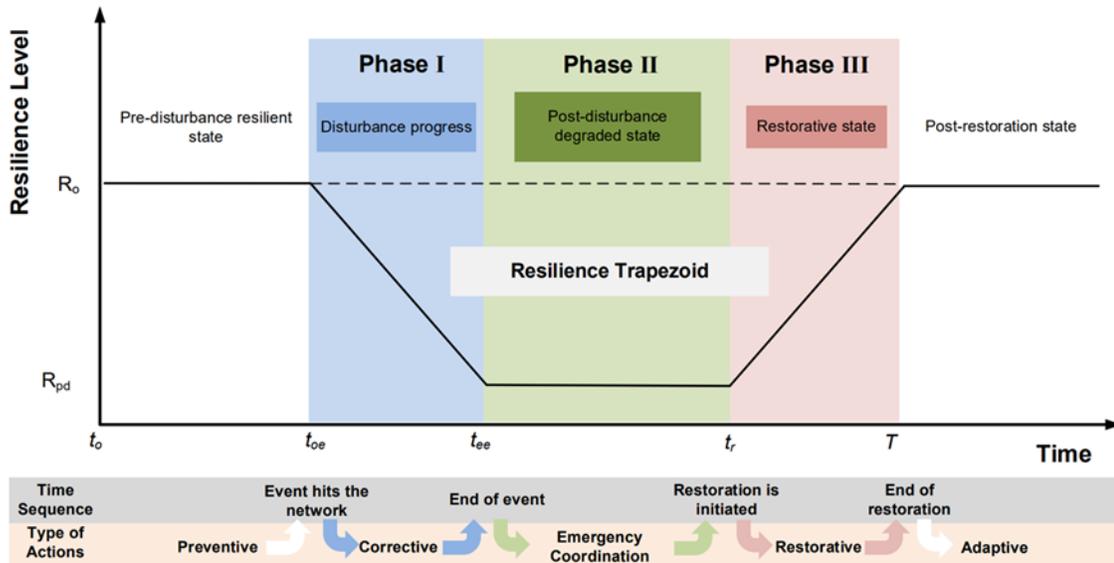
Parte de entender los desafíos que conllevan el adaptar el sector energético a los problemas que trae el cambio climático, empieza con definir qué es lo que se entiende por resiliencia. Organizaciones le dan distintas definiciones a esta, considerando tanto aspectos en común como no, por ejemplo, se tienen las siguientes definiciones:

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): Capacidad de un sistema social, económico o ambiental para soportar un evento crítico, tendencia o perturbación, respondiendo o reorganizándose de manera tal que se mantengan sus funciones esenciales, identidad y estructura, mientras también se mantiene la capacidad de adaptación, aprendizaje y transformación.[5]

Política Energética Nacional (PEN). En su actualización de 2022 incluye la definición de resiliencia climática en sí: habilidad de un sistema o sus componentes para anticipar, absorber, adaptarse o recuperarse de los efectos adversos del cambio climático, de forma oportuna y eficiente, incluso velando por la conservación, restauración o mejora de sus estructuras y funciones básicas esenciales.[7]

IEEE: Capacidad de resistir y reducir la magnitud y/o duración de incidentes perjudiciales, que incluye la capacidad de anticipar, absorber, adaptarse y/o recuperarse rápidamente de tal evento.[6]

Además, la IEEE define el concepto de resiliencia como un proceso dinámico, esto es, que puede tenerse cierto nivel de resiliencia (definido por algún parámetro a definir) el cual después de una contingencia o evento crítico baja a un valor post perturbación, para luego recuperarse y volver al estado pre contingencia. Esto se puede resumir en la figura a continuación:



(Ref. IEEE Task Force on Definition and Quantification of Resilience 2018, M. Panteli)

Figura 2.6: Concepto de resiliencia como proceso dinámico, IEEE 2018.
Extraído de: [6]

En resumen, se puede entender que lo que se busca con un sistema más resiliente, es que este pueda tener una mejor anticipación o respuesta ante distintos eventos, en específico dado el contexto del trabajo a realizar, ante eventos extremos. Siguiendo esto que se definen dos formas básicas de aportar a la mejora de resiliencia de un sistema energético, las cuales son:

- Resiliencia del servicio: Se enfoca en la gestión del sistema, buscando asegurar la continuidad de servicio tratando variadas formas de operar el sistema con tal de que se asegure el suministro de la demanda.
- Resiliencia de la infraestructura: Se enfoca en los componentes en sí del sistema, buscando la minimizar de daños y mantener la mayor cantidad de tiempo posible a estos componentes operativos, ya sea haciendo modificaciones en elementos presentes o agregando elementos extras que ayuden al sistema a mantenerse en pie ante adversidades.

Otra forma de evaluar el aporte de resiliencia que se pueda tener es con los conceptos de resiliencia orientada en la planificación y en la operación, donde la resiliencia orientada a la operación se divide en respuesta y restauración. En cuanto a la orientada en la planificación, se centran en medidas aplicadas a largo plazo, generalmente asociándose a medidas de

resiliencia de la infraestructura que requieren de tiempo para aplicarse y robustecer el sistema. La resiliencia orientada en la operación hace referencia a medidas de corto plazo para contrarrestar los efectos que puedan haber, se consideran medidas que puedan ser aplicadas pocos días antes del evento, durante el mismo o para recuperar el sistema cuando ya ocurrió. Al ser medidas concentradas en asegurar el suministro ya sea tomando medidas preventivas o intentando recuperar el sistema lo antes posible es que se asocian generalmente a la resiliencia del servicio. En la figura 2.7 se muestra un cuadro resumen de lo acá mencionado. Hay que notar que a pesar de asociarse las medidas tomadas a largo plazo con resiliencia de infraestructura y las de corto plazo al servicio, no implica que signifiquen lo mismo, ya que por ejemplo pueden haber excepciones en donde medidas que aportan resiliencia del servicio necesiten de un largo tiempo para ser desarrolladas.

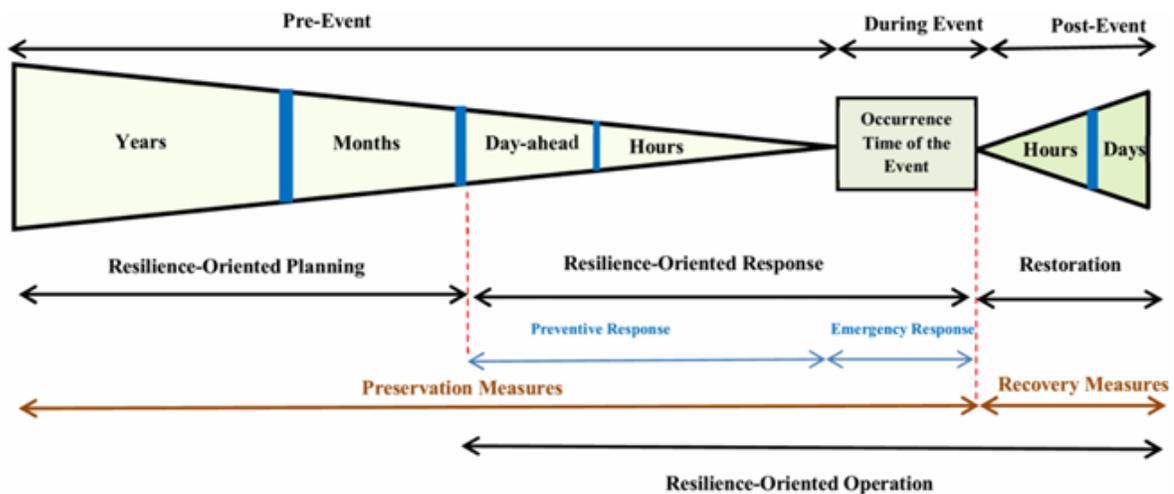


Figura 2.7: Clasificación de aplicaciones de resiliencia según la separación temporal con el evento. Extraído de: [15]

Otra forma en que se ha descrito la problemática sobre como abordar la resiliencia es mediante el tipo de enfoque que tienen las posibles medidas. En [9], se resume parte de esto en la imagen mostrada a continuación, en donde se ve que existen principalmente tres formas de considerar el aporte de resiliencia de las distintas alternativas posibles. Estas tres son: Robustez, se concentra en hacer los distintos sectores del sistema más “fuertes” con tal de evitar que se produzcan daños. Redundancia, se concentra en tener vías alternativas para así asegurar el suministro en caso de que sufra algún daño el sistema. Flexibilidad y respuesta, se concentra en medidas que permitan recuperar el sistema rápidamente o medidas que ayuden al sistema a llegar a otros puntos de operación y minimizar el tiempo de pérdida de carga.

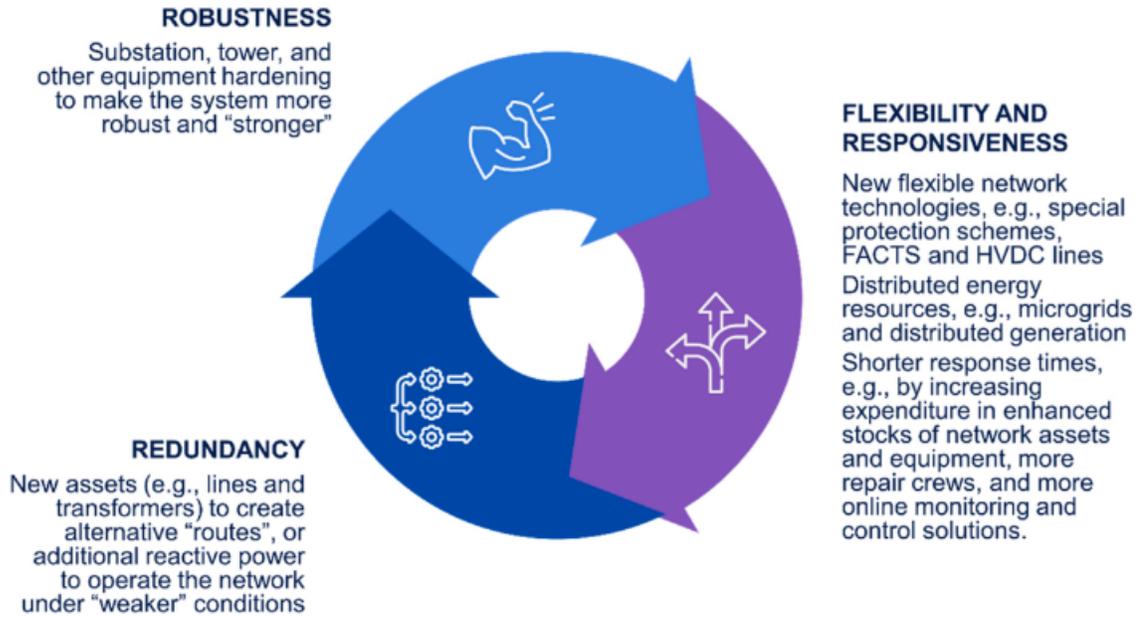


Figura 2.8: Trilema de portafolios de inversión en resiliencia. Extraído de: [9].

Considerando la información mencionada es que investigadores hacen aportes y modificaciones a las distintas definiciones. Por ejemplo, en [8] y [10] modifican el trapecoide de resiliencia brindado por la IEEE, generando las imágenes que se muestran en las figuras siguientes:

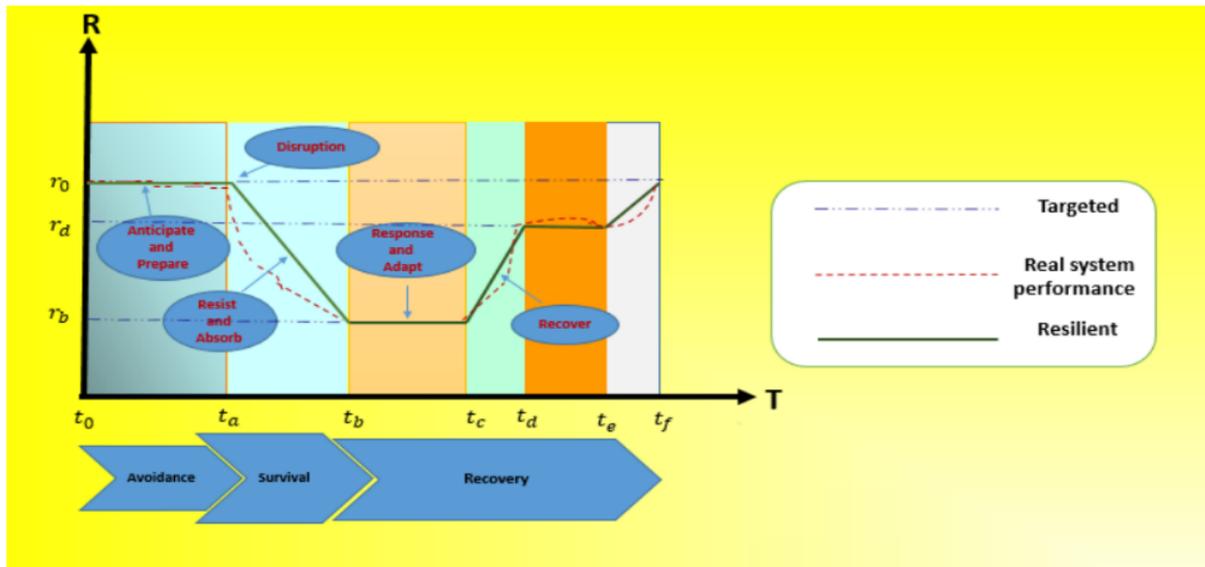


Figura 2.9: Cuadro de resiliencia según referencia. Extraído de: [8].

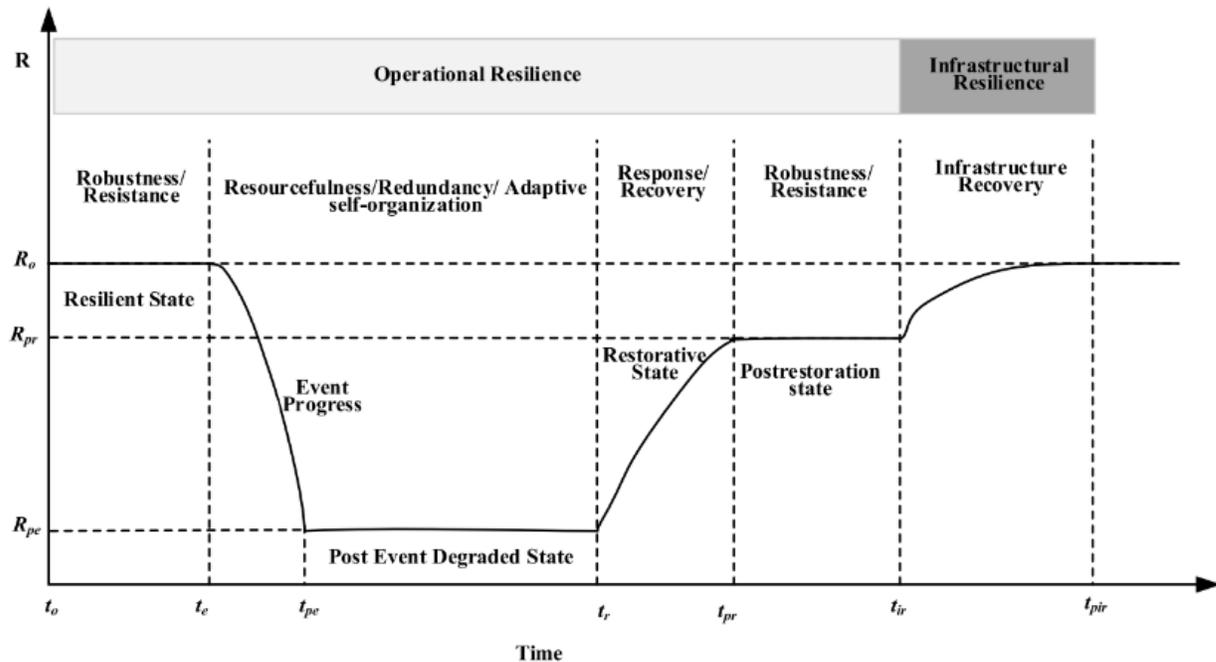


Figura 2.10: Cuadro de resiliencia según referencia. Extraído de: [10].

En la primera imagen se puede ver una comparación del comportamiento ideal de un sistema resiliente vs lo que se puede esperar de su rendimiento real, junto con los enfoques que se deben tener en cada sector. En la segunda imagen, se muestra una modificación en cuanto a la forma de la curva, junto con el enfoque que deberían tener las medidas si se quiere fortalecer cierta parte de la curva. Además, en [8] junto con la imagen brindada se indican las características que debe tener un sistema para ser resiliente, centrándose en los distintos sectores que se observan en la curva, estas son:

- Antes del incidente el sistema debe tener un nivel de resiliencia suficiente y el operador del sistema debe estimar la localización y severidad de los eventos extremos, para preparar las medidas necesarias.
- Cuando ocurre el incidente, el operador debe ser informado de la situación presente y deben actuar las medidas que se tienen para proteger el sistema. Se debe tener un conjunto de alternativas que reduzcan la vulnerabilidad del sistema.
- Mientras avanza la perturbación, se debe priorizar la identificación de elementos clave perjudicados y los daños sufridos, con tal de planificar rápidamente los elementos que deben ser recuperados.
- Ya minimizado el impacto del evento se entra en la fase de recuperación y adaptación. El nivel de resiliencia se mantendrá bajo el umbral inicial por un tiempo y posteriormente se podrán aplicar medidas considerando los daños sufridos por el evento.

En [10] se incluye además un gráfico con el rendimiento del sistema vs tiempo en vez de resiliencia vs tiempo ante la ocurrencia de un evento extremo, visto en la figura. En este se indica como se tiene un mejor rendimiento con un sistema más robusto, como puede

verse variado este rendimiento con la cantidad de medidas adaptativas que se tienen y que bajo cierto umbral a definir por los operadores del sistema, se tiene un nivel insuficiente de resiliencia que disminuye mucho el rendimiento. Se nota también que a pesar de tener ciertos niveles menores al óptimo, se puede tener un sistema que aún así no pase del umbral mínimo a disponer, de esta forma siendo resiliente pero teniendo todavía formas en las que mejorar para llegar al punto óptimo. En la figura: t_i es el instante de inicio de la perturbación, t_{Bi} cuando se pasa el umbral mínimo, t_{Bf} cuando se vuelve al umbral mínimo, t_{f1} cuando empiezan a actuar las medidas de recuperación.

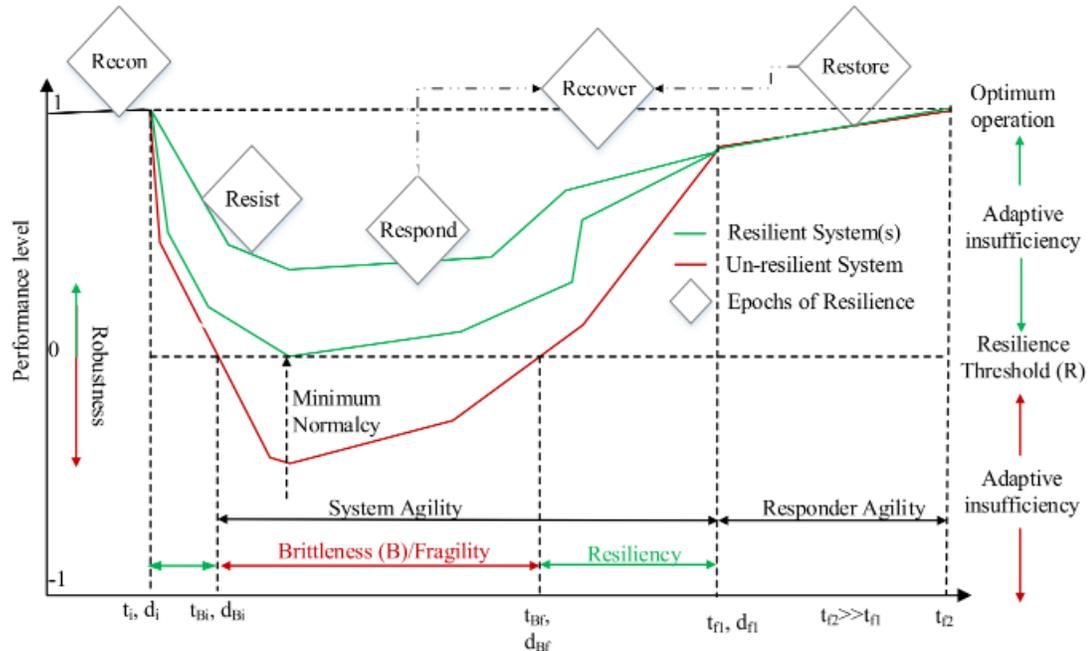


Figura 2.11: Cuadro rendimiento vs tiempo. Extraído de: [10].

2.3. Antecedentes en Chile

2.3.1. Política Energética Nacional (PEN)

Sostiene como uno de sus pilares esenciales la búsqueda de un sistema energético resiliente y eficiente. Tiene diversas metas definidas para lograr esto, entre las que se pueden destacar: la incorporación de resiliencia y adaptación al cambio climático en la regulación, planificación y normativa eléctrica (2030). Al 2040, Chile cuenta con los más altos estándares del mundo en confiabilidad y resiliencia del sistema energético. La implementación de planes que reduzcan riesgos en todo el país (2050). La instalación de 6000 [MW] de sistemas de almacenamiento de energía (2050).

2.3.2. Plan de Adaptación al Cambio Climático para el Sector Energía 2018-2023

Busca aportar en la meta de un desarrollo energético bajo en emisiones y resiliente. Habla en específico de 5 lineamientos, que buscan una oferta y transporte de energía más resiliente y adaptado al cambio climático, un sector energía mejor preparado ante los futuros cambios en

la demanda dados por el cambio climático, crear arreglos entre sectores e instituciones para llegar a acciones que ayuden a mejorar la resiliencia ante el cambio climático y por último generar estrategias para implementar el plan en el largo plazo.

Con esto propone 15 medidas en total, asociadas a cada uno de los lineamientos y que incluyen entre otras cosas, análisis de impacto del cambio climático, estudios de infraestructura y planes de acción para coordinar instituciones e integrar resiliencia en planificación futura.

2.3.3. Política Nacional para la Reducción del Riesgo de Desastres 2020 - 2030

Tiene como uno de sus ejes prioritarios el planificar e invertir en la reducción del riesgo de desastres para la resiliencia. En relación a lo mencionado, esto busca implementar medidas estructurales para reducir la vulnerabilidad física de edificaciones e infraestructura críticas y propiciar el desarrollo de infraestructura verde y azul considerando el enfoque de reducción de riesgo.

2.3.4. Estrategia Climática de Largo Plazo de Chile

Analiza los desafíos que abordan al cambio climático en variados temas además del sector energético. En cuanto a este, presenta varios objetivos detallados con metas y plazos específicos, en donde destaca la búsqueda de bajar las emisiones de carbono de acuerdo a las metas establecidas, eficiencia energética, acceso equitativo y de calidad a los servicios energéticos y un sector mas resiliente, menos vulnerable y con gran penetración de energías renovables.

2.3.5. Atlas de Riesgo Climático

Plataforma en línea proyecto del Ministerio del Medio Ambiente del Gobierno de Chile. Este incluye una gran variedad de mapas de riesgo que incluyen todo el territorio del país. Estos mapas de riesgo abarcan distintos sectores que pueden ser afectados por eventos críticos o variaciones climáticas dadas por el cambio climático, tales como energía eléctrica, bosques nativos y recursos hídricos entre otros.

Puede ser de gran utilidad en la evaluación de alternativas de aporte de resiliencia en el sistema, al indicar zonas que tienen mas riesgo bajo algún supuesto dado, como por ejemplo altas temperaturas o incendios forestales. Esto juntándolo con mapas de Chile que indiquen la posición de zonas clave energéticas, puede identificar zonas de riesgo para futuros análisis.

2.4. Antecedentes Internacionales

2.4.1. Climate Resilience (International Energy Agency)

En este reporte se destaca el peligro que puede significar el cambio climático en cada uno de los sectores de un sistema eléctrico, afectando por ejemplo el potencial y la eficiencia de

la generación, la resiliencia de infraestructura de los sistemas de transmisión y distribución y cambiando como se comporta la demanda. Siguiendo esta lógica, se destaca la importancia de implementar medidas para adaptarse y crear políticas con tal de crear un sistema resiliente.

Para tocar los temas antes mencionados, en el reporte se describe como distintos eventos causados por el cambio climático pueden afectar los distintos segmentos de un sistema eléctrico, junto con algunos casos de estudio vistos en distintas partes del mundo utilizados para combatir el cambio climático.

2.4.2. Advancing towards climate resilience in Europe (European Environment Agency)

Trata una descripción general del avance ante políticas de adaptación al cambio climático de países miembros de la Unión Europea y Turquía. Esto para describir el progreso temporal (en específico, hace una revisión hasta el 31 de Mayo de 2022)en las acciones que toman estos países para volverse más resilientes en términos de cambio climático.

Cabe destacar que se menciona que dada la diferencia en avances de todos los países aludidos, este reporte debe ser visto como una referencia inicial de avances heterogéneos, que se prevé vaya mejorando en versiones futuras. Por esto, la principal pertinencia de este reporte para el trabajo presente es brindar una visión inicial sobre posibles países que pueden ser estudiados para cumplir con los objetivos planteados.

En el reporte, se encuentra la siguiente tabla que muestra el avance en la toma de políticas a lo largo del tiempo por parte de los distintos países:

Country	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Austria													*					
Belgium																		
Bulgaria																		
Croatia																		
Cyprus																		
Czechia																		
Denmark																		
Estonia																		
Finland										*								
France																		
Germany											*					*		
Greece																		
Hungary														*				
Ireland														*				
Italy																		
Latvia																		
Lithuania																	*	
Luxembourg														*				
Malta																		
Netherlands													*					
Poland																		
Portugal											*							
Romania												*						
Slovakia														*				
Slovenia																		
Spain																*		
Sweden														*				
Iceland																		
Liechtenstein																		
Norway																		
Switzerland																		
Türkiye																		

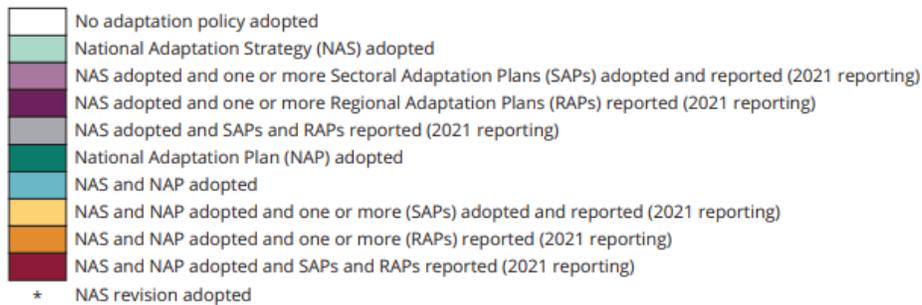


Figura 2.12: Instrumentos de políticas de adaptación en países miembros de la EEA 2005-2022, EEA 2022. Extraído de:[12]

2.4.3. Adaptation challenges and opportunities for the European energy system (European Environment Agency)

A diferencia del documento anterior, este se centra exclusivamente en el sector energético de Europa, buscando hacer un análisis sobre desafíos y oportunidades en cuanto a la adaptación al cambio climático y el reforzamiento de la resiliencia ante este. Todo esto, en un contexto de descarbonización al igual que en el caso chileno.

En este documento, se mencionan una variedad de aspectos, tales como los usos de energía en Europa, las repartición de generación de energía entre distintas tecnologías y variaciones

que se espera que ocurran en los distintos países del continente dado el cambio climático entre otras cosas. Sin embargo, al igual que en el caso anterior, se revisa el documento con tal de poder tener futuras referencias sobre soluciones aplicables a Chile. Por esto, se incluye la siguiente tabla que especifica de forma parecida a la anterior, el avance que han tenido distintos países de Europa en cuanto a el desarrollo y aplicación de políticas de adaptación al cambio climático, solo que en este caso centrándose en el sector energía.

Country	Document					
	Climate change impact, vulnerability and risk (CCIV) assessments		National adaptation strategies (NAS) and plans (NAP)		Country fiches	UNFCCC
	Availability of national CCIV assessment	Coverage of the energy sector in national CCIV assessments	NAS and/or NAP adopted	Coverage of the energy sector in NAS and/or NAP	Adaptation measures implemented in the energy sector	
Austria	Green	Green	Green	Green	Yellow	Red
Belgium	Green	Green	Green	Green	Green	Green
Bulgaria	Green	Yellow	Red	Yellow	Red	Red
Croatia	Green	Green	Green	Green	Red	Red
Cyprus	Green	Green	Green	Green	Red	Red
Czechia	Green	Green	Green	Green	Red	Red
Denmark	Green	Green	Green	Yellow	Red	Red
Estonia	Green	Green	Green	Green	Red	Red
Finland	Green	Green	Green	Yellow	Yellow	Green
France	Green	Green	Green	Green	Red	Red
Germany	Green	Green	Green	Green	Green	Yellow
Greece	Green	Green	Yellow	Yellow	Red	Red
Hungary	Green	Green	Green	Green	Red	Red
Iceland	Red	Red	Red	Grey	Grey	Red
Ireland	Green	Green	Yellow	Yellow	Red	Red
Italy	Green	Green	Green	Green	Red	Red
Latvia	Green	Green	Red	Red	Red	Red
Liechtenstein	Red	Yellow	Yellow	Yellow	Grey	Green
Lithuania	Green	Green	Green	Green	Red	Red
Luxembourg	Green	Green	Green	Green	Yellow	Red
Malta	Green	Red	Yellow	Red	Red	Red
Netherlands	Green	Green	Green	Green	Green	Green
Norway	Green	Green	Yellow	Yellow	Grey	Green
Poland	Green	Green	Yellow	Yellow	Red	Red
Portugal	Green	Green	Green	Green	Yellow	Red
Romania	Green	Green	Green	Green	Red	Red
Slovakia	Green	Green	Yellow	Yellow	Red	Red
Slovenia	Green	Red	Yellow	Red	Yellow	Red
Spain	Green	Green	Green	Green	Green	Red
Sweden	Green	Green	Green	Yellow	Yellow	Red
Switzerland	Green	Green	Green	Green	Grey	Green
Turkey	Green	Yellow	Green	Yellow	Grey	Red
United Kingdom	Green	Green	Green	Green	Green	Green

Figura 2.13: Medidas tomadas ante cambio climático por países miembros de la EEA, sector energía, EEA 2019. Extraído de:[13]

Donde: verde significa que está listo/identificado, amarillo en progreso y rojo que no está listo o que no se ha tomado acción.

2.4.4. Adaptation Case Studies in the Energy Sector (Ouranos)

Este documento realizado por una empresa Canadiense presenta casos de estudio de aplicaciones tomadas en diferentes partes del mundo para adaptarse a eventos extremos, los cuales se han visto incrementados por efecto del cambio climático. Para seleccionar estos casos de estudio, primero se revisan una gran cantidad de medidas tomadas en diferentes partes del mundo para luego seleccionar las más asociadas a las necesidades del sector energético de Canadá. Siguiendo esta metodología se puede llegar a un estudio similar en el caso chileno, teniendo una base de alternativas que puedan aportar de diferentes maneras a la resiliencia del sector energético en Chile.

2.4.5. Países posiblemente preparados

En [14], se presenta la tabla mostrada a continuación. En esta, se busca identificar experiencias internacionales que podrían servir como ejemplos a seguir. Los números 1 a 5 hacen alusión a la cantidad de temáticas abordadas en materias de adaptación al cambio climático. La penúltima columna establece un ranking de vulnerabilidad al cambio climático de un total de 192 países, entre más alto es el ranking, más expuesto se encuentra el país a los fenómenos del cambio climático. La última columna indica una selección de países hecha en el informe.

País	EEA 2019	Climate Resilience Policy Indicator	Global Climate Resilience Ranking	Readiness index	Exposure index	Seleccionado
Alemania	5		OK	OK	29/192	Preseleccionado
Australia			OK	OK	133/192	
Bélgica	5				27/192	
Canadá			OK		88/192	
Corea del Sur			OK		177/192	
Dinamarca	3		OK	OK	94/192	
España	5	OK			39/192	Potencialmente
Estonia	4				49/192	
Finlandia	3			OK	97/192	
Francia	4		OK		61/192	Potencialmente
Irlanda		OK			76/192	
Italia	2	OK	OK		94/192	
Japón			OK		166/192	
Luxemburgo	4		OK		6/192	
Noruega	3	OK	OK	OK	55/192	
Países Bajos	5		OK	OK	61/192	Preseleccionado
Portugal	2				57/192	
Reino Unido	5	OK	OK	OK	56/192	Preseleccionado
Singapur				OK	175/192	
Suecia	3		OK	OK	73/192	
Suiza	5		OK	OK	10/192	Preseleccionado
Estados Unidos			OK	OK	134/192	Potencialmente

Figura 2.14: Tabla presentada en informe de Análisis de Infraestructura Resiliente a la Crisis Climática para el Sector Energético Extraído de: [14]

Cabe destacar que son pocos los países que llegan al cinco, significando este que en el país se ha analizado el impacto del cambio climático, se han elaborados planes de adaptación y se han implementado acciones concretas. Siguiendo esto, se confirma la problemática de la inmadurez que existe todavía en el mundo en cuanto a la adaptación al cambio climático.

2.5. Síntesis de Información Presentada

De la información presentada en este capítulo, se logra entender que Chile es un país que se puede ver altamente afectado por eventos de baja probabilidad y alto impacto, tanto por el cambio climático que afecta a todo el mundo hoy en día como por las características geográficas que posee el país. En cuanto a resiliencia, existen ciertas definiciones y avances en esta materia, los cuales se centran principalmente en definir como puede ser identificado el nivel de resiliencia de un sistema, como se puede aportar resiliencia y como es afectado este cuando ocurren ciertos eventos. Sin embargo, no existen todavía estándares a utilizar en esta materia, pero sí propuestas, por lo que no se tiene métricas oficiales para hacer las distintas mediciones. En cuanto al avance tanto nacional como internacional de esta materia, se identifica que mundialmente está reconocida la necesidad de tener sistemas resilientes al cambio climático, al haber metas en cuanto al nivel de resiliencia que se espera tener en un futuro y estudios sobre que tan avanzados están en la materia ciertos países. A pesar de esto, no se presentan planes de como cumplir los objetivos propuestos o que medidas pueden ser tomadas en cada país para lograr las metas que tienen, lo que lleva a entender que a pesar de ya tener identificada la problemática de la falta de resiliencia, falta desarrollo llevar a cabo estas ideas.

Capítulo 3

Metodología

Para llevar a cabo los objetivos propuestos, se propone la metodología descrita a continuación, la cual se puede ver resumida en la estructura vista en la figura 3.1. Primero, se procede a hacer una revisión de fuentes de información, la cual consta de dos componentes centrales. El primer componente está enfocado en la identificación de eventos geoclimáticos extremos que podrían afectar al territorio chileno, esto incluye fenómenos naturales como terremotos, tsunamis, inundaciones, incendios forestales, sequías y otros eventos que, por su magnitud, representan un riesgo significativo para la infraestructura del sistema. Para llevar a cabo esta identificación, se revisan principalmente documentos emitidos por organizaciones gubernamentales e instituciones centradas en el estudio del clima o que mantienen registros históricos de eventos climáticos y geológicos en el país, tales como el Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)², el Instituto para la Resiliencia ante Desastres y ONEMI entre otros. Una vez identificados estos eventos extremos, cada uno es caracterizado en detalle, mencionando sus posibles impactos y los daños que podrían generar en el sistema energético.

El segundo componente de la revisión bibliográfica se centra en la búsqueda de alternativas que contribuyan a mejorar la resiliencia en el sector energético. Para esto se centra la búsqueda en archivos de investigación tales como papers, revistas científicas o casos de estudio específicos realizados alrededor del mundo. Con esto, el objetivo es construir un listado de alternativas que puedan ser aplicadas o adaptadas al contexto chileno, considerando la particular vulnerabilidad del país ante desastres naturales. Siguiendo esto, cada una de estas alternativas es descrita, identificando en que consiste su aplicación y utilidad.

La siguiente etapa del trabajo consiste en la clasificación de la información recopilada en la fase previa. Primero se define el impacto que puedan tener los eventos extremos considerados sobre el sistema energético, utilizando para esto información obtenida de referencias bibliográficas revisadas. Con esto, al reconocer y dividir los distintos sectores que se tienen dentro del sistema energético, se resume como cada uno de los eventos extremos identificados puede afectarlos. De esta manera, se permite la posterior identificación sobre cuales de las medidas de aporte de resiliencia pueden ser adecuadas para combatir cada uno de los eventos.

Una vez definidos los impactos de los eventos sobre el sistema, se procede a clasificar las medidas de aporte de resiliencia encontradas. La primera forma en que se catalogan las medidas es definiendo sobre que eventos puede ser útil la aplicación de la medida en cuestión. Para esto, en primera instancia se examinan referencias bibliográficas que corroboren la utilización

de la medida para contrarrestar los efectos del evento extremo. Luego, si no se encuentran referencias que indiquen lo mencionado, se estudian los efectos del evento sobre el sistema y las características de la medida para definir si esta puede ser de utilidad en contra del evento.

La segunda clasificación a realizar de las medidas es caracterizando cada una de estas según determinados parámetros, dentro de los que se tiene sobre que sector actúan, el costo asociado a estas, el tiempo necesario de aplicación y el enfoque en cuanto a resiliencia que tienen. Por último, se generan comentarios adicionales que sean necesarios para entender la aplicación de las medidas sobre ciertos eventos o supuestos que hayan sido necesarios al momento de realizar las distintas clasificaciones.

Finalizadas las clasificaciones y caracterizaciones correspondientes a las medidas de aporte de resiliencia, se procede a proponer una metodología para evaluar la utilización de estas medidas en casos reales. Esta propuesta metodológica tiene como objetivo el estudiar el empleo de medidas para evitar la pérdida de suministro dentro de zonas que puedan ser afectadas por eventos extremos. La realización de esta metodología tiene como foco su aplicación dentro de Chile, por lo que se utilizan una variedad de herramientas que permita la identificación de zonas posiblemente perjudicadas por eventos extremos, zonas del sistema energético que puedan estar en riesgo y las clasificaciones realizadas en el trabajo.

Por último, se utiliza la información recopilada y la metodología propuesta en la sección anterior para desarrollar casos de estudio dentro de Chile. Para desarrollar estos casos de estudio, se utilizan las herramientas mencionadas en la propuesta metodológica anterior para identificar zonas del país que puedan ser afectadas por los eventos extremos considerados como pertinentes para el estudio. Luego, empleando la información recopilada y clasificada se definen que alternativas pueden ser utilizadas para así finalmente decidir con criterios económicos si es óptima la utilización de estas.

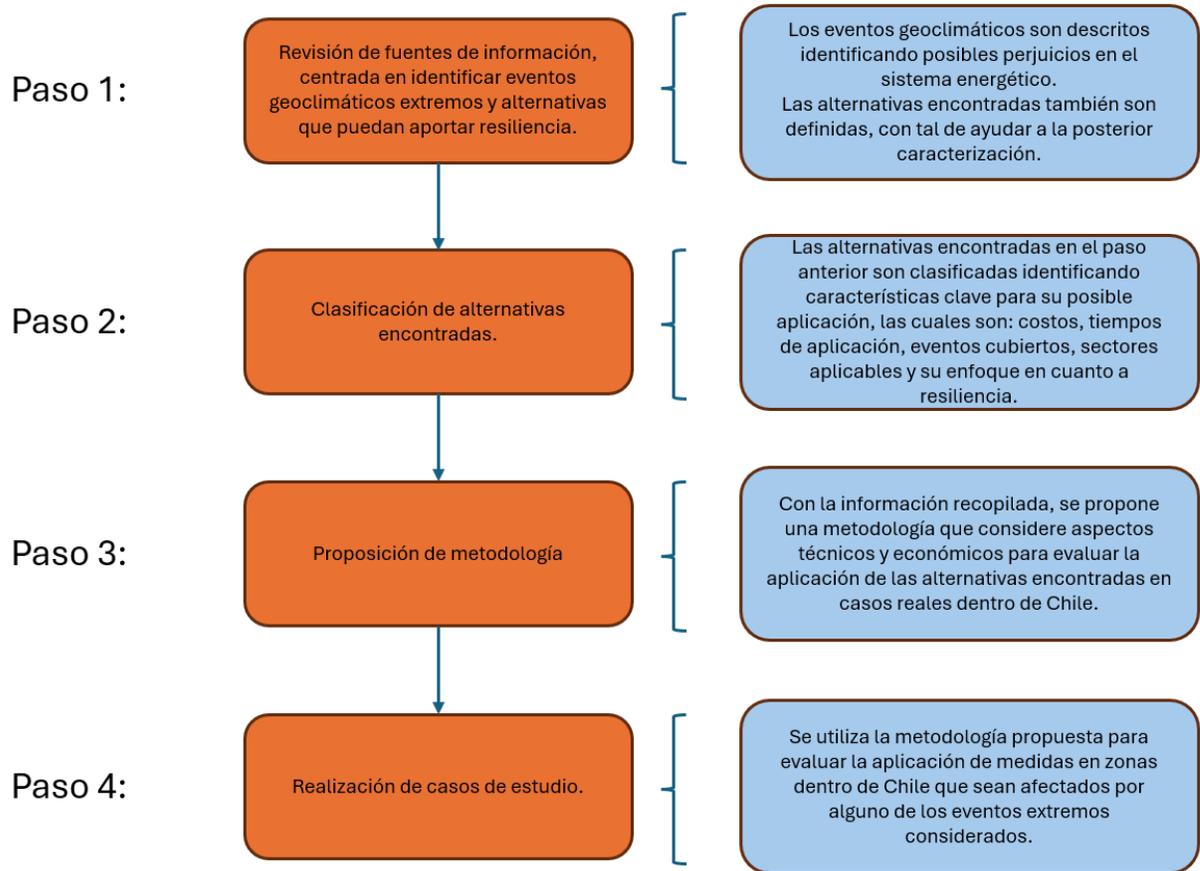


Figura 3.1: Diagrama de flujo, metodología.

Capítulo 4

Revisión de Fuentes de Información: Eventos y Medidas

4.1. Introducción

Para encontrar aplicaciones de resiliencia que puedan ser de utilidad para el sistema energético chileno, lo primero a realizar es un estudio sobre los eventos extremos que puedan afectar al país. De este modo, se pueden definir las posibles necesidades que tenga el sistema y de esta forma realizar la búsqueda de aplicaciones de resiliencia útiles.

En cuanto a la búsqueda de aplicaciones que aporten resiliencia, primero se investigan publicaciones científicas con tal de encontrar alternativas variadas que puedan llegar a ser útiles ante los eventos extremos dados. Luego, se investigan experiencias internacionales en países con avances en materias de resiliencia o países que sean afectados por eventos extremos que también se dan en Chile, para así encontrar medidas posiblemente aplicables en el país.

4.2. Eventos Geoclimáticos Extremos en Chile

Como se menciona en secciones anteriores del trabajo, Chile es un país altamente vulnerable a eventos climáticos dada su gran variedad de geografías y climas, lo que puede significar el país sea afectado por una alta gama de posibles eventos extremos. A raíz de esto, se destaca la importancia de investigar que eventos son los que pueden afectar de mayor manera al territorio o cuales tienen una mayor posibilidad de ocurrir.

En primera instancia, se tiene el gran periodo de sequía el cual ha estado experimentando Chile los últimos años, en específico se tiene registro de que *“a 16 años consecutivos con déficit de precipitación se convierte en el periodo más largo desde que se tiene registros, siendo la década 2011-2022 una de las más secas y cálidas”*[16]. En la figura siguiente se pueden apreciar los diferentes niveles de sequía en el país para el año 2022 y en el periodo 2019-2022.

INDICE COMBINADO DEL MONITOR DE SEQUÍA

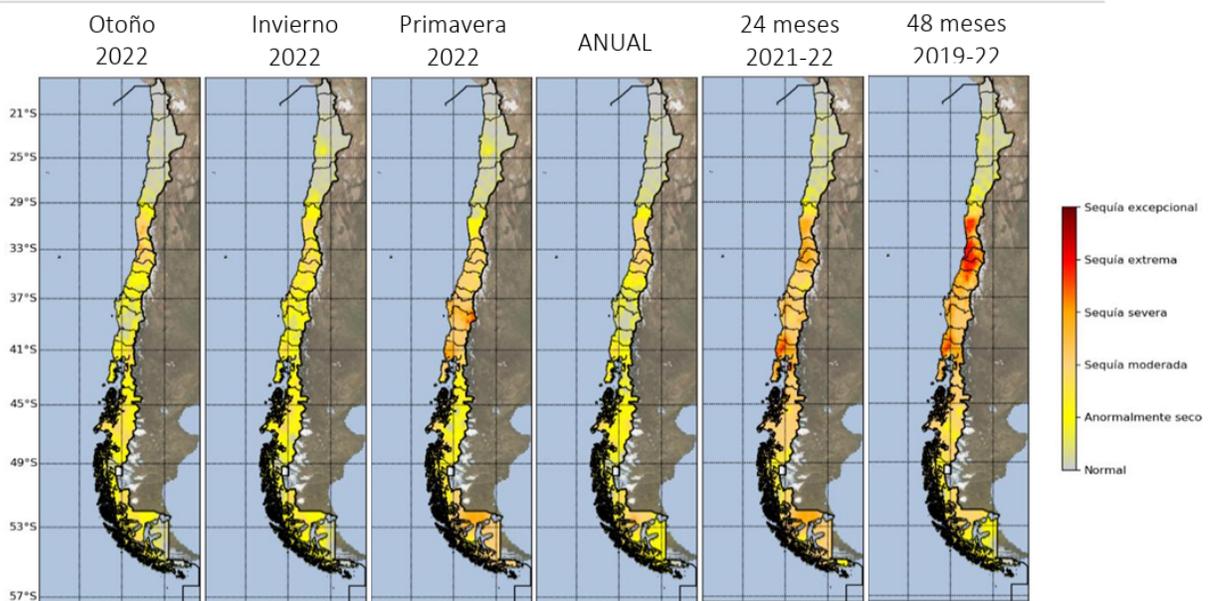


Figura 4.1: Índice de sequía en Chile. Extraído de: [16]

Las ocurrencia de eventos extremos como olas de calor también ha aumentado considerablemente. En solo la última década se han registrado temporadas con hasta 50 olas de calor [16]. Si bien estas pueden ocurrir en todo el territorio nacional, se ven principalmente afectadas las zonas centro-sur, como es mostrado en la figura 4.2 Considerando esto, más el gran periodo de sequías mencionado anteriormente, ha hecho que la cantidad de incendios forestales se de con mucha más frecuencia. En específico, se tiene que en el periodo 2022-2023 hubieron 5980 incendios con un total de 422646.62 hectáreas afectadas [17]. Asimismo, se ha visto un incremento en la ocurrencia de megaincendios en ciertos sectores del territorio nacional, en específico, en Chile entre 1985 y 2018 ocurrieron 22 megaincendios, 16 de los cuales fueron entre 2010 y 2018 [18]. En la figura 4.3 se aprecia esto junto con el área quemada en distintos periodos, con lo que se puede destacar nuevamente el gran efecto que ha tenido el cambio climático en la frecuencia y severidad de estos eventos.

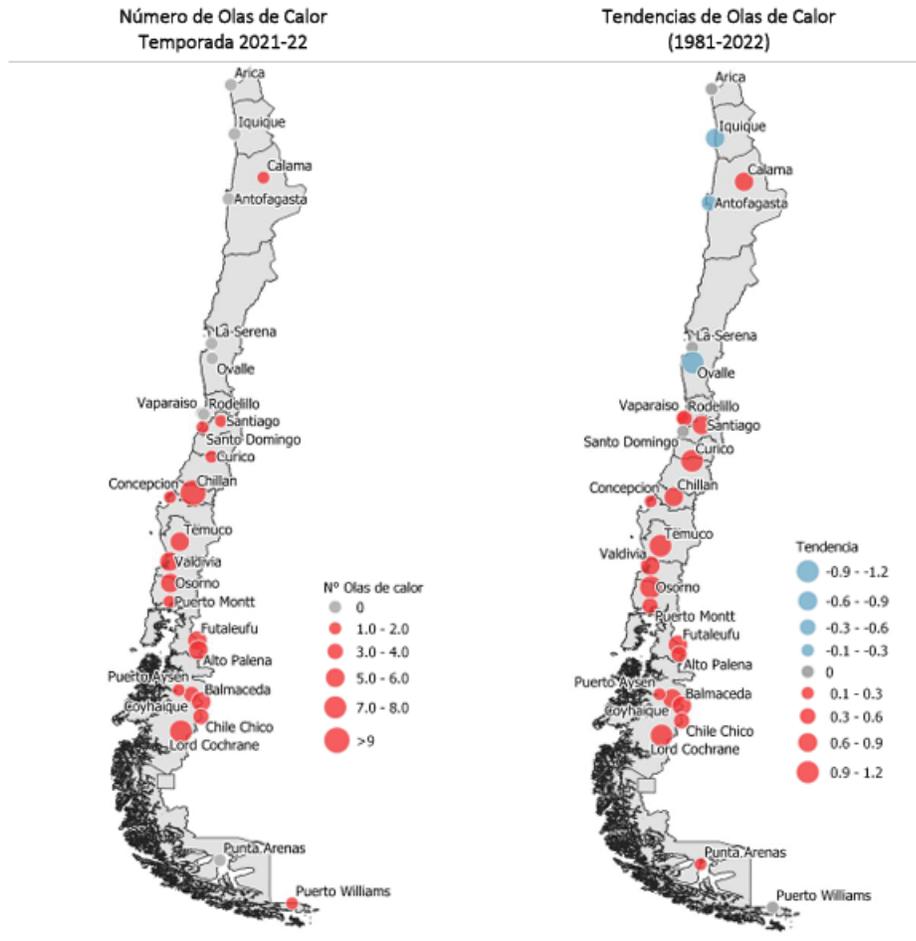


Figura 4.2: Olas de calor en Chile. Izquierda: temporada 2021-2022. Derecha: tendencia de olas de calor entre 1981-2022. Extraído de: [16]



Figura 4.3: Megaincendios en Chile 1985-2018. Extraído de: [18]

La Dirección Meteorológica de Chile genera boletines anuales sobre eventos extremos ocurridos en el país durante cada uno de los meses del año. En estos, se destaca que en los últimos años, a pesar de no mencionarse en la bibliografía revisada antes en esta sección, se tienen granizos y lluvias torrenciales en variadas épocas del año. Por consiguiente, estos también son considerados en cuanto al estudio de eventos extremos, ya que también se pueden dar con frecuencia en distintos sectores de Chile. Si bien se tiene registro de que estos eventos pueden ocurrir en distintas partes del país, acontecen principalmente en las zonas centro y sur.

Por otro lado, son considerables terremotos y tsunamis, a pesar de no deberse a eventos extremos ocasionados por el cambio climático. Chile al estar situado en el cinturón de fuego y poseer costa a lo largo de todo su territorio es muy susceptible a sufrir por estos eventos, tal como ha ocurrido en deliberadas ocasiones en el pasado, destacando por ejemplo los terremotos de 1960 y 2010 que alcanzaron magnitudes de 9.5 MW y 8.8 MW respectivamente.

Además de las olas de calor, se tienen proyecciones sobre alzas de temperaturas en el periodo 2035-2065 con aumentos de los 1.15°C a los 2°C con respecto al periodo histórico 1980-2010. Con esto se espera que la acumulación de nieve en las zonas precordilleranas y fiordos del extremo sur pueda disminuir hasta en un 100 % [4], cosa que eleva altamente el riesgo de inundaciones. En la Política Nacional para la Reducción del Riesgo de Desastres se tiene registro de los eventos extremos más importantes que han afectado al país hasta 2017, en donde los principales en los últimos años son incendios, terremotos y aluviones.[19] Con esto se corrobora el peligro de los incendios y terremotos mencionados anteriormente y se suma el peligro de los deshielos ante el posible aumento de aluviones por estos.

En el Instituto para la Resiliencia ante Desastres se guarda registro de distintas amenazas que han afectado al país, en específico, tiene registro de actividad volcánica, incendios forestales, remociones en masa, terremotos y tsunamis. Para estos tiene una variedad de datos específicos para cada amenaza, entre los que pueden destacar mapas de amenaza, catastros históricos o cicatrices producidas por los eventos.[20]

Por último, en el Plan de Adaptación al Cambio Climático para el Sector Energía[2] se hace referencia a los eventos extremos que pueden afectar el territorio chileno. Acá además de mencionar los anteriores, se incluye la ocurrencia de vientos extremos, marejadas e inundaciones.

Utilizando la información anterior, se genera un conjunto de eventos extremos que pueden afectar en mayor manera a Chile. Adjuntando esta información con lo indicado por las figuras 2.4 y 2.5, se entiende como afectan los eventos mencionados en los párrafos anteriores al sistema eléctrico. Como resultado, se genera el listado que se muestra a continuación de los principales eventos extremos que pueden afectar el sistema chileno, junto con una breve descripción de sus efectos negativos y del porque pueden tener estos efectos.

Olas de calor: Tal como se muestra en las figuras mencionadas, los sistemas de generación en general tienen una reducción en la eficiencia, al poder afectar los sistemas de enfriamiento de distintos generadores, afectar la conversión de energía o afectar la resistencia eléctrica de elementos de electrónica de potencia. También se espera un aumento de la demanda de frío al ocurrir olas de calor, lo que puede forzar el sistema sumado los otros elementos perjudicia-

les. Por último, el aumento de temperatura durante olas de calor genera un aumento en la resistencia eléctrica de elementos tales como líneas de transmisión o cables de subestaciones, lo que genera la disminución de capacidad mencionada en las figuras.

Incendios: En primera instancia, se tiene que afectan principalmente a plantas solares y eólicas disminuyendo el factor de planta de estas, efecto que ocurre por el humo y ceniza que los incendios generan, reduciendo la radiación solar que llega a los paneles y afectando el rendimiento de las turbinas afectando la velocidad y densidad del viento. Por otro lado, los incendios pueden generar daños en toda zona que se generen, produciendo especial peligro en elementos que se encuentren cercanos a árboles, arbustos o zonas boscosas en general. En específico, se considera el posible daño a los sistemas de transmisión, al cubrir mayores áreas y estar más expuestos a zonas boscosas, por lo que un incendio forestal puede significar grandes costos al existir la posibilidad de tener que reemplazar grandes secciones de conductores, varias torres de transmisión o incluso elementos importantes de subestaciones.

Granizos, lluvias torrenciales y nevazones: Se tiene un deterioro en el funcionamiento de paneles solares (con posibles daños en el caso de los granizos) y un aumento en la demanda dado por la necesidad de calefacción de los hogares. También se espera que estos eventos extremos puedan generar daños en líneas de transmisión o subestaciones, generando cortocircuitos y ayudando a posibles inundaciones en zonas de peligro.

Terremotos: Tal como se menciona, Chile es un país con alto riesgo ante terremotos. En el caso de un siniestro de gran magnitud, el sistema eléctrico se puede ver altamente comprometido, no solo por daños directos al sistema, si no que también por elementos externos que puedan caer en este como árboles o muros sobre líneas, postes o subestaciones. Además, se suma el riesgo de que se generen remociones en masa, posiblemente dañando principalmente los mismos componentes indicados antes. Considerando esto mismo, estos eventos pueden imposibilitar la utilización de caminos, haciendo que sea imposible abastecer ciertas zonas e impidiendo en caso de ser necesario el abastecimiento de combustible.

Tsunamis: Debido a la gran tendencia de Chile a sufrir terremotos, se tiene como consecuencia que exista de la misma forma riesgo ante tsunamis. Estos, pueden causar un gran daño a todos los elementos del sistema que se encuentren cercanos a la costa, además de poder generar inundaciones en zonas de riesgo y dejar puertos importantes para la descarga de combustibles deshabilitados.

Remociones en masa: Dentro de las remociones en masa se pueden identificar eventos como aluviones que se refieren a flujos principalmente líquidos u otros eventos como caídas y deslizamientos de material sólido. No se ven en el diagrama de impacto de efectos climáticos, pero dada la naturaleza de estos eventos se puede esperar que los principales perjuicios que puedan generar sean cortocircuitos dados por daños en líneas de transmisión o destrucción de postes, además de generar daños en subestaciones o generadores dependiendo de la zona de impacto. Esto se explica por los posibles daños y la fuerza que pueden tener estos eventos, al desplazar una gran cantidad de material, que pueden dañar fácilmente los elementos del sistema mencionados.

Sequías: Si bien las sequías se pueden describir como una tendencia climática más que un

evento extremo, se incluyen dado el gran efecto que tienen en Chile. Esto por el gran periodo de sequía por el que se está pasando y por la gran importancia que tiene el agua en el sector energético, al haber un gran porcentaje de generación hidroeléctrica y al ser utilizada el agua para poder enfriar centrales térmicas.

Vientos extremos: Tal como se presenta en el diagrama de efectos climáticos, los vientos extremos pueden afectar positivamente a los generadores eólicos si se mantienen dentro de rangos aceptables, ya que si superan cierta velocidad podrían pasar los límites de diseño del aerogenerador dañándolo. También se ve que pueden afectar positivamente el factor de planta de generadores solares, ya sea por mover elementos que puedan estar tapándolos como por bajar la temperatura ambiente, sin embargo vientos muy fuertes pueden arrastrar objetos que puedan golpear y dañar los paneles. En cuanto a los sistemas de transmisión y distribución, los vientos extremos pueden causar daños por la misma razón, al botar árboles, sus ramas u otros objetos que puedan dañar tanto líneas como elementos de una subestación.

Marejadas: Las marejadas si bien pueden no afectar en gran parte el sistema eléctrico a menos que se trate de elementos muy cercanos a la costa, puede impedir que se realice la descarga o carga en puertos, lo que en el caso de generadores convencionales puede significar que se imposibilite la descarga de combustible y queden fuera de servicio. Dependiendo de la geografía del terreno, las marejadas podrían posiblemente generar inundaciones en subestaciones muy cercanas a la costa.

Inundaciones: Causadas principalmente por otros eventos extremos, tales como tsunamis o lluvias torrenciales, es importante mencionarlas dado el posible daño que estas pueden generar. Las inundaciones afectan principalmente a subestaciones, al poder infiltrarse en ciertos equipos y dañarlos, pudiendo generar un daño prolongado al no poder arreglarse hasta liberarse del agua. Además, pueden generar daños en zonas de líneas soterradas si se llega a infiltrar agua.

Tormentas de arena: A pesar de no nombrarse previamente, en [21] se presenta este evento, el cual se ha dado últimamente en la zona norte del país. Si bien no se posee mucha información sobre la formación de tormentas de arena en Chile, se entiende que este puede afectar enormemente la producción de energía de plantas solares, al tapar la luz solar y dejar las celdas solares cubiertas de arena. También se puede esperar que generen daños en centrales eólicas o sistemas de transmisión o distribución por las mismas razones que los vientos extremos.

4.3. Identificación de Medidas para Mejorar Resiliencia

Para identificar medidas que contribuyan resiliencia al sistema energético, la búsqueda se estructura en dos categorías. Primero, se estudian documentos de investigación tales como papers o revistas científicas, los cuales aborden la aplicación de medidas que aporten resiliencia o el estudio sobre diferentes medidas posiblemente aplicables. Para esto, se utilizan principalmente las bases de datos de *IEEE*, *ScienceDirect* y referencias encontradas en estas

fuentes. En segunda instancia, se revisan antecedentes internacionales sobre países que estén avanzados en materias de resiliencia, tales como los que se mencionan en las figuras de **Antecedentes Internacionales**, así como países que sean afectados por los eventos extremos que se dan en Chile.

4.3.1. Revisión de Literatura Internacional

A continuación se resume parte de la información presentada en [15], [22], [23] y [24], en donde se presenta un conjunto de medidas que aportan resiliencia de la infraestructura y del servicio para brindar apoyo al sistema. Entre estas se encuentran las presentadas a continuación:

Tabla 4.1: Resumen medidas de resiliencia de infraestructura

Resiliencia de la infraestructura	
Elevación de subestaciones	Poda de árboles y mantenimiento de vegetación cercana
Presencia de instalaciones con capacidad de arranque en negro	Soterramiento de líneas de transmisión/distribución
Movilización de equipos de reparación	Mejora de postes con materiales más robustos

Elevación de subestaciones: La utilidad de elevar subestaciones esta principalmente en evitar daños por agua que puedan darse por eventos que generen inundaciones. Se concentra en construir estructuras para elevar cada uno de los componentes presentes en la subestación.

Presencia de instalaciones con capacidad de arranque en negro: A diferencia del caso anterior, acá se tiene una alternativa que ayuda al sistema a ponerse de pie después de un apagón, el cual puede haber sido ocasionado por un evento crítico tal como por otras fallas en la red. Esto permite tener una alternativa que no solo aporta resiliencia sino que también puede ser útil en otras circunstancias.

Movilización de equipos de reparación: Útil para todo evento crítico que genere daños en el sistema. Tener un sistema eficiente para movilizar equipos de reparación que a su vez estén efectivamente preparados para responder ante daños específicos puede agilizar la reposición del sistema ante desastres.

Poda de árboles y mantenimiento de vegetación cercana: Medida simple que puede ayudar a evitar daños por incendios en el sistema o evitar la caída de árboles o vegetación sobre líneas de transmisión.

Soterramiento de líneas de transmisión/distribución: Al soterrar las líneas se evitan todos los posibles daños de estas, tanto por caída de postes, incendios o elementos que puedan caer sobre ellas.

Mejora de postes con materiales más robustos: Principalmente útil ante eventos que puedan generar un daño directo en las estructuras como terremotos, tsunamis o remociones en masa.

Tabla 4.2: Resumen medidas de resiliencia del servicio

Resiliencia del servicio	
Sistemas de almacenamiento móviles	Sistemas de monitoreo avanzados
Gestión de la demanda	Asegurar funcionalidad de comunicaciones
Operación en isla	Planificación de reservas
Generación Distribuida	Lineas de transmisión redundantes
Coordinación con redes adyacentes	

Sistemas de almacenamiento móviles: Pueden ser de gran utilidad ante cualquier evento que cause destrucción de parte del sistema eléctrico, como caída de parte del sistema de transmisión, daño a alguna subestación o si se inhabilita la generación de cierta central, al poder brindar energía en donde sea necesitada. La localización en donde se mantienen estos sistemas debería ser en cargas críticas, en caso de haber daños que imposibiliten su movilización. Acá cabe mencionar también los sistemas de almacenamiento convencionales, que pueden cumplir la misma función estando bien situados, pero sin la flexibilidad que aporta el que sean móviles.

Gestión de la demanda: El gestionar la demanda puede dar mayor flexibilidad al operador del sistema, como por ejemplo reduciendo la demanda en horas de punta. Esto puede proporcionar una mejor capacidad de responder ante eventos imprevistos o puede ayudar a prepararse en caso de que se espere algún evento en el futuro cercano.

Operación en isla: El preparar una zona para que pueda operar en isla puede ayudar a que esta resista una gran variedad de eventos extremos que puedan cortar el suministro por un periodo prolongado de tiempo. Con esto, la resiliencia del servicio de zonas que tengan las capacidades de implementar esto podría aumentar considerablemente, al no depender de que el resto del sistema sea protegido de eventos extremos.

Generación distribuida: La implementación de generación distribuida puede significar un gran apoyo para distintas partes de la red. Esto porque al poder situarse en lugares de cargas críticas o zonas poco enmalladas, es capaz de mantener el suministro energético en caso de cualquier falla, destrucción en el sistema de transmisión dado por algún evento extremo o por falta de capacidad por condiciones climáticas. A este apartado se le puede añadir el uso de sistemas de almacenamiento, ya que pueden funcionar de manera parecida y como un implemento extra de ayuda a la generación distribuida. Esto porque de igual manera pueden ayudar a mantener el suministro al cargarse previamente o utilizarse en conjunto con la generación distribuida para no cargar más el sistema en las zonas donde se incluya.

Coordinación con redes adyacentes: Dependiendo la localización de la conexión y que tantas líneas se tengan destinadas a esta conexión puede ayudar ante diferentes even-

tos. Puede ser eficaz en casos de líneas congestionadas por reducción de capacidad o brindar apoyo en el caso de falta de capacidad de generación o falla de alguna línea. Para aplicarse, estudios con simulaciones de flujos de potencias deben ser necesarios.

Sistemas de monitoreo avanzados: El desarrollo de sistemas de monitoreo puede brindar una gran cantidad de información con respecto al estado del clima y con esto sobre eventos que puedan ocurrir. Esto puede ayudar a la toma de decisiones en cuanto a como operar el sistema y así estar mejor preparado para cuando ocurran los eventos críticos.

Asegurar funcionalidad de comunicaciones: Al igual que en el caso anterior, el tener buenos sistemas de comunicación puede ayudar al operador del sistema a mantener mejor control sobre la red. Al mezclar un buen sistema de comunicaciones con otros elementos que permitan controlar el sistema el operador del sistema puede prepararse para eventos críticos. El tener canales de comunicación asegurados puede ayudar ante eventos que generen caos entre la población o ante eventos que también puedan afectar negativamente las redes de comunicación, como terremotos o grandes tormentas.

Planificación de reservas: El tener reservas adicionales para algún caso extremo, independiente de la operación del sistema, puede ayudar en el caso de alguna falla dada por un evento crítico. Esto puede ayudar brindando una respuesta rápida ante alguna emergencia, además de ser útil en caso de que la zona cubierta por la reserva quede operando en isla posteriormente al evento. Sin embargo, el considerar reservas para eventos de poca probabilidad puede ser poco beneficioso para la operación normal del sistema, por lo que puede ser una opción no tan beneficiosa en comparación de otras, dependiendo de los efectos negativos que se deseen evitar.

Líneas de transmisión redundantes: Desarrollar un sistema más enmallado genera confiabilidad además de resiliencia. Se tienen vías adicionales que son provechosas ante cualquier evento que cause daños en el sistema de transmisión o distribución, las cuales no necesariamente tienen que estar constantemente conectadas. Con esto se podría conseguir no afectar negativamente los flujos por las líneas que se utilizan normalmente.

4.3.2. Revisión de Experiencias Internacionales

En primera instancia, se revisan medidas de adaptación propuestas por países u organizaciones como alternativas para prevenir o soportar eventos extremos. Luego, se revisan casos de estudio donde se aplican algunas medidas de aporte de resiliencia, tanto mencionadas en este documento como propuestas nuevas, con tal de poder tener ejemplos de aplicación posiblemente útiles o estudiar las nuevas medidas aplicadas.

4.3.2.1. Medidas de Adaptación

- **Opciones de adaptación para las redes e infraestructuras de transporte y distribución de electricidad**[25]: Se menciona el soterramiento de líneas mencionado anteriormente y además se consideran medidas que aportan resiliencia de la infraestructura para enfrentarse a aumentos de temperatura u olas de calor. Dentro de estas medidas se tiene: la instalación de postes de líneas eléctricas más altos para contrarrestar

el pandeo y el aumento de la temperatura mínima de diseño de líneas eléctricas. Dada la gran ocurrencia de olas de calor en el territorio chileno, lo cual en casos extremos podría causar cortes intempestivos de servicio, la implementación de este tipo de adaptaciones puede ser de utilidad en Chile.

- **Establecimiento de sistemas de alerta rápida**[26]: Con una buena base científica de estaciones meteorológicas e hidrológicas, los sistemas de alerta rápida pueden ayudar a prevenir daños o recuperar el sistema ante una gran cantidad de eventos extremos, al permitir que se tomen decisiones clave para responder ante este. En Chile al poder ocurrir una gran variedad de eventos extremos el tener estos sistemas puede disminuir considerablemente el tiempo que se mantenga cualquier tipo de falla.
- **Reducción del consumo de agua para la refrigeración de las centrales de generación térmica**[28]: El enfriar las centrales térmicas mediante el uso de agua genera un gasto muy grande de esta, además de poder generar grandes daños en el medio ambiente. En un contexto de sequía esto puede ser muy perjudicial e incluso puede no tenerse la capacidad de agua para poder realizar el enfriamiento. Por esto se proponen los siguientes métodos de enfriamiento: enfriamiento mediante torres de recirculación, que si bien también utiliza agua, retira mucha menos que el uso de sistemas de un solo uso. Enfriamiento en seco, el cual se basa en aire como base del enfriamiento, lo que disminuye el uso de agua al mínimo, pero utilizando parte de la energía de la planta para impulsar los ventiladores necesarios. Todos estos sistemas de enfriamiento son menos eficientes que la utilización de agua de paso. Considerando el caso chileno, al existir una sequía importante y depender todavía fuertemente de centrales de generación térmica, la disminución de uso de agua puede significar una gran diferencia ante la toma de decisiones sobre que centrales despachar, sin embargo el costo adicional de cambiar el sistema de enfriamiento de una planta puede disminuir los incentivos de este tipo de aplicaciones.
- **Construyendo resiliencia del sistema eléctrico con sistemas de almacenamiento de bombeo de agua**[29]: En Australia se propone el tener a disposición un portafolio de sistemas de almacenamiento de diferentes duraciones. Teniendo los sistemas de almacenamiento comunes de 6 a 8 horas para complementar la energía solar y sistemas de almacenamiento que puedan almacenar energía durante grandes periodos de tiempo. El propuesto acá, permitiría desplazar el uso del agua por temporadas, de esta forma teniendo principalmente un seguro en contra de sequías. En Chile se tiene una importante fracción de generación hidroeléctrica, por lo que podría ser posible la implementación de sistemas de almacenamiento de este calibre en ciertas zonas, sin embargo necesitaría de estudios adicionales para analizar la factibilidad de la realización de un proyecto de tal calibre.

4.3.2.2. Casos de Estudio

Mejorar la resistencia a las inundaciones mediante la construcción de muros contra inundaciones (Reino Unido, segmento distribución y transmisión)[30]: Acá se implementan medidas tales como: barreras contra inundaciones, medidas portátiles de defensa contra inundaciones, terraplenes de tierra, puertas y compuertas, sistemas de drenaje y

estaciones de bombeo. En subestaciones más grandes se construye un muro de contención en el perímetro de todo el terreno. Para implementar en Chile se necesitaría realizar un cruce entre mapas del sistema eléctrico (especificando localizaciones de subestaciones con riesgo de inundación) y entre mapas de riesgo climático (como por ejemplo los que se encuentran en el Atlas de Riesgo Climático).

Adaptando líneas aéreas en respuesta del incremento de temperatura en Reino Unido (Reino Unido, segmento distribución y transmisión)[31]: En Reino Unido al igual que en Chile, se espera un aumento en la frecuencia de olas de calor dado el cambio climático, lo que hace que estas se expandan y por ende pandeen, provocando que tengan mayor probabilidad de chocar con elementos que estén cerca de las líneas. La implementación más costo efectiva para resolver este problema fue aumentar la temperatura mínima de diseño de líneas nuevas y elevar los postes de líneas existentes, contrarrestando este posible pando. En Chile podría ser implementada bajo la justificación de que evita posibles cortes de suministro y con esto se empeore la calidad de servicio, lo que motivaría a empresas distribuidoras a realizar este posible cambio.

Mejora de resiliencia de cadena de suministro de combustible de biomasa (Reino Unido, segmento generación)[32]: Las crecientes marejadas ocasionadas por tormentas e inundaciones costeras significan un impacto muy grande para la infraestructura de los puertos. Esto afecta en gran manera a generadores que reciban su combustible mediante transporte marítimo. Por esto, Las soluciones empleadas han sido barreras o compuertas contra marejadas y embarcaderos. En el caso chileno puede que se necesiten soluciones mas robustas por el riesgo de tsunamis, pero pueden seguir los mismos principios. Además, se adoptó el uso de una estrategia de multi-puertos, en la cual se utilizan varios terminales para recibir la biomasa, con tal de no ser afectados de gran manera si alguno es comprometido.

Sistemas de Alerta Temprana Basado en Imágenes Satelitales y Monitoreo in situ[33]: Se plantea el ejemplo de un programa de observación de la Tierra de la Unión Europea llamado “Copernicus”, este puede recoger una gran variedad de variables climáticas, lo que ayuda a una toma temprana de decisiones y de esta forma ayudar a la resiliencia del sistema previniendo futuros eventos críticos. Si bien en Chile no existe ninguna herramienta de este nivel de detalle, el contar con su existencia aporta a tener visiones futuras sobre sistemas posiblemente implementables, que podrían aportar de la misma manera en el país, considerando sus pertinencias.

Construyendo resiliencia al fuego utilizando agua reciclada (España)[34]: Se construye una estructura hidráulica para tomar aguas residuales, tratarlas y repartirlas por zonas de peligro de incendio. Estas se utilizan en caso de incendio y para el riego de “cortafuegos verdes”. Estos cortafuegos verdes son el fuerte de esta medida, los cuales son cinturones hechos con árboles muy poco inflamables y con buenas propiedades estructurales para detener el viento. Para la aplicación de este proyecto puede que la estructura para tomar y repartir aguas residuales puede que sea de muy gran magnitud, pero el uso de cinturones verdes puede formar un gran aporte para defender partes del sistema eléctrico situadas en zonas de riesgo de incendio. Dado que Chile es un país altamente afectado por incendios forestales, además de tener grandes extensiones de territorio, la implementación de cinturones verdes puede ser de utilidad en zonas rurales.

Enfriamiento distrital: Una alternativa de enfriamiento ahorradora de energía (Austria)[35]: En ciertas zonas de gran demanda energética, como hospitales u hoteles, se están utilizando máquinas de refrigeración por absorción de calor. Estas utilizan calor (puede ser residual de algún otro proceso) en vez de electricidad para producir la refrigeración. Estos centros de refrigeración luego de ser instalados pueden ser alimentados por una red de calefacción distrital, bajando la demanda eléctrica y beneficiando al sistema en condiciones críticas como la ocurrencia de olas de calor. En zonas de Chile que sean mayormente afectadas por altas temperaturas puede tener un mayor atractivo la utilización de este tipo de medidas, esto dado que ante la posible ocurrencia de una ola de calor, los usuarios pueden ser más perjudicados. Por esto, dentro de distritos en la zona norte del país puede haber una mayor probabilidad de aplicar esta medida.

Capítulo 5

Propuesta Metodológica: Clasificación y Aplicación

5.1. Introducción

En el capítulo presente, se expone la sección principal del trabajo realizado. Primero se presenta una breve caracterización de los eventos extremos identificados, con tal de indicar sectores afectados y daños. Luego, se detallan las clasificaciones hechas con tal de caracterizar exhaustivamente cada una de las medidas descritas en el capítulo anterior. En esta sección se revisan referencias para determinar contra que eventos pueden útiles ser las medidas encontradas, así como para definir costos y tiempos de aplicación. Además, se clasifican en sectores aplicables, enfoques y se hacen comentarios sobre la aplicabilidad y funcionamiento de estas.

5.2. Efecto de Eventos Extremos Considerados

Para evaluar cómo las medidas identificadas pueden contribuir a la resiliencia del sistema, lo primero a considerar son los sectores afectados por cada uno de los eventos. Esto se detalla con mayor profundidad en el capítulo anterior, por lo que en esta sección se presenta un resumen en la tabla 5.1 con esta información, en la cual se definen sectores específicos representantes del sistema energético y se incluye que impacto puede tener el evento extremo en el sector dado. Para esto se utiliza parte de la información mostrada en las figuras 2.4 y 2.5 y se revisa la información disponible en [2]. En los casos en que no se cuenta con una referencia específica, se realiza un análisis propio, considerando el efecto físico del evento y evaluando su impacto en los componentes del sistema, comparando este con eventos de los que sí se dispone información. Este análisis, se basa en identificar el efecto físico realizado por el evento en cuestión, comparando este efecto con el del algún evento del que si se tenga una referencia o estudiando como puede afectar a los distintos sectores.

Tabla 5.1: Resumen de eventos y efectos en sistema

Evento	Generación		Transmisión		Demanda	Combustible
Olas de Calor	Térmica, Nuclear, Biomasa, Solar	Reducción eficiencia	Línea, Subestación	Reducción Capacidad	Incremento demanda frío	
	Térmica ciclo abierto	Desconexión intempestiva				
Incendios	Solar, Eólica	Reducción factor de planta	Línea	Reducción Capacidad, Cortocircuito		No abastecimiento por daño a caminos
Granizos, lluvias torrenciales, nevazones	Hidroeléctrica	Incremento factor de planta	Línea, Subestación	Cortocircuito	Incremento demanda calor	No abastecimiento por daño a caminos
	Solar, Eólica	Reducción factor de planta Desconexión intempestiva				
Terremotos			Línea, Subestación	Cortocircuito		Daño de oleoductos Daño de gaseoductos No abastecimiento por daño a caminos
Tsunamis	Térmica, Nuclear, Biomasa	Desconexión intempestiva	Subestación	Cortocircuito		No abastecimiento por daño a puertos Daño de oleoductos Daño de gaseoductos
Remociones en masa	Térmica, Nuclear, Biomasa	Desconexión intempestiva	Línea, Subestación	Cortocircuito		No abastecimiento por daño a caminos
Sequías	Térmica, Biomasa, Nuclear, Solar	Reducción eficiencia	Línea	Reducción Capacidad		
	Hidroeléctrica	Reducción factor de planta				
Vientos extremos	Solar, Eólica	Incremento factor de planta	Línea, Subestación	Cortocircuito		Cierre de puertos
	Eólica	Desconexión intempestiva				
Marejadas			Subestación	Cortocircuito		Cierre de puertos Daño de oleoductos Daño de gaseoductos
Inundaciones	Térmica, Nuclear, Biomasa, Hidroeléctrica	Desconexión intempestiva	Subestación	Cortocircuito		
	Hidroeléctrica	Reducción factor de planta				
Tormentas de arena	Solar, Eólica	Reducción factor de planta	Línea, Subestación	Cortocircuito		

5.3. Clasificación de Medidas

A continuación se presentan tablas resumen que contienen los eventos extremos previamente mencionados junto con las alternativas de aporte de resiliencia, clasificadas en medidas que aportan resiliencia de infraestructura y del servicio. Se indica qué medidas pueden ser efectivas para mitigar cada uno de los eventos analizados, lo cual se hace considerando el efecto del evento sobre el sistema, el aporte de las medidas en cuanto a resiliencia y la efectividad de funcionamiento de las alternativas bajo efecto del evento en cuestión. En las tablas, se indica con un \checkmark si se tiene una referencia que ratifique que la medida sea de utilidad contra el evento en cuestión y con un $*$ si dadas las características del evento, la medida puede ser útil pero no se tienen referencias que indiquen esto, cosa que se deja a criterio del autor. Las medidas dejadas a criterio del autor son definidas comparando los impactos de eventos de los cuales no se tiene referencia con aquellos que si.

Tabla 5.2: Eventos extremos vs medidas de resiliencia de infraestructura

	Olas de Calor	Incendios	Granizos, Tormentas, Nevazones	Terremotos	Tsunamis	Remociones en masa	Sequías	Vientos Extremos	Marejadas	Inundaciones	Tormentas de Arena
Poda de arboles/ [25] vegetación	✓	✓	✓					✓			
Soterramiento de líneas [36]		*	✓			*		✓			*
Mejora de postes [37]			✓	*	*	*		✓			*
Elevación de subestaciones [38],[39]					*	*			✓	✓	
Elevar postes [31]	✓	✓									
Aumentar temperatura de diseño mínima de líneas [31]	✓	✓									
Reducción de uso de agua para enfriamiento [28]							✓				
Almacenamiento de bombeo de agua [29]	✓						✓				
Muros contra inundaciones [30],[40]					✓				*	✓	
Cinturones verdes [34]		✓						*			
Instalaciones con arranque en negro			*	*	*	*		*		*	*
Movilización de equipos de reparación [42]			✓	*	*			*			

Tabla 5.3: Eventos extremos vs medidas de resiliencia del servicio

	Olas de Calor	Incendios	Granizos, Tormentas, Nevazones	Terremotos	Tsunamis	Remociones en masa	Sequías	Vientos Extremos	Marejadas	Inundaciones	Tormentas de Arena
Gestión de la demanda [41]	*	*	*	*		*		✓		*	*
Lineas redundantes	*		*	*		*		*			*
Operación en isla		*	*	*		*		*			*
Sistemas de monitoreo avanzados [33]	✓	*	✓					✓	*		*
Asegurar funcionalidad de comunicaciones			*	*	*			*			
Planificación de reservas	*	*	*	*		*	*	*	*		
Sistemas de alerta rápida [26] [27]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	*
Sistemas de almacenamiento móviles [42]	*	*	✓	*	*	*		*		*	
Generación distribuida	*	*	*	*		*		*			*
Coordinación con redes adyacentes		*	*	*		*		*			
Enfriamiento distrital [35]	✓										

Para completar la caracterización de las medidas encontradas, se realizan estimaciones de costos y tiempos de aplicación de estas. Para lograr esto, primero se revisan las medidas aplicadas previamente en otras partes del mundo, con lo que se obtienen valores de referencia esperables sobre medidas útiles en Chile. Luego, en medidas donde no se encuentren referencias que indiquen las características buscadas, se llevan a cabo estimaciones sobre el dimensionamiento de estas. Dado que no se poseen referencias con descripciones precisas sobre estas medidas, este dimensionamiento no cuenta con cálculos exactos y puede omitir factores adicionales que no son considerados. Estos se realizan principalmente con el objetivo de obtener órdenes de magnitud aproximados que sirvan como aproximaciones y referencias iniciales al comparar alternativas. El dimensionamiento de estas medidas se realiza principalmente considerando el tamaño, materiales necesarios, posicionamiento de estructuras necesarias y la relación con elementos conocidos (por ejemplo, para el costo de líneas redundantes se considera el costo de construcción de una línea, pero aumentado por no estar

posicionada óptimamente como la línea que se desea apoyar). Además, se incluyen los sectores beneficiados del sistema energético por cada una de las medidas y de que forma realizan el aporte de resiliencia, lo que permite un mejor contraste de los sectores afectados por los eventos extremos. En la tabla siguiente se muestran las aproximaciones de costos y tiempos de aplicación encontradas, junto con los sectores aplicables y el enfoque en cuanto a resiliencia de la medida. Los sectores aplicables indicados son Gx: Generación, Tx: Transmisión, Dx: Distribución, A:Almacenamiento, C:Combustibles, AEP: Apoyo Extra Preventivo. Las referencias utilizadas se ven en la tabla posterior. Se incluye un \emptyset si no se encuentra una referencia fiable para la información.

Tabla 5.4: Clasificación según características de medidas.

Medida	Costo	Tiempo	Sector Aplicable	Enfoque
Poda de arboles	2.7 [MUSD/Km]	2 [semanas/Km]	Tx,Dx	Preventivo
Lineas soterradas	5.9 [MMUSD/Km]	> 1 [mes/Km]	Tx,Dx	Robustez
Mejora de postes	Concreto 19.2 [MUSD/Km] Metal 13.8 [MUSD/Km]	3 [semanas/Km]	Tx,Dx	Robustez
Elevación de Subestaciones	97 [USD/m2]	4 [horas/m2]	Tx	Robustez
Lineas redundantes	> 590 [MUSD/Km]	> 1 [mes/Km]	Tx,Dx	Redundancia
Elevar postes	442 [USD/Km]	3 [semanas/Km]	Tx,Dx	Preventivo
Aumentar temperatura mínima de diseño	80 [MUSD/Km]	< 1 [mes/Km]	Tx,Dx	Preventivo
Reducción de uso de agua para enfriamiento	192 [MUSD/MW]	∅	Gx	Preventivo
Almacenamiento de bombeo de agua	60 [MMUSD/MW]	Proyecto masivo: 9 años	Ax	Redundancia
Muros contra inundaciones	112 [USD/m]	2 [horas/m]	C,Gx,Tx,Dx	Robustez
Cinturones verdes	7.39 [MUSD/Km]	2 [semanas/Km]	Tx	Robustez
Gestión de demanda	540 [USD/MWh]	∅	D,A	Redundancia
Operación en isla	Gen: Variable Almc. combustible: 0.75 - 1.75 [MUSD]	∅	Tx,Dx	Redundancia
Sistemas de monitoreo avanzados	7.17 [BUSD]	Proyecto completo: 6 años	AEP	Preventivo Recuperación
Asegurar funcionalidad de comunicaciones	100 [MUSD/unidad]	1 [mes/torre]	AEP	Preventivo Recuperación
Planificación de reservas	0.5-1 [MMUSD/MW]	∅	C,Gx,A	Recuperación
Sistemas de alerta rápida	7.1 [MMUSD]	Sistema completo: 4 años	AEP	Preventivo
Sistemas de almacenamiento móviles	1.1 [MMUSD/MW]	∅	C,A	Recuperación
Instalaciones con arranque en negro	470 [MUSD/MW]	∅	Gx	Recuperación
Movilización de equipos de reparación	11 [MMCLP]	∅	Tx,Dx,AEP	Recuperación
Generación Distribuida	697 [MUSD/MW]	2 [años/planta]	G,Dx	Redundancia
Coordinación con redes adyacentes	> 590 [MUSD/Km]	> 1 [mes/Km]	Tx	Redundancia
Enfriamiento Distrital	21.5 [MMUSD]	Proyecto completo: 3 años	Gx,Tx	Redundancia

En la tabla a continuación se presentan las referencias utilizadas para obtener los valores de la tabla anterior, además, se incluyen comentarios adicionales sobre la posible aplicación de las medidas, la utilidad que podrían tener en ciertos escenarios o de los supuestos tomados para obtener los valores de la tabla anterior.

Tabla 5.5: Comentarios sobre medidas encontradas.

Medidas	Referencias utilizadas	Comentarios adicionales
Poda de arboles	[43]	Alternativa útil ante zonas de gran vegetación. Se considera un grupo de personal que se encargue de la poda de cierta zona cada cierto periodo de tiempo, el tiempo para la poda suele hacerse calzar con meses de invierno.
Lineas soterradas	[44],[45]	Alternativa útil para proteger líneas ante todo tipo de eventos. Es una de las alternativas que protege de mejor manera la infraestructura, pero su costo es muy alto. El único peligro es ante posibles inundaciones.
Mejora de postes	[46],[47],[48]	Se considera la mejora de postes de madera a postes de concreto o metal. Por esto esta medida se centra en postes de distribución. Centrado en proteger los postes ante eventos que generen posibles golpes.
Elevación de Subestaciones	[49],[50]	Alternativa muy útil ante todo evento que pueda causar una inundación. Se consideran estructuras de acero mediante las cuales se eleven todos los elementos de la subestación.
Líneas redundantes	[44]	Equivalente a la construcción de una línea de transmisión, se considera un costo mayor a esto dado que se tienen que utilizar rutas menos óptimas a la ruta original de la línea.
Elevar postes	[51],[52]	Medida utilizada para combatir el pandeo generado por olas de calor. Puede ser útil para cumplir requisitos sobre la elevación mínima de las líneas. En este sentido, su utilidad contra incendios está en evitar que se generen al evitar que los cables choquen con ramas. Se consideran costos de elevar postes de madera.
Aumentar temperatura mínima de diseño	[53]	Útil para contrarrestar el efecto de olas de calor, con esto se anticipa una pérdida de eficiencia. También evitan el pandeo al estar diseñadas para mayores temperaturas. Se considera principalmente el costo de cambiar los conductores de las líneas. Su utilidad contra incendios está en evitar que se generen al evitar que los cables choquen con ramas.
Reducción de uso de agua para enfriamiento	[54]	Se considera el costo del cambio de sistemas de enfriamiento por agua por otros de aire, con esto se reduce significativamente el uso de agua lo que lo hace útil para periodos de sequía.

Continúa en la pagina siguiente

Tabla 5.5 – Continuada de página anterior

Medidas	Referencias utilizadas	Comentarios adicionales
Almacenamiento de bombeo de agua	[55]	Se inspira en sistemas de almacenamiento masivos de agua utilizados en Australia. Sirve para almacenar agua durante largos periodos de tiempo, útil también para periodos de sequía y para utilizar el agua de lluvias torrenciales inesperadas.
Muros contra inundaciones	[56]	Medida útil contra inundaciones, en el caso de subestaciones es menos efectiva que la elevación de estas, pero menos costosa. Se considera la construcción de muros de concreto de 2 metros de alto.
Cinturones verdes	[57],[58],[59]	Medida aplicable para contrarrestar el avance de incendios y vientos extremos. Se considera la utilización de arboles con uno de los menores índices de flamabilidad según referencia, el costo de compra por mayor, tiempo de crecimiento y la utilización de un sistema de riego.
Gestión de demanda	[60]	Se utilizan referencias de sistemas de gestión de demanda en ciertas partes del mundo. Puede ser aplicable en zonas de alta congestión y para contrarrestar sobrecargas dadas por ciertos eventos. Puede ver su utilidad en asegurar el suministro de cargas críticas, pero no de toda la demanda. No es útil en zonas que queden aisladas por evento.
Operación en isla	[61],[63],[62]	Alternativa altamente aplicable en zonas con generación. Puede ser útil para evitar pérdidas al permitir operar independientemente. Se consideran costos de generación y almacenamiento de combustible.
Sistemas de monitoreo avanzados	[64],[65]	Alternativa de altos costos y de gran magnitud, cuya aplicación debe ser pensada para el futuro. Es útil únicamente si se tiene un conjunto de alternativas para ser aplicadas en el corto plazo.
Asegurar funcionalidad de comunicaciones	[66],[67],[68]	Se considera la construcción de canales de comunicación por radio al ser fiables y resistentes. Útil principalmente ante eventos que causen gran destrucción, para ponerse de acuerdo en la puesta en marcha de medidas para recuperar el sistema.
Continúa en la pagina siguiente		

Tabla 5.5 – Continuada de página anterior

Medidas	Referencias utilizadas	Comentarios adicionales
Planificación de reservas	[69]	Esta medida puede funcionar de la mano con alternativas como la operación en isla o los sistemas de monitoreo. Juntas pueden disminuir significativamente la demanda no suministrada. Se considera el costo de alimentar una carga crítica. En este caso la carga de un hospital promedio.
Sistemas de alerta rápida	[70]	Esta medida puede funcionar para poner en marcha medidas operativas o de recuperación del sistema lo antes posible, de esta forma evitando posibles daños graves y altos costos. Útil solo si se tiene medidas para aplicar al corto plazo. Se estudia sistema de alerta ante terremotos de Japón.
Sistemas de almacenamiento móviles	[71]	Medida que puede ser útil para combatir eventos extremos de los cuales no se sepa con exactitud en donde se puedan generar daños. Con estos, se pueden cubrir demandas críticas en sectores variados mientras se recupera el sistema. Más aplicable en zonas urbanas, al existir más cargas repartidas.
Instalaciones con arranque en negro	[63],[72]	El tener capacidad de arranque en negro puede evitar pérdidas prolongadas en caso de fallas que generen apagones en sectores amplios. Solo útil para recuperar el sistema. Se considera costo de incluir capacidad de arranque dada por referencia.
Movilización de equipos de reparación	[73]	Esta alternativa es útil para recuperar el sistema ante eventos que generen destrozos, pero que no imposibiliten el acceso a la zona, como lo harían incendios o tsunamis por ejemplo. Su aplicación se espera que sea de bajo costo, al requerirse poco capital de inversión que puede resumirse en el vehículo de movilización, las herramientas a utilizar y el personal.
Generación Distribuida	[74],[75]	El tener una gran cantidad de generación distribuida en el sistema puede proteger una gran cantidad de cargas ante eventos que dañen los sistemas de transmisión. Se consideran costos de parque fotovoltaico y almacenamiento de energía.
Coordinación con redes adyacentes	[76],[77]	Esta alternativa considera principalmente los costos de construcción de una línea de transmisión, pero se estiman costos de una inversión de gran escala al tener que cubrir grandes distancias. Se estudia línea de interconexión con Argentina.

Continúa en la página siguiente

Tabla 5.5 – Continuada de página anterior

Medidas	Referencias utilizadas	Comentarios adicionales
Enfriamiento distrital	[78]	Medida centrada en bajar la carga de líneas de transmisión durante olas de calor al disminuir la demanda de frío. Aplicable en una gran cantidad de sectores, pero su enfoque de uso es en grandes dimensiones. Se estudia proyecto de 350.000 m ²

5.4. Metodología para Evaluación en Casos Reales

Con la información reunida en las secciones anteriores, se propone una metodología ordenada que permita la aplicación de casos de estudio específicos dentro de Chile. Para esto, primero es necesario definir que zonas del país son afectadas por los distintos eventos extremos mencionados, junto con que elementos del sistema energético chileno están situados en estas zonas. Para elaborar la propuesta metodológica, se utilizan los pasos iniciales en los casos de estudio vistos en la revisión de experiencias internacionales, en los cuales se identifican zonas de los sistemas correspondientes y se identifican medidas que puedan ser de utilidad para contrarrestar sus efectos. En cuanto a las evaluaciones posteriores, son realizadas identificando los elementos económicos pertinentes a cada caso. De esta forma, se puede definir que alternativa puede ser la más adecuada dada la clasificación previa. En la figura 5.1 se muestra un diagrama resumen de la metodología propuesta a continuación.

Paso 1:

El primer paso a seguir es identificar en que partes del país pueden ocurrir los eventos extremos considerados para el estudio. Para esto, existe una variedad de herramientas con mapas de riesgo, los cuales contienen la tendencia en el futuro de que ocurran estos eventos o guardan registro sobre en que lugares se han repetido en el pasado. Teniendo esta información, se debe realizar una superposición de estos mapas con un mapa del sistema energético chileno, para así definir las instalaciones en peligro y poder pasar a identificar las medidas aplicables. Para lograr esto, las herramientas identificadas incluyen: Atlas de Riesgo Climático del Ministerio del Medio Ambiente, que contiene información sobre olas de calor, sequías, inundaciones, tiempos muertos en muelles e incendios. Visor Chile Preparado del Servicio Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres (SENAPRED), donde se pueden ver zonas inundables por tsunamis y también se puede ver información sobre zonas de peligro de incendios forestales. Portal Geomin del Servicio Nacional de Geología y Minería, en donde se puede ver un catastro con remociones en masa o aluviones ocurridos en el país.

Paso 2:

El segundo paso es estudiar los elementos del sistema energético afectados por estos eventos. Para esto se utiliza un mapa del sistema eléctrico brindado por el Coordinador Eléctrico Nacional, el cual es instalable en Google Earth y que de esta forma permite localizar que instalaciones están en peligro de los distintos eventos extremos considerados. Además, se cuenta con la herramienta Geo Portal de la Comisión Nacional de Energía, la cual además de poder ver la infraestructura del sector eléctrico (solo que actualizada hasta 2018), permite ver infraestructuras del sector hidrocarburos dentro del mapa. Gracias a esto, se visualiza

cuales de estos componentes coinciden con las zonas de peligro indicadas por las herramientas anteriores.

Algunas de las herramientas mencionadas permiten además descargar la información de los mapas correspondientes para incorporarla dentro de Google Earth, lo que permite visualizar de mejor manera que instalaciones coinciden con las zonas de riesgo de eventos extremos. Para los mapas que no permiten esto, de todas formas se ubica dentro de ellos tanto zonas de riesgo como elementos del sistema para el estudio.

Paso 3:

El tercer paso a seguir es que una vez identificado el evento extremo y el sector del sistema energético afectado, se estudia el efecto que pueda tener el evento sobre los elementos del tal sector, con esto se estiman los costos que podría tener la ocurrencia de un evento extremo en la zona considerada. Estos costos se estiman centrándose tanto en la pérdida de suministro del área por un periodo prolongado, como en el costo que significaría el daño a la infraestructura presente. El costo asociado a la pérdida de suministro se estima utilizando el costo de falla de corta duración brindado por la CNE, mientras que el costo asociado a los daños a infraestructura se estima considerando el reemplazo del elemento afectado, bajo el supuesto de que tal elemento deba ser sustituido. Para esto se estudia en cada caso que partes del elemento en cuestión puede estar en riesgo por el evento. Vistos los costos asociados a la pérdida de suministro, se decide si utilizar la posible zona damnificada encontrada o si se busca otra zona para realizar el caso de estudio. Esto se realiza con tal de examinar zonas que signifiquen una mayor pérdida económica, por lo que al terminar este paso se decide si pasar al paso siguiente o se vuelve al paso 1. En los casos a presentar solo se muestran aquellos que cumplen con este criterio.

Además de lo mencionado, se evalúa la ocurrencia del evento a lo largo de los años. Es decir que se toman valores para tanto la duración de la falla como para la frecuencia con que se da el evento. Estos valores en la realidad pueden estar asociados a distribuciones probabilísticas, ya que no se puede predecir exactamente cuando se dará cierto evento o cuanto durará la falla asociada a este evento al ser variables aleatorias y depender de una gran variedad de elementos, tales como factores ambientales, el terreno y recursos disponibles entre otros. Por esto, en esta evaluación se toman valores aproximados y se hace un análisis de sensibilidad para evaluar la factibilidad de aplicación de cierta alternativa en cada caso. Este análisis de sensibilidad se realiza considerando la ocurrencia del evento después de cierta cantidad de años pasados de la aplicación de la alternativa y trayendo el costo de la falla al presente con una tasa de descuento, para así comparar el costo presente de la aplicación de la alternativa con el costo de falla del año estimado.

Paso 4:

Por último, revisando la clasificación de las medidas de aporte de resiliencia hecha anteriormente se identifican que medidas pueden ser útiles en cada caso. De esta forma, los costos encontrados en el paso anterior se comparan con los costos de aplicación de cada una de las posibles medidas, comparación utilizada para definir que alternativa puede ser más óptima en cada caso.

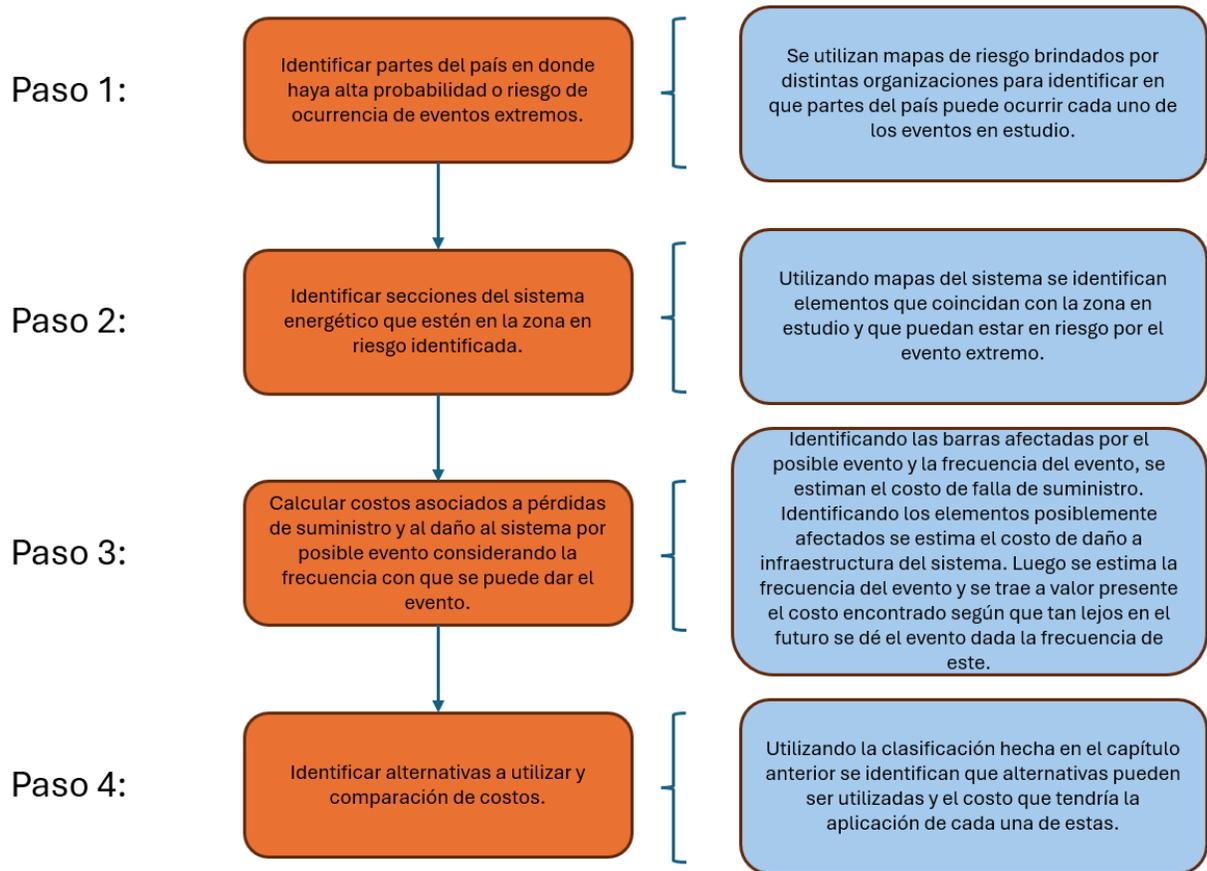


Figura 5.1: Diagrama de flujo, metodología de evaluación de medidas.

A continuación se presentan los parámetros y fórmulas necesarias para realizar los cálculos en los casos de estudio posteriores. Con estos se obtienen todos los valores de costos de falla y pérdidas que se observan. Si son necesarios cálculos adicionales dentro de cada caso, se explicitan dentro del mismo como son obtenidos los valores.

$$Costo_{falla} = Costo_{fallacc} * Dem \quad (5.1)$$

$$V_{A_N} = \frac{V_{A_0}}{(1 + T_D)^N} \quad (5.2)$$

$$Perd_{tot} = Perd_{infr} + Costo_{falla} \quad (5.3)$$

Donde:

N : Año N .

$Costo_{falla}$: Valor económico asociado a la pérdida de suministro por un periodo determinado

$Costo_{fallacc}$: Costo de falla de corta duración.

Dem : Demanda no suministrada por falla. Se toman valores promedios según la barra de estudio.

V_{A_N} : Valor de variable en el año N. Se utiliza en todas las variables cuyo valor se aprecia a lo largo de los años.

V_{A_0} : Valor de variable en el año 0.

T_D : Tasa de descuento.

$Perd_{tot}$: Pérdidas totales. Se refiere al valor final sobre el cual se estiman las pérdidas generadas por un evento.

$Perd_{infr}$: Pérdidas asociadas al daño a infraestructura.

Junto con esto, los parámetros utilizados de forma común para todos los casos de estudio son:

Tabla 5.6: Valores comunes para casos de estudio

Parámetros	Valor
Costo falla [79]	5.69 [USD/KWh]
Tasa de descuento	10 %

Capítulo 6

Casos de Estudio Aplicados

6.1. Introducción

En este capítulo se utiliza la información recopilada en partes anteriores y las herramientas descritas que permiten ver tanto mapas de riesgo como mapas del sistema energético, esto para realizar el estudio de casos específicos sobre posibles peligros a los que puede estar expuesto el sistema energético chileno. Para escoger los casos de estudio, se investigan los mapas de riesgo mencionados con tal de localizar zonas que destaquen en cuanto a la exposición a ciertos eventos críticos. Luego, se superponen estos mapas de riesgo con un mapa del sistema eléctrico brindado por el Coordinador Eléctrico Nacional, con tal de converger las zonas de riesgo con elementos críticos del sistema energético cuya falla podría significar una pérdida económica importante y que podría dejar a ciertos sectores sin suministro por un periodo prolongado de tiempo. Finalmente se realiza una comparación de costos, considerando el costo que tiene el evento extremo en el sistema y el costo de las alternativas estudiadas en el capítulo anterior, con el objetivo de analizar si puede ser óptima la aplicación de alguna alternativa en la zonas dadas.

Dado que para los casos de estudios vistos a continuación una de las herramientas principales utilizadas es el mapa del sistema eléctrico brindado por el CEN, se incluye la simbología de este en la figura a continuación:



Figura 6.1: Leyenda mapa SEN del CEN.

6.2. Incendios en la Provincia de Arauco

Paso 1

Utilizando la herramienta Visor Chile Preparado, se buscan las mayores zonas con riesgo de incendios forestales. Dentro de lo mostrado en el mapa, cabe destacar el área de la región del Biobío, específicamente en las comunas Los Álamos, Lebu y Curanilahue de la provincia de Arauco.

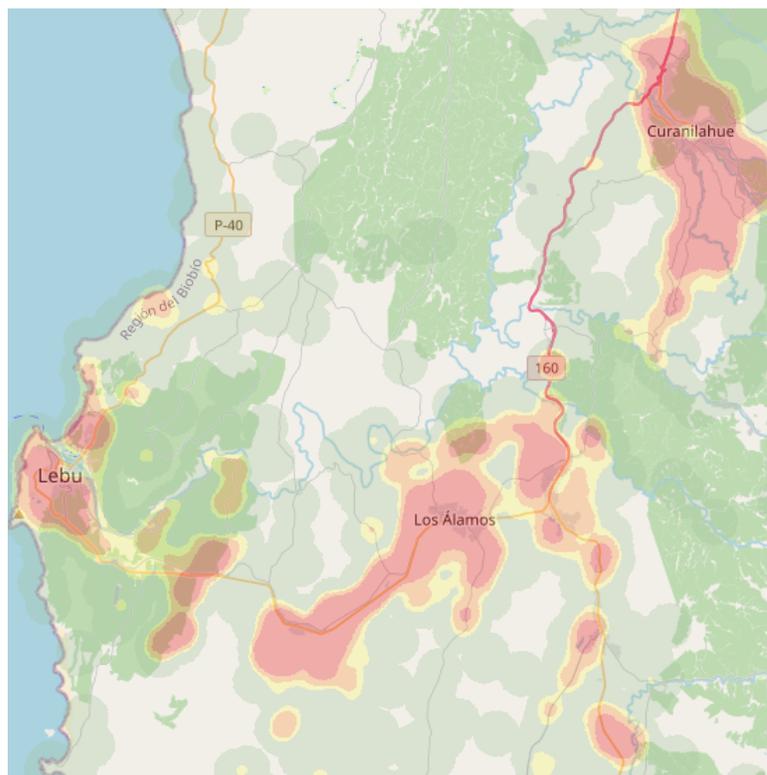


Figura 6.2: Mapa de zonas con peligro de incendio. Fuente: Visor Chile Preparado, SENAPRED

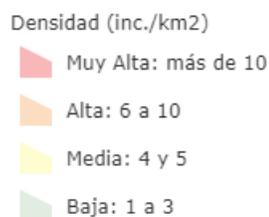


Figura 6.3: Leyenda incendios de Figura 6.2 para periodo 2019-2023

Paso 2

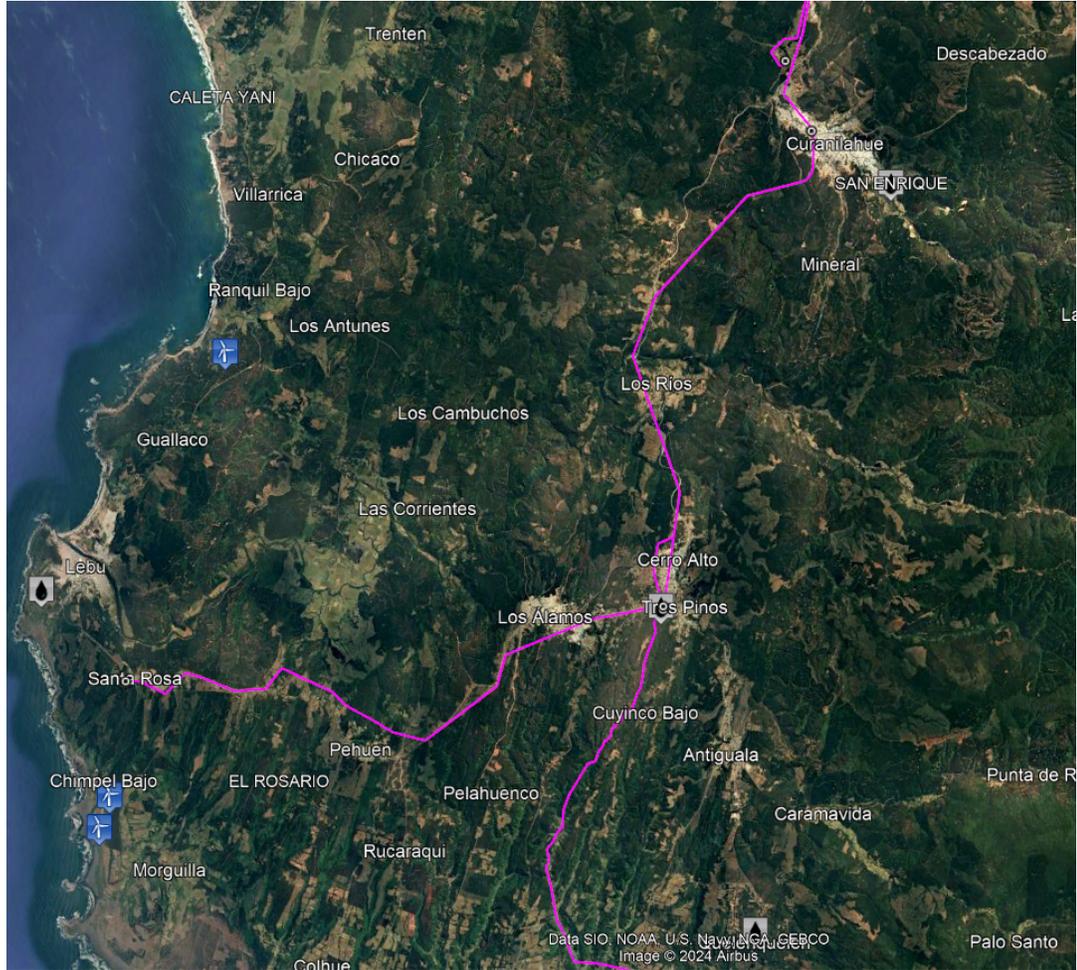


Figura 6.4: Instalaciones en peligro de sistema eléctrico nacional. Fuente: CEN

Para el estudio se considera un megaincendio forestal que cubra principalmente las secciones más boscosas con mayor riesgo de incendio según lo visto en la figura 6.2. Dentro de esta zona, los elementos críticos del sistema energético presentes que pueden ser dañados por este incendio según lo visto en la figura 6.4 son:

Tabla 6.1: Posibles elementos dañados por incendio.

Línea de Transmisión	Tres Pinos - Lebu 66KV Tres Pinos - Canete 66KV Curanilahue - Tres Pinos 66KV Curanilahue Norte - Tres Pinos 66KV
Subestación	S/E Tres Pinos S/E Lebu
Generación	PMGD Ter Los Alamos PMGD Ter Lebu

Con esto y con lo visto en los mapas anteriores, se consideran que los principales elementos en riesgo son las líneas de transmisión, por esto se destacan con color celeste las partes en específico de las líneas mencionadas cuyas partes están dentro de las zonas de mayor riesgo de incendio. Esto se indica la imagen siguiente y posteriormente se indica el largo de los segmentos destacados.

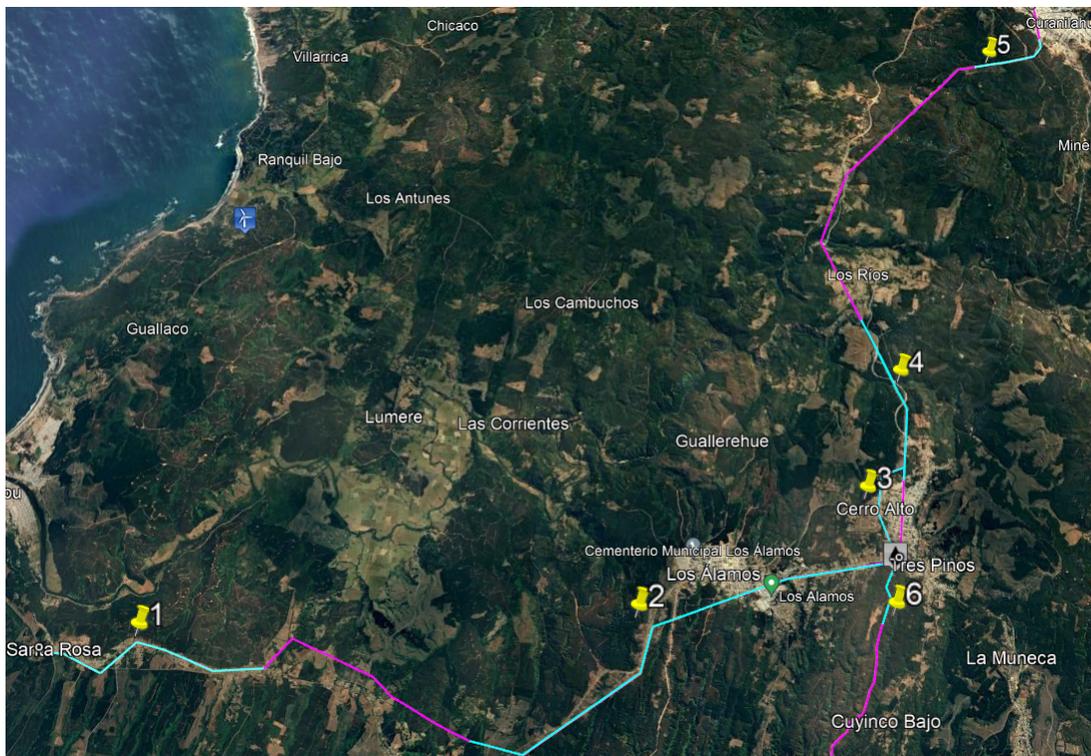


Figura 6.5: Secciones de líneas con mayor peligro de incendio. Fuente: CEN

Tabla 6.2: Largo secciones destacadas.

Número	Largo sección destacada [Km]
1	5.54
2	11.3
3	2.63
4	4.64
5	2.02
6	1.54

Paso 3

Con esta información y considerando lo mencionado en la tabla 5.1, se estudia el peor escenario posible en donde se corte el suministro de las subestaciones S/E Tres Pinos, S/E Lebu y S/E Canete. En la página web del Coordinador Eléctrico Nacional se busca la demanda

durante los meses de Diciembre 2023, Enero y Febrero 2024 para las barras que tienen retiro de energía de las subestaciones mencionadas al ser los meses con más calor, con esto se obtiene una demanda promedio diaria y se considera el corte de suministro por una semana considerando esta demanda promedio. Esto se resume en la tabla mostrada a continuación.

Tabla 6.3: Posibles pérdidas económicas por falta de suministro por incendio.

Barras de retiro	Demanda promedio diaria [MWh]
S/E Lebu 13.2kV	81.73
BA S/E Tres Pinos 13.2kV	62.12
BA S/E Canete 23kV B.Principal	162.62
Total	306.47

Como se puede ver en la figura 6.4, cerca de las subestaciones mencionadas también se encuentran centrales generadoras termoeléctricas a CL. Debido a esto, parte de la demanda no suministrada por la pérdida de la línea de transmisión podría ser suministrada por estas centrales, por lo que se estima la posible generación diaria de estas considerando que puedan mantenerse funcionando durante todo el día.

Tabla 6.4: Generación centrales en zonas afectadas por incendios.

Centrales	Potencia máxima [MW]	Posible generación diaria [MWh]
PMGD TER LEBU	3.4	81.6
PMGD TER ALAMOS	0.8	19.2
PMGD TER CAÑETE	4.4	105.6

Para estudiar la capacidad de estas centrales PMGD de abastecer las localidades correspondientes durante el periodo considerado, se identifican los datos en que la demanda supera la capacidad de generación. Así, se obtiene el porcentaje de días del total de 91 días estimado en que la generación zonal no es suficiente, la demanda promedio estos días y de esta forma la demanda no suministrada y las pérdidas económicas si se utilizan las centrales PMGD durante todo el periodo. Luego, considerando el costo de falla de corta duración se calculan los posibles costos.

Tabla 6.5: Demanda no suministrada considerando centrales PMGD.

Barra	Días de demanda mayor a Gx	Demanda promedio estos días [MWh]	Demanda no suministrada diaria [MWh]	Demanda no suministrada (1 semana) [MWh]	Costo de falla [MUSD]
S/E Lebu 13.2kV	50	86.25	4.65	17.88	185.21
BA S/E Tres Pinos 13.2kV	89	63.13	43.93	300.75	1749.73
BA S/E Canete 23kV B.Principal	91	162.62	57.02	399.14	2271.11

Además de las pérdidas económicas dadas por el corte de suministro, se pueden esperar costos adicionales asociados a los daños que tenga la infraestructura indicada en la tabla 6.1. Principalmente, se cuantifica el daño que puedan tener las líneas de transmisión, al ser los elementos más expuestos a un incendio forestal. Para esto se adjudican los costos al reemplazo de conductores obtenido de [53] multiplicado por el largo de la línea. Sin embargo es posible que puedan haber otros costos adicionales, como el posible daño a alguna torre de transmisión o a otros elementos de las líneas, por lo que se espera tratar este costo como una cota inferior de los costos reales que puedan haber. En la tabla siguiente se muestran estos valores.

Tabla 6.6: Costo de arreglo de líneas en caso de incendio.

Número	Costo reemplazo de conductores [MUSD]
1	443.2
2	904
3	210.4
4	371.2
5	161.6
6	123.2

Por último, se estima la frecuencia con que se dan megaincendios en la zona de estudio. Según lo visto en el capítulo anterior y lo que se aprecia en la figura 4.3, entre 2010 y 2018 se tuvieron 16 megaincendios. En [18] se indica que estos megaincendios se dan principalmente entre las regiones de O'Higgins y el Biobío, tomando como supuesto que se reparten equitativamente en ambas regiones, se tendría que se produce un megaincendio por año en ambas regiones, considerando los demás focos de incendio que se ven en el mapa estudiado se estima que en la zona de estudio se podría producir un incendio una vez cada cinco años. Sin embargo, en el caso de incendios en específico, se debe considerar además el tiempo necesario para que se recupere la vegetación de la zona quemada para que pueda ocurrir un incendio en el mismo lugar. En [80], [81] se muestra que dentro de 14 a 16 años una zona boscosa puede mostrar recuperación luego de ocurrido un incendio, valor variable dependiendo de que tipo

de vegetación se esté considerando, por lo que dentro de la zona de estudio puede ser tanto más como menos tiempo.

Para analizar la factibilidad de aplicación de las medidas a proponer, se calcula el costo que tendría en el tiempo la falla para así hacer el análisis de sensibilidad mencionado en la metodología. Para esto se considera una falla de duración corta de una semana y se determinan los costos de la falla si ocurre al instante después de la aplicación, si ocurre al año determinado como frecuencia para los incendios, al año determinado como necesario para la recuperación de la vegetación y por último en un año lejano a estos.

Tabla 6.7: Valor presente de conductores según año de falla.

Costo conductores [MUSD]				
Nº Conductor	Año 0	Año 5	Año 15	Año 30
1	443.2	275.19	106.10	25.40
2	904	561.31	216.41	51.81
3	210.4	130.64	50.37	12.06
4	371.2	230.49	88.86	21.27
5	161.6	100.34	38.69	9.26
6	123.2	76.50	29.49	7.06

Tabla 6.8: Valor presente de costo de falla según año de falla.

Costo falla [MUSD]				
Subestación	Año 0	Año 5	Año 15	Año 30
S/E Lebu 13.2kV	185.21	115.00	44.34	10.61
BA S/E Tres Pinos 13.2kV	1749.73	1086.45	418.87	100.27
BA S/E Cañete 23kV B.Principal	2271.11	1410.18	543.68	130.15

En la figura 6.5 se ve que en este caso en específico se tiene que las secciones 3,4 y 5 conectan a Tres Pinos y son comunes para las tres subestaciones, mientras que las secciones 1 y 2 conectan a Lebu y la sección 6 a Cañete. Por esto, se evalúa primero la protección de las secciones 3,4,5 comparando únicamente con las pérdidas asociadas a la subestación de Tres Pinos, para luego evaluar la protección de las secciones 1,2 y 6 para proteger Lebu y Cañete respectivamente.

Tabla 6.9: Valor presente de tramos de conductores según año de falla.

Costo tramos de conductores [MUSD]				
Tramos de conductores	Año 0	Año 5	Año 15	Año 30
1,2	1347.20	836.51	322.51	77.21
3,4,5	743.20	461.47	177.92	42.59
6	123.20	76.50	29.49	7.06

Con esto, se pueden obtener las pérdidas totales asociadas a un incendio en la zona, al sumar los costos de los conductores asociados a cada subestación junto con el costo de falla.

Tabla 6.10: Valor presente de costo total de falla según año de falla.

Pérdidas totales [MUSD]				
Subestación	Año 0	Año 5	Año 15	Año 30
S/E Lebu 13.2kV	1532.41	951.51	366.85	87.82
BA S/E Tres Pinos 13.2kV	2492.93	1547.91	596.79	142.87
BA S/E Canete 23kV B.Principal	2394.31	1486.68	573.18	137.21

Paso 4

Ya identificados todos los factores asociados a un posible incendio en la zona estudiada, se procede a comparar los costos que este conllevaría con el costo que tendría la aplicación de las posibles alternativas encontradas. Dado que el daño estimado es a líneas de transmisión y se posee generación zonal, se presentan los dos posibles casos para evitar la pérdida de suministro mencionados antes. 1) Invertir en la operación en isla de las localidades y dejar el daño en las líneas 2) Invertir en protección para las líneas. Según lo visto en las tablas del capítulo anterior las opciones a utilizar serían:

- Caso 1) Protección de líneas:
 - Poda de árboles
 - Cinturones verdes
 - Soterramiento de líneas
- Caso 2) Operación en isla:
 - Inversión en Generación
 - Inversión en Almacenamiento de combustible

Caso 1:

Viendo la información que da la tabla 5.4, se ve que se pueden definir los costos de las alternativas propuestas. A continuación se presentan los costos de las alternativas para compararlos con las pérdidas estimadas.

Tabla 6.11: Costos de alternativas de protección de líneas ante incendio.

Número	Poda de árboles [MUSD]	Cinturones verdes [MUSD]	Soterramiento de líneas [MMUSD]
1	14.96	40.94	32.69
2	30.51	83.51	66.67
3	7.10	19.44	15.52
4	12.53	34.29	27.38
5	5.45	14.93	11.92
6	4.16	11.38	9.09

Se puede apreciar a simple vista que en todo caso el costo del soterramiento de líneas es mucho mayor que las pérdidas esperadas por la ocurrencia del incendio, por lo que se descarta esta opción. En cuanto a la poda de árboles y los cinturones verdes, la poda debe ser repetida todos los años, por lo que debe evaluarse de la misma forma la suma del costo de esta solución durante todos los años, mientras que los cinturones verdes se estiman como un costo único.

Tabla 6.12: Valor presente de alternativas según año de falla.

Costo de poda de arboles [MUSD]					Costo cinturones verdes [MUSD]
Tramos	Año 0	Suma año 5	Suma año 15	Suma año 30	Costo único
1,2	45.47	217.83	391.30	474.09	124.45
3,4,5	25.08	120.17	215.87	261.54	68.65
6	4.16	19.92	35.78	43.36	11.38

Con esto, se puede ver que los cinturones verdes tienen costos de aplicación menores que las pérdidas estimadas en casi todos los casos, menos en el caso de la protección de los tramos 1,2 para el año 30 de lo simulado, mientras que la poda de arboles pierde su optimalidad en Lebu para el año 15 y para el resto en el año 30. Para el año 15 se aprecia que es óptima la aplicación de ambas medidas, al brindar mayor protección que cada medida por separado, tanto en Tres Pinos como en Cañete. Por lo tanto, se estima como óptima la aplicación de tanto cinturones verde como poda de árboles para las líneas Tres Pinos - Canete 66KV, Curanilahue - Tres Pinos 66KV y Curanilahue Norte - Tres Pinos 66KV, mientras que para la línea Tres Pinos - Lebu 66KV se considera óptima solo la aplicación de cinturones verdes.

Caso 2:

Se ve en la tabla 5.4, que los costos de generación se indican como variables al poder utilizarse distintas tecnologías de generación. Para encontrar los diferentes costos se revisa el informe de costos de tecnologías de generación de la CNE [63]. La tecnología elegida en este caso sería de generadores térmicos Diesel dado que las centrales PMGD ya presentes utilizan este combustible y por tanto se puede compartir el mismo sistema de almacenamiento de combustible. Según el informe mencionado, el costo de inversión de generadores a Diesel es de 470 [USD/KW]. En cuanto al almacenamiento de combustible, el Diesel permite obtener 10.17 MWh/m³, en la tabla 5.4 se incluye un rango de precios, en [62], se tiene el catalogo de precios completo para diferentes volúmenes, por lo que se revisan los costos en este.

Este caso tiene enfoque en mejorar la resiliencia del servicio de las zonas afectadas, lo que se traduce en evitar solamente el costo de falla. Acá se estudian primero la aplicación de medidas en Lebu y Cañete al presentar puntos opuestos de costos de falla y conductores, dado que si no resulta conveniente la operación en isla de estas zonas no lo será la de Tres Pinos al ser el punto de conexión para estas dos. Se estudia primero el costo de inversión en generación necesario, que se ve a continuación:

Tabla 6.13: Costo de alternativas para evitar pérdida de suministro ante incendio.

Inversión en generación			
Zona	Demanda no suministrada diaria [MWh]	Potencia necesaria [kW]	Costo inversión [MUSD]
Lebu	4.65	193.75	91.06
Cañete	57.02	2375.83	1116.64

Con estos costos, sumando los costos de daño a las líneas, se puede apreciar que esta opción no es mejor que la del Caso 1, por lo que se descarta, destacando además que no fueron incluidos los costos de almacenamiento que hubieran encarecido aún más este caso. Por último, a este caso también podría considerarse la inclusión de tener capacidad de arranque en negro en las centrales, para así recuperar el sistema en caso de que se caiga por las fallas de las líneas.

6.3. Tsunami en Viña del Mar

Paso 1

Para estudiar zonas en peligro de tsunami, se utiliza el Visor Chile Preparado al igual que en el caso anterior. Para este tipo de eventos, la herramienta dicha permite la descarga de datos para visualizarlos en Google Earth, con lo que se logra superponer las zonas de riesgo de tsunami directamente sobre el mapa del sistema eléctrico brindado por el Coordinador Eléctrico Nacional.

Haciendo lo anterior, se encuentra una gran variedad de componentes dentro de las zonas de riesgo de tsunamis, por lo que se identifica aquella infraestructura que puede causar un mayor impacto económico al ser afectada. Para esto, se concentra primero el estudio en subestaciones que puedan ser deshabilitadas dado el peligro de inundarse por un tsunami y la carga que quedaría sin suministro por esto. Considerando esto, se selecciona la ciudad de Viña del Mar al presentar las subestaciones con mayor retiro de energía dentro de las áreas en riesgo de tsunami y por ser un área altamente poblada, por lo que el daño de un evento extremo puede significar un gran costo para una gran cantidad de habitantes.

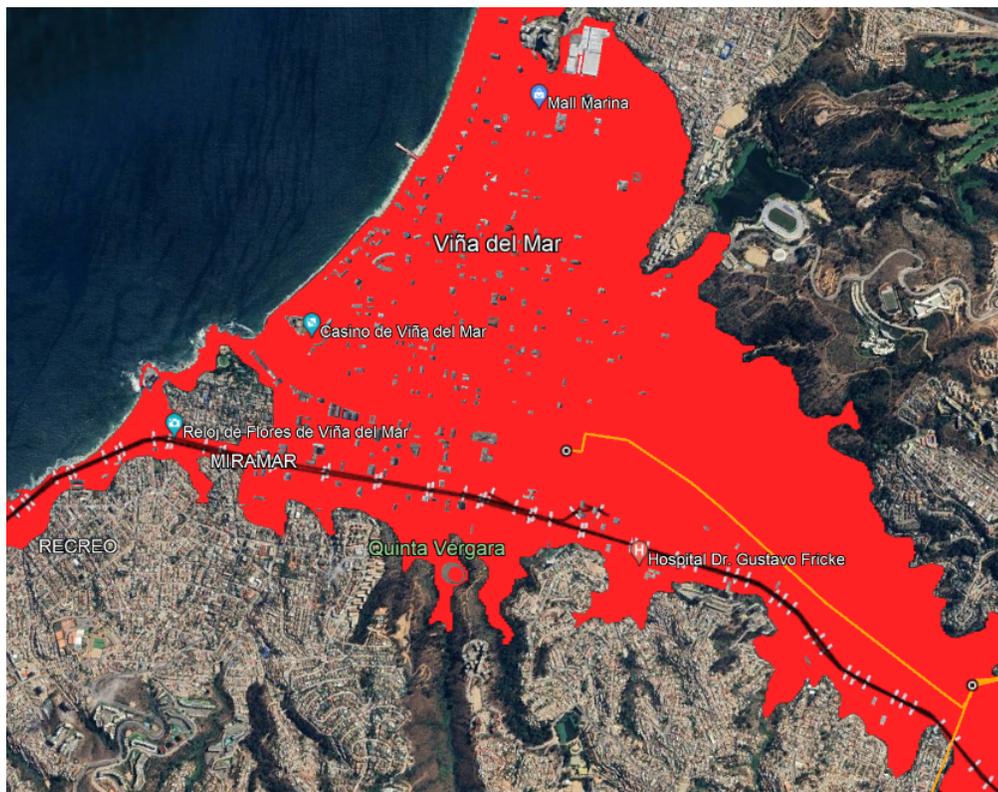


Figura 6.6: Zona con riesgo de tsunami junto con instalaciones en peligro, Viña del Mar. Fuentes: Visor Chile Preparado, SENAPRED, CEN

Paso 2

En este mapa, el área roja consiste en las áreas de evacuación ante un posible tsunami. Considerando uno de estos sucesos que cubra el área recién mostrada, los elementos críticos del sistema que pueden ser dañados por este evento son:

Tabla 6.14: Posibles elementos dañados por tsunami.

Línea de Transmisión	Miraflores - Marga Marga 110kV L2
Subestación	S/E Marga Marga S/E Miraflores

Paso 3

Con esta información y considerando lo mencionado en la tabla 5.1, se estudia el peor escenario posible en donde se corte el suministro de las subestaciones S/E Marga Marga y S/E Miraflores. En la página web del Coordinador Eléctrico Nacional se busca la demanda durante el año 2023 para las barras que tienen retiro de energía de las subestaciones mencionadas, con esto se obtiene una demanda promedio diaria y se considera el corte de suministro por una semana considerando esta demanda promedio. Esto se resume en la tabla mostrada a continuación.

Tabla 6.15: Demanda no suministrada y costo de falla ante posible tsunami.

Barras de retiro	Demanda no suministrada diaria [MWh]	Demanda no suministrada semanal [MWh]	Costo de falla [MMUSD]
BA S/E Marga Marga 13.2KV BP1	785.59	5499.12	31.29
BA S/E Miraflores 12KV BP1	319.51	2236.58	12.73
BA S/E Miraflores 12KV BP2	208.86	1462.04	8.32
Total	1313.96	9197.75	52.34

Además de las pérdidas vistas por el corte de suministro, se pueden esperar costos adicionales asociados a los daños que tenga la infraestructura indicada en la tabla 4.1. Se considera como la estructura principalmente en riesgo las subestaciones acá presentes, al poder ser inundadas durante el tsunami. La inversión de capital que esto implica, se atribuye principalmente al reemplazo de equipos inundados de la subestación, dado que son los elementos críticos más susceptibles a ser dañados por este evento. Para estudiar los costos que esto puede significar se revisan los planos de las subestaciones en peligro que indican además el listado de equipos de estas. De acá se identifican los elementos que podrían representar una mayor pérdida económica dada la necesidad de reemplazarlos, proceso del cual destacan principalmente transformadores de poder, corriente y potencial, interruptores y desconectores. Para determinar los costos de estos elementos se revisan los “Anexos Nuevo Informe Técnico Definitivo rectificado” de la Valorización de Sistemas de Transmisión [53] y se multiplica por la cantidad de elementos que se muestren en los planos de las subestaciones. Además de lo mencionado, pueden existir costos adicionales dados a infraestructuras por objetos arrastrados por el agua, por lo que además de lo ya considerado se podrían esperar pérdidas aún mayores a lo acá dispuesto. Con esto, el costo del posible daño a las subestaciones se define en las tablas siguientes:

Tabla 6.16: Costo de reparación de subestaciones en caso de inundación por tsunami.

S/E Marga Marga		S/E Miraflores	
Elemento	Costo reemplazo [MUSD]	Elemento	Costo reemplazo [MUSD]
Transformadores de poder	1455	Transformadores de poder	916
Transformadores de corriente	9.6	Transformadores de corriente	68.4
Transformadores de potencial	-	Transformadores de potencial	12.9
Interruptores	66.8	Interruptores	130.2
Desconectadores	11.2	Desconectadores	118.8
TOTAL	1542.6	TOTAL	1246.3

Según lo mencionado en [82], en la investigación de tsunamis históricos se nota que en cada uno de los últimos cinco siglos se han dado cerca de 4 tsunamis, principalmente originados en costas chilenas. Con esto, se puede aproximar la frecuencia de estos eventos a uno cada 25 años. Estos eventos a diferencia de otros no se ven afectados por el cambio climático, por lo que no se considera una variación en la frecuencia de estos para el estudio realizado.

Al igual que en el caso anterior, se procede a calcular el costo que tendría en el tiempo la ocurrencia de este evento. Ya que se estima que la frecuencia del evento es de aproximadamente 25 años se considera la ocurrencia del evento al año siguiente de la aplicación de las medidas, al año que calza con la frecuencia estimada y años después.

Tabla 6.17: Valor presente de daño a subestación por tsunami según año de falla.

Costo daño a subestación [MUSD]					
Subestación	Año 0	Año 25	Año 62	Año 70	Año 80
S/E Marga Marga	1542.64	142.38	4.19	1.95	0.75
S/E Miraflores	1246.30	115.03	3.38	1.58	0.61

Tabla 6.18: Valor presente de costo de falla por tsunami según año de falla.

Costo de falla [MUSD]					
Subestación	Año 0	Año 25	Año 62	Año 70	Año 80
S/E Marga Marga	31290.00	2887.94	84.93	39.62	15.28
S/E Miraflores	21045.18	1942.39	57.12	26.65	10.27

Tabla 6.19: Valor presente de costo total de falla por tsunami según año de falla.

Costo total [MUSD]					
Subestación	Año 0	Año 25	Año 62	Año 70	Año 80
S/E Marga Marga	32832.64	3030.32	89.12	41.57	16.03
S/E Miraflores	22291.48	2057.41	60.51	28.23	10.88

Paso 4

Ya identificados los factores a considerar ante un posible tsunami en la zona estudiada, se procede a comparar los costos que este conllevaría con el costo que tendría la aplicación de las posibles alternativas encontradas. Para esto, se revisa en las tablas del capítulo anterior las medidas que pueden ser útiles contra tsunamis e inundaciones y que sean aplicables al sector correspondiente. Ya que el elemento que se desea proteger son las subestaciones indicadas, las medidas a considerar en este caso serían:

- Elevación de subestaciones
- Muros contra inundaciones

Para evaluar los costos asociados a estas soluciones, se revisan los mismos planos de las subestaciones en cuestión antes mencionados y se visualizan las subestaciones en Google Earth. Para calcular el área a elevar se utilizan las medidas de los planos, mientras que para obtener el largo necesario de los muros se ven las mediciones necesarias en Google Earth. Esto último se hace ya que los muros no pueden estar pegados a los elementos de la subestación, cosa que ocurriría al calcular su largo con las medidas de los planos. Además, viendo los largos necesarios en Google Earth se pueden añadir estructuras aledañas que estén muy cercanas a la subestación y que podrían obstruir la construcción del muro en caso de no desear incluirlas. Así, se obtienen las medidas para luego poder obtener los costos de estas soluciones con la tabla 5.4.



(a) Subestación Marga Marga



(b) Subestación Miraflores.

Figura 6.7: Muros a construir en subestaciones.

Con esto, las dimensiones junto con los costos de las alternativas a utilizar se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 6.20: Costo de alternativas de protección de subestaciones en peligro de tsunami.

Subestación	Área a elevar [m ²]	Costo área [MUSD]	Largo muro [m]	Costo muro [MUSD]
S/E Marga Marga	497.7	48.28	153	17.14
S/E Miraflores	668.3	64.83	237	26.54

Viendo los costos de las alternativas a aplicar y el costo total que podría tener el evento a lo largo de los años, se tiene que para el año 25, estimado como la frecuencia del evento, es óptima la aplicación de cualquiera de las dos alternativas. De estas se considera mejor la elevación de la subestación al eliminar por completo el peligro de daños por agua al haber una inundación. Para el año 62 se ve que la opción de elevar la subestación pierde optimalidad para la subestación Miraflores, para el año 70 ya no es conveniente y para el año 80 no lo es ninguna de las dos alternativas. Ya que en el año en que la opción de elevar las subestaciones es conveniente durante mucho después la frecuencia estimada, se considera como la opción óptima para aplicar en este caso. Cabe considerar además el poco tiempo que se considera

para la falla, ya que utilizando tiempos mayores para el tiempo de falla resultarían aún mas convenientes las alternativas propuestas.

6.4. Inundaciones por Desborde de Ríos en Illapel

Paso 1

Para estudiar componentes del sistema energético que puedan estar en riesgo de inundación, primero se revisa el ARCLIM, en el cual se indican puntos sobre los cuales puede haber riesgo de desborde de ríos, indicando además la localidad cercana al punto. Debido a la imprecisión vista en este mapa, además se realiza una superposición de un mapa de los ríos de Chile en Google Earth junto con el mapa del sistema descrito previamente. Con esto, se examina si en la cercanía de las zonas destacadas por el ARCLIM calza la ubicación de un río con elementos del sistema energético. A continuación se muestra una zona de riesgo destacada en el ARCLIM, junto con la zona en Google Earth indicando el río en cuestión y elementos del sistema energético.

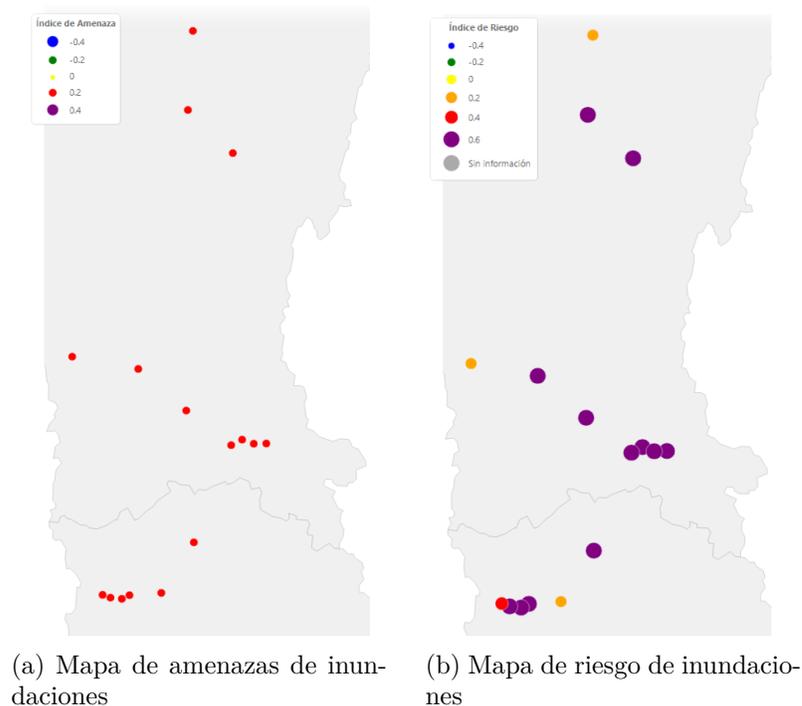


Figura 6.8: Mapas de zonas en peligro de inundación por desborde de ríos.
Fuente: ARCLIM

Tal como se puede ver, se incluyen dos mapas para el análisis de riesgo ante inundaciones por desbordes de ríos. El mapa (a) o mapa de amenazas señala la amenaza a centros urbanos cercanos dada la recurrencia en que un caudal de cierta magnitud es igualado o excedido. Por esto, mientras mayor el índice mostrado en la figura, mayor es la amenaza por caudales mayores. El mapa (b) o mapa de riesgo, señala la susceptibilidad que tienen los centros urbanos de sufrir un mayor o menor impacto adverso frente a eventos de precipitación extrema desencadenante en un desborde de río. Para más información visitar el Atlas de Riesgo Cli-

mático, sección recursos hídricos - inundaciones por desbordes de ríos.

Se selecciona la zona mostrada en los mapas al ser aquella que coincide en los índices más altos para ambos mapas. Los puntos coincidentes con los índices más altos corresponden a los centros urbanos de: Monte Patria, Carén, Illapel, Salamanca, Coiron, Chillepín, Tranquilla, Cuncumen, Petorca, Valle Hermoso, La Ligua y Placilla. Con esta información, se procede a buscar dentro de los mapas mencionados de Google Earth para encontrar componentes críticos del sistema energético que puedan ser susceptibles a daños por este evento.

Paso 2

Entre todos los centros mencionados, destaca la ciudad de Illapel, que cuenta con una subestación cercana al río Illapel, el cual atraviesa la ciudad. Esto se puede observar en la figura a continuación. Posterior a la imagen se indica de que subestación se trata junto con la barra de retiro de energía que posee y valor del retiro promedio durante el año 2023.

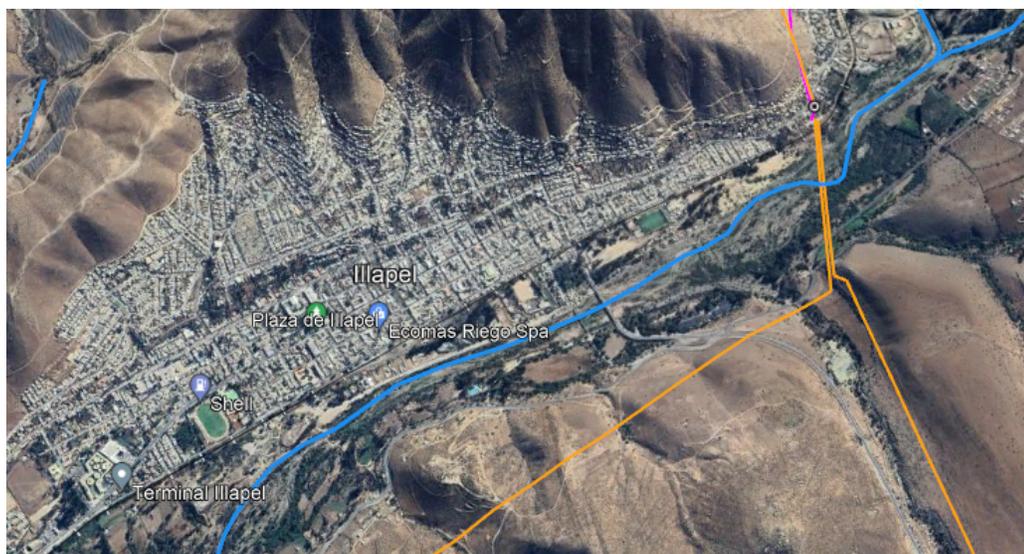


Figura 6.9: Imagen de ciudad de Illapel, destacando el río Illapel y los elementos del sistema energético en riesgo de inundación. Fuente: CEN

Paso 3

Tabla 6.21: Demanda no suministrada y costo de falla ante posible inundación.

Subestación	Demanda no suministrada diaria [MWh]	Demanda no suministrada semanal [MWh]	Costo de falla [MMUSD]
S/E Illapel	163.87	1147.08	6.53

Al igual que en el caso de los tsunamis, se pueden esperar costos adicionales asociados al daño de ciertos elementos de la subestación, ya sea por reparaciones menores o por la necesidad de reemplazar otros componentes de la subestación. Al tratarse de una inundación

y que el elemento crítico del sistema que está en peligro es una subestación, se consideran los mismos factores que en el caso de estudio anterior, por lo que para las soluciones a considerar se pueden utilizar las mismas que en el caso anterior. En cuanto a la frecuencia con que se puede dar este evento, en [83] se tiene registro de cerca de 30 eventos de inundaciones fluviales en la IV región desde 1900 a 2012, mientras que en el ARCLIM se presenta que en el futuro se espera que hayan aproximadamente 3 días al año de precipitaciones muy intensas en la zona de Illapel. Con esto se puede aproximar la ocurrencia de un evento de este tipo a 5 años, frecuencia que puede aumentar debido al cambio climático, haciendo que eventos de precipitación extrema se den más seguido. Cabe destacar nuevamente que estos valores se deben tomar en realidad como funciones de probabilidad, siendo de esta forma más probable que ocurra el evento con el tiempo, pero que acá se toman aproximaciones y se evalúa la sensibilidad de los costos dependiendo del tiempo que pase.

Tabla 6.22: Costo de reparación de subestación en caso de inundación por desborde de río.

Elemento	Costo reemplazo [MUSD]
Transformadores de poder	974
Transformadores de corriente	48.9
Transformadores de potencial	21.9
Interruptores	105
Desconectadores	84.7
TOTAL	1234.5

Tabla 6.23: Valor presente de daño a subestación por inundación según año de falla.

Costo daño a subestación				
Subestación	Año 0	Año 5	Año 47	Año 61
S/E Illapel	1234.50	766.53	14.00	3.69

Tabla 6.24: Valor presente de costo de falla por inundación según año de falla.

Costo falla				
Subestación	Año 0	Año 5	Año 47	Año 61
S/E Illapel	6526.87	4052.68	74.00	19.49

Tabla 6.25: Valor presente de costo total de falla por inundación según año de falla.

Costo Total				
Subestación	Año 0	Año 5	Año 47	Año 61
S/E Illapel	7761.37	4819.20	88.00	23.17

Paso 4

De esta forma, al igual que en el caso de estudio sobre inundaciones causadas por tsunamis, se evalúan la elevación de la subestación y la aplicación de muros contra inundaciones. Para esto, se revisan los planos de la subestación Illapel y se hacen las mediciones pertinentes en Google Earth.



Figura 6.10: Muros a construir en subestación Illapel.

Tabla 6.26: Costo de alternativas de protección de subestaciones en peligro de inundación.

Subestación	Área a elevar [m ²]	Costo área [MUSD]	Largo muro [m]	Costo muro [MUSD]
S/E Illapel	990.1	96.01	220	24.64

Comparando los costos totales que se atribuyen al evento, se puede apreciar que para el año 47 pierde optimalidad la elevación de la subestación, mientras que para el año 61 lo pierde la utilización de muros contra inundaciones. Dada la frecuencia definida para este evento, considerando además que se puede esperar que aumente debido al cambio climático, se puede considerar como mejor la elevación de la subestación en cuestión. A esto se le puede sumar el argumento de que se considera un tiempo de reposición que puede considerarse como corto para la falla, ya que considerar un tiempo de falla más largo haría que los costos asociados a la falla sean aún mayores.

Capítulo 7

Conclusiones y Trabajos Futuros

7.1. Conclusiones

Al considerar todos los puntos desarrollados a lo largo del trabajo, se entiende como resultado principal de esta memoria la elaboración de propuesta metodológica probada. En esta propuesta se integran diversas referencias de información y se propone un enfoque para organizar, clasificar y utilizar dicha información con el objetivo de implementar medidas para proteger al sistema energético frente a eventos extremos.

La revisión de fuentes permitió identificar un conjunto de medidas que fortalecen la resiliencia del servicio y de la infraestructura, siendo este conjunto suficiente para cubrir los eventos extremos considerados relevantes para Chile. De este grupo se destacan principalmente las medidas que aportan a la resiliencia de la infraestructura, ya que cuentan con mayor respaldo en la literatura y evitan costos adicionales asociados a daños en el sistema. Además, se observa que las medidas de resiliencia de la infraestructura suelen tener aplicaciones más específicas, es decir, están centradas en proteger al sistema contra eventos particulares, mientras que las medidas de resiliencia del servicio pueden servir contra una gran cantidad de eventos. Otro aspecto a destacar es que muchas de las medidas que aportan a la resiliencia del servicio requieren de elementos adicionales para proteger al sistema, como lo pueden ser los sistemas de alerta temprana o los sistemas de monitoreo avanzado, por lo que en general pueden resultar menos útiles en cuanto a la aplicación pronta de medidas.

Durante la investigación para realizar la caracterización de las medidas es donde más destaca la falta de información, al ser poco frecuente encontrar registros de la aplicación de alguna medida, proyectos asociados o empresas que ofrezcan servicios relacionados. Sin embargo, mediante aproximaciones y enfocándose en los elementos básicos necesarios para la aplicación de ciertas alternativas, es posible obtener valores de referencia que permitan estructurar las clasificaciones propuestas. En cuanto a dicha clasificación, se logra disponer de valores referenciales para los costos, aunque en algunos casos no se encuentran referencias suficientes para aproximar los tiempos de implementación necesarios. Además, se nota que la mayoría de las medidas encontradas tienen enfoque en apoyar al sistema de transmisión, lo cual es comprensible dado que este es el que se puede ver más expuesto a eventos ambientales.

Uno de los descubrimientos principales es que la bibliografía revisada se centra principalmente en medidas de resiliencia enfocadas en proteger únicamente el sistema eléctrico. Si

bien el objetivo principal del trabajo era abordar medidas que pudieran aplicarse a diversas áreas del sistema energético en su conjunto, incluyendo tanto el sector eléctrico como el sector hidrocarburos, se encuentra escasa información centrada en proteger el sector hidrocarburos, como por ejemplo lo podrían ser la protección de gaseoductos o sistemas de almacenamiento de combustibles. Esta carencia de información dificulta el cumplimiento pleno del objetivo del estudio, por lo que el análisis se debe concentrar principalmente en el sector eléctrico del sistema energético.

Siguiendo lo anterior, otro aspecto a destacar de la investigación es el limitado desarrollo que presenta el tema de resiliencia de los sistemas energéticos a nivel global. Muchos países revisados ya han elaborado políticas a seguir y planes de acción a futuro, como se refleja en los antecedentes internacionales revisados. Pese a esto, muy pocos han detallado medidas a tomar, como llevar a cabo las metas que tienen propuestas o metodologías a seguir que puedan servir de guía para el resto del mundo. En otras palabras, a pesar de que ya se reconozca la necesidad de tener sistemas resilientes al cambio climático, todavía falta desarrollo en la implementación de estas medidas.

En cuanto a la aplicación de la metodología para analizar los casos de estudio, se destaca la gran utilidad que tiene el uso de los distintos mapas de riesgos revisados. Esto se especifica dado que uno de los principales desafíos al momento de querer emplear la clasificación realizada es determinar que zonas y que elementos del sistema son los que están más expuestos al riesgo.

Con respecto a a los resultados obtenidos en los casos de estudio, se aprecia que el costo asociado al daño de la infraestructura a pesar de ser considerable, suele ser menor que el costo asociado a la pérdida de suministro, lo cual podría verse afectado según que valor se le asigne a este costo de falla en un escenario real. Esto se debe a que el costo asignado en este estudio corresponde al costo de falla de corta duración, el cual está relacionado a eventos imprevistos que deberían solucionarse rápidamente. Dado que este tipo de fallas son poco frecuentes y a pesar de ser imprevistas pueden significar largas duraciones de pérdida de suministro, el valor que se utilice en realidad para estos eventos podría variar. Por otro lado, al no contar con datos precisos de los daños potenciales a la infraestructura, los resultados encontrados y la optimalidad de las medidas propuestas se podrían ver afectados. No obstante, este hecho influiría únicamente la decisión final tomada, ya que considerando los costos de las pérdidas de suministro y asumiendo un costo de daño a la infraestructura significativamente menor al utilizado, de todas formas se podrían elegir alternativas óptimas para proteger elementos en específico del sistema energético y así aumentar su resiliencia. Con todo esto, se considera logrado el objetivo propuesto de la aplicación de las clasificaciones hechas sobre casos de estudio dentro de Chile.

7.2. Trabajos Futuros

Finalizada la propuesta de este trabajo y considerando las conclusiones expuestas, se pueden conjeturar ciertas acciones a seguir que podrían complementar este trabajo de título. En primera instancia, para mejorar el análisis del impacto de las medidas encontradas, se sugiere incluir la utilización de métricas de resiliencia como un parámetro adicional a los casos de estudio. De este modo, además de considerar los costos de las alternativas, se puede cuanti-

ficar el aporte de resiliencia de cada una de estas, de esta forma puede que alternativas más costosas pasen a ser más óptimas al considerar el valor añadido en términos de resiliencia. Asimismo, se observa que en diversos documentos revisados a lo largo del trabajo se destaca la falta de un estándar de resiliencia que defina el nivel de resiliencia que un sistema debe tener para contrarrestar los efectos de ciertos tipos de eventos. Por lo tanto, centrar trabajos futuros en la búsqueda de estándares a seguir constituirían un aporte significativo en cuanto a la implementación de resiliencia.

Este trabajo aborda las clasificaciones y los casos de estudio desde una perspectiva general, al trabajar con aproximaciones y buscar contribuciones generales en el ámbito de resiliencia, por lo que si bien se logra el objetivo de aplicar la información recopilada, son necesarios aspectos adicionales para ser utilizada en situaciones reales. En este sentido, la información acá presentada se puede utilizar de base para estudios más específicos, que podrían centrarse sobre la aplicación de un grupo reducido de alternativas en zonas en específico o para combatir eventos particulares. Por ejemplo, considerando el caso de incendios en la provincia de Arauco, además de los costos y la posible aplicación de métricas de resiliencia, puede haber aspectos adicionales a considerar para analizar la factibilidad de cada una de las medidas, tales como la vegetación presente o la calidad de los suelos para plantar entre otros, considerando las alternativas propuestas de poda de arboles y cinturones verdes. A partir de esto, se puede generar una gran variedad de estudios más especializados utilizando lo agrupado en este trabajo como referencia.

En línea con la realización de estudios más específicos, se propone para investigaciones futuras un más análisis detallado sobre los daños potenciales que puedan sufrir los diferentes elementos del sistema energético a causa de eventos extremos. Esto permitiría identificar con mayor precisión las medidas a utilizar y hacer más cercanas a la realidad las estimaciones de costos.

En cuanto futuras propuestas metodológicas para evaluar los casos de estudio, se propone utilizar los datos planteados con tal de definir parámetros clave, lo que permitiría desarrollar una metodología más eficiente y aplicable a distintos tipos de proyectos. Con esto, a partir de los casos evaluados se pueden establecer rangos para costos e impactos dentro de cada sector del sistema energético. Por ejemplo, dentro de los casos vistos se pueden definir rangos para costos e impactos ante eventos que afecten subestaciones o líneas del sistema de transmisión. Haciendo esto para los distintos sectores del sistema energético se puede llegar a una metodología más escalable a diferentes tipos de proyectos en los diferentes sectores.

Finalmente, se propone la realización de estudios centrados únicamente en el sector hidrocarburos, dada la poca información y el poco enfoque sobre esta área en general. Esto permitiría tener un mayor aporte para el sector energético en general y así cumplir los objetivos que se tienen en diferentes partes del mundo.

Bibliografía

- [1] IPCC, “Summary for Policymakers,” pp. 3–32, Jul. 2023, doi: <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>.
- [2] Ministerio de Energía, “Plan de Adaptación al Cambio Climático para el Sector Energía 2018-2023”, Santiago Chile, Dic. 2018.
- [3] P. Gutiérrez, “Planificación de la expansión considerando los efectos de eventos climáticos extremos en la operación de los SEP”, Tesis Doc, Univ. Chile, Santiago.
- [4] “Estrategia Climática de Largo Plazo de Chile,” Ministerio del Medio Ambiente, Oct. 2021. Disponible: <https://cambioclimatico.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2021/11/ECLP-LIVIANO.pdf> (Accedido Mar. 16, 2024).
- [5] IPCC, Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)] , 2022, Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844.
- [6] A.Stankovic K. Tomsovic,L Mili M. Panteli J. Kavicky K. Thomas R. Desalvo J. Liu H. Chao, “The Definition and Quantification of Resilience”, TECHNICAL REPORT PES-TR65, Abr. 2018.
- [7] Ministerio de Energía, “Transición Energética de Chile Política Energética Nacional (Actualización 2022)”, Santiago Chile, Feb. 2022.
- [8] M. Rezaei, M. Tolou-Askari, M. Amirahmadi, and V. Ghods, “Challenges of Generation and Transmission Expansion Planning Considering Power System Resilience and Provide Solutions,” International Journal of Engineering, pp. 824–841, 2023, doi: <https://doi.org/10.5829/ije.2023.36.05b.01>.
- [9] D. Chattopadhyay and Mathaios Panteli, “Integrating resilience in power system planning: A note for practitioners,” The Electricity journal, vol. 35, no. 9, pp. 107201–107201, Nov. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tej.2022.107201>.
- [10] N. Bhusal, M. Abdelmalak, M. Kamruzzaman, and M. Benidris, “Power System Resilience: Current Practices, Challenges, and Future Directions,” IEEE Access, vol. 8, pp. 18064–18086, 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/access.2020.2968586>.
- [11] Ministerio del Interior y. Seguridad Pública Gobierno de Chile, “POLÍTICA NACIONAL

PARA LA REDUCCIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES”, Departamento de Gestión del Sistema Nacional de Protección Civil ONEMI, Chile.

- [12] EEA, “Advancing towards climate resilience in Europe — Status of reported national adaptation actions in 2021”, Dinamarca, 2022.
- [13] EEA, “Adaptation challenges and opportunities for the European energy system”, Dinamarca, 2019.
- [14] R. Palma, R. Torres, C. Benavides, M. Diaz, S. Gwinner y V. Sepúlveda, “Análisis de Infraestructura Resiliente a la Crisis Climática para el Sector Energético”, Santiago Chile, Oct. 2023.
- [15] M. Mahzarnia, M. P. Moghaddam, P. T. Baboli, and P. Siano, “A Review of the Measures to Enhance Power Systems Resilience,” IEEE Systems Journal, vol. 14, no. 3, pp. 4059–4070, Sep. 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/jsyst.2020.2965993>.
- [16] R. Gutiérrez Cisterna, “REPORTE ANUAL DE LA EVOLUCIÓN DEL CLIMA EN CHILE,” Dirección General de Aeronáutica Civil, Santiago - Chile, May. 2023.
- [17] CONAF, “Situación de incendios vigentes”. <https://www.conaf.cl/incendios-forestales/incendios-forestales-en-chile/estadistica-de-ocurrencia-diaria/> (Accedido Mar. 16, 2024).
- [18] M. E. González, “Incendios en Chile: causas, impactos y resiliencia,” Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2, Chile, 2019. Disponible: <https://www.cr2.cl/wp-content/uploads/2020/01/Informe-CR2-IncendiosforestalesenChile.pdf> (Accedido Jun. 19, 2024).
- [19] Departamento de Gestión del Sistema Nacional de Protección Civil ONEMI, Ed., “Política Nacional para la Reducción del Riesgo de Desastres,” Ministerio del Interior y Seguridad Pública Gobierno de Chile, Feb. 2020. Disponible: <https://emergenciaydesastres.mineduc.cl/wp-content/uploads/2024/01/POLITICA-NACIONALGESTIO%CC%81N-REDUCCIO%CC%81N-DEL-RIESGO-DE-DESASTRES-2020-2030-3.pdf> (Accedido Mar. 17, 2024).
- [20] Instituto para la Resiliencia ante Desastres, Itrend.cl. <https://www.plataformadedatos.cl/catalog/categories/HAZARD> (Accedido Mar. 17, 2024).
- [21] R. Schröer and M. Falvey, “Análisis de la información disponible de recursos renovables para generación utilizada en procesos de optimización del sistema eléctrico,” Meteodata, Santiago de Chile, Ago. 2020.
- [22] Y. Lin, Z. Bie, and A. Qiu, “A review of key strategies in realizing power system resilience,” Global Energy Interconnection, vol. 1, no. 1, pp. 70–78, Ene. 2018, doi: <https://doi.org/10.14171/j.2096-5117.gei.2018.01.009>.
- [23] J. Abdubannaev, Y. Sun, A. Xin, M. U. Jan, N. Makhamadjanova, and S. Rakhi-mov, “Enhancing Power System Resilience - A review,” 2019 IEEE 3rd Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), Nov. 2019, doi: <https://doi.org/10.1109/ei247390.2019.9062002>.
- [24] J. Kim and Y. Dvorkin, “Enhancing Distribution System Resilience with Mobile Energy Storage and Microgrids,” IEEE Transactions on Smart Grid, pp. 1–1, 2018, doi: <https://doi.org/10.1109/tsg.2018.2872521>.

- [25] “Opciones de adaptación para las redes e infraestructuras de transporte y distribución de electricidad — Inglés,” climate-adapt.eea.europa.eu. <https://climate-adapt.eea.europa.eu/es/metadata/adaptation-options/adaptation-options-for-electricity-transmission-and-distribution-networks-and-infrastructure> (Accedido Mar. 27, 2024).
- [26] “Establecimiento de sistemas de alerta rápida — Inglés,” climate-adapt.eea.europa.eu. <https://climate-adapt.eea.europa.eu/es/metadata/adaptation-options/establishment-of-early-warning-systems> (Accedido Mar. 27, 2024).
- [27] J. A. Strauss and R. M. Allen, “Benefits and Costs of Earthquake Early Warning,” *Seismological Research Letters*, vol. 87, no. 3, pp. 765–772, Mar. 2016, doi: <https://doi.org/10.1785/0220150149>.
- [28] “Reducing water consumption for cooling of thermal generation plants — English,” Europa.eu, 2022. <https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/metadata/adaptation-options/reducing-water-consumption-for-cooling-of-thermal-generation-plants> (Accedido Mar. 27, 2024).
- [29] “Building power system resilience with pumped hydro energy storage,” Australia: Australian Energy Market Operator. Disponible: https://www.aemo.com.au/-/media/Files/Electricity/NEM/Planning_and_Forecasting/ISP/2019/ISP-Insights---Building-power-system-resilience-with-pumped-hydro-energy-storage.pdf (Accedido Mar. 29, 2024).
- [30] “Flood defence framework for National Grid substations in United Kingdom — Discover the key services, thematic features and tools of Climate-ADAPT,” climate-adapt.eea.europa.eu. <https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/metadata/case-studies/flood-defence-framework-for-national-grid-substations-in-united-kingdom> (Accedido Mar. 28, 2024).
- [31] “Adapting overhead lines in response to increasing temperatures in UK — English,” climate-adapt.eea.europa.eu. <https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/metadata/case-studies/adapting-overhead-lines-in-response-to-increasing-temperatures-in-uk> (Accedido Mar. 28, 2024).
- [32] “Improved resilience of biomass fuel supply chain in UK — Discover the key services, thematic features and tools of Climate-ADAPT,” climate-adapt.eea.europa.eu. <https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/metadata/case-studies/improved-resilience-of-biomass-fuel-supply-chain-in-uk> (Accedido Mar. 28, 2024).
- [33] “Copernicus Climate Change Service and Copernicus Atmosphere Monitoring Service — Discover the key services, thematic features and tools of Climate-ADAPT,” climate-adapt.eea.europa.eu. <https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/metadata/organisations/copernicus-climate-change-service-ecmw> (Accedido Abr. 10, 2024).
- [34] “Building fire resilience using recycled water in Riba-Roja de Túria, Spain — Discover the key services, thematic features and tools of Climate-ADAPT,” climate-adapt.eea.europa.eu. <https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/metadata/case-studies/building-fire-resilience-using-recycled-water-in-riba-roja-de-turia-spain> (Accedido Mar. 28, 2024).
- [35] B. Kronberger-Kießwetter, M. Balas, and A. Prutsch, Eds., trans. M. Harris, Y. Prentice, and S. Lustig trans. Vienna: Federal Ministry for Sustainability and Tourism, Oct. 2017.

- [36] “Replacing overhead lines with underground cables in Finland — English,” climate-adapt.eea.europa.eu. <https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/metadata/case-studies/replacing-overhead-lines-with-underground-cables-in-finland> (Accedido Abr. 10, 2024).
- [37] W. Hughes et al., “Damage modeling framework for resilience hardening strategy for overhead power distribution systems,” Reliability Engineering & System Safety, vol. 207, p. 107367, Mar. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107367>.
- [38] J. W. Baker, “Eliminating hurricane-induced storm surge damage to electric utilities via in-place elevation of substation structures and equipment”, 2014 IEEE PES T&D Conference and Exposition, Chicago, IL, USA, 2014, pp. 1-5, doi: 10.1109/TDC.2014.6863459.
- [39] “Relocation as adaptation to flooding in the Eferdinger Becken, Austria — Discover the key services, thematic features and tools of Climate-ADAPT,” climate-adapt.eea.europa.eu. <https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/metadata/case-studies/relocation-as-adaptation-to-flooding-in-the-eferdinger-becken-austria> (Accedido Abr. 10, 2024).
- [40] O. Kiyomiya and K. Kuroki, “FLAP GATE TO PREVENT URBAN AREA FROM TSUNAMI,” in World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo, Japan: Waseda University, Dic. 2008.
- [41] Y. Li, K. Xie, L. Wang, and Y. Xiang, “Exploiting network topology optimization and demand side management to improve bulk power system resilience under windstorms,” Electric Power Systems Research, vol. 171, pp. 127–140, Jun. 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.02.014>.
- [42] R. Tao, D. Zhao, H. Wang and X. Xia, "Multi-stage Defender-Attacker-Defender Model for Distribution System Resilience Enhancement in Ice Storms with Line Hardening, Mobile Device and Repair Crew Dispatching, in CSEE Journal of Power and Energy Systems, vol. 9, no. 3, pp. 1103-1118, May 2023, doi: 10.17775/CSEEJPES.2021.05510.
- [43] “¿Cuánto cuesta podar un árbol? Precios actualizados para 2024,” www.cronoshare.cl. <https://www.cronoshare.cl/cuanto-cuesta/podar-arbol> (Accedido Jul. 10, 2024).
- [44] F. Becerra Y. et al., “PROPUESTA DE EXPANSIÓN DE LA TRANSMISIÓN PROCESO DE PLANIFICACIÓN DE LA TRANSMISIÓN 2022,” Coordinador Eléctrico Nacional, Chile, Ene. 2022. Disponible: <https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2022/01/Informe-PET-enero-2022.pdf> (Accedido Jul. 10, 2024).
- [45] “Soterramiento de Redes. Experiencia Comparada.,” Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, Jun. 2012. Disponible: https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/28156/3/93755_PSOCIAL_20120305_VP_SOTERRAMIENTO_URBANO_93755__3_.pdf (Accedido Jul. 10, 2024).
- [46] “Poste hormigón armado 11,5M carga 300/600Kg Chilquinta,” www.tiendatecnored.cl. <https://www.tiendatecnored.cl/poste-hormigon-armado-11-5m-carga-300-600kg-chilquinta.html> (Accedido Jul. 10, 2024).
- [47] “Poste Acero Galvanizado Cónico 9 Metros,” Natura Energy. <https://www.naturaenergy.cl/product/poste-acero-galvanizado-conico-9-metros> (Accedido Jul. 10, 2024).
- [48] “A raíz del camión que arrasó con tres postes en el centro de Puerto Varas: ¿Cuánto cuesta reponer un poste del tendido eléctrico?,” El Heraldo Austral. <https://www.eha.cl/noticia/local/a-raiz-del-camion-que-arraso-con-tres-postes-en-el-centro-de-puerto-v>

- aras-cuanto-cuesta-reponer-un-poste-del-tendido-electrico-3825#:~:text=El%20tiempo%20promedio%20del%20cambio (Accedido Jul. 10, 2024).
- [49] “Precio en Chile de m2 de Estructura metálica con losa armada en una dirección. Generador de precios de la construcción. CYPE Ingenieros, S.A.,” chile.generadordeprecios.info. https://chile.generadordeprecios.info/obra_nueva/Estructuras/Acero/Montajes_industrializados/EAM030_Estructura_metalica_con_losa_armada.html (Accedido Jul. 19, 2024).
- [50] “Precio en Chile de Ud de Alquiler de grúa torre. Generador de precios de la construcción. CYPE Ingenieros, S.A.,” www.chile.generadordeprecios.info. http://www.chile.generadordeprecios.info/obra_nueva/Trabajos_previos/Andamios_y_maquinaria_de_elevacion/Gruas_torre/Alquiler_de_grua_torre.html (Accedido Jul. 19, 2024).
- [51] “Postes Eléctricos,” masmaderachile. <https://masmadera.cl/collections/postes-electricos> (Accedido Jul. 10, 2024).
- [52] “Improved Statistical Ratings for Distribution Overhead Lines,” National Grid. <https://www.nationalgrid.co.uk/innovation/projects/improved-statistical-ratings-for-distribution-overhead-lines> (Accedido Jul. 10, 2024).
- [53] CNE, Tarificación Eléctrica. <https://www.cne.cl/tarificacion/electrica/> (Accedido Jun. 27, 2024).
- [54] “ESTUDIO DE ANTECEDENTES TECNICOS, ECONOMICOS, NORMATIVOS Y AMBIENTALES DE TECNOLOGIAS DE CENTRALES TERMOELECTRICAS Y SUS SISTEMAS DE REFRIGERACION,” inodú, Chile, Dic. 2014. Disponible: <https://biblioteca.digital.gob.cl/server/api/core/bitstreams/cbfb9ee9-3bfe-4dc3-a862-466a25bd0317/content> (Accedido Jul. 10, 2024).
- [55] “SECURING THE FUTURE OF CRITICAL ENERGY TRANSFORMATION PROJECTS,” Snowy Hydro, Ago. 31, 2023. <https://www.snowyhydro.com.au/news/securing-the-future-of-critical-energy-transformation-resets/>
- [56] “Precio en Chile de m3 de Muro de hormigón. Generador de precios de la construcción. CYPE Ingenieros, S.A.,” chile.generadordeprecios.info. https://chile.generadordeprecios.info/obra_nueva/Estructuras/Hormigon_armado/Muros/Muro_de_hormigon.html (Accedido Jul. 10, 2024).
- [57] A. Carlos Batista et al., “Evaluation of the Flammability of Trees and Shrubs Used in the Implementation of Green Barriers in Southern Brazil”. Disponible: https://www.researchgate.net/profile/Armando-Gonzalez-Caban/publication/259890905_Proceedings_of_the_Fourth_International_Symposium_on_Fire_Economics_Planning_and_Policy_Climate_Change_and_Wildfires/links/54e685ed0cf2cd2e028f76c2/Proceedings-of-the-Fourth-International-Symposium-on-Fire-Economics-Planning-and-Policy-Climate-Change-and-Wildfires.pdf#page=267 (Accedido Jul. 10, 2024).
- [58] L. Smith, “Everything you need to know about Viburnums,” Silverstone Gardening, Ene. 18, 2023. <https://www.silverstonegardening.com.au/viburnum/#:~:text=Sweet%20Viburnum%2C%20also%20known%20as> (Accedido Jul. 10, 2024).
- [59] “¿Cuánto cuesta instalar riego por goteo? Precios Actualizados para 2024,” Cronoshare.cl, Jul. 24, 2023. <https://www.cronoshare.cl/cuanto-cuesta/instalar-riego-por-goteo> (Accedido Sep. 08, 2024).

- [60] “Reglamento de SSCC Mesa de Trabajo N°9,” Comisión Nacional de Energía, Chile, Ago. 2017. Disponible: <https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2017/09/Sesi%C3%B3n-N%C2%B09-Mesa-de-SSCC-17-08-2017.pdf> (Accedido Jul. 10, 2024).
- [61] “Enap,” www.enap.cl. <https://www.enap.cl/relaciones-comerciales/petroleo-diesel-grado-b1>
- [62] “LISTA DE PRECIOS MARZO 2024,” Punto Industrial, 2024. Disponible: <https://www.puntoindustrial.cl/img/estanques/LISTA%20DE%20PRECIOS%20PUNTO%20INDUSTRIAL%20MARZO%202024.pdf> (Accedido Jul. 10, 2024).
- [63] “INFORME DE COSTOS DE TECNOLOGÍAS DE GENERACIÓN,” Comisión Nacional de Energía, Chile, May. 2023.
- [64] “Earth observation: first Copernicus satellite Sentinel 1A,” Abr. 03, 2014. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/MEMO_14_251 (Accedido Jul. 10, 2024).
- [65] “OBSERVER: A History of Copernicus | Copernicus,” www.copernicus.eu. <https://www.copernicus.eu/en/news/news/observer-history-copernicus> (Accedido Jul. 10, 2024).
- [66] V. Ugolnikov, “Canales de comunicación por radio para sistemas de alerta,” www.sirenaselectronicas.com. <https://www.sirenaselectronicas.com/canales-de-comunicacion-por-radio-para-sistemas-de-alerta/> (Accedido Jul. 10, 2024).
- [67] “How Much Does It Cost To Start A Radio Station?,” radiostationmavericks.com, Jun. 27, 2022. <https://radiostationmavericks.com/start/how-much-does-it-cost-to-start-a-radio-station/>
- [68] N. Garzón Gómez, “Manual: Análisis torres de comunicación autosoportadas,” Universidad La Gran Colombia, Bogotá, Colombia, 2020. Disponible: <https://repository.ugc.edu.co/bitstream/handle/11396/5886/Manual%20proceso%20constructivo%20torres%20de%20comunicacion.pdf?sequence=2&isAllowed=y> (Accedido Jul. 10, 2024).
- [69] “Eficiencia Energética Mesa edificaciones,” Ministerio de Energía, Chile, Jun. 2021. Disponible: https://energia.gob.cl/sites/default/files/20210601_-_sesion_1_mesa_ee_en_edificaciones.pdf (Accedido Jul. 10, 2024).
- [70] “Information and Communication Technology for Disaster Risk Management in Japan: How Digital Solutions are Leveraged to Increase Resilience through Improving Early Warnings and Disaster Information Sharing,” World Bank, Washington, D.C. 2019. Disponible: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/979711574052821536/pdf/Information-and-Communication-Technology-for-Disaster-Risk-Management-in-Japan.pdf> (Accedido Jul. 10, 2024).
- [71] Mar. 30, 2023. <https://www.camionesjac.cl/comunidad/jac-lander-3430-desempeno-y-rendimiento-en-todo-tipo-de-terrenos> (Accedido Jul. 10, 2024).
- [72] B. Clarke, “POSITION PAPER: SYSTEM MANAGEMENT BLACK START REQUIREMENTS ON THE SWIS ,” Western Power, Australia. Disponible: <https://www.wa.gov.au/system/files/2021-05/Agenda%20Item%207%20Attachment%20-%20Black%20Start%20Requirements%20on%20the%20SWIS%20%28System%20Management%29.pdf> (Accedido Jul. 10, 2024).
- [73] Inalco Chevrolet. https://www.inalcochevrolet.cl/modelos/n400?ppc=%7Bpaidsearchcampaign%7D&gclid=Cj0KCQjw_qexBhCoARIsAFgBleuEha3GUYZZ2BNDzq5tUwDp-O0HBcg4pcc6TvKMPY2tzUxf2WM3PUaAomDEALw_wcB&gclsrc=aw.ds

(Accedido Jul. 10, 2024).

- [74] “Proyección de la Generación Distribuida en los sectores residencial, comercial e industrial en Chile,” E2BIZ, Santiago, Chile, 2021. Disponible: https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/e2biz-2021_proyeccion_de_generacion_distribuida.pdf (Accedido Jul. 10, 2024).
- [75] C. Wüllner, “¿Cuánto se demora realizar un proyecto fotovoltaico PMG(D) en Chile?,” Cool Power, Mar. 2023. Disponible: <https://www.coolpower.cl/post/cuanto-se-demora-realizar-un-proyecto-fotovoltaico-pmgd> (Accedido Jul. 10, 2024).
- [76] Coordinador Eléctrico Nacional, https://infotecnica.coordinador.cl/instalaciones/secciones-tramos?id=&id__in=,4467 (Accedido Jul. 10, 2024).
- [77] A. García Prat, J. Burgaleta, and J. L. Suárez, Nov. 01, 1998. <https://www.iesepubliching.com/proyecto-interandes-espanol.html#full-description-anchor> (Accedido Jul. 10, 2024).
- [78] “Climate-friendly cooling: New district cooling centre for Alsergrund,” Medical University of Vienna, Jul. 03, 2023. Disponible: <https://www.meduniwien.ac.at/web/en/ueber-uns/news/2023/default-34fee72b1e-3/klimafreundlich-kuehlen-neue-fernkaeltezentrale-fuer-den-alserground/> (Accedido Jul. 10, 2024).
- [79] Comisión Nacional de Energía, RESOLUCIÓN EXENTA No 680. 2022.
- [80] B. C. Bright, A. T. Hudak, R. E. Kennedy, J. D. Braaten, and A. Henareh Khalyani, “Examining post-fire vegetation recovery with Landsat time series analysis in three western North American forest types,” *Fire Ecology*, vol. 15, no. 1, Abr. 2019, doi: <https://doi.org/10.1186/s42408-018-0021-9>.
- [81] W. S. Machida et al., “Long term post-fire recovery of woody plants in savannas of central Brazil,” *Forest Ecology and Management*, vol. 493, p. 119255, Aug. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119255>.
- [82] “Tsunami Las Grandes Olas,” Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile, Valparaíso. Disponible: <https://emergenciaydesastres.mineduc.cl/wp-content/uploads/2021/04/Tsunami-Grandes-Olas-Gui%CC%81a-Docente.pdf> (Accedido Jul. 1, 2024).
- [83] O. Rojas, M. Mardones, J. L. Arumí, and M. Aguayo, “Una revisión de inundaciones fluviales en Chile, período 1574-2012: causas, recurrencia y efectos geográficos,” *Revista de geografía Norte Grande*, no. 57, pp. 177–192, May. 2014, doi: <https://doi.org/10.4067/S0718-34022014000100012>.