



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

HERRAMIENTA DE APOYO PARA LA TOMA DE DECISIONES EN EL SECTOR ELÉCTRICO BASADA
EN INDICADORES DE ECONOMÍA CIRCULAR

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MENCIÓN
ELÉCTRICA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO

CLAUDIO OSVALDO LÓPEZ DE LÉRIDA ELÍAS

PROFESOR GUÍA:

RODRIGO ERNESTO EDUARDO PALMA BEHNKE

PROFESOR CO-GUÍA:

FELIPE DÍAZ-ALVARADO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

PATRICIO MENDOZA ARAYA

PABLO FERRADA MARTÍNEZ

Este trabajo ha sido financiado por Beca Magister Nacional ANID Folio 22210520

SANTIAGO DE CHILE

2022

RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN
CIENCIAS DE LA ING. MENCIÓN ELÉCTRICA, Y DE LA MEMORIA PARA
OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO
POR: CLAUDIO OSVALDO LÓPEZ DE LÉRIDA ELÍAS
FECHA: 2022
PROFESOR GUÍA: SR. RODRIGO PALMA BEHNKE

HERRAMIENTA DE APOYO PARA LA TOMA DE DECISIONES EN EL SECTOR ELÉCTRICO BASADA EN INDICADORES DE ECONOMÍA CIRCULAR

Si bien abordar el desafío del cambio climático es urgente, no puede disociarse de otras problemáticas menos visibilizadas en relación al desarrollo sostenible del sector eléctrico. La economía circular (EC), que busca maximiza el servicio producido a partir del flujo lineal de materiales y energía entre la naturaleza y la sociedad, permite abordar este desafío.

Así, el objetivo de esta tesis es proponer una forma de integración efectiva de los conceptos de EC, a través de un set de indicadores, en la toma de decisiones del sector eléctrico. Para esto se adapta el marco conceptual ew-MFA (economy wide-Material Flow) con tal de estructurar la información a considerar, y se utilizan los criterios RACER (Relevant-Acceptability-Credibility-Easiness-Robustness) para evaluar la prefactibilidad de los potenciales indicadores. Con lo anterior se proponen los siguientes tres indicadores: Desmaterialización Relativa (DMR), Desmaterialización Absoluta (DMA) y Autoabastecimiento Eléctrico (AE).

Al aplicar los indicadores propuestos sobre la proyección energética de la región de Tarapacá, dos escenarios que cumplen con las metas regionales de descarbonización se diferencian en su desempeño respecto a la idea de EC. Lo anterior da cuenta de la efectividad de su aplicación en un caso real. Además, se muestra que mediciones de penetración renovable y emisiones de GEI son indicadores insuficientes para capturar aspectos claves del desarrollo sostenible del sector eléctrico. Los indicadores propuestos pueden ser entregar evidencia útil para la planificación de sistemas eléctricos basados en tecnologías con menor impacto material en un territorio.

A mi abuela, Elvira.

Agradecimientos

A mis padres, Cecilia y Claudio, por impulsarme a alcanzar todos mis sueños en los momentos de pasión, y brindarme sostén en los momentos de fragilidad.

A mi hermana, Antonia, por ser compañía incondicional a lo largo de toda mi vida; por ser mi ejemplo de fortaleza y crecimiento.

Al gurú, Dr. Profesor Rodrigo Palma Behnke, por su permanente amistad, apoyo y guía; por aceptar el reto de participar en la formación de una persona original – y perpetuamente – entrópica.

Al Profesor Felipe Díaz Alvarado, por entregarme una nueva forma de mirar alrededor en cada conversación.

A Robert y Tommy, porque no podría haber pedido mejores amistades; por su forma de vivir la vida y compartirla conmigo.

A mis amigas y amigos del laboratorio, particularmente a la Belén y al Richie, porque mis últimos años de carrera no hubiesen estado tan llenos de cariño sin ustedes.

A mis amigas, Ilana, Claudia y Daniela, por entregarme un espacio de cobijo y ser un ejemplo de profesionales.

A mi pareja, Catalina, por recorrer conmigo, empujándome, la última milla; por llegar a darme vuelta los planes, e incitarme a cambiar el mundo en equipo.

A las personas que me acompañaron en parte de este recorrido, y que por alguna u otra razón no están hoy.

Al Jefe, por hacer todo esto posible.

“I often say that when you can measure what you are speaking about, and express it in numbers, you know something about it...”

- *Lord Kelvin*

Tabla de contenido

Capítulo 1: Introducción	1
1.1. Motivación.....	1
1.2. Hipótesis.....	3
1.3. Objetivos	3
1.3.1. Objetivo general	3
1.3.2. Objetivos específicos	3
1.4. Alcance.....	4
1.5. Estructura del documento	4
Capítulo 2: Antecedentes	6
2.1. Economía circular	6
2.1.1. Conceptualización	6
2.1.2. Críticas, desafíos y límites de la EC	10
2.1.3. Economía circular en el sector energético	14
2.2. Indicadores	15
2.2.1. Indicadores y desarrollo sostenible.....	15
2.2.2. Clasificación de indicadores	16
2.2.3. La importancia de un marco de medición para el desarrollo de un sistema de indicadores	17
2.2.4. Criterios que debe cumplir un “buen” indicador.....	19
2.2.5. Indicadores de economía circular	21

2.3. Marcos de Contabilidad – Accounting Frameworks	22
2.3.1. Origen y desarrollo de los sistemas de contabilidad	22
2.3.2. SEEA Central Framework [85]	24
2.3.3. Economy wide Material Flow Accounts (ew-MFA) Framework [91]	25
2.3.4. Ew – MFA framework, flujos internos e indicadores	29
2.4. Mercado energético y medio ambiente.....	31
2.4.1. Conceptos generales de organización y mercados eléctricos	31
2.4.2. Organización del eléctrico chileno, agentes que lo componen, marco normativo y toma de decisiones	34
2.4.3. Toma de decisiones pública en el sector eléctrico chileno: PELP.....	38
2.4.4. Política medioambiental en el sector eléctrico	45
2.4.5. Política medioambiental en el sector eléctrico chileno	49
Capítulo 3: Propuesta de indicadores	57
3.1. Descripción general de la metodología para la selección y/o elaboración de indicadores	60
3.2. I: Elección de marco conceptual	62
3.3. II: Aplicación del marco conceptual	67
3.4. III: Propuesta set de indicadores	70
3.4.1. Ejemplo de sistema uninodal conectado a “Resto del Sistema”	72
3.4.2. Indicador de Desacople Material Relativo (DMR)	73
3.4.3. Indicador de Desacople Material Absoluto (DMA)	83
3.4.4. Indicador complementario, autoabastecimiento eléctrico (AE) - dependencia	86
3.5. IV: Test preliminar, evaluación de indicadores en base a criterios	89

Capítulo 4: Propuesta de integración de indicadores de EC a la toma de decisiones del sector eléctrico	95
4.1. Descripción general de la propuesta de integración de indicadores de EC a la toma de decisiones del sector eléctrico	96
4.2. Monitoreo y evaluación.....	99
4.3. Análisis Energético de Largo Plazo, Estudio de Escenarios.....	100
Capítulo 5: Caso de estudio, Región de Tarapacá	103
5.1. Adaptación de la integración de indicadores a la toma de decisiones del caso de estudio...	103
5.2. PELP 2023 – 2027, Región de Tarapacá.....	107
5.3. Fuentes de información	108
5.3.1. Expansión de la infraestructura de generación y generación energía eléctrica	109
5.3.2. Infraestructura de transmisión: Líneas, subestaciones y transformadores	114
5.3.3. Demanda eléctrica	115
5.3.4. Eficiencia Energética.....	116
5.3.5. Modelo material y factores de caracterización (normalización de materiales)	119
5.4. Resultados: Indicadores de EC para el sector eléctrico de la Región de Tarapacá	121
5.4.1. Resultados Indicador AE	121
5.4.2. Resultados Indicador DMRcap	123
5.4.3. Resultados Indicador DMAcap	127
5.4.4. Otros indicadores.....	130
Capítulo 6: Discusión de resultados.....	134
Capítulo 7: Conclusiones y trabajo futuro.....	137
7.1. Conclusiones.....	137

7.2. Trabajo futuro	139
Bibliografía.....	141

Índice de tablas

TABLA 2-1 ELEMENTOS DE EC [78].....	21
TABLA 2-2 CATEGORÍAS Y SUBCATEGORÍAS DE FLUJOS PARA EL MARCO EW – MFA [96].....	29
TABLA 2-3 INDICADORES EW – MFA DERIVADOS DE LAS CANTIDADES ESTANDARIZADAS	30
TABLA 2-4 INDICADOR DERIVADO DE LA INCORPORACIÓN DE TÉRMINOS DE RECIRCULACIÓN	30
TABLA 2-5 RESUMEN DE LA PROPUESTA DE PLAN DE EFICIENCIA ENERGÉTICA 2022-2026.....	55
TABLA 3-1 ENTRADAS Y SALIDAS DE INFRAESTRUCTURA ENERGÉTICA [MW/AÑO]	73
TABLA 3-2 CONSUMO INICIAL Y TASA DE CRECIMIENTO	73
TABLA 3-3 REQUERIMIENTOS MATERIALES DE LA INFRAESTRUCTURA ENERGÉTICA [143]	77
TABLA 3-4 SERIE DE TIEMPO DE INFRAESTRUCTURA MATERIAL PARA TECNOLOGÍA PV	78
TABLA 3-5 FACTOR DE NORMALIZACIÓN ADP SBEQ APLICADO AL EJEMPLO DEL TRABAJO	80
TABLA 3-6 INGESTA MATERIAL NORMALIZADO POR EL SISTEMA DE EJEMPLO A LO LARGO DEL TIEMPO	81
TABLA 3-7 GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA DEL SISTEMA DE ESTUDIO	82
TABLA 3-8 AHORROS DE CONSUMO BASADO EN ESTRATEGIAS DE EE	82
TABLA 4-1 APLICACIONES DE INDICADORES, Y PREGUNTAS CLAVE QUE APUNTAN A RESPONDER.....	96
TABLA 5-1 ANÁLISIS DE ESCENARIO DE EE ANIDADO	118
TABLA 5-2 IMPACTO NUMÉRICO DE ANÁLISIS DE ESCENARIO ANIDADO	118
TABLA 5-3 MODELO MATERIAL INFRAESTRUCTURA DE GENERACIÓN [154].....	120
TABLA 5-4 MODELO MATERIAL INFRAESTRUCTURA DE TRANSMISIÓN [154].....	120
TABLA 5-5 FACTOR DE CARACTERIZACIÓN ADP SBEQ, HERRAMIENTA DE NORMALIZACIÓN [147].....	120

Índice de figuras

FIGURA 2-1: REPRESENTACIÓN ECONOMÍA LINEAL. EXTRACCIÓN DE MINERALES (ENTRE OTROS MATERIALES), MANUFACTURA DEL PRODUCTO, Y DESECHO DE ÉSTE POSTERIOR A SU USO.	7
FIGURA 2-2 METABOLISMO SOCIOECONÓMICO DE AYER Y HOY. A LA IZQUIERDA SE MUESTRA UNA REPRESENTACIÓN DE LA ECONOMÍA PREINDUSTRIAL, EN DONDE EL TAMAÑO DE LA ECONOMÍA GLOBAL ERA RELATIVAMENTE PEQUEÑO RESPECTO AL ECOSISTEMA GLOBAL. HOY LA MAGNITUD ES COMPARABLE A LOS CICLOS NATURALES (EJ: CARBONO, AGUA), INTERFERIENDO EN DICHA ESCALA [30].....	8
FIGURA 2-3 DIAGRAMA MARIPOSA, ELLEN MACARTHUR FOUNDATION [13]	8
FIGURA 2-4 CATEGORIZACIÓN DE ESTRATEGIAS DE LA EC EN EL SECTOR ENERGÉTICO [52].	14
FIGURA 2-5 REPRESENTACIÓN SIMPLIFICADA DE EW – MFA	26
FIGURA 2-6 DIAGRAMA EW – MFA CONSIDERANDO FLUJOS INTERNOS [28].....	29
FIGURA 2-7 ESTADO DE LIBERALIZACIÓN DEL SECTOR ELÉCTRICO EN DISTINTAS REGIONES [99].....	32
FIGURA 2-8 MODELO ORGANIZACIONAL DE SECTOR ELÉCTRICO CHILENO, MERCADO MAYORISTA [100].	34
FIGURA 2-9 ESTRUCTURAS DE MERCADO EN EL SECTOR ELÉCTRICO CHILENO. A LA IZQUIERDA: MERCADO TIPO POOL; A LA DERECHA: ABSTRACCIÓN DE ACUERDOS BILATERALES FINANCIEROS. REPRESENTACIÓN ADAPTADA PARA EL CASO DE CHILE [101].	35
FIGURA 2-10 ESQUEMA SECUENCIAL DEL PROCESO PELP, CON EXPRESIÓN DE ENTRADAS Y SALIDAS.	40
FIGURA 2-11 RELACIÓN METODOLÓGICA DE LOS MODELOS DE PROYECCIÓN[105].	41
FIGURA 2-12 PROCESO DE PLANIFICACIÓN, LICITACIÓN Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN, Y LOS AGENTES RESPONSABLES.	42
FIGURA 2-13 OBJETOS DE VALORACIÓN TERRITORIAL PRODUCTIVOS, PER TARAPACÁ [110].....	44
FIGURA 2-14 TAXONOMÍA DE INSTRUMENTOS PARA POLÍTICA PÚBLICA MEDIOAMBIENTAL.....	45
FIGURA 2-15 ESQUEMA SIMPLIFICADO DEL SISTEMA SEIA.....	52
FIGURA 2-16 METAS GLOBALES DE LA PROPUESTA DE PLAN DE EFICIENCIA ENERGÉTICA 2022-2026 [133].	55
FIGURA 3-1 REPRESENTACIÓN “DONUT” DE LOS LÍMITES SOCIALES Y PLANETARIOS [136].....	59
FIGURA 3-2 MÉTODO DE SELECCIÓN Y/O ELABORACIÓN DE INDICADORES; DIAGRAMA DE FLUJO.	61
FIGURA 3-3 EJEMPLO DE INTERACCIÓN: DINÁMICAS DE GENERACIÓN SOLAR Y CONSUMO [kW].	63
FIGURA 3-4 CONCEPTUALIZACIÓN DEL SERVICIO ENERGÉTICO COMO SUMA DE DOS CONTRIBUCIONES.	64
FIGURA 3-5 ESQUEMA DPSIR PARA EL TÓPICO DE CAMBIO CLIMÁTICO	65
FIGURA 3-6 DIAGRAMA EW – MFA CONSIDERANDO FLUJOS INTERNOS [28].....	67
FIGURA 3-7 ESQUEMA DE EW – MFA PARA APLICACIÓN DE EC AL SECTOR ELÉCTRICO.	70
FIGURA 3-8 METODOLOGÍA DE SELECCIÓN Y/O ELABORACIÓN DE INDICADORES	71
FIGURA 3-9 DIAGRAMA DEL SUBSISTEMA DE EJEMPLO, CONECTADO AL “RESTO DEL SISTEMA”	72
FIGURA 3-10 ESQUEMA LCA.....	79
FIGURA 3-11 CONSUMO ELÉCTRICO CON Y SIN MEDIDAS DE EE	82
FIGURA 3-12 COMPUTO DEL INDICADOR DMR [TON ADP Sbeq/GWh] PARA CADA TIEMPO T EN EL PERIODO DE ESTUDIO	83
FIGURA 3-13 COMPUTO DEL INDICADOR DMA [TON ADP Sbeq] PARA CADA TIEMPO T EN EL PERIODO DE ESTUDIO	86
FIGURA 3-14 ENERGÍA EN SERVICIO Y CONSUMO PROYECTADO (E_t, C_{Pt}) PARA CADA PERIODO T EN [GWh].	87

FIGURA 3-15 CARACTERIZACIÓN ANUAL DE AUTO ABASTECIMIENTO ENERGÉTICO DEL SISTEMA EJEMPLO; ESTO ES, VALORES DE E_t — $C_{Pt}C_{Pt}[1]$	88
FIGURA 4-1 REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE DOS HERRAMIENTAS PARA LA TOMA DE DECISIONES PÚBLICA DEL SECTOR ELÉCTRICO CHILENO	98
FIGURA 5-1 ESQUEMA METODOLÓGICO ANÁLISIS ENERGÉTICO DE LARGO PLAZO, ESTUDIO DE ESCENARIOS.	105
FIGURA 5-2 RELACIÓN METODOLÓGICA DEL PROCESO PELP, ADECUADA AL USO DE INDICADORES DE EC (MODIFICADO DE [105]).	106
FIGURA 5-3 REQUERIMIENTO DE INFORMACIÓN PARA CALCULAR INDICADORES.....	109
FIGURA 5-4 EXPANSIÓN DE LA GENERACIÓN, REGIÓN DE TARAPACÁ, PELP 2023 – 2027.	111
FIGURA 5-5 PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA, REGIÓN DE TARAPACÁ, PELP 2023 – 2027.	113
FIGURA 5-6 DIAGRAMA UNILINEAL REGIÓN DE TARAPACÁ, ILUSTRACIÓN REPRESENTATIVA [161].	115
FIGURA 5-7 DEMANDA ELÉCTRICA DE LA REGIÓN DE TARAPACÁ.....	116
FIGURA 5-8 CONSIDERACIONES DE EFICIENCIA ENERGÉTICA DENTRO DEL PROCESO PELP 2023 – 2027.....	117
FIGURA 5-9 METAS ANUALES DE LEE PARA CADA ESCENARIO ANIDADADO, RESPECTO A LA REFERENCIA LEE DE LA FIGURA 2-16.	119
FIGURA 5-10 INDICADOR $AE[1]$ PARA EL ESCENARIO ANIDADADO 1.....	122
FIGURA 5-11 INDICADOR $AE[1]$ PARA EL ESCENARIO ANIDADADO 2.....	122
FIGURA 5-12 INDICADOR $AE[1]$ PARA EL ESCENARIO ANIDADADO 3.....	123
FIGURA 5-13 INDICADOR $DMRcap[tonGWh]$ PARA EL ESCENARIO ANIDADADO 1	124
FIGURA 5-14 INDICADOR $DMRcap[tonGWh]$ PARA EL ESCENARIO ANIDADADO 2	124
FIGURA 5-15 INDICADOR $DMRcap[tonGWh]$ PARA EL ESCENARIO ANIDADADO 3	125
FIGURA 5-16 INDICADOR $DMRcap[tonGWh]$ PARA EL ESCENARIO DE CARBONO NEUTRALIDAD, ESCENARIO ANIDADADO 1.....	126
FIGURA 5-17 INDICADOR $DMRcap[tonGWh]$ PARA EL ESCENARIO DE RECUPERACIÓN LENTA, ESCENARIO ANIDADADO 1.....	126
FIGURA 5-18 INDICADOR $DMRcap[tonGWh]$ PARA EL ESCENARIO DE TRANSICIÓN ACCELERADA, ESCENARIO ANIDADADO 1	127
FIGURA 5-19 COMPARACIÓN DEL INDICADOR $DMAcap[ton]$ PARA LOS RESULTADOS DE LOS TRES ESCENARIOS PELP 2023 – 2027 .	128
FIGURA 5-20 INDICADOR $DMAcap[ton]$ PARA EL ESCENARIO DE CARBONO NEUTRALIDAD	128
FIGURA 5-21 INDICADOR $DMAcap[ton]$ PARA EL ESCENARIO DE RECUPERACIÓN LENTA	129
FIGURA 5-22 INDICADOR $DMAcap[ton]$ PARA EL ESCENARIO DE TRANSICIÓN ACCELERADA.....	129
FIGURA 5-23 INDICADOR DE PORCENTAJE DE GENERACIÓN RENOVABLE ANUAL	130
FIGURA 5-24 INDICADOR DE PORCENTAJE DE CAPACIDAD RENOVABLE DEL SISTEMA ESTUDIADO (REGIÓN DE TARAPACÁ).....	131
FIGURA 5-25 EMISIONES ACUMULADAS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA [KTON CO2 EQ], REGIÓN DE TARAPACÁ	132
FIGURA 5-26 EMISIONES ANUALES GENERACIÓN ELÉCTRICA [KTON CO2 EQ], REGIÓN DE TARAPACÁ	132
FIGURA 5-27 EMISIONES ANUALES GENERACIÓN ELÉCTRICA CON INTERPOLACIÓN LINEAL [KTON CO2 EQ], REGIÓN DE TARAPACÁ	133

Capítulo 1: Introducción

1.1. Motivación

Dada la gran cantidad de evidencia científica que reafirma las consecuencias graves de la inacción ante la crisis climática [1], distintas naciones han optado por la promoción de cambios alineados con la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Estos esfuerzos se encuadran con el compromiso contraído en el Acuerdo de París [2]. Lo anterior se materializa en metas autoimpuestas por cada nación descritas en sus respectivas NDC (*Nationally Determined Contribution*) [3].

Los sistemas eléctricos, y de energía en general, han sido foco de reestructuración debido a su alto aporte al total global de emisiones, cercano al 73.2% para el año 2016 [4]. Dichos cambios abarcan desde fomento de la innovación tecnológica, principalmente relacionados con las energías renovables (ER) y su integración a la matriz [5][6], hasta transformaciones en la organización de los agentes y sus roles [7][8].

Si bien abordar este desafío tiene un carácter urgente, este proceso no puede dissociarse de otras problemáticas menos visibilizadas que guardan relación con los recursos, y que también atañen al sector eléctrico. Algunos ejemplos son la acumulación de desechos con sus efectos en los distintos ecosistemas [9][10] y la escasez del agua [11]. Considerando la complejidad del escenario planteado, resulta clara la necesidad de complementar el proceso de toma de decisiones del sector, de manera que se consideren una mayor cantidad de aspectos en las estrategias a evaluar, y sus respectivos aportes a un desarrollo sustentable.

La economía circular (EC) es una disciplina que estudia el uso de materiales y energía, y que podría aportar a subsanar la disyuntiva planteada. Se identifica como opuesto al histórico modelo de economía lineal representado como “extracción – uso – desecho” [12], planteando un marco teórico para un cambio en el uso de los recursos y, en consecuencia, sus impactos. Dentro de los lineamientos generales de la EC se pueden distinguir: eliminar residuos y contaminación desde el diseño, mantener productos y materiales en uso, y regenerar sistemas naturales [13].

En lo que respecta a desarrollo sostenible, el uso de indicadores tiene una larga trayectoria de empleo en el campo [14], exigiendo al mismo tiempo un progreso en el conocimiento sobre los mismos. Su implementación permite condensar y presentar información compleja, y se utilizan comúnmente para la establecimiento de objetivos y seguimiento de políticas públicas [15]. Dicho lo anterior, el uso de indicadores presenta una oportunidad para la operacionalización de la EC, y su posterior integración al proceso de toma de decisiones del sector eléctrico. Más aún, el uso de indicadores puede aportar en clarificar un análisis en torno a la EC, considerando la diversidad de pensamientos que reúne el concepto, y el amplio rango de estrategias que se identifican con el mismo [16].

Pese a que no se tienen antecedentes sobre estándares de metodologías para la elaboración y/o selección de indicadores, sí se tiene registro de recomendaciones que entregan una estructura general [17] [18]. La aplicación un marco de medición y criterios de evaluación como elementos claves en la estructura recomendada, proveen de coherencia, transparencia y relevancia a la propuesta de indicadores [19], promoviendo su empleo en el plano real. De esta manera se expande el desafío de elaboración y/o selección de indicadores a la previa implementación de un marco de medición, y a la elección de criterios de evaluación de los mismos indicadores.

Los procesos de toma de decisiones del sector eléctrico son variados y responden al ordenamiento del sistema posterior a su periodo de restructuración, llevado a cabo de manera independiente por cada región. La forma de integrar un grupo de indicadores a la toma de decisiones depende tanto del esquema adoptado por la red en cuestión, así como también de la naturaleza del fenómeno a indicar. En el presente trabajo se destaca un enfoque sistémico de la economía circular, lo que se relaciona con herramientas de planificación centralizada del sector eléctrico.

En base a lo expuesto, se propone un caso de estudio para el empleo del set de indicadores resultante, con el propósito de verificar su desempeño. Para la implementación se escoge como contexto de estudio la Región de Tarapacá, debido a la relevancia que cobra la orgánica territorial y regional en el marco de la Política Energética de Chile (Energía 2050) [20], particularmente al considerar el rol de la “Energía como Motor de Desarrollo”. Adicionalmente, está programada la apertura del “Centro Tecnológico para la Economía Circular” para la misma región [21], por lo se presenta como una elección coherente.

Este trabajo propone un set de indicadores basado en el concepto de EC para el sector eléctrico y propone una manera de integrarlos en su proceso de toma de decisiones. Lo anterior permite visibilizar elementos relevantes para el desarrollo del mismo sector, entregando herramientas para la comprensión de las consecuencias que conllevan diferentes líneas de acción sobre el uso material. Este conjunto de indicadores no es el resultado de una elección arbitraria, sino que se fundamenta en un proceso riguroso que consta de la construcción de un relato coherente del contexto (marco de medición), y la selección de criterios de evaluación.

1.2. Hipótesis

La primera hipótesis de este trabajo de tesis plantea que: la utilización de medidas de penetración renovable y emisiones de gases de efecto invernadero como indicadores estándares del desarrollo sostenible del sector eléctrico son insuficientes para tratar el tópico de EC.

Una segunda hipótesis de este trabajo de tesis plantea que: es posible proponer un conjunto de indicadores asociados a elementos clave de EC que complementen el proceso de toma de decisiones pública del sector eléctrico, entregando evidencia estratégica para el desarrollo sostenible de éste.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

El objetivo general de esta tesis es proponer una forma de integración efectiva de los conceptos de EC en el proceso de toma de decisiones del sector eléctrico, en el contexto de promover un desarrollo sostenible. Esta forma de integración consta del desarrollo de un set de indicadores, así como su vinculación en los procesos de toma de decisión del sector. Se busca transparentar los efectos que tienen distintas estrategias de desarrollo o líneas de acción de un territorio en el uso de materiales.

1.3.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos de esta tesis son:

1. Obtener un entendimiento global de la interacción entre la EC y el desarrollo sostenible en el sector eléctrico a través de la revisión del estado del arte.
2. Seleccionar e implementar un marco de medición que estructure y de coherencia a la información del sector eléctrico, tal que permita generar una propuesta de indicadores relevantes para el problema y su contexto.
3. Proponer (elaborar y/o seleccionar) un conjunto de indicadores, en base a un escrutinio sobre la documentación de indicadores de EC, el marco de medición adoptado, y las características propias del sector eléctrico.
4. Evaluar el conjunto de indicadores propuestos en base a criterios de bondad preseleccionados.
5. Disponer de una metodología de apoyo al proceso de toma de decisiones del sector eléctrica que integre el conjunto de indicadores resultante de los procedimientos anteriores.
6. Respalidar con un caso de estudio el desempeño y utilidad de los indicadores propuestos.

1.4. Alcance

Los alcances principales de este trabajo son:

- El enfoque general del trabajo es de carácter “*top-down*”, por lo cual se evita una modelación detallada de cada subsector, a menos que éste tenga alguna utilidad para alcanzar los objetivos de eficacia y eficiencia propuestos.
- El análisis de economía circular del presente trabajo se lleva a cabo desde una perspectiva de contabilidad material, y no profundiza en los impactos de otra índole (efectos en los ecosistemas, por ejemplo).
- El trabajo se enmarca en el contexto energético de un territorio, particularmente en el sector eléctrico. De ser necesario se complementa el desarrollo con otros tópicos relevantes, abarcados sin mayor profundidad.
- El trabajo no busca desarrollar en detalle las temáticas de sostenibilidad, por lo que su conexión con los aspectos de economía circular se basa en las metodologías existentes y probadas, con un foco en los aspectos técnicos.
- El presente trabajo no pretende declarar un conjunto oficial de indicadores de economía circular para el sistema eléctrico, sino que presentar una propuesta fundada de éste (conjunto de indicadores). Dicha propuesta deberá ser estudiada posteriormente por las organizaciones pertinentes para su posible implementación.
- Los indicadores seleccionados y/o elaborados se enfocan, particularmente, en el manejo de recursos no-renovables. Las dinámicas de reproducción de los recursos renovables escapan del afán del estudio por motivos que se presentan en la Sección 3.4.3.

1.5. Estructura del documento

El documento se estructura en siete capítulos, comenzando por la presente Introducción. En el Capítulo 2:, Antecedentes, se detallan las bases conceptuales para una mejor comprensión del trabajo. Se incluye una revisión de la noción de EC, teoría de indicadores y su aplicación a través de un marco conceptual, y la estructura de los sistemas eléctricos a partir de una mirada organizacional y medioambiental. En el Capítulo 3:, Propuesta de indicadores, se aplican las estructuras genéricas expuestas en el Capítulo 2: al problema en cuestión, particularmente el marco conceptual; se establecen, además, algunas convenciones para desarrollo del trabajo.

En el Capítulo 4:, considerando el conjunto de indicadores elaborados y/o seleccionados en el capítulo anterior, se describe una propuesta de integración de estos mismos en dos espacios de toma de decisión del

sector público: evaluación y monitoreo (análisis ex-post), y Análisis Energético de Largo Plazo (análisis ex-post). En el Capítulo 5:, se trabaja un caso de estudio para evaluar el desempeño de los indicadores. Para esto, se toma una de las propuestas de integración de indicadores, particularmente la propuesta de análisis ex-post, para aplicarla en los resultados del proceso PELP 2023 – 2027 sobre la Región de Tarapacá. Además, en el Capítulo 5: se aplican indicadores tradicionales del sector eléctrico para encontrar relaciones con los nuevos indicadores y enriquecer el discurso. En el Capítulo 6:, se discuten los resultados del capítulo anterior, considerando los indicadores propuestos y los indicadores ya establecidos en el sector. Finalmente, en el Capítulo 7: se concluye el trabajo, analizando el cumplimiento de los objetivos según el desarrollo y los resultados.

Capítulo 2: Antecedentes

En el presente capítulo se sientan las bases contextuales, conceptuales y teóricas requeridas para una mejor comprensión del trabajo propuesto. En primer lugar, se expone el concepto de economía circular, incluyendo desafíos del concepto y las líneas de aplicación identificadas para el sector energético. Luego, se exponen elementos sustanciales para el proceso de creación y/o selección de indicadores. Siguiendo, se profundiza en el marco conceptual de contabilidad como elemento clave para el problema de indicadores de EC. Finalmente, se ilustra una mirada organizacional de los sistemas eléctricos, además del caso particular chileno, junto con una gama de instrumentos de política pública medioambiental potencialmente aplicable a éstos.

2.1. Economía circular

A continuación, se presenta una aproximación básica a la EC. En primer lugar se expone la idea principal, tomando como punto de inicio el modelo actual de “economía lineal” mencionada en la motivación. Se evidencian las problemáticas de este último y la necesidad de un cambio de paradigma, presentando la alternativa “circular”. En segundo lugar, se revelan algunos desafíos de este nuevo canon. Por último, se introduce un entendimiento de aplicación de la EC para el sector energético, en base a una subcategorización de sus líneas de aplicación.

2.1.1. Conceptualización

El término economía se entiende a partir del conjunto de actividades económicas (producción, consumo y acumulación de productos) realizadas por un grupo de agentes en un territorio, algunas de las cuales requieren flujos de recursos y energía para su realización¹. La economía lineal, representada genéricamente por el circuito “take-make-dispose”, refiere al movimiento de los materiales y energía desde un inicio (fuente) hasta un final (sumidero) bien definidos, asociado a la cadena de suministro y consumo de los productos (Figura 2-1).

¹ La terminología se discutirá con más detalle en la Sección 2.4



Figura 2-1: Representación economía lineal. Extracción de minerales (entre otros materiales), manufactura del producto, y desecho de éste posterior a su uso.

Desde el extremo extractivo se pueden encontrar minas, canales de agua o napas subterráneas, bosques, por decir algunas fuentes de recursos naturales materiales. Desde el extremo de los desechos, se pueden mencionar vertederos (regularizados e irregulares), océanos, y atmósfera.

La adopción de este arquetipo por las diferentes industrias se funda o justifica en la abundancia con la que se encontraban las materias primas, tanto para la fabricación de bienes como para la generación de energía. Esto se traduce en bajos costos de extracción, lo que incentiva modelos de negocio intensos en uso de materia como solución al problema de minimización de costos o maximización de utilidades [22].

Para que un modelo como este sea factible con el pasar del tiempo, es necesario sostener dos grandes supuestos: la existencia de una fuente inagotable de recursos, y un sumidero sin límites para los desechos. Esto se traduce en concebir la tierra como un sistema abierto, o un sistema cerrado (en donde outputs guardan relación con inputs) con una capacidad restaurativa superior o igual al desgaste [23]; es decir, declarar que la acción antropogénica es despreciable respecto al resto de la naturaleza.

A pesar de que en algún momento de la historia se pudiese haber asumido lo anterior para una escala temporal amplia, es de sentido común sostener que estos principios no se cumplen hoy en día (Figura 2-2). Para constatar esto, basta con constatar el sobrepaso de límites planetarios [24], u observar indicadores como la huella ecológica (Ecological Footprint) [25]. Más aún, es complejo considerar un escenario de industrialización de los países en vías de desarrollo, debido al desplazamiento (aumento) en la tasa metabólica² que esto significaría bajo el paradigma actual. Es probable que no haya disponibilidad de recursos para dicho ejercicio, ni capacidad ecosistémica para absorber las consecuencias en términos de desechos [26] [27] [28]. Actualmente se entiende que el crecimiento económico basado en el uso de recursos tiene límites [29].

² Requerimiento material [t] anual por habitante de una nación

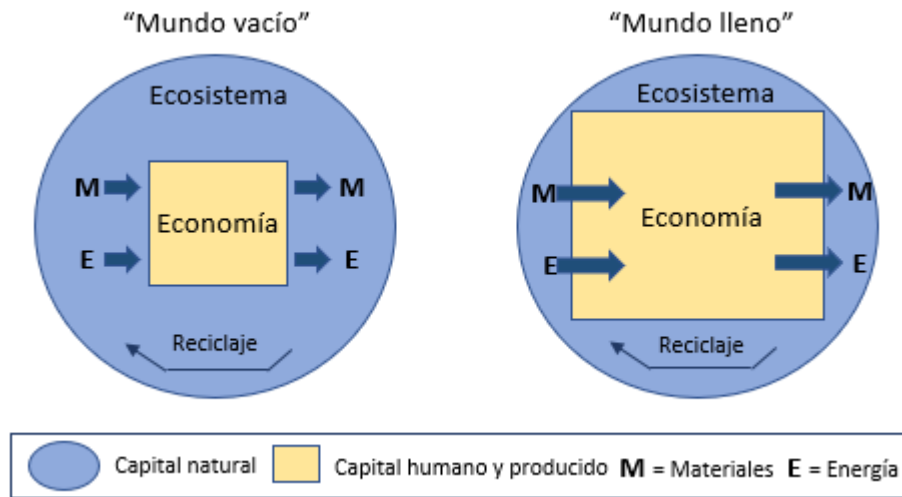


Figura 2-2 Metabolismo socioeconómico de ayer y hoy³. A la izquierda se muestra una representación de la economía preindustrial, en donde el tamaño de la economía global era relativamente pequeño respecto al ecosistema global. Hoy la magnitud es comparable a los ciclos naturales (ej: carbono, agua), interfiriendo en dicha escala [30].

De manera opuesta al modelo lineal, una economía circular obedece a un sistema que requiere un mínimo de insumos y desechos para su funcionamiento sostenido en el tiempo. El diagrama mariposa (Figura 2-3) provee una intuición general del concepto.

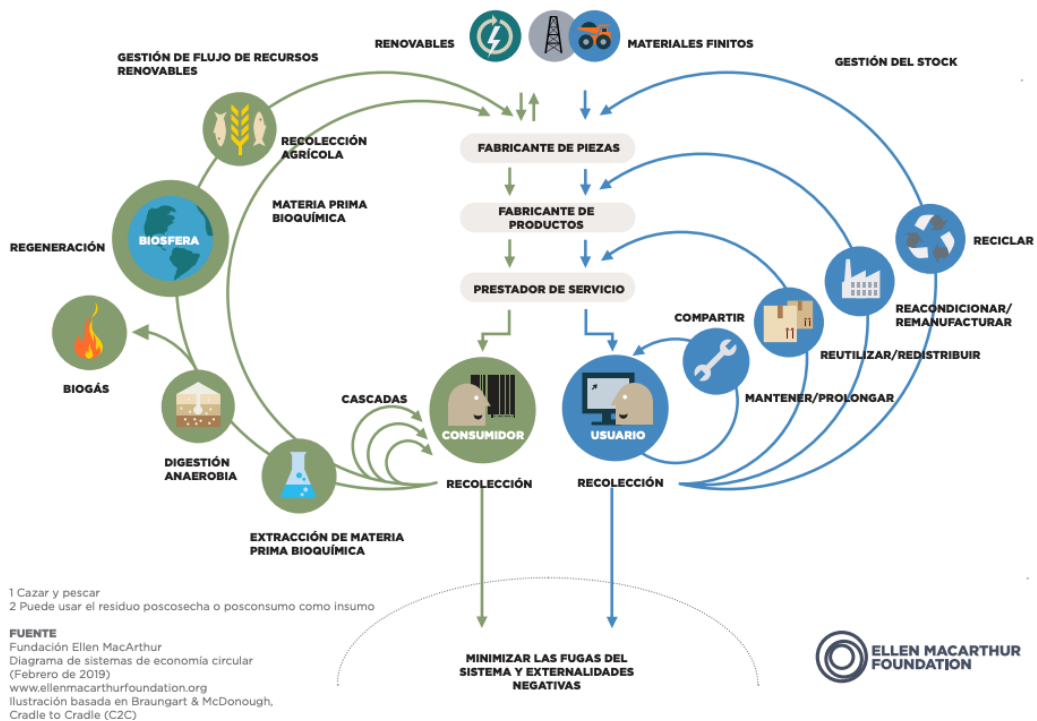


Figura 2-3 Diagrama Mariposa, Ellen MacArthur Foundation [13]

³ Aquí, reciclaje representa estrategias que tenga por finalidad evitar ingerir o disponer materiales o energía.

Al eliminar los ciclos laterales, que corresponden a las estrategias de circulación, se recupera el paradigma lineal. En éste se extraen materias primas que ingresan al proceso de manufactura y, luego del uso por parte del consumidor, se obtienen desechos como resultado (vertedero e incineración). Por el contrario, si se eliminan los flujos verticales, esto es, las entradas y salidas, se obtiene un diseño circular.

Analizando el diagrama en mayor detalle, se observa una categorización binaria de ciclos: nutrientes biológicos y nutrientes técnicos. El primero refiere a los tratamientos que se le podría dar a componentes, cuyo producto resulta no dañino para el ecosistema al momento de liberarlos, pudiendo incluso tener un impacto positivo en éste. El segundo hace referencia a componentes que no están diseñados para su disposición en el medio ambiente, incluso después de tratamientos, y se enfoca en la reinserción de éstos a la cadena productiva [13]. Esta no es una separación necesaria para la EC, sino que propuesta por la fundación Ellen McArthur (autoría del gráfico).

Posterior a la intuición, se mencionan dos tipos de principios fundamentales sobre los cuales se suele conceptualizar y operacionalizar la EC: Marco 4R's y Enfoque Sistémico [31]. Éstas se pueden utilizar como clasificaciones complementarias de una estrategia de economía circular.

El Marco 4R's, comúnmente conocido y utilizado en el contexto de manejo de residuos, representa un conjunto de estrategias de circularización para evitar o retrasar la disposición final: Reducir (Prevenir, Eliminar), Reutilizar, Reciclar y Recuperar. Adicionalmente, estas tácticas siguen un orden jerárquico con tal de minimizar los efectos negativos del depósito de elementos en el entorno.

Como se puede ver en el diagrama mariposa, la EC heredó estas posibles acciones como una forma de implementación, así como también la importancia de su jerarquía. Si bien dentro de la bibliografía se pueden encontrar menciones a una mayor o menor cantidad de R's [32] [33], se escoge el Marco 4R's ya que es el utilizado por la Unión Europea (UE) [34], con un afán de uniformar códigos.

El enfoque sistémico refiere al alcance territorial el modelo circular implementado, que puede constar de varias estrategias, y se clasifica en nivel: Micro, Meso y Macro. El primero obedece a la organización interna de una empresa (o actor), ya sea enfocando los esfuerzos en el diseño de un producto o relacionando distintos procesos. El nivel meso típicamente considera vincular distintos agentes con intereses económicos separados entre sí. Ejemplos de este alcance son los parques eco-industriales. Finalmente, un análisis macro contempla una mirada regional, nacional o internacional del uso de recursos.

Por último, vale la pena mencionar que la transición a un esquema más circular no ha sido exclusivamente un trabajo teórico [16], o desarrollado como modelo de negocio para la aplicación de privados de manera autónoma [13]. Esta idea ha sido apropiada por diferentes organizaciones intergubernamentales, así como gubernamentales, dentro de las cuales se destacan: OECD con la iniciativa

“RE-CIRCLE: resource efficiency and circular economy”, la que busca evaluar el impacto de políticas ambientales relacionadas con el uso eficiente de recursos y economía circular [35], y EU con la iniciativa “Circular Economy Action Plan” [36].

2.1.2. Críticas, desafíos y límites de la EC

Si bien este nuevo modelo circular ofrece posibles respuestas a las problemáticas planteadas, no está exento de desafíos y dificultades, algunos de los cuales se presentarán a continuación.

Hoy en día el término sostenibilidad se ha trivializado al punto de que cualquier actividad puede ser etiquetado como sostenible si “se le mira de la manera correcta”. Es difícil encontrar algo que no pueda ser catalogado como tal en algún ámbito. Lo mismo sucede con el apelativo “verde”, el cuál posee un valor impreciso y no cuantificable, resultante de la interacción de la actividad que le precede con el medio ambiente (política pública “verde”, inversión “verde”, reactivación “verde” ...) [37].

En dicho contexto, la EC surge como una posible guía tangible para identificar y adoptar modelos de negocio, en la línea de asumir desafíos de sostenibilidad [38]. Sin embargo, dado que no existe claridad en qué criterios aplicar al momento de seleccionar estrategias para implementar la EC [13], se puede caer en un problema similar al descrito en el párrafo anterior. En esa línea, es común advertir algunos agentes que ignoran las estrategias relacionadas con “Reducir”, así como también ignoran la jerarquía (4R’s) al momento de evaluar sus posibilidades de transformación. Estas prácticas incentivan el despliegue de mínimos esfuerzos con tal de adquirir el apelativo “circular”; ejemplo de esto es incrementar marginalmente estrategias de reciclaje [31].

Otra forma de imprecisión respecto a la EC guarda relación con el desbalance de sus impactos en los ejes el desarrollo sostenibilidad. La EC está fuertemente arraigada en la dimensión ecológica de la sostenibilidad, y su auge se impulsó principalmente desde el sector empresarial. Lo anterior se llevó a cabo en base a modelos de negocios coherentes con una mejora respecto a los impactos medio ambientales (en términos de recursos materiales), manteniendo los requerimientos respecto a la dimensión económica. Debido a esto, la dimensión social está generalmente ausente en los esquemas de implementación. Más aún, esta dinámica se puede reconocer en las definiciones de la EC y su escasa mención de la triada de elementos subyacentes a la sostenibilidad [31] [39].

Un desafío importante para el problema de EC se hereda de la delimitación del sistema económico bajo estudio (ver Figura 2-2 y Figura 2-3). A través de esta frontera se computan los flujos de entradas y salidas del sistema, y por lo tanto identifica qué elementos están bajo la responsabilidad de quién. Un fenómeno relevante a considerar en relación a este punto es el “desplazamiento de la problemática”, en donde la búsqueda de una mejora local (un sistema económico en cuestión) puede generar consecuencias indeseadas

en otra región, o incluso en términos globales [40]. Es más, el problema se podría trasladar entre los diferentes ejes que componen desarrollo sustentable [41]. Resulta necesario destacar que, en última instancia, los efectos negativos de dicho traslado del problema suelen recaer sobre sociedades y/o países (agentes en general) en desarrollo [42].

A modo de ejemplo en el contexto de EC, se podría considerar un caso genérico de cadena de producción de un artículo en instalaciones de una marca inscritas en un país desarrollado. Una estrategia para que dicho país “disminuya” la ingesta de recursos y generación de residuos, puede ser transportar sus plantas de fabricación a un país en desarrollo. Incluso esto podría “justificarse” bajo las premisas de disminuir las emisiones (residuos o recursos fósiles) por concepto de transporte de recursos brutos, e impulsar el crecimiento económico del país huésped (en desarrollo). Sin perjuicio de la pertinencia de dichos argumentos, los recursos ingeridos para la producción del artículo se desplazan de una localidad a otra, pudiendo incluso fomentar condiciones laborales precarias a causa de una regulación menos estricta, i.e. “desplazamiento de la problemática”.

Otro fenómeno importante de mencionar, y que no guarda directa relación con la delimitación del sistema de estudio, es el Efecto Rebote – Paradoja de Jevons. Este fenómeno se manifiesta en un escenario posterior a una mejoría en la eficiencia de un producto o proceso, cambio que se traduce en una reducción en los costos producción, causando una reducción en los precios o costos⁴. Bajo estas condiciones, puede suceder que la reducción del consumo del material producto de la mejora en la eficiencia sea menor a la esperada, lo que se denomina Efecto Rebote. El hecho podría ser más extremo, resultando en un aumento de los requerimientos del material en cuestión, lo que se denomina Paradoja de Jevons. Las situaciones expuestas se explican por un cambio en la demanda a causa de la modificación del precio. Otros drivers del fenómeno pueden ser costos de oportunidad percibidos por los diferentes agentes [43].

A modo de ejemplo en el contexto de la EC, se podría considerar un aumento en la eficiencia del recurso “Y” por unidad de artículo, a causa de un pequeño ajuste de un proceso de la cadena de producción (costo despreciable). Esta acción persigue el afán de disminuir la dependencia del negocio con este recurso por estar inserto en un mercado altamente incierto. En este contexto, el sistema de producción bajo estudio ingiere una menor cantidad del recurso “Y” por unidad de artículo en comparación con un estado anterior. Al disminuir la ingesta de “Y”, el costo de producción unitario disminuye. Si, el precio de venta refleja esta baja en los costos, entonces la curva de oferta del artículo se desplaza, intersectando la curva de demanda en un punto que exija una mayor producción del artículo (a un menor precio). Como consecuencia de esta

⁴ Esta cadena causal no se tiene necesariamente. Se exponen condiciones que pueden conducir al fenómeno en cuestión.

dinámica, el negocio podría resultar ingiriendo una mayor cantidad del recurso “Y” en comparación con un estado anterior.

Un último fenómeno a considerar, dentro de otros que puedan aplicar al tópico de EC, recibe el nombre de Dependencia en la Trayectoria (path dependency) – Lock-In. En pocas palabras, esta idea ilustra cómo pequeños eventos históricos, i.e. a lo largo del tiempo, pueden generar una tendencia concluyente en una decisión. Explica además que, a pesar de que cada agente tome una decisión racional, puede darse el caso en que la opción favorecida no lo sea en términos globales. Esto se complementa con la definición de un escenario “Lock-In”, consecuencia de la ruta escogido, que representa la dificultad de cambiar el rumbo a medida que el camino avanza y se acentúa [44]. Un caso particular de este fenómeno es el evento conocido como “sobrevivencia del primero” en lugar del “más apto” [45] [40].

A modo de ejemplo en el contexto conceptual de la EC, se podría considerar la diversidad de definiciones del término (lo que se juega un rol central en el desarrollo del presente trabajo). En este escenario, distintos agentes pueden optar por utilizar alguna u otra definición de acuerdo con el objetivo que busque cada cual. Distintos eventos podrían causar una desviación parcial en favor de una definición en particular: la adopción de esta definición por una institución reconocida, un problema relevante que exija mirar con más detalle una definición que cubra este campo, o la propuesta sólida de un conjunto de indicadores que facilite el monitoreo del concepto basados en esta definición. Esto puede generar una adopción acelerada en favor de la definición en cuestión. En un panorama ideal, la definición sorteada reúne las características para generar un impacto significativamente positivo. En un escenario adverso, la definición sorteada no logra capturar aspectos del concepto de EC que son relevantes para la sociedad.

Para evitar posibles confusiones, pero también para esclarecer los alcances de la EC, es conveniente precisar algunas diferencias entre esta disciplina y la de sostenibilidad, particularmente aquellas atingentes a los objetivos que busca cumplir cada una. Por un lado, la economía circular busca minimizar los recursos requeridos, así como los desechos y emisiones producidos por un sistema, a través de un modelo que promueve el cierre de ciclos. Por otro lado, “la sostenibilidad abre el ámbito para múltiples expectativas sobre, por ejemplo, lo que debe desarrollarse y lo que debe mantenerse, durante cuánto tiempo y en beneficio de quién” [46] [47]. En la misma línea, la EC no busca en primera instancia alcanzar un desarrollo sostenible, aunque su adopción debe significar una transición del sistema en esa dirección [40]. Adicionalmente, la EC es percibida como una condición necesaria para lograr éste desarrollo (sostenible) [46]. Así, la EC se puede entender como un aspecto del desarrollo sostenible limitándose a la cuestión de los recursos, por lo que se proponen como ideas complementarias.

Por último, y en relación a algunos desafíos mencionados anteriormente, se puede encontrar una extensa variedad de definiciones de EC, las que pueden hacer énfasis en diferentes términos del concepto, y precisar la idea de diferentes maneras. A continuación, se expondrán cuatro ejemplos de definiciones:

“Una economía circular es un sistema industrial que es regenerativo o restaurador por intención y diseño. Sustituye el concepto de ‘fin de vida útil’ por el de restauración, se orienta hacia el uso de energías renovables, elimina el uso de productos químicos tóxicos, que perjudican la reutilización, y aspira a la eliminación de los residuos mediante un diseño superior de los materiales, los productos, los sistemas y, dentro de estos, los modelos empresariales.” (Ellen MacArthur Foundation [13])

“Una economía circular pretende mantener el valor de los productos, materiales y recursos durante el mayor tiempo posible, devolviéndolos al ciclo de producción al final de su uso, al tiempo que se minimiza la generación de residuos. Cuantos menos productos desechemos, menos materiales extraemos, mejor para nuestro medio ambiente.

Este proceso comienza al principio del ciclo de vida de un producto: el diseño inteligente del producto y los procesos de producción pueden ayudar a ahorrar recursos, evitar la gestión ineficiente de los residuos y crear nuevas oportunidades de negocio.” (European Commission [48])

“Una economía circular describe un sistema económico que se basa en modelos empresariales que sustituyen el concepto de ‘fin de la vida útil’ por la reducción, la reutilización alternativa, el reciclaje y la recuperación de materiales en los procesos de producción/distribución y consumo, operando así a nivel micro (productos, empresas, consumidores), meso (parques ecoindustriales) y macro (ciudad, región, nación y más allá), con el objetivo de lograr un desarrollo sostenible, lo que implica crear calidad ambiental, prosperidad económica y equidad social, en beneficio de las generaciones actuales y futuras.” [31]

“La economía circular es una economía construida a partir de sistemas de producción y consumo de la sociedad que maximiza el servicio producido a partir del flujo lineal de materiales y energía entre la naturaleza y la sociedad. Para ello se utilizan flujos de materiales cíclicos, fuentes de energía renovables y flujos de energía del tipo cascada. Una economía circular exitosa contribuye a las tres dimensiones del desarrollo sostenible. La economía circular limita el flujo de producción a un nivel que la naturaleza tolera y utiliza los ciclos de los ecosistemas en los ciclos económicos respetando sus tasas de reproducción naturales.” [40]

2.1.3. Economía circular en el sector energético

Si bien la EC “apunta a depender de las energías renovables” [13], los alcances del sector en este tópico no se limitan a la utilización de éstas. La infraestructura utilizada para abastecer el sistema también se identifica como un asunto que requiere atención. En consecuencia, el problema de flujo de residuos al cumplimiento de la vida útil de los productos (e.g. paneles FV) [49] [50], así como los mecanismos de extensión de la funcionalidad de los materiales [51], han llamado la atención de la academia, instituciones gubernamentales y no gubernamentales.

Pese a lo anterior, evaluar el sector energético exclusivamente desde el punto de vista de la generación aún entrega un panorama incompleto del impacto de éste en el uso de recursos y, por tanto, limita las posibles acciones a considerar. Así, algunas agrupaciones han examinado con un enfoque más amplio las oportunidades de la EC en el sector [52] [53]; incluyendo, como se ilustra en la Figura 2-4, estrategias de cooperación y simbiosis y el rol del consumidor final.



Figura 2-4 Categorización de estrategias de la EC en el sector energético [52].

A continuación, se presenta una breve descripción de cada categoría, acompañada de algunos ejemplos:

- 1. EC en la producción energética:** Dentro de esta categoría se encuentra la transición hacia una matriz energética renovable, recuperación energética (waste to energy) y reconversión de plantas, con la finalidad de independizar el sistema de recursos fósiles. Además, se identifican en esta clase los trabajos de diseño para integrar una perspectiva de ciclo de vida en la infraestructura.
- 2. Simbiosis y flujos energéticos:** Dentro de esta categoría se enmarcan relaciones de cooperación entre agentes, aprovechando flujos energéticos remanentes de actividades

individuales con interacciones tipo cascada. En base a lo anterior se busca minimizar las pérdidas energéticas.

- 3. Consumidor final:** En esta última categoría se ubican las estrategias que guardan relación con las decisiones de consumo del usuario final. La elección del tipo de suministro, alternativas de electrodomésticos (artefactos en general) y su eficiencia, modelos de negocio referentes a éstos, y modelos de gestión del uso de la energía se identifican con esta clase.

2.2. Indicadores

En el presente apartado se exponen nociones relacionadas con el tópico de indicadores. En primer lugar, se entrega una definición de este concepto, junto con el contexto de su progreso en el marco de un trabajo internacional por el desarrollo sostenible. Luego, se muestran categorías dentro de las cuales se puede identificar un indicador según su propósito. Posteriormente, se introducen los conceptos de “marco de medición” y “marco conceptual”, fuentes de estructura para la selección y/o gestación de indicadores. Siguiendo, se presentan características que debiese tener un “buen” indicador como criterio de evaluación de éstos. Finalmente, se exhibe una forma de clasificación de indicadores para el problema de economía circular y relacionados.

2.2.1. Indicadores y desarrollo sostenible

Un indicador, del griego “indicare” que refiere a elemento que indica, apunta o anuncia, es una forma de medida que puede cumplir con muchos roles dentro de la sociedad. Informar, evaluar y apoyar el proceso de toma de decisiones respecto a un tema de interés, así como monitorear su desempeño, son algunos. A través de estos es posible condensar y presentar información compleja, facilitando su análisis y comunicación. Se utilizan comúnmente como entradas para políticas nacionales e internacionales, particularmente para política estratégica. Son importantes para establecer objetivos y monitorear el cumplimiento de los mismos [15].

Para dar una definición concreta, la OECD/DAC propone [54]:

“Factor o variable cuantitativa o cualitativa que proporciona un medio sencillo y confiable para medir los logros, para reflejar los cambios relacionados con una intervención, o para ayudar a evaluar el desempeño de un actor de desarrollo.”

En materia de sostenibilidad, el llamado a un trabajo con indicadores se propone por la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (WCED) en el documento “*Our Common Future*”, 1987, debido a lo inadecuadas que resultaban las señales económicas por si solas para evaluar fenómenos de bienestar social [55] [56]. Posterior a esto, el año 1992, se acuerda y firma por 173 gobiernos el plan de

acción “Agenda 21” en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (United Nations Conference on Environment and Development Indicators). En el capítulo 40 de dicho documento se expresa la necesidad de indicadores de desarrollo sustentable (SDI’s) que provean bases sólidas para los procesos de toma de decisiones en diferentes niveles [57].

Como consecuencia de esto, en 1995 la Comisión de Desarrollo Sostenible (Commission on Sustainable Development) aprobó el Programa de Trabajo sobre Indicadores de Desarrollo Sostenible (SDI’s). Dentro de los elementos claves considerados por el programa se encuentran los siguientes [58]:

- Promover la comunicación y el traspaso de información entre actores interesados en la investigación, desarrollo de metodologías y aplicaciones relacionadas con indicadores de sostenibilidad.
- Generación de capacidad, a nivel regional y nacional, para la implementación de indicadores con la finalidad de monitorear el progreso en dirección de un desarrollo sostenible.
- Prueba de combinaciones de indicadores y seguimiento de experiencias en distintos países para adquirir conocimientos.

Este proceso es importante, no solamente por su culminación en un grupo de indicadores para monitorear los objetivos de desarrollo sostenible [14], sino porque dejó atrás una gran cantidad de experiencia e información útil para su extrapolación en otras áreas relacionadas como la economía circular. Más aún, han apoyado e impulsado el debate respecto a la gestación de políticas en base a evidencia [59].

2.2.2. Clasificación de indicadores

Un indicador se puede clasificar bajo distintas tipologías, dependiendo de la característica estudiada, pudiéndose emplear más de una de manera complementaria. A continuación, se presentan algunas de éstas [55]:

Basado en su dimensión: Guarda relación con el tiempo y el espacio en donde el indicador es utilizado. En cuanto al primero, se hace una diferencia si es que la herramienta se aplica en una instancia (snap-shoot, single-point) o si se estudia su evolución través del tiempo. Respecto a la segunda dimensión, espacio, se diferencian estudios que miden aspectos de un territorio con aquellos que comparan distintas regiones entre sí.

Basado en su propósito: Se mencionó anteriormente que un indicador se emplea para distintas finalidades. De acuerdo con los requerimientos de esta, al menos en temas referentes a sostenibilidad, un indicador se puede clasificar como:

- Descriptivo; entrega una observación respecto a un fenómeno usando una variable en particular.
- De eficiencia; en base a una relación de proporción entre al menos dos variables, entrega información de eficiencia.
- Desempeño (normativo); utiliza una medida de distancia entre un punto de referencia y un nivel deseado. Es inherentemente normativo pues establece una dirección de desarrollo como positiva.
- Bienestar total; fuertemente relacionado con conceptos de sostenibilidad, pues refiere a la relación y agregación de sus tres elementos a partir de un indicador compuesto.

Basado en posición temporal en relación al fenómeno que indica: Usado comúnmente en contextos macroeconómicos, diferencia aquellos indicadores que adelantan el fenómeno de aquellos que lo atrasan (ex-ante y ex-post). Los primeros se utilizan para predecir o explorar, mientras que los últimos para corroborar, evidenciar o explicar el paso de un suceso.

Basado en proceso organizativo (secuencia): Clasifica el indicador como input, output, u outcome, dependiendo de la etapa del proceso que se esté monitoreando. En la categoría input se ubican los indicadores relacionados con las acciones o actividades realizadas, mientras que en output y outcome se identifican las medidas de sus impactos como corto y largo plazo respectivamente.

2.2.3. La importancia de un marco de medición para el desarrollo de un sistema de indicadores

En algún momento se mencionó que la EPA (Environmental Protection Agency) era “abundante en datos, pero escaso en información” [30]. Aunque desde la definición más amplia de indicador cualquier medición podría catalogarse como tal, el proveer información en un contexto determinado, para posteriormente poder comunicarla, no es algo que cualquier medida pueda hacer. El llamado a un trabajo más metodológico y teórico, en contraste con un aumento en el volumen de estadísticas, data de hace más de 45 años [60]. Sin embargo, el interés en los datos por sobre la información obtenida en base al entendimiento de elementos clave del fenómeno, contexto de la aplicación de indicadores, y las conexiones de estos, parece mantenerse vigente en algunos desarrollos actuales [61].

Con ese preámbulo, y volviendo a la experiencia de los SDI's, el desafío primero para las organizaciones que trabajaron en esta tarea fue desarrollar marcos de medición (marcos de indicadores), a través de los cuales seleccionar indicadores relevantes para monitorear el desarrollo sustentable según el marco [62]. En su nivel más simple, abierto o abstracto, un marco de medición es un modelo mental que provee una estructura del entendimiento de un tema en particular, y una forma de organizar la información del mismo [30]. Por lo tanto, la utilidad de este instrumento (marco de indicadores) recae justamente en

articular la data sobre una narrativa que aporte en la generación de información y conocimiento. Si bien la incorporación de un marco de medición no es un requisito para la elaboración y/o selección de indicadores, es una fuerte recomendación por los argumentos expuestos [17] [19].

Los enfoques para desarrollar estos marcos de medición se pueden clasificar en dos categorías [62]:

Enfoque Político (Política pública): Esta aproximación utiliza las estrategias y metas de políticas públicas como un marco de referencia para definir los indicadores que medirán el progreso en la dirección del cumplimiento de dichos objetivos. El set de indicadores se limita y refleja la estrategia en cuestión. Algunos nombres genéricos que recibe este tipo de marco son **Issue-based, goal-oriented or thematic framework**.

Enfoque Conceptual: Los países u organizaciones que toman esta aproximación definen un marco conceptual, al margen de una política pública particular, que permite seleccionar y organizar el sistema de indicadores. Éste considera un modelo del problema a estudiar, incluyendo las variables a tener en cuenta, y una estructura de presentación de los indicadores en conjunto con las temáticas importantes a abordar, con tal de asegurar su monitoreo [63].

Si bien un marco conceptual podría ser concebido de manera exclusiva para el desarrollo de cada tema en su contexto, una práctica común es escoger un modelo basal de marco, para luego aplicarlo al problema de interés. A continuación, se presenta algunos marcos conceptuales genéricos (basales) aplicados en el ejercicio de monitoreo en materias de sostenibilidad, con una breve descripción de cada uno [58]:

Driving force – pressures – state – impact – response (DPSIR) framework: Este marco, representado por una cadena causal, expone los impactos de una cierta acción o actividad desde la razón o causa primera de su realización (driving force), pasando por las presiones que dicha actividad ejerce sobre el medio ambiente (pressures), hasta llegar a las variaciones que provoca en el estado de éste (state) y finalmente sus impactos en el mismo (impact). Luego de identificar los elementos de la cadena para un problema, se proponen posibles respuestas frente a impactos indeseados (response). Las respuestas pueden bien ser una reacción de la sociedad o directamente políticas públicas, las que pueden afectar subsecuentemente a distintos eslabones de la cadena [64].

Capital framework: En este marco se expanden los términos de consumidor y consumo, haciendo alusión al beneficio obtenido de disfrutar de productos (bienes y servicios) provenientes de: sistemas sociales, medioambientales y económicos, i.e. de mercado o financieros y no mercantilizados, tangibles e intangibles. En esta línea, se busca traducir todas estas formas de capital a términos comparables, generalmente monetarios, proponiendo la idea de sustitución en el centro de la discusión [65].

Accounting frameworks: Este marco se utiliza para contabilizar variables de interés relacionadas con las actividades económicas de un territorio. Estas estructuras deben su origen a los sistemas nacionales de contabilidad (SNC), ligado a los estudios macroeconómicos, de donde derivaron herramientas que cubren otros tópicos de interés como el medio ambiente en el Sistema de Contabilidad Ambiental y Económico (SEEA).

Es importante destacar que un marco conceptual permite la organización de ideas y relaciones, focaliza y proporciona directivas. Sin embargo, éstos también son una limitante para el accionar de los indicadores, pues capturan un modelo determinado de la realidad. Asimismo, éste propone supuestos, maneras de pensar, visualizar el escenario y, eventualmente, influye en las formas de actuar, lo que podría entrar en pugna con las visiones de distintos stakeholders [55].

2.2.4. Criterios que debe cumplir un “buen” indicador

Posterior a establecer el propósito que busca alcanzar la implementación de indicadores y desarrollar el marco conceptual del problema, incluyendo las variables y agentes a considerar, se procede a seleccionar y/o diseñar el o los indicadores en cuestión [17].

Se ha acostumbrado a catalogar de “buen” indicador a aquel que cumple con ciertas propiedades preconcebidas, en ocasiones acompañadas con algún tipo de jerarquía; i.e. cuando una propiedad se considera más importante que otra. Algunas de las propiedades más utilizadas están contenidas en los acrónimos RACER, SMART y CREAM [66], las que se presentan a continuación. Además de las agrupaciones anteriores están los Principios de Bellagio [67]. Si bien estos principios son reconocidos, y se mencionan en el documento por este motivo, son vistos como una estructura muy teórica (en contraste con practicable), y no apuntan directamente al problema de selección de indicadores [68], por lo que no se profundizará en estos.

RACER: Propuesto por la unión europea (EU, 2016) para la evaluación de indicadores, en el marco de la serie de publicaciones y guías para metodologías y herramientas sobre distintas temáticas [69]. Posterior a su definición ha sido promocionado y utilizado por esta misma institución [70] [18], incluyendo documentos que abarcan tópicos de economía circular [71] [72].

- 1. Relevant (Relevante/Pertinente):** El indicador debe cubrir el tópico de manera adecuada (suficiente), y establecer un vínculo estrecho con el objetivo que representa (necesario);
- 2. Accepted (Aceptación):** El indicador debe validarse y entenderse por el personal a cargo de su utilización y mantención, así como por los stakeholders y usuarios en general;
- 3. Credibility (Credibilidad/Verosimilitud):** El indicador debe ser de fácil interpretación, sin dejar espacio a ambigüedades. Debe ser accesible en estos términos a personal no experto;

4. **Easy (Factible/Sencillo):** El indicador debe basarse en datos y sistemas de monitoreo factibles de implementar en términos de costo y tiempo;
5. **Robust (Robusto):** El indicador se define de manera clara, es reproducible sin estar sujeto a manipulación de resultados, y es sensible a la introducción de cambios;

SMART: Los atributos que forman parte de este acrónimo fueron pensados, originalmente, para evaluar la establecimiento de objetivos [73]. Sin embargo, también han sido adaptados para el caso de medidas de desempeño (indicadores entre otras) [74] [75].

- **Specific (Específico):** El indicador debería apuntar a un área de mejora o monitoreo de forma precisa. Debe ilustrar de manera clara lo que busca transmitir, los parámetros utilizados y medidos, independiente de quién reproduzca los resultados;
- **Measurable (Comparable/Medible):** El indicador debe permitir identificar (al menos sugerir) progresos y comparaciones, reflejando un nivel de desarrollo;
- **Assignable/Attainable (Asignable/Alcanzable):** Debe especificar el personal a cargo de la mantención del indicador, además debe ser capaz de entregar información acerca de la realización del objetivo;
- **Realistic/Relevancy (Realista/Relevante):** Debe indicar que resultados se pueden alcanzar de forma realista. El indicador debe entregar información elocuente del tema de interés y su consecuente evolución;
- **Time-related/Timely (Tiempo de espera/ Tiempo de evaluación):** Debe transmitir el tiempo esperado para el cumplimiento de resultados, así como proponer un plazo adecuado a contemplar en el análisis, alineado con periodos relevantes para el asunto de interés;

CREAM: La lista de cualidades deseables sobre un indicador puede ser extensa, además de existir muchos puntos comunes entre dichas cualidades, con distintas interpretaciones. CREAM es otra propuesta de propiedades, como conjunto de condiciones necesarias, extraídas de un grupo más grande [76].

- **Clear (Claro):** El indicador debe ser preciso y no ambiguo (no necesariamente cuantitativo);
- **Relevant (Relevante):** El indicador debe ser apropiado para el problema en cuestión;
- **Economic (Económico):** La obtención de datos debe reflejar costos razonables;
- **Adequate (Suficiente/Adecuado):** El indicador debe proveer información suficiente para analizar o evaluar el tópico en cuestión, ya sea por sí sólo o en conjunto con otros indicadores;
- **Monitorable (Monitoreable):** Además de asegurar la disponibilidad y claridad de la información, el indicador debe ser susceptible a un escrutinio externo;

Un factor común entre los términos anteriores, y frecuentemente resaltado como uno de los más importantes en el proceso de selección y diseño de indicadores, es la relevancia de éste [19]. A pesar de ello, el concepto sin definir deja un espacio abierto a la interpretación, pudiendo hacer hincapié a diferentes zonas del problema. En la bibliografía se ha abordado el término, explícita [77] e implícitamente [55], separándolo en dos naturalezas:

Por un lado, se entiende que el indicador es relevante cuando “indica lo que debe indicar”, esto es, existe una relación estrecha y clara entre lo que se mide y el objeto de estudiarlo; i.e. lo que busca reflejar. Lo anterior es equivalente a decir que logra capturar las dimensiones esenciales del problema. Por otro lado, referente al tópicico de estudio, se considera que el sistema de indicadores es relevante cuando abarca un problema significativo para los incumbentes (deseable un grupo amplio), y últimamente para la sociedad.

2.2.5. Indicadores de economía circular

Como se enuncia en la definición, los indicadores proporcionan maneras de medir logros, cambios y/o desempeños. Así, resulta claro que su implementación depende de qué es lo que se busca indicar, en este contexto la EC. Sin embargo, como queda en evidencia en la Sección 2.1.2, existen una variedad de definiciones de EC. Más aún, la interpretación del concepto puede variar para cada agente. Lo anterior repercute directamente en la selección y/o elaboración de indicadores, pues cada definición e interpretación puede dirigir el foco a elementos particulares que se enmarcan en la EC. En la Tabla 2-1 se presentan algunos de los posibles elementos de la EC, sujetos a la potencial implementación de indicadores para su evaluación.

Tabla 2-1 Elementos de EC [78].

CE Elements		
Disposición de residuos	Disponibilidad o concentración de reservas	Longevidad o tiempo de residencia
Uso primario vs. secundario de materiales, partes y productos	Entradas adicionales al proceso	Compartir o aprovechar los flujos de recursos
Productividad de los recursos o eficiencia de los procesos	Complejidad de reutilización, refabricación y reciclaje	Valor del material reciclado
Eficiencia de reciclaje	Retención de productos, piezas y materiales	Estabilidad del sistema
Consideración energética	Cambio de valor o uso productivo	Mezclado de materiales
Potencial de reciclaje o refabricación	Uso en cascada	Riesgo de suministro y escasez de recursos
Dimensión espacial	Modelación de ciclos materiales	Reservas integradas o de vida útil diferenciada
Destino de los flujos	El downcycling y la pérdida de calidad	Ciclos de toxicidad y material limpio

Es posible notar que los elementos no son completamente excluyentes entre sí, i.e. el estudio de un elemento guarda relación con el estudio de otros. Ejemplos de esto pueden ser vinculación de la estabilidad del sistema y el riesgo del suministro de recursos, o la relación entre el fomento de circulación del tipo cascada y compartir flujos de recursos. Pese a lo anterior, esta categorización resulta útil para precisar de mejor manera el foco de la implementación de un indicador. Una manera complementaria de clasificar un indicador, además del elemento o estrategia de economía circular que busca evaluar, es la escala de implementación de éste. Al igual que las estrategias de economía circular, la escala de un indicador también se puede clasificar en macro, meso y micro [79].

2.3. Marcos de Contabilidad – Accounting Frameworks

En la presente sección se introducen los marcos de contabilidad, o accounting frameworks, comenzando con su desarrollo desde un punto de vista histórico. Luego, se exponen los conceptos y lineamientos básicos del SEEA, marco que integra perspectivas económicas y medioambientales en el ejercicio de la contabilidad. Finalmente, se presenta un submodelo del SEEA, ew – MFA, el cual se enfoca particularmente en los flujos de materiales.

2.3.1. Origen y desarrollo de los sistemas de contabilidad

El origen de los sistemas de contabilidad tiene sus raíces en el siglo XIX, con los intentos de algunos “eruditos aficionados” por encontrar una forma de estimar la renta nacional. Estos estudios no llamaron la atención hasta finales de la década de los 20’s, hecho gatillado en gran parte por la Gran Depresión. Dicho evento tuvo como consecuencia la creación de programas gubernamentales para estimar la renta nacional, donde se destacan los movimientos de países como: Estados Unidos, Suecia, Holanda, Dinamarca y Reino Unido, entre otros. Lo anterior progresó hacia la obtención un sistema de contabilidad nacional (SCN), símil a su contraparte privada, dando paso al desarrollo de la macroeconomía como disciplina [80].

Luego del desarrollo y establecimiento de un SCN, el gran desafío fue armonizar los aparatos particulares a cada país para formular un estándar internacional, lo que se llevó a cabo en colaboración con entidades internacionales no gubernamentales y trabajos intergubernamentales (UN, OECD, European Commission, International Monetary Fund, World Bank) [80].

Desde el punto de vista del monitoreo y análisis de la macroeconomía y el problema de la renta nacional este fue un ejercicio fructífero, de donde se extraen los estándares internacionales: System of National Accounts (SNA, 1953) [81] y European System of Accounts (ESA, 1995). Sin embargo, no se pueden ignorar las críticas respecto a la representatividad que pudiera ofrecer una medida como el Producto Interno Bruto (GDP), por ejemplo, respecto al universo de preocupaciones sociales [80].

Si bien existía una inquietud respecto a la necesidad de considerar el medio ambiente en el ejercicio de contabilidad económica, ésta no se reflejó en un documento oficial de SNA hasta su versión de 1993 (3ra versión) [82], catalogada por algunos como moderada en cuanto a la consideración del entorno natural [83].

No obstante, también en 1993, y en respuesta a las demandas por políticas, expresadas en los documentos *Our Common Future*:

“In all countries, rich or poor, economic development must take full account in its measurements of growth of the improvement or deterioration in the stock of natural resources.”

y Agenda 21, la UNSD (United Nation Statistics Division) publica el libro *Handbook of National Accounting: Integrated of Environmental and Economic Accounting* [84], también conocido como SEEA⁵ (primera versión, considerada work in progress). Este último aplica los conceptos y reglas de contabilidad, definiciones, clasificaciones, principios y estructuras en general del SNA, de manera coherente con el mismo, a la información ambiental (generalmente presentada en unidades físicas). Ésto abre la posibilidad de comunicar e integrar de manera consistente data medioambiental y económica (generalmente presentada en unidades monetarias) [85].

Actualmente, y desde el 2012, el SEEA es considerado por la UNSC (United Nation Statistical Commission) como un estándar para la contabilidad económica medioambiental [86]:

“The Statistical Commission:

(c) Agreed to adopt the 2012 SEEA central framework as the initial version of the international standard for environmental-economic accounts, subject to further revision, acknowledging that further improvements on measurement are necessary on specific issues;”

Dada la ampliación del espectro de un sistema de contabilidad, de aquí en adelante éste se entenderá como una estructura que permite ordenar y organizar información (no sólo económica) de manera conceptualmente coherente. Posteriormente esta información podría ser utilizada como insumo para la creación de indicadores y, de manera general, en procesos de tomas de decisiones [85].

⁵ SEEA: System of Environmental Economic Accounting

2.3.2. SEEA Central Framework⁶ [85]

El SEEA es un marco conceptual que permite organizar información medioambiental y económica de una manera coherente, representando las interacciones entre estas dos unidades, contemplando los activos naturales existentes y los cambios en sus reservas. Para ordenar dicha información es necesario establecer algunos conceptos y definiciones, pilares sobre los cuales se sustentará la congruencia de las ideas. Algunas de las nociones más relevantes son la definición de la economía, los agentes y las actividades que la componen, el entorno o medio ambiente, y las fronteras entre éstos.

En términos básicos, la economía se entiende a través de sus actividades, dentro de las cuales se destacan: producción, consumo y acumulación, por ser las reconocidas en el SNA 2008 [87]. Asimismo, en términos de mediciones, la economía se representa por las interacciones, flujos y reservas, que articulan estas actividades. En un apartado posterior se profundizará sobre otros conceptos relevantes para un caso particular.

Además de las definiciones basales, se establece qué tipo de fenómeno se contabilizará o medirá, y cómo se hará (unidades, representación). En esta línea, el SEEA cubre tres categorías principales:

- 1) **Flujos físicos (materia y energía) a través de la economía y el medio ambiente, así como entre economías**, dentro de los cuales se reconocen tres tipos: entradas naturales, productos (tráfico dentro de la economía o entre ellas), y residuos. Es relevante mencionar que estos movimientos se cuantifican en unidades físicas: masa, volumen y energía; y no en términos monetarios, a diferencia de otros sistemas de contabilidad. Para identificar y registrar estos movimientos, se utilizan como estándar las denominadas “tablas de suministro y uso físico” (PSUT’s).
- 2) **Los activos medio ambientales** (distinto de lo referente a la actividad de acumulación), **sus reservas y cambios en ellas**. Se consideran activos ambientales todos aquellos componentes de la naturaleza (vivos y no-vivos) que entregan beneficios a la humanidad.

Éstos se pueden entender desde dos perspectivas; en primer lugar, el aprovechamiento de partes individuales en forma de materia y espacio de manera directa. En segundo lugar, y como contraparte indirecta, se pueden contabilizar beneficios no-materiales como servicios de regulación de ciclos (carbono, por ejemplo), o servicios de sostén de la vida en la tierra (polinización, por ejemplo). Al igual que los flujos, éstos se cuantifican en términos físicos.

⁶ Adicional al documento “Central Framework” existen variantes del SEEA que complementarían la mirada básica que este provee con, por ejemplo, la integración de los ecosistemas. Esto no se abarcará en el presente texto.

3) **Actividades económicas relacionadas con el medio ambiente.** Adicionalmente a los activos y flujos, el SEEA Central Framework contabiliza en términos monetarios los gastos asignados a las actividades medioambientales y relacionadas a éste. Generalmente estas transacciones responden a esfuerzos de conservación y protección de la naturaleza, como mecanismos de abatimiento de contaminación, programas de protección, subsidios e impuestos, entre otros.

Hay dos tipos de documentos (estándares) conectados y consistentes con el SEEA, particularmente alusivo al documento Central Framework, que valen la pena mencionar. Por un lado se encuentran los subsistemas o submódulos de contabilidad que se aplican de manera específica a un área de desarrollo; por ejemplo SEEA – Energy [88], SEEA – Water [89] y SEEA – Agriculture , Forest and Fisheries [90]. Estas herramientas derivadas pueden propiciar una relación detallada y formal con otros instrumentos, organizaciones o estructuras referentes al sector en particular; un ejemplo de esto es la relación entre el SEEA – Energy y las International Recommendations for Energy Statistics (IRES) [88].

Por otro lado, se encuentran los subsistemas o submódulos de contabilidad que representan un panorama parcial de los fenómenos que contabiliza el SEEA, y no los tres que se mencionaron anteriormente. Como ejemplos de estas estructuras se encuentran: Economy-wide Material Flow Account (ew-MFA), Physical Water Flow Accounts (PWFA), Physical Energy Flow Accounts (PEFA) y Air Emissions Accounts (AEA). Los modelos mencionados se focalizan en el estudio de flujos físicos de materia y energía, dejando de lado temáticas de activos medioambientales y actividades económicas relacionadas con el medio ambiente.

2.3.3. Economy wide Material Flow Accounts (ew-MFA) Framework [91]

El marco ew – MFA es una metodología de contabilidad madura [92] que busca, en términos simples, identificar y cuantificar los flujos materiales que requiere una economía para su funcionamiento, tanto los de entrada como de salida, utilizando un enfoque de balance másico; i.e. no se consideran unidades energéticas, como por ejemplo Joules. A priori, este puede ser un punto de desencuentro para aplicar el marco conceptual ew – MFA al sector eléctrico, marcando una diferencia entre el mundo material y el mundo energético-eléctrico. Esto exige una discusión acerca de la pertinencia del uso del marco en cuestión sobre el problema de estudio, lo que se aborda en la Sección 3.2.

Previo a continuar con una explicación más detallada del funcionamiento y las componentes de este marco conceptual, se remarcan algunas diferencias importantes respecto a la estructura SEEA – CF, mientras que otras se presentarán más adelante.

En primer lugar, y como una de las distinciones más notorias entre los dos arquetipos, se encuentra el estudio de los flujos internos de productos en la economía, los cuales no se contabilizan en el presente

subsistema (ew-MFA). En segundo lugar, y como se advirtió en párrafos anteriores, ew-MFA representa un panorama parcial, no sólo en términos de no considerar activos o transacciones monetarias, sino que también en cuanto a los elementos que considera como flujos físicos. En un principio las grandes masas de aire y agua quedan excluidos del análisis formal por convención. Por último, si bien los flujos energéticos no se encuentran explícitos en unidades de Joules, si tienen incidencia para la contabilidad en términos másicos como carriers.

A continuación, en la Figura 2-5, se presenta un diagrama simplificado del modelo. Se puede observar que la diferencia entre los ingresos y egresos del periodo de análisis en cuestión se traducen en una cantidad acumulada dentro de la economía.

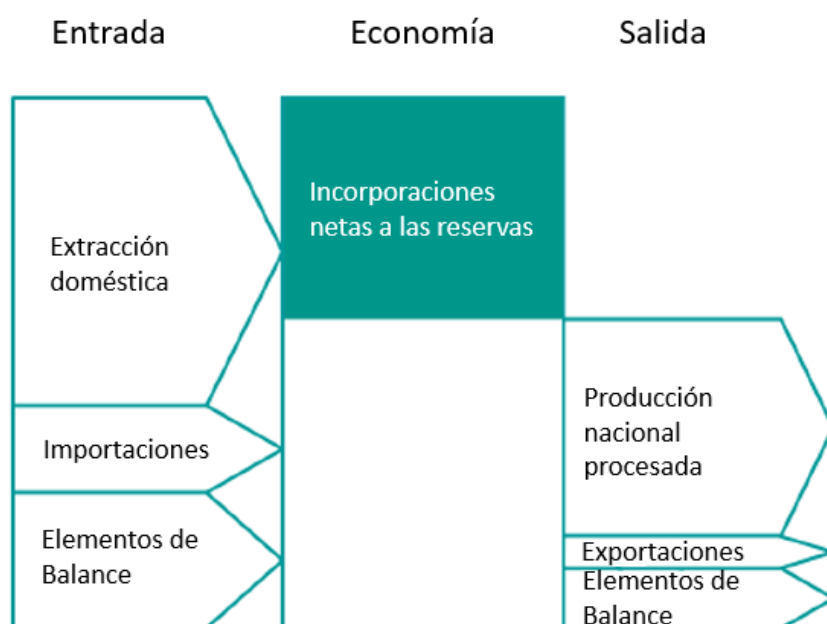


Figura 2-5 Representación simplificada de ew – MFA

De la Figura 2-5, se extrae como componente central del problema la definición estandarizada y coherente de las fronteras de la economía y, por tanto, la misma definición de economía como sujeto de análisis. Además, se desprende que los flujos a contabilizar provienen de fenómenos de distinta naturaleza, por lo que se requiere una clara conceptualización de dichos elementos.

La economía nacional se entiende como “el conjunto de actividades económicas llevadas a cabo por unidades residentes de un país” [91], definición heredada del estándar System of National Accounts (SNA). A su vez, y como se mencionó, las actividades económicas corresponden a los ejercicios de producción, consumo y acumulación (SNA 2008 [87]). Atañe al caso mencionar también que, en el marco de una actividad económica, no todas las transacciones tienen una representación monetaria y física, existiendo casos donde se pudiese encontrar ausencia de una de éstas.

Se dice que una unidad institucional es residente de un país “cuando mantiene un centro de interés económico predominante en ese territorio” [87] (similar a la definición ESA 2010 [93]). La definición anterior es independiente de la ubicación del ente propietario; ejemplo de esto es una central eólica ubicada en Chile que es propiedad de una empresa alemana. Hay otros casos menos directos donde aplica el mismo criterio; por ejemplo, al contabilizar las emisiones de aerolíneas – vuelos internacionales. Dicho problema no se abarcará en el presente documento, pudiéndose encontrar más detalle en fuentes oficiales [94].

En base a lo anterior, se presenta la frontera, puntos de medición o cruce del problema de flujo de materiales y energía, que aluden a la entrada y salida de la economía nacional. Se entienden dos dimensiones relevantes al definir dicho margen.

Por un lado, ew – MFA reconoce flujos entre la sociedad/economía y el ambiente, los cuales se identifican como **extracciones domésticas** cuando se integran insumos, y **producción nacional procesada** cuando se liberan los residuos del metabolismo.

Se han adoptado algunas convenciones de contabilidad respecto a este aspecto de frontera, y que son interesantes de mencionar; por ejemplo, considerar como flujo interno, y por tanto invisible ante el modelo estándar de ew – MFA, el movimiento de desechos materiales hacia vertederos controlados. Otra convención, menos relevante para este trabajo, es considerar como extracción, y no como producción, el ejercicio de cultivar recursos biológicos (agricultura, bosques). Esta última estipulación requiere una reinterpretación, incluso una redefinición, de la delimitación de la economía como se presentó. Para unos pocos casos esto se permite, considerando la escala y factibilidad de implementación del marco ew – MFA.

En segundo lugar, ew – MFA también reconoce flujos entre distintas economías, particularmente entre la economía evaluada y el resto del mundo, llamados flujos comerciales físicos. Para precisar el concepto de comercio (trade), entran en juego los principios de “cambio de propiedad” y de “residencia”.

Se considera un flujo comercial entre una unidad residente y otra no-residente cuando existe un cambio de la propiedad del producto, tanto para **importación** como para **exportación**. De la aclaración anterior se excluyen los bienes enviados al extranjero para ser procesados; i.e. no se consideran como importación o exportación [95].

Por último, el principio de residencia, parcialmente desarrollado al definir la economía nacional, indica que las actividades realizadas y sus flujos son atribuibles según la residencia de la unidad económica, i.e. donde la unidad institucional mantiene un centro de interés económico, y no a la localización de las unidades al momento de realizar dicha actividad. Es importante entender la diferencia entre la definición de actividades económicas realizadas en el contexto de un territorio nacional, y de una economía nacional.

Llegados a este punto, se han descrito dos de los flujos de entrada y dos de los flujos de salida presentes en la Figura 2-5, a través de la conceptualización de las fronteras de la economía nacional. Para obtener una representación general del modelo, queda entonces por esclarecer el rol de los términos de balance.

Como se mencionó anteriormente, al especificar algunas de las diferencias importantes entre los marcos SEEA – CF y ew – MFA, los grandes flujos de agua no son considerados como entradas o salidas de actividades económicas. Esto se adoptó como convención, principalmente, debido a que el agua es comparativamente mucho más relevante en términos de masa que otros materiales, por lo que terminaría desviando la atención. Ya que los flujos de agua escapan del alcance del estándar ew – MFA por el motivo expuesto, se implementan otros métodos para su exclusiva evaluación (PWFA). Pese a esto, otros tipos de contenidos acuíferos si son considerados por el ew – MFA, como por ejemplo la humedad de los materiales. Para lograr un equilibrio material entre salidas, entradas y activos, se agregan expresiones de balance. Entre estas expresiones de balance se puede encontrar el vapor de agua producto de humedad en el extremo de salida.

Asimismo, los flujos de aire, relacionados con los procesos de combustión dentro de la economía, y por lo tanto los subproductos (emisiones), no están considerados dentro de la categoría **extracción doméstica**. Sin embargo, dentro de la **producción nacional procesada** si están considerados los residuos emitidos a la atmósfera. Es por esto que se agregan en la expresión de balance de entrada elementos como oxígeno para procesos de combustión/producción.

Con lo anterior, se han descrito los orígenes del marco conceptual ew – MFA, las estructuras fundamentales que lo componen, así como también las principales distinciones respecto al modelo SEEA – CF. Como último punto a abordar, se detalla en mayor medida la categorización material utilizada para organizar las secciones **extracción doméstica** e **importaciones**. Se presenta la categorización de estas secciones, y no de **producción nacional procesada** y **exportaciones**, puesto que el foco del trabajo son los materiales entrantes al sistema. De esta manera, se explicita qué elementos son identificados por el marco. En la Tabla 2-2 se presenta una tabla con la categorización y subcategorizaciones correspondientes a **extracción doméstica** [96]. Por otro lado, en cuanto a las **importaciones**, se desagrega la masa de cada producto bajo estudio en las mismas categorías utilizadas para **extracción doméstica** siempre que se pueda, típicamente en base a información de comercio internacional [97].

Tabla 2-2 Categorías y subcategorías de flujos para el marco ew – MFA [96].

MFA4	MFA13
Biomasa	Cultivos
Biomasa	Residuo de cultivos
Biomasa	Biomasa de pastoreo y cultivos forrajeros
Biomasa	Madera
Biomasa	Extracción y cosecha silvestre
Minerales metálicos	Minerales ferrosos
Minerales metálicos	Minerales no-ferrosos
Minerales no-metálicos	Minerales no-metálicos; dominante en construcción
Minerales no-metálicos	Minerales no-metálicos; dominante en industria o agricultura
Combustibles fósiles	Carbón
Combustibles fósiles	Petróleo
Combustibles fósiles	Gas natural
Combustibles fósiles	Pizarras y arenas bituminosas

2.3.4. Ew – MFA framework, flujos internos e indicadores

Se mencionó anteriormente que el modelo original de ew – MFA no es sensible a transacciones físicas internas a la economía. Sin duda esto amerita atención si se busca relacionar dicha estructura con conceptos de economía circular, la cual promueve, entre otras cosas, la reutilización de productos y reciclaje de materias. Es por esto que algunos autores han expandido el marco conceptual original, agregando ciclos internos [28]. Éste se presenta en la Figura 2-6, en donde las expresiones de balance no están explicitadas.

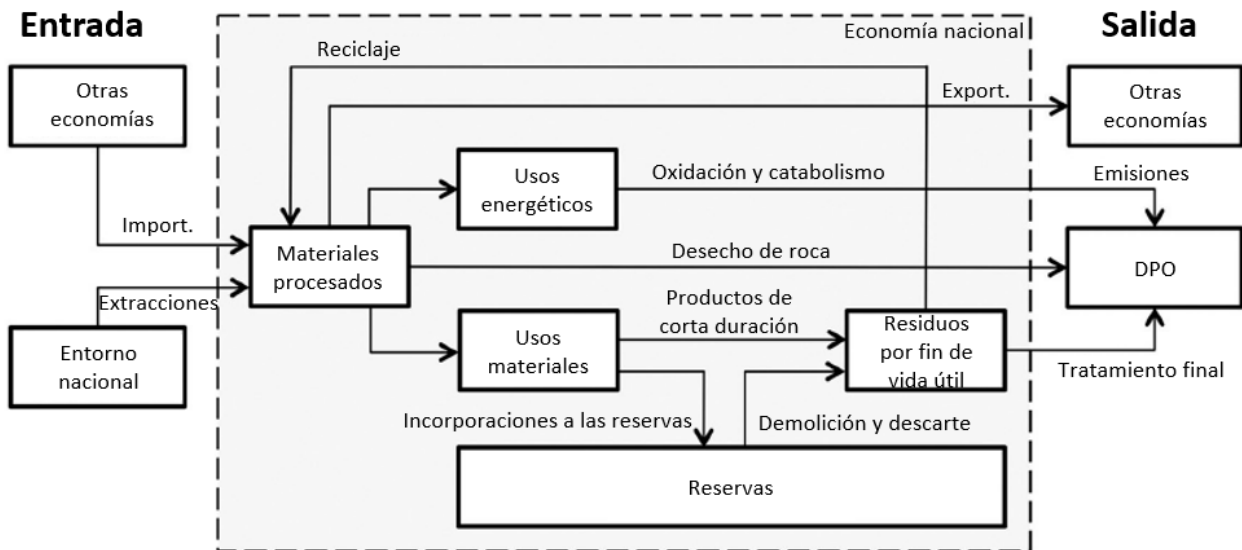


Figura 2-6 Diagrama ew – MFA considerando flujos internos [28]

Se observan, entonces, los flujos que aluden a las relaciones medioambiente – economía nacional y economía mundial – economía nacional. En la zona de entrada se identifican correspondientemente las **extracciones domésticas** y las importaciones, así como en la zona de salida se identifican la **producción nacional procesada** y las **exportaciones**. De estas cantidades se derivan los indicadores ubicados en la siguiente tabla.

Tabla 2-3 Indicadores ew – MFA derivados de las cantidades estandarizadas

Código	Etiqueta	SEEA - CF tipo de flujo	Fórmula para indicadores derivados
DE	Extracciones doméstica	Entrada natural	-
IMP	Importaciones físicas	Producto	-
EXP	Exportaciones físicas	Producto	-
DPO	Producción nacional procesada	Residuos	-
BI_in	Elementos de balance (entrada)	Entrada natural	-
BI_out	Elementos de balance (salida)	Residuos	-
DMC	Consumo material nacional	n.a.	$DMC = DE + IMP - EXP$
DMI	Entrada material directa	n.a.	$DMI = DE + IMP$
PTB	Balance por intercambio físico	n.a.	$PTB = IMP - EXP$
BI	Elementos de balance (input - output)	n.a.	$BI = BI_in - BI_out$
NAS	Incorporaciones netas a las reservas	n.a.	$NAS = DMC + BI_in - DPO - BI_out$

Respecto a los indicadores, en el problema de flujos se asume que una porción de las entradas pasa directo a formar parte de las exportaciones. Así, se define el indicador “Consumo Material Doméstico” (DMI), el cual sólo considera la porción material que se utiliza dentro de la economía nacional. Por otro lado, se define el indicador “Entrada Material Directa”, en donde se suman los inputs independientes de su uso (exportación o uso interno). Además, se definen los balances de comercio físico y la diferencia entre expresiones de balance. Por último, se define el indicador “Adición Neta de Reservas”, que representa el flujo de materias que pasa a un estado de acumulación para el periodo de análisis, que generalmente es de un año. Es importante distinguir que a través de esta herramienta se miden flujos, y no reservas totales.

Los términos presentados son indicadores derivados de las cantidades de un ew – MFA estándar, sin embargo, en la imagen también se puede observar un flujo con la etiqueta “Reciclaje”. Éste refiere a cualquier forma de ciclar los materiales, incluyendo reutilización y remanufactura. De aquí se deriva el indicador “Materiales Procesados” (PMs), como todos los materiales a utilizar dentro de la economía nacional, incluyendo aquellos reprocesados [28].

Tabla 2-4 Indicador derivado de la incorporación de términos de recirculación

Código	Etiqueta	SEEA - CF tipo de flujo	Fórmula para indicadores derivados
PMs	Materiales procesados	n.a.	$PM = DE + IMP + Rec. - EXP$

Ahora bien, vale la pena mencionar que, si bien la adición gráfica de un flujo de “Reciclaje” se puede traducir en un indicador que sugiera su seguimiento explícito (PMs), también tiene un valor fundamental en términos conceptuales. De hecho, la consideración de técnicas de recirculación tiene un impacto directo para un sistema en otras medidas del marco conceptual original, como por ejemplo en DMI, sin necesidad de incorporar otros indicadores. Al fomentar estrategias de recirculación de material, se podría esperar una disminución en el valor de DMI, si se consideran otros factores como estáticos (consumo, por ejemplo).

2.4. Mercado energético y medio ambiente

En las secciones previas se abarcaron antecedentes del concepto de EC y sus elementos relevantes, así como también de las bases para generar indicadores. Luego, se ahondó en la materia de marcos conceptuales, pieza clave para el desarrollo de indicadores, en donde se expusieron los marcos de contabilidad, y en particular el marco ew – MFA. Además, como se mencionó al comienzo de la Sección 2.3.3, el marco conceptual ew – MFA captura particularmente los flujos de recursos materiales. Todo lo anterior se realizó con la intención de conceptualizarse sobre el sector eléctrico, caracterizado principalmente por sus procesos de transformación (generación, transmisión y consumo) energética. Con lo anterior, esta sección tiene principalmente la responsabilidad de presentar un relato del sector eléctrico que se pueda utilizar para conciliar los aspectos materiales y energéticos, cuya consecuencia se expresa en la Sección 3.2.

Así, se exponen a continuación los sistemas eléctricos desde una perspectiva organizacional, junto con tópicos de política pública medioambiental a los cuales están sujetos. De esta manera, se introducen conceptos generales de estos sistemas para, posteriormente, identificar la estructura del sistema chileno junto con una profundización en una herramienta de planificación energética como elemento de toma de decisiones del sector público. Finalmente, se ilustran la variedad de instrumentos de política medioambiental, potenciales a ser utilizados en el sector energético.

2.4.1. Conceptos generales de organización y mercados eléctricos

Previo al proceso de introducción de competencia o restructuración del sector eléctrico, iniciado en los años 80’ – 90’, el esquema de funcionamiento de los servicios eléctricos se basaba comúnmente en entidades integradas verticalmente a lo largo de toda la cadena de suministro: producción, transmisión, distribución y comercialización; además de incluir los servicios de operación de redes y de despacho. Dicha institución funcionaba como monopolio geográfico, independiente de su naturaleza privada o gubernamental [98]. El proceso de restructuración del sector refiere a la desintegración de esta entidad a lo largo de su cadena productiva, con el afán de incorporar espacios de competencia entre los agentes.

A continuación, se identifican cinco modelos de organización de los sistemas eléctricos que se adoptaron alrededor del mundo [99]. Estos se exhiben con un carácter de tendencia, y no como estructura rígida y dogmática, pues se entiende que cada orgánica nacional y/o regional posee matices distintivos:

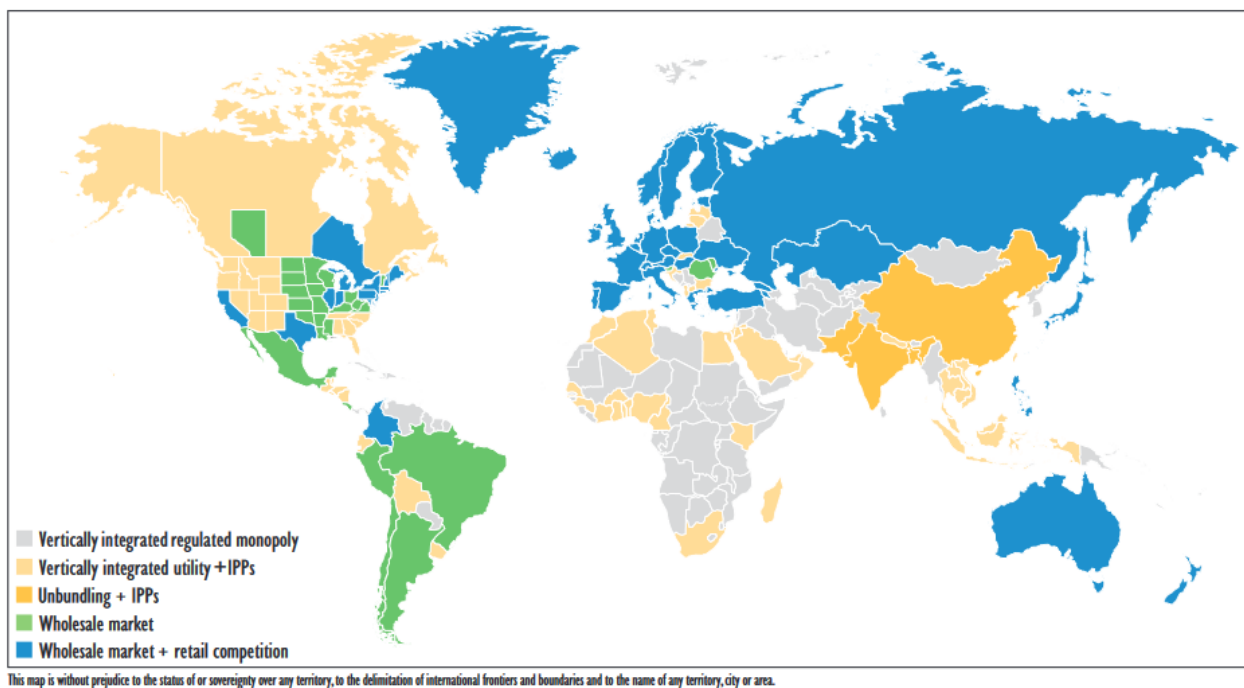


Figura 2-7 Estado de liberalización del sector eléctrico en distintas regiones [99].

Industria verticalmente integrada, monopolio: El primer modelo, como su nombre lo indica, está compuesto por una industria verticalmente integrada, la que funciona además como monopolio geográfico. Lo anterior quiere decir que es la misma entidad la que administra cada componente de la cadena del negocio eléctrico, y que en el territorio no hay otra institución (integrada o desintegrada) que ofrezca el servicio. Ahora bien, no todas las instalaciones de la cadena de suministro deben ser propiedad de una entidad. Sin embargo, las interacciones deben ser reguladas vía legal o contractual con tal de accionar como tal; ejemplo de esto es la existencia de Compañías de Distribución (DisCos).

Industria verticalmente integrada + IPPs: Este modelo entrega una primera aproximación a la introducción de competencia. Aquí algunos o todos los productores de energía se separan de la estructura verticalmente integrada para generar electricidad de manera independiente (Independent Power Producers, IPPs), y luego venderla a un **precio predefinido** al resto de la cadena de suministro. Los contratos de suministros derivados de esta interacción se denominan Acuerdos de Compra de Energía (Power Purchase Agreement, PPAs).

Desintegración vertical + IPPs: Una segunda aproximación a la introducción de competencia, usualmente previa a la implementación de mercados, guarda relación con la separación de la estructura

verticalmente integrada (desintegración). Esta separación puede ser contable, funcional, operacional o de propiedad, dependiendo del grado de vinculación entre los distintos componentes de la cadena separada. Una de las consecuencias de esta de separación es la prevención o mitigación del poder que puedan ejercer sobre el sistema algunos eslabones (generación, por ejemplo) basándose en la propiedad de otros eslabones (transmisión, por ejemplo). Lo anterior teniendo en cuenta que algunas instalaciones, como la red, son claves para otros negocios, como la generación.

Mercado mayorista: Una tercera aproximación a la introducción de competencia es el establecimiento de mercados mayoristas (grandes volúmenes de energía). La interacción entre grandes productores y consumidores tendrá lugar en dicho mercado, que puede operar de manera centralizada o en base a contratos bilaterales (descentralizada). En este esquema, además, puede aparecer la imagen del comercializador, quien toma lugar en la venta y compra de energía sin necesariamente poseer activos físicos.

Aquellos eslabones de la cadena de valor necesarios para la operación del sistema pero que no son sujetos de competencia, e.g. redes y la Operación del Sistema (por sus siglas en inglés SO), son remunerados a través de mecanismos de fijación de precios eficientes y regulados. Por último, se puede agregar que las Compañías de Distribución (DisCos, por su traducción del inglés “Distribution Companies”), siendo entes regulados, reúnen las actividades de redes de distribución (redes) y comercialización minorista (venta de energía a pequeños consumidores).

Mercado minorista: Como cuarta y última aproximación a la introducción de competencia, se separa la función de las DisCos en: su componente de redes (incluyendo el manejo de estas, i.e. DSO), y su componente de comercialización. De esta forma, se busca **agregar competencia a nivel de consumidor final** generando un mercado minorista, en donde la figura del comercializador juega un rol clave al expandir el espectro de ofertas para estas cargas.

La incorporación de los espacios de mercados mencionadas anteriormente, ya sea mayorista, minorista o ambos, no aseguran por sí solos la adecuada introducción de competencia, la cual busca mejorar la eficiencia del sistema y el uso de sus recursos. Asimismo, desintegrar el esquema del sector de manera vertical (cadena), y horizontal, conlleva desafíos de coordinación y cambios en la estructura del flujo de información, entre otros. Para estructurar estos aspectos técnico-económicos y, en general, el espacio de acción de los agentes, se define un **marco normativo o regulatorio**. Este marco orienta el funcionamiento y desarrollo del sistema bajo estándares definidos a un mínimo costo, y reflejando, en lo posible, los valores de la sociedad.

2.4.2. Organización del eléctrico chileno, agentes que lo componen, marco normativo y toma de decisiones

A partir de los conceptos expuestos, se presenta en esta sección la composición del sector eléctrico chileno. Para esto, se describe el nivel de desintegración vertical que ha alcanzado el proceso de restructuración, describiendo la participación de los agentes a lo largo de la cadena. Luego se presenta de manera somera el marco normativo que sostiene el funcionamiento y desarrollo del sistema eléctrico chileno. Finalmente, se presenta una herramienta de planificación energética, importante para consideraciones medioambientales. Además, a lo largo de toda la sección se identifican algunos agentes del sector, a medida que sea necesario.

Respecto al modelo organizacional del sector eléctrico chileno, i.e. nivel de desintegración vertical, se puede identificar un esquema de mercado mayorista. Generadores de gran escala (Generadores), DisCos y grandes consumidores se entienden como entes independientes que transan energía en dicho mercado, como se puede observar en la Figura 2-8.



Figura 2-8 Modelo organizacional de sector eléctrico chileno, mercado mayorista [100].

El proceso de restructuración no se ha extendido a un mercado minorista. Las DisCos mantienen la potestad de vender energía a los clientes regulados⁷ de su área de concesión, de manera exclusiva hasta el momento; dejando sin explotar dicho espacio de competencia. Esta situación guarda directa relación con la actual ausencia de la figura de un comercializador, lo que podría cambiar en el corto plazo. Pese a lo anterior, se han flexibilizado las condiciones para transitar de la clasificación ‘cliente regulado’ a ‘cliente libre’⁸.

⁷ Clientes regulados: Subordinados al precio de energía de la respectiva DisCo

⁸ Clientes libres: Participantes del mercado mayorista.

En la operación del mercado mayorista se pueden identificar un esquema híbrido, constituido por estructuras de enfoque centralizado y descentralizado (Figura 2-9). Respecto a la primera componente, el sistema eléctrico chileno consta de un mercado tipo pool, basado en costos auditados y de participación **obligatoria**. Tanto la operación del sistema como la operación del mercado están a cargo de una misma entidad, el **Coordinador Eléctrico Nacional (CEN)**. Su misión es ejecutar el funcionamiento del sistema eléctrico nacional (SEN), respetando estándares de seguridad y calidad de servicio a un mínimo costo.

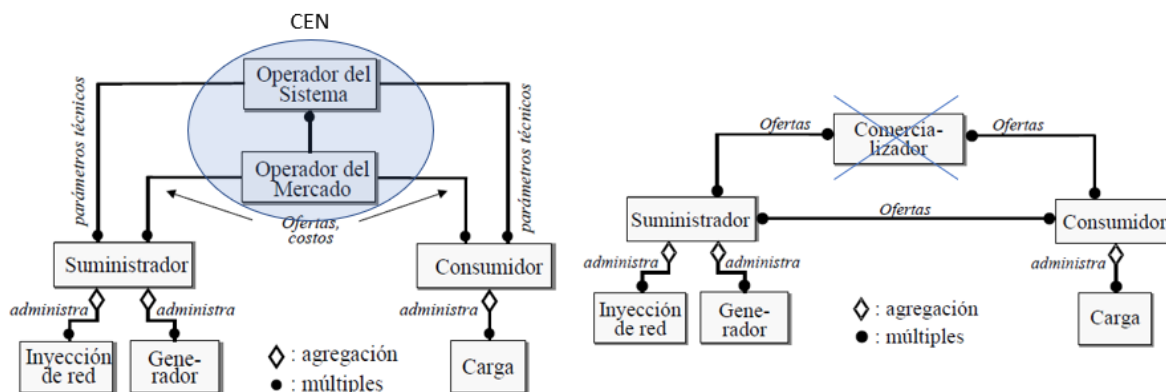


Figura 2-9 Estructuras de mercado en el sector eléctrico chileno. A la izquierda: mercado tipo pool; a la derecha: abstracción de acuerdos bilaterales financieros. Representación adaptada para el caso de Chile [101].

Respecto a la componente descentralizada, los productores y consumidores participantes del mercado mayorista pueden optar por utilizar otras estructuras, como los son los contratos bilaterales financieros, con tal de obtener algún beneficio financiero respecto a su contabilidad económica-energética. Se recalca que la participación en esta dinámica de negocio es opcional y, dado que no existen la figura de comercializador, los suministradores y cargas entran en contacto directo.

Con el panorama general de mercado eléctrico chileno, se procede a describir brevemente cómo funciona el negocio de cada una de las actividades principales del sector en el país:

Generación: Segmento de competencia. La inversión en tecnologías de generación pasa por una decisión completamente privada, siempre y cuando cumpla con la regulación vigente, considerando permisos ambientales (SEIA); por tanto, es necesario que dicha tecnología esté contenida en la regulación. Para ser enfáticos, lo anterior quiere decir que la decisión de inversión no pasa por la entidad central. A pesar de lo anterior, siempre es posible pensar en generar los incentivos económicos para inducir una decisión privada particular.

El negocio de la generación consta de dos subcomponentes, generalmente asociado a gerencias diferentes de una empresa generadora: producción y comercialización de la energía. En cuanto a la producción, la compañía busca generar energía al menor costo posible, con tal de obtener el mayor margen

al momento de vender en el pool al precio casado del mercado. Al participar en un pool obligatorio, es el CEN quien determina en qué nivel de producción se encuentra cada central del sistema.

Por su parte, la comercialización establece contratos de compra y venta de energía con sus clientes (PPA). Para ésto, la compañía compra energía al precio de casación en el pool en el punto de retiro, para luego vender esta misma a un precio fijado con el cliente. Dado que las DisCos responden a un segmento regulado, la comercialización con estas empresas varía respecto al caso general de grandes consumidores. Por último, recalcar que el ejercicio de comercializar vía contratos bilaterales financieros no es una actividad obligatoria.

Transmisión: Servicio público regulado. A diferencia de la actividad de generación, la decisión de inversión en redes de transmisión no es exclusivamente privada, sino que está supeditada al plan de expansión que impone el CEN⁹, y que debe ser aprobado tras estudios realizados (y complementado de ser necesario) por la **Comisión Nacional de Energía (CNE)**. Esta última institución es la encargada de aterrizar técnicamente las decisiones estratégicas y tácticas del Ministerio de Energía. Una vez aprobado el plan de expansión por la CNE, éste pasa al Panel de Expertos¹⁰, última instancia antes de ser aprobado y donde se reciben, de existir, discrepancias de distintos agentes del sistema.

El negocio de la transmisión, entonces, está regulado desde la inversión, pasando por la operación (sistema operado por el CEN), hasta el precio asociado al servicio prestado (tarificación, estampillado clásico). Para la asignación de proyectos se generan concursos de licitación, adjudicándose a la compañía que presente una menor anualidad por tramo. Luego, el valor ganador de la licitación se traduce en cobro para los clientes. Por último, vale la pena mencionar que, actualmente (según la ley vigente N° 20.936), todos los sistemas de transmisión son de acceso público, incluidos aquellos desarrollados por privados, siempre y cuando tengan capacidad disponible.

Distribución: Servicio público regulado y concesionado. La empresa distribuidora asignada para una zona es responsable de brindar suministro a cualquier cliente (consumo) que se encuentre dentro de ésta, si es que éste último así lo solicita. Además, debe garantizar una adecuada calidad de servicio, la cual se encuentra parametrizada en la normativa técnica.

⁹ El plan de expansión de las redes de transmisión responde a un análisis multidimensional que incluye, entre otros aspectos, un estudio de proyección de demanda, así como la evaluación de posibles zonas de desarrollo de proyectos.

¹⁰ El rol de esta institución se presenta unos párrafos adelante.

El negocio de la distribución también consta de dos componentes: redes y comercialización. Respecto al primero, los usuarios de la red de distribución deben pagar un peaje regulado. A diferencia de las redes de transmisión, este valor se calcula a través de la comparación con una empresa modelo (eficiente), y depende de lo que se denomina “área típica” en la cual se puede caracterizar la zona de concesión.

En cuanto al negocio de comercialización, las empresas distribuidoras compran un monto de energía en el mercado mayorista, para, posteriormente, vender ésta a los clientes ubicados en su zona. Entretanto, es necesario hacer la distinción entre tipos de clientes y sus transacciones respectivas. Para clientes regulados, la DisCo se contrata con generadoras a través de procesos de licitación reguladas por la CNE. Por otro lado, la DisCo puede generar contratos bilaterales financieros corrientes para suministrar a sus clientes libres. Últimamente ha sido un ejercicio común encontrar clientes libres que se contratan directamente con generadoras, debiendo pagar exclusivamente un monto correspondiente al peaje a la DisCo correspondiente.

Comercialización: Como se menciona anteriormente, no existe una figura de comercializador en el mercado eléctrico nacional. Esta actividad está parcialmente contenida dentro de los segmentos de generación y distribución.

Algunos actores relevantes que no fueron mencionados son la **Superintendencia de Electricidad y Combustible (SEC)**, ente encargado de fiscalizar el cumplimiento de la normativa vigente, y el **Panel de Expertos**, quienes dirimen frente a situaciones de conflicto o discrepancia entre los agentes del mercado eléctrico. Por otro lado, las responsabilidades de regulación recaen, en primer lugar, sobre los **Ministerios de Energía y Medio Ambiente**, con un carácter estratégico y táctico (visión y planes de acción). Con un carácter técnico-operacional, se identifican las instituciones **CNE** y **Servicio de Evaluación Ambiental (SEA)**.

El marco normativo del sector eléctrico chileno está contenido, principalmente, en la Ley General de Servicios Eléctricos (LGSE), o DFL N°4. En este documento se establece la regulación (reglas) para la participación de los agentes que componen el sistema. Esta regulación abarca el sector de competencia (Generación), los sectores regulados (Transmisión y Distribución), así como también los servicios habilitantes para el funcionamiento de la red (rol del CEN, por ejemplo). A continuación, se presentan ejemplos de las materias de regulación para cada sector [102].

- Generación: Concesiones, sistema de cuotas anuales de inyección de Energías Renovables No Convencionales (ERNC) al Sistema Eléctrico Nacional (SEN), PMG y PMGD, racionamiento.
- Transmisión: Concesiones, el acceso abierto, las licitaciones, la expansión, valorización y remuneración de la transmisión, interconexiones.

- Distribución: Concesiones, el acceso abierto, las licitaciones de energía para el suministro de clientes regulados, el régimen de precios según el tipo de cliente y tamaño del sistema eléctrico, equidad tarifaria, generación distribuida.
- Coordinación y operación del SEN y del mercado eléctrico: Seguridad, operación y transferencias económicas, información pública, intercambios internacionales, servicios complementarios.
- Sistemas medianos: Algunos sistemas eléctricos cuya capacidad de generación instalada es superior a 1,5 MW e inferior a 200 MW.

Además de la LGSE, existen otros elementos legales que participan en el marco normativo del sistema eléctrico chileno, por cuanto estructuran su funcionamiento y desarrollo. Algunos de estos elementos son la Ley de Eficiencia Energética (EE), DFL de Servicios de Gas, Ley de Mecanismos de Estabilización de Precios de los Combustibles, entre otros [102].

2.4.3. Toma de decisiones pública en el sector eléctrico chileno: PELP

Un grupo de elementos relevantes para el presente trabajo, y someramente presentados junto al segmento transmisión, son los estudios de carácter prospectivo del sector eléctrico. Estos analizan los posibles futuros o desarrollos del sector. De esta manera, el ejercicio aporta conocimiento que puede incidir en las decisiones sobre el sistema. El estudio particular a presentar, la Proyección Energética de Largo Plazo (PELP), impacta de manera indicativa y estratégica al sector eléctrico chileno, incidiendo en posibles señales de mercado del sistema. Lo anterior considerando que la decisión de inversión en el contexto chileno es, en última instancia, privada. Sin perjuicio de lo anterior, la PELP también tiene algunos resultados vinculantes, particularmente en relación al subsector de transmisión como se menciona en la presente sección. Por último, y debido al impacto de las nuevas tendencias energéticas, como por ejemplo el desarrollo de la electromovilidad y la producción de hidrógeno verde, la PELP estudia íntegramente los energéticos del país, y no solamente los sistemas eléctricos.

El año 2016, junto con la promulgación de la Ley N° 20.936 [103], donde se instituye un nuevo sistema de transmisión y la creación del SEN (ISO resultante de la unión CDECs SING-SIC), se origina la herramienta Proyección Energética de Largo Plazo (PELP), ahora presente en la Ley General de Servicios Eléctricos (LGSE) principalmente¹¹ como:

¹¹ Además del Artículo 83°, en el Artículo 86° también se hace una breve mención al proceso de planificación energética.

“Artículo 83°. - Planificación Energética. Cada cinco años, el Ministerio de Energía deberá desarrollar un proceso de planificación energética de largo plazo, para los distintos escenarios energéticos de expansión de la generación y del consumo, en un horizonte de al menos treinta años.

...deberá incluir escenarios de proyección de oferta y demanda energética y en particular eléctrica, considerando la identificación de polos de desarrollo de generación, generación distribuida, intercambios internacionales de energía, políticas medio ambientales que tengan incidencia y objetivos de eficiencia energética entre otros, elaborando sus posibles escenarios de desarrollo. Asimismo, la planificación deberá considerar dentro de sus análisis los planes estratégicos con los que cuenten las regiones en materia de energía. Anualmente, el Ministerio podrá actualizar la proyección de la demanda, los escenarios macroeconómicos, y los demás antecedentes...” [103]

Como se menciona, la PELP, al estudiar futuros escenarios energéticos, polos de desarrollo y proyecciones de consumo y oferta energética, entrega información relevante que sirve como apoyo para la toma de decisiones de política pública del sector. En particular, y por mandato legal, los resultados de la PELP son un insumo esencial para el plan de expansión anual de la transmisión, a cargo de la CNE [104].

El proceso de la PELP entrega tres grandes resultados [105][106] [107]:

- **Definición de Escenarios Energéticos.** Se identifican y priorizan variables clave con las cuales se formulan relatos coherentes (escenarios) que sostienen posibles desarrollos para el sector energético del país. Los escenarios se pueden obtener enteramente del conocimiento experto, o de un proceso participativo con diversos actores sociales, respaldado por un apoyo técnico competente (experto). El caso del proceso PELP 2023-2027 toma esta última metodología, buscando legitimar el proceso ante la sociedad.
- **Proyecciones de oferta y demanda energética.** Este subproceso se realiza en base a los escenarios definidos anteriormente. Con los escenarios, en conjunto con modelos matemáticos del sector, se proyectan las posibles trayectorias de las necesidades energéticas de la sociedad. Habiendo establecido la necesidad energética, se procede a estudiar la oferta energética que abastece dicho consumo de manera eficiente. Se identifica además la infraestructura necesaria para el funcionamiento del sistemas según los requerimientos de la normativa vigente.
- **Polos de desarrollo de generación eléctrica.** En base a los resultados, se identifican los polos de desarrollo del sistema eléctrico, los cuales se definen como “... *aquellas zonas territorialmente identificables en el país, ubicadas en las regiones en las que se emplaza el Sistema Eléctrico Nacional, donde **existen recursos** para la producción de energía eléctrica proveniente de energías renovables, cuyo aprovechamiento, **utilizando un único sistema de transmisión**, resulta de interés público por ser eficiente económicamente para el suministro*”

eléctrico, debiendo cumplir con la legislación ambiental y de ordenamiento territorial” (Art. 85° de la Ley N° 20.936 [103]). Previo a emitir el informe técnico asociado a cada polo de desarrollo que se obtiene de la PELP, el Ministerio debe realizar una Evaluación Ambiental Estratégica (EAE) en cada provincia donde se establezca la presencia de uno o más polos [105] [108].

Así, el proceso completo PELP se puede diagramar de la siguiente manera [105]:

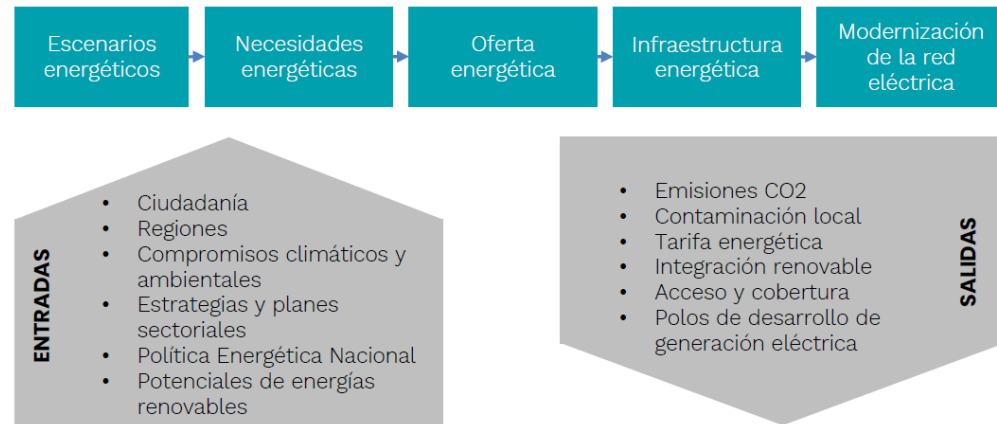


Figura 2-10 Esquema secuencial del proceso PELP, con expresión de entradas y salidas.

Dentro de los ejercicios de planificación, cobran particular relevancia los modelos de proyección del sistema eléctrico. Estos modelos de proyección se alimentan de, entre otras cosas, las variables identificadas como relevantes por la definición de los escenarios. De esta manera, se calculan las salidas para cada escenario energético construido.

La PELP consta, principalmente, de tres modelos de proyección: Modelo de Demanda, Modelo de Oferta (eléctrico), y Modelo de Recursos Distribuidos. La relación metodológica entre dichos modelos de proyección se presenta en la Figura 2-11. Se ilustra tanto las entradas como las salidas de cada modelo, así como también las entradas y salidas del esquema en general. Estas últimas (salidas del esquema general) corresponden a la información de la infraestructura óptima de transmisión y generación para cada escenario.

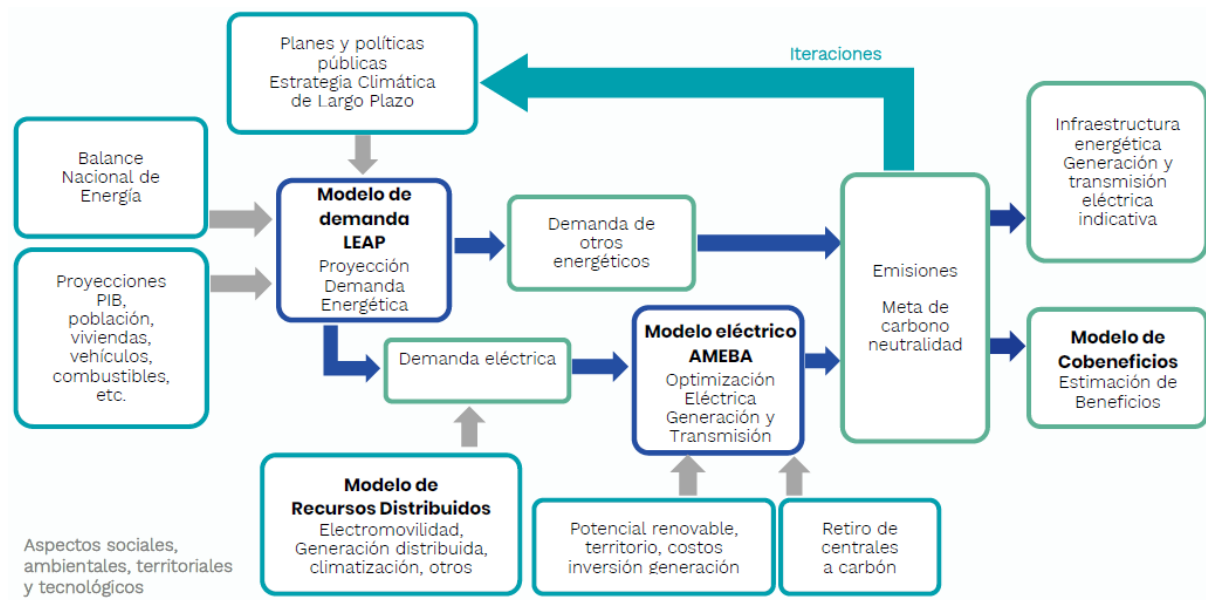


Figura 2-11 Relación metodológica de los modelos de proyección[105].

Modelo de proyección de demanda: Utilizando un enfoque “bottom-up”, esta herramienta considera tanto parámetros globales (e.g. proyecciones PIB según datos FMI, OECD y B) así como sectoriales (e.g. sustitución de energéticos) para modelar, al menos con una granularidad regional y horizonte de 30 años, cada subsegmento energético¹²: Comercial y Público, Residencial, Transporte, y Sector Industrial y Minero. Debe contemplar todos los energéticos presentes en el Balance Nacional de Energía, y busca incorporar nuevas tecnologías y medidas de eficiencia energética [106].

Modelo de recursos distribuidos: Se busca estimar el grado de inclusión de nuevas tecnologías a nivel de distribución, particularmente en el ejercicio de generación eléctrica a través de paneles FV, para los sectores residencial, comercial e industrial. Lo anterior se realiza a través de un modelo basado en agentes. Algunos de los elementos más importantes para el modelamiento de decisión de los agentes son el periodo de payback de la inversión, ingreso económico del sector, influencia de comunicación entre los agentes y beneficios medioambientales [105].

Modelo de planificación eléctrica: Permite optimizar la inversión del mercado eléctrico (desarrollo costo-eficiente), considerando fenómenos de mediano-largo plazo como la coordinación hidrotérmica, y fenómenos de corto plazo como las dinámicas de operación del sistema. Se propone un modelo reducido en número de barras, con resolución suficiente para lograr una correcta representación eléctrica (mínimo),

¹² Según Balance Nacional de Energía.

geográfica (mínimo) y computacional (máximo). Actualmente se utiliza la plataforma AMEBA para la realización de las simulaciones [106] [109].

En otro plano, y como se enfatizó anteriormente, el resultado del proceso de planificación energética es, por mandato legal, pero sin ser vinculante en su completitud, un insumo esencial para el plan de expansión anual de la transmisión a cargo de la CNE. Esto último por dos motivos: en primer lugar, es imperante procurar que el desarrollo de la transmisión permita o habilite un buen funcionamiento técnico-económico del sistema/mercado eléctrico. En segundo lugar, el plan de expansión de la transmisión contempla, de manera vinculante, los polos de desarrollo extraídos de la PELP, y su conexión con el sistema nacional. Así, y como se muestra en la Figura 2-12, el resultado del proceso PELP se cruza con la información del coordinador eléctrico nacional para alimentar el proceso llevado a cabo por la CNE. Finalmente, es el **Panel de Expertos** el ente encargado de aprobar o no el Plan de Expansión de la Transmisión, considerando las discrepancias presentadas por distintos agentes del sector.

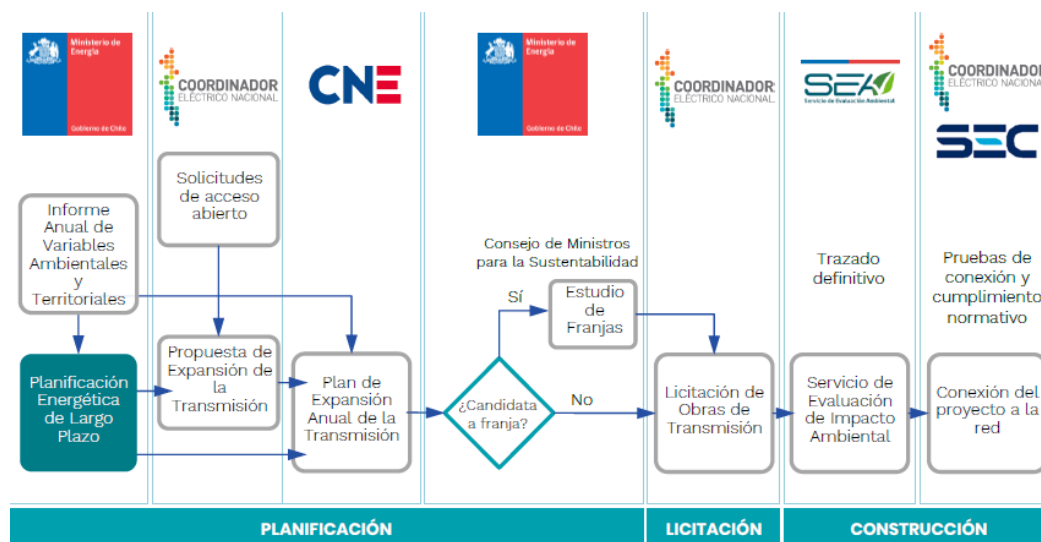
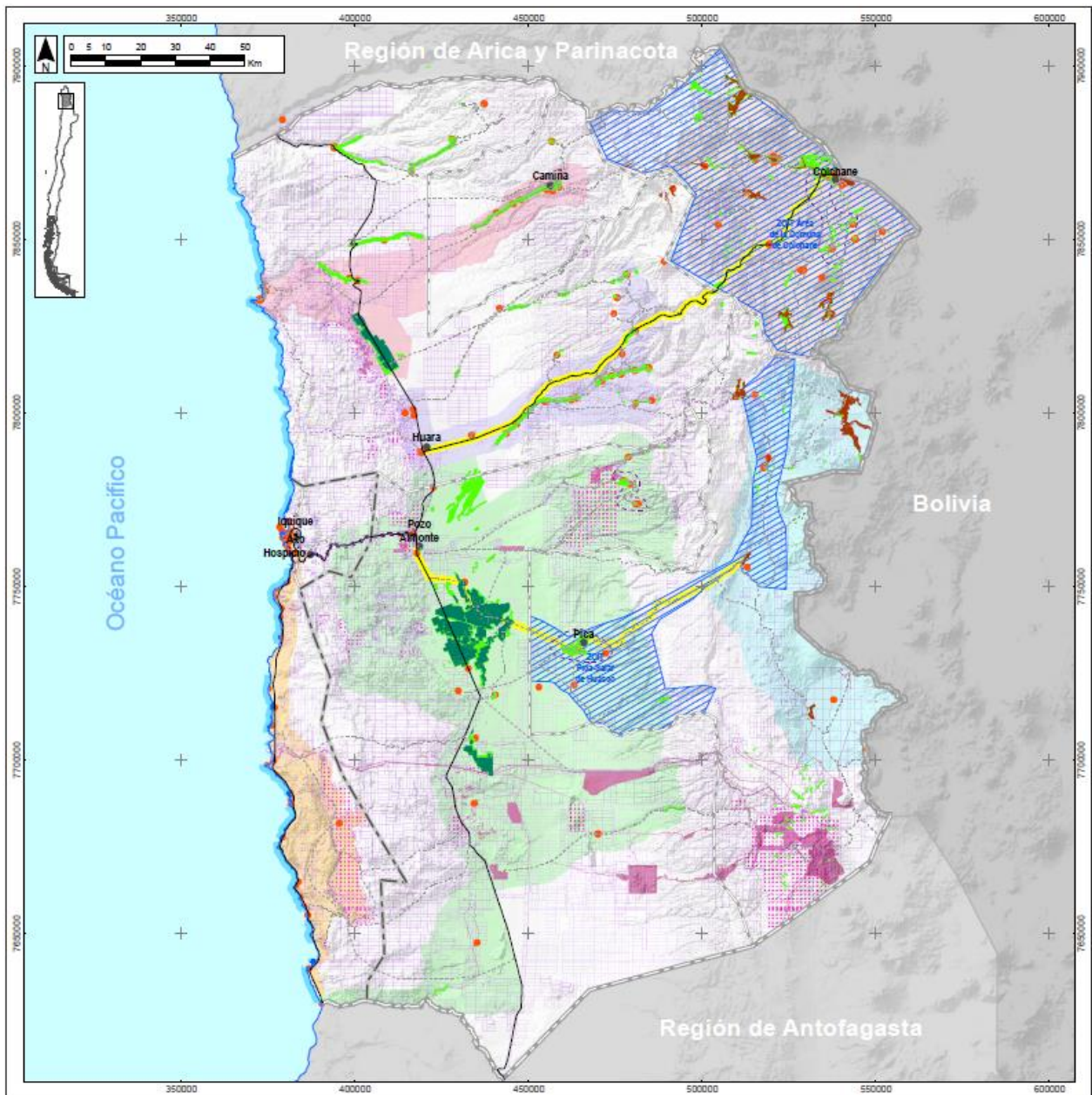


Figura 2-12 Proceso de planificación, licitación y construcción del sistema de transmisión, y los agentes responsables.

Un último punto relevante, parte de las entradas de la PELP es la influencia de “los planes estratégicos con los que cuentan las regiones en materia de energía.”. El propósito de un Plan Energético Regional (PER) es “identificar de manera indicativa las zonas de interés energético considerando los potenciales de energías renovables y las brechas en servicios energéticos de las regiones en electricidad, agua caliente sanitaria y combustibles, en coherencia con las características y usos de los territorios, bajo un enfoque participativo (público-privado) y de coordinación multisectorial a nivel regional.” [110].

Como ejemplo de las consideraciones sobre usos territoriales, se presenta en la Figura 2-13 los Objetos de Valoración Territorial Productivos (OdVTP), parte del Plan Energético Regional de Tarapacá [110]. Los Objetos de Valoración Territorial se definen como “...una serie de variables presentes en el territorio, de

distinta naturaleza, que se consideran particularmente relevantes para el desarrollo del sector energético, y que pueden ser valoradas respecto a su incidencia en el desarrollo del sector.” [110].



Información Temática

Turismo

Áreas Turísticas Prioritarias (ATP)

- RESERVA NATURAL PAMPA DEL TAMARUGAL
- P.N. VOLCÁN ISLUGA - M.N. SALAR DE SURIRE
- HUARA-CHUSMIZA-ALTO TARAPACA
- SALITRERAS Y OASIS DE TARAPACA
- SALARES DE HUASCO Y COPOSA
- LITORAL DE IQUIQUE

- Atractivos Turísticos
- Circuitos Turísticos
- Destinos Turísticos
- Zonas de Interés Turístico (ZOIT)

Silvoagropecuario

- Áreas de aptitud Preferente Pecuario
- Áreas de aptitud Preferente Agrícola
- Plantaciones Forestales

Pesca

- Áreas de Manejo y Explotación de Recursos Bentónicos (AMERB)
- Áreas Apropriadadas para el ejercicio de la Acuicultura (A.A.A.) - Concesiones de Acuicultura

Minería

- Faenas Mineras
- Servidumbres mine
- Concesiones Exploración Minera
- Concesiones Explotación Minera (1932/1983)

Información Base

- ⊙ Capital Regional
- Capital Comunal
- Ruta Principal
- Limite Internacional
- Limite Provincial
- Limite Comunal
- Línea de Costa
- Cuerpos de Agua (Lago o Laguna)

Figura 2-13 Objetos de Valoración Territorial Productivos, PER Tarapacá [110].

2.4.4. Política medioambiental en el sector eléctrico

Una política pública se puede definir como “un curso de acción intencional seguido por una institución o funcionario gubernamental para resolver un asunto de interés público” [111]. Sin entrar en el detalle de esta teoría, es importante considerar que las políticas públicas debiesen reflejar la cultura y los valores de la sociedad, y tienen consecuencias en la misma [112]. En particular, la política medioambiental refleja los valores de la sociedad en interacción con el entorno.

Una política medioambiental, ya sea internacional, nacional o territorial, se implementa por medio de instrumentos políticos, apoyado por organizaciones públicas y privadas, para lograr las metas impuestas sobre un sector. Estos instrumentos se pueden entender como normas y mecanismos de relación sobre y entre las organizaciones que participan en la aplicación y el sector objetivo [113].

A continuación, en la Figura 2-14, se presenta una taxonomía que permite apreciar desde una perspectiva general la variedad de instrumentos utilizados en política medioambiental y que, por consiguiente, podrían generar un impacto en el sector eléctrico [114]:



Figura 2-14 Taxonomía de instrumentos para política pública medioambiental

Los instrumentos que no se basan en mecanismos de mercado se manifiestan a través de obligaciones o incentivos no monetarios para generar el cambio esperado en el comportamiento de un agente; e.g. fijación de límites de producción o emisiones. Por su parte, los instrumentos de mercado se basan en la modificación de los incentivos económicos (precios) para lograr cambios en un comportamiento en cuestión, incorporando costos no percibidos en un comienzo por el agente. Esto se percibe como una acción indirecta en contraste con los instrumentos no basados en mercados. En variadas ocasiones la ubicación en una de estas categorías no es del todo clara [115].

A continuación, se presentan de manera sintética los instrumentos ilustrados en la Figura 2-14. En algunos casos se acompañará la descripción con un ejemplo relacionado al sector eléctrico:

- **Impuestos:** Son instrumentos fiscales en forma de cargos aplicados sobre la unidad de producto, entradas y/o salidas de un proceso, o contaminación. En el caso medioambiental, tienen como principal objetivo, y sin desmedro de la existencia de una componente recaudatoria, desincentivar un comportamiento, internalizando (en mayor o menor medida) efectos negativos causados sobre el entorno en forma de costos. Es una manera de aplicar el principio “el que contamina paga”.

Una de las grandes ventajas que se le asocia a esta herramienta es la costo-efectividad de su implementación [116]. Asimismo, se puede fomentar un comportamiento por medio de exención o reducción de carga impositiva, o incorporación de impuestos negativos (subsidios).

Por su parte, el impuesto al carbono tiene una alta incidencia en el sector energético, el cual aplica un cargo a la emisión de CO₂-equivalente, medida indirectamente a través de la cantidad y tipo de combustible utilizado.

- **Comercialización de emisiones [117]:** Existen dos mecanismos que permiten limitar la cantidad de emisiones a través de transacciones, particularmente aplicada a la emisión de CO₂ (no sé si carbono equivalente). En primer lugar, se encuentra la herramienta cap-and-trade, la cual establece un máximo de unidades de emisiones para cada institución. A algunas de éstas les será menos costoso implementar acciones de mitigación que a otras. Generando un mercado, es posible transar cuotas de carbono de organización que logran reducir emisiones de manera menos costosa, lo que se traduce en una acción de eficiencia a nivel global.

La segunda herramienta, baseline-and-credit scheme, genera esta misma situación de mercado, sin embargo, no se asigna un monto total (máximo) de unidades de carbono disponibles a emitir, sino que establece una intensidad de emisiones de referencia (actualidad o un valor

modificado). Al posicionar las emisiones de la organización por debajo del objetivo indicado, i.e. su desempeño es mejor que le solicitado, se crean créditos por dicha diferencia.

- **Remoción de incentivos perversos:** Algunos países han provisto a la industria de combustibles fósiles de apoyo e incentivos para su desarrollo, dado su impacto en la economía nacional. Estados Unidos, por ejemplo, ha utilizado mecanismos de subsidio directo y otros beneficios fiscales como subvención a dicho sector para fomentar la producción energética nacional, manteniendo sus costos bajos [118]. Sumado a lo anterior, otros instrumentos tienen consecuencias indirectas, como el gozo de excepciones a normas de responsabilidad (liability rules), las cuales asignan costos por daños incurridos. Remover estos beneficios y aportes es parte importante de la discusión medioambiental.
- **Normas de responsabilidad:** Tanto en el proceso de instalación como en el de operación de las diversas industrias existen potenciales daños a terceros, incluyendo al medioambiente. Las normas de responsabilidad atribuyen la obligación del causante de pagar por dicho perjuicio, lo que se traduce en un costo desde el punto de vista del responsable. Asimismo, es posible aplicar esta regulación de manera diferenciada según los impactos medioambientales, con la finalidad de incentivar un comportamiento en particular.

En principio, esta herramienta tiene un carácter compensatorio y no preventivo, sin embargo, con el apoyo de correctos mecanismos institucionales, los costos de reparación podrían internalizarse *ex ante* a la decisión [119].

- **Depósito-reembolso:** Este instrumento es una combinación de cargos (fianza) al momento de adquirir un producto y descuentos aplicados al momento de su correcta disposición (reciclaje, reutilización, etc).
- **Regulación tipo mando y control:** Son aquellas que imponen directamente decisiones y operación a un negocio, incluyendo especificaciones sobre el “cuánto contaminar” y/o el “cómo controlar” la incidencia de los agentes en el medioambiente, regulando su participación sin instrumentos de incentivo. Algunas de sus aplicaciones pueden tener un enfoque cualitativo con carácter interpretativo, como BATNEEC (best available technology not entailing excessive cost).

Este tipo de regulación tiene un amplio impacto en el desarrollo de los sistemas eléctricos, imponiendo estándares de desempeño (limitación emisiones, desechos), exigiendo o vetando procedimientos, solicitando el uso de tecnologías específicas o estandarizando requisitos

mínimos que deban cumplir éstas, entre otros. Un claro ejemplo de aplicación de lo anterior es la regulación basada en permisos (EPR), en donde una ente centralizado impone requisitos mínimos para autorizar el proceso de construcción y operación de una obra [120] [121] [122].

- **Requerimientos de reporte/información:** La creación de estructuras de reporte generalmente antecede al trabajo regulatorio, incrementando la cantidad de información accesible. Los inventarios de emisiones son un ejemplo de esta herramienta.
- **Apoyo activo a tecnologías (verdes):** Esta categoría engloba actividades que fomentan el desarrollo y empleo de tecnologías. Apoyo a instituciones I+D (R&D) con financiamiento público, certificación de energía renovable, inversión en infraestructuras compatibles estas tecnologías, estándares mínimos de generación o consumo renovable y aplicación de incentivos de adopción (feed-in tariffs, por ejemplo), son algunas de éstas. No se hace responsable directamente las externalidades negativas, y se enfoca en el segmento de suministro de tecnologías “verdes” [123].
- **Remoción de barreras financieras para tecnologías verdes:** Se traduce en distintos mecanismos financieros, como la exención parcial o completa de los impuestos y préstamos subvencionados, entre otros. Se considera como un instrumento no basado en mercados, a pesar de utilizar herramientas económicas, debido a la especificidad del objetivo, en lugar de incidir en la cadena de un producto energético o contabilidad de emisiones [115].
- **Enfoque informativo y voluntario:** Este instrumento apunta a divulgar información, e.g. efectos negativos del consumo de algunos productos, y generar conciencia en el consumidor final a través de ésta. Así, afectando los estándares morales, se busca suscribir voluntariamente a los agentes a un cambio de comportamiento.
- **Certificación y etiquetado de productos:** Persigue comunicar a los stakeholders el cumplimiento de ciertos estándares, o información relevante sobre los procesos relacionado con un producto en cuestión, a través de un símbolo, etiqueta, reconocimientos o representación en general. Esta medida puede ser comandada por un ente centralizado, o impulsada voluntariamente por una industria o empresa.

En cuanto al sector energético, se encuentran en discusión y evaluación, por ejemplo, la inclusión de tecnologías fotovoltaicas en los estándares voluntarios EU Ecolabel [124] y Green Public Procurement (GPP) [125] [126]. El primero es un reconocimiento del compromiso

medioambiental exigente de un producto, de acuerdo a los criterios de la unión europea. El segundo guarda relación con la identificación de productos de impactos medioambientales reducidos, **comparativo** a otros que cumplirían con la misma función, con la finalidad de dirigir la inversión pública de acuerdo a los valores promovidos.

2.4.5. Política medioambiental en el sector eléctrico chileno

Habiendo presentado sucintamente conceptos de política ambiental, corresponde señalar su expresión en el caso chileno, particularmente para el sector eléctrico. Para esto se presentan los principales instrumentos de política que afectan al sector, separando aquellos provenientes de política internacional de aquellos propios de la política nacional.

Respecto a los compromisos **internacionales** se destaca el Acuerdo de París, adoptado por Chile en diciembre del 2015 y promulgado en febrero del 2017 en el diario oficial [127]. En dicho tratado se impulsa a las Partes a mantener la temperatura media global “muy por debajo de 2°C con respecto a niveles preindustriales”, y a redoblar su determinación para limitar la temperatura a 1,5°C. Este tratado es **jurídicamente vinculante**, y exige a las Partes, entre otras cosas, a la realización periódica (cada 5 años) y progresiva de un documento que comunique los esfuerzos ambiciosos de cada nación para alcanzar los objetivos internacionales de reducir las emisiones de GEI. Este documento se denomina “Contribución Determinada a Nivel Nacional” (“NDC” por sus siglas en inglés), y tiene un carácter **jurídicamente no vinculante** con el desarrollo de cada sector productivo. Además, a partir del año 2024 los países comunicarán las medidas adoptadas hasta el momento con la finalidad de evaluar el progreso colectivo, en miras de una nueva versión de NDC (año 2025).

El Acuerdo de París también anima a la formulación y comunicación de una Estrategia Climática de Largo Plazo (ECLP) como guía para el desarrollo bajo en emisiones de cada una de las Partes. A raíz de recomendaciones de la OCDE en materia ambiental, y a través del Proyecto de Ley Marco de Cambio Climático¹³, Chile “se compromete a elaborar, implementar y dar seguimiento de su ECLP” [128], con lo que el documento adquiriría un carácter **jurídicamente vinculante**. De aquí se extraen los lineamientos generales para alcanzar los objetivos de reducción de emisiones, alcanzar la carbono neutralidad, y reducir la vulnerabilidad, aumentando la resiliencia ante los efectos de la crisis climática [128]. Por último, el Proyecto de Ley establece una relación inmediata entre la ECLP y la NDC, siendo la segunda un paso

¹³ A través del Proyecto de Ley Marco de Cambio Climático, y en línea con la ECLP, se fija un “camino a la carbono neutralidad y resiliencia a más tardar al 2050” [129].

intermedio para el cumplimiento de la primera. En consecuencia, la segunda (NDC) adquiriría un carácter **jurídico vinculante** a través de la primera (ECLP) de manera indirecta.

El sector energía, responsable del 77,4% del total nacional de emisiones de GEI (año 2018), tiene un rol preponderante para alcanzar la meta de carbono neutralidad al 2050. Como subcategoría, la Industria de la energía (principalmente generación de electricidad) tiene una participación del 38,8% de las emisiones del sector (año 2018). En consecuencia, de lo anterior, una estrategia con el objetivo de lograr la carbono neutralidad tiene un impacto significativo sobre el sistema eléctrico. En particular, la ECLP establece los siguientes objetivos para el sector energía [129]:

- Objetivo 1: Alcanzar una matriz energética baja en carbono al 2050.
- Objetivo 2: Establecer la eficiencia energética como pilar de desarrollo en sectores industrial, residencial, entre otros. Eficiencia energética como acción habilitadora fundamental para la descarbonización.
- Objetivo 3: Incrementar el uso de tecnologías y energéticos bajos en emisiones, como por ejemplo el uso de hidrógeno verde, en todos los sectores de la economía.
- Objetivo 4: Lograr el acceso equitativo a servicios energéticos de calidad que permitan satisfacer las necesidades energéticas de las personas y contribuir al desarrollo humano.
- Objetivo 5: Descentralización y diversificación de los recursos energéticos para un sector energético más resiliente y bajo en emisiones, incluyendo tanto el autoconsumo de energía como las tecnologías renovables de gran escala.
- Objetivo 6: Reducir la vulnerabilidad al cambio climático y facilitar su integración en el desarrollo y gestión del sector energía.

La estructura de compromisos internacionales descrita anteriormente genera un marco estratégico para el desarrollo e implementación de instrumentos de políticas públicas que apunten a objetivos y metas más específicas. De esta manera, se hereda en el contexto nacional las responsabilidades adquiridas de manera internacional. A continuación, se presentan algunos instrumentos que tienen incidencia sobre el sector eléctrico. Si bien algunos de estos persiguen el afán de cumplir con acuerdos internacionales, otros responden a inquietudes locales.

Ley 20.698, modificación Art. 150° bis DFL 4/20.018, Participación de ERNC en la Comercialización (Regulación tipo mando y control):

“Artículo 150° bis.- Cada empresa eléctrica que efectúe retiros de energía desde los **sistemas eléctricos** con capacidad instalada superior a 200 MW¹⁴ para comercializarla con distribuidoras o con clientes finales, estén o no sujetos a regulación de precios, deberá acreditar ante el Coordinador, que una **cantidad de energía equivalente al 20% de sus retiros** en cada año calendario haya sido inyectada a cualquiera de dichos sistemas, **por medio de generación renovables no convencionales**, propios o contratados.”

Agrega además que, de haber excedentes de inyección renovable, se pueden convenir traspasos entre empresas eléctricas. Por último, se establece un cargo de 0,4 UTM por cada MWh de déficit respecto a la obligación, que puede aumentar a 0,6 UTM por cada MWh si la empresa reincide en un plazo de 3 años.

Evaluación de Impacto Ambiental (EIA, Regulación tipo mando y control):

Contenido y promulgado en 1994 en la Ley 19.300 de Bases Generales del Medio Ambiente (LGBMA) e implementado desde el año 1997 a través de la promulgación del Decreto 30: REGLAMENTO DEL SISTEMA DE EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL (SEIA, reemplazado/actualizado por el Decreto 40 el año 2013.

“La SEIA es un instrumento ambiental de carácter preventivo que permite a la autoridad determinar antes de la ejecución de un proyecto si:

- Cumple con la legislación ambiental vigente
- Se hace cargo de los potenciales impactos ambientales significativos”

Dentro del concepto “legislación ambiental vigente” se incluyen Normas de Calidad, Normas de Emisión, Planes de Prevención y Descontaminación, y Normativa Sectorial. Los proyectos sujetos al escrutinio de una EIA para su aprobación se establecen en el Art. 10° de la LGBMA y el Art 3° del Decreto 40. Dichos proyectos sólo podrán iniciar su fase de construcción cuando obtengan una Resolución de Calificación Ambiental (RCA) favorable. Dentro de los proyectos que requieren la obtención de RCA para su instalación se encuentran las líneas de transmisión de alta tensión y subestaciones, centrales generadoras de capacidad mayor a 3 MW, y proyectos de desarrollo minero, incluidos los de carbón, petróleo y gas comprendiendo prospecciones, explotaciones, plantas procesadoras y disposición de residuos. Dependiendo de las características del proyecto, el instrumento de evaluación puede corresponder a una Declaración de Impacto Ambiental (DIA) o una Evaluación de Impacto Ambiental (EIA).

¹⁴ Hace referencia a sistemas eléctricos, y no ha compañías eléctricas. En el caso chileno, un sistema eléctrico con capacidad instalada superior a 200 MW corresponde sólo al SEN (Sistema Eléctrico Nacional).

A continuación, se presenta el esquema general del sistema SEIA [130]:

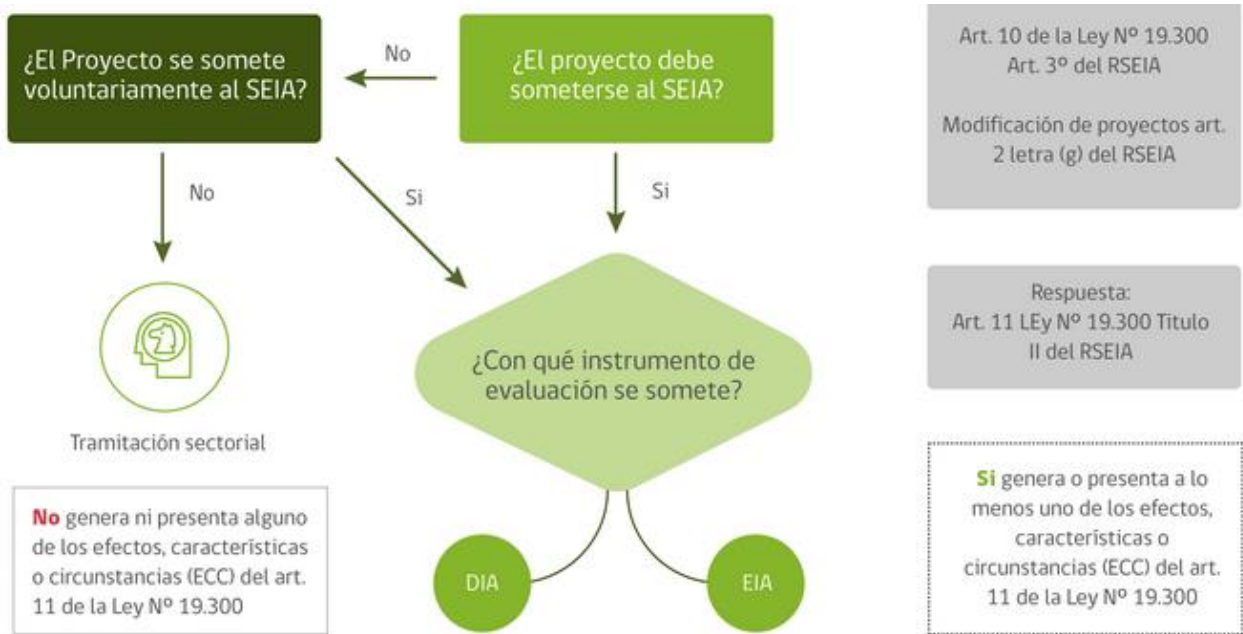


Figura 2-15 Esquema simplificado del sistema SEIA

Impuestos verdes (Ley 20.780 de Reforma Tributaria y su posterior simplificación en la Ley 20.899, Impuestos):

Con el objetivo de reducir las emisiones globales y locales, el 2014 se promulgó la Ley 20.780 en el diario oficial (para entrar en régimen el año 2017), en la cual se escribió lo siguiente:

“Artículo 8°.- Establécese un impuesto anual a beneficio fiscal que gravará las emisiones al aire de material particulado (MP), óxidos de nitrógeno (NOx), dióxido de azufre (SO2) y dióxido de carbono (CO2), producidas por establecimientos cuyas fuentes fijas, conformadas por calderas o turbinas, individualmente o en su conjunto sumen, una potencia térmica mayor o igual a 50 MWt (megavatios térmicos), considerando el límite superior del valor energético del combustible.”

Para la implementación de este impuesto se utiliza la siguiente formula:

$$T_{ij} = 0,1 \cdot CCA_j \cdot CSC_{pci} \cdot P_{obj}$$

Donde

CCA: Calidad del Aire de una comuna “j” (Zona saturada 1,2; Zona latente 1,1);

CSC: Costo Social per cápita para el contaminante “i” (MP US\$ 0,9; SO2 US\$ 0,01; NOX US4 0,025);

Pob: Población de la comuna “j”, según proyección oficial de cada año del INE.

Para el caso de CO₂ se fijó un gravamen plano de USD 5 por cada tonelada emitida, excluyendo las instalaciones que operen en base a energías renovables cuyo energético primario sea biomasa. Esto equivale a determinar un costo social del carbono (al año 2014) equivalente a \$2.213 CLP [131].

Ley de Modernización Tributaria (21.210, Comercialización de emisiones):

Esta ley, promulgada en febrero del año 2020, modifica los activos sujetos a impuestos por un umbral de emisiones de 25 mil toneladas de CO₂ y/o 100 toneladas de MP. Además, incorpora un nuevo instrumento a la gestión de las emisiones: Offsets. Estos corresponden a compensaciones de las emisiones de una entidad en base a la reducción de otra entidad (adicional a las metas correspondientes). Por último, notar que si bien la metodología de cálculo del costo social del carbono (CSC) se ha modificado (CLP\$ 23.298¹⁵), así como también su valor (CSC), el monto del gravamen se ha mantenido (\$5 USD).

Ley Marco para la Gestión de Residuos, la Responsabilidad Extendida del Productor y Fomento al Reciclaje (20.920, Múltiples instrumentos):

La Ley REP tiene como principal objetivo disminuir la generación de residuos, fomentando además la valorización de estos a través de estrategias como reutilización y reciclaje, entre otras. Algunos de los principios que inspiran la ley se enuncian a continuación:

- El que contamina paga: el generador de un residuo es responsable de éste.
- Gradualismo: Las obligaciones para prevenir la generación de residuos o su valorización serán establecidas o exigidas de manera progresiva.
- Jerarquía en el manejo de residuos: Orden de preferencia de manejo, que considera como primera alternativa la prevención en la generación de residuos, luego la reutilización y otras estrategias, tal y como se explicó en la Sección 2.1.1.
- Precautorio: Ante la falta de certeza científica respecto a los riesgos que implica el manejo de algún tipo de residuo para el medio ambiente y la salud humana (incertidumbre), se promueven medidas que eviten dicha emisión o contaminación.

Para cumplir con el objetivo en cuestión, se pueden distinguir dos caminos establecidos en la Ley. Un primer camino busca prevenir la generación de residuos y valorizarlos en términos generales a través de la institución (instituir) de un marco “de la gestión de residuos”. Para llevar a cabo esto, el Ministerio del

¹⁵ Considerando un precio social del carbono de 0,823 UF/ton CO₂ para el año de calibración (30/12/2016) [163] y el valor de la Unidad de Fomento a 28.309,03 CLP/UF para la fecha 30/12/2019 [131].

Medio Ambiente está facultado para establecer, a través de decreto supremo, una cartera de instrumentos que aplican sobre distintos agentes de la cadena de un residuo: ecodiseño, certificación y etiquetado, sistemas de depósito y reembolso, por nombrar algunos.

Un segundo camino presenta el concepto de “la responsabilidad extendida del productor” (REP), la que

“...corresponde a un régimen especial de gestión de residuos, conforme al cual los productores de productos prioritarios son responsables de la organización y financiamiento de la gestión de los residuos de los productos prioritarios que comercialicen en el país.” [132].

Siguiendo, los productos prioritarios mencionados se definen de la siguiente manera:

“Sustancia u objeto que una vez transformado en residuo, por su volumen, peligrosidad o presencia de recursos aprovechables, queda sujeto a las obligaciones de la responsabilidad extendida del productor, en conformidad a esta ley.” [132].

Es decir, bajo ciertos criterios se definen objetos o familias de objetos (productos prioritarios) sujetos a la gestión especial REP. Dentro de estos productos prioritarios, con incidencia directa en el sector eléctrico, se destacan la categoría de aparatos eléctricos y electrónicos, y la categoría de baterías. En particular, dentro de la categoría de aparatos eléctricos y electrónicos se contempla la subcategoría de paneles fotovoltaicos con una dimensión superior a 50 cm.

Ley de Eficiencia Energética (21.305, Múltiples instrumentos):

La Ley de Eficiencia Energética (LEE) tiene como principal objetivo institucionalizar un Plan Nacional de Eficiencia Energética, que se elabora cada cinco años, y proporciona un “marco estratégico para el desarrollo de la eficiencia energética” [133]22 del país en miras de una carbono neutralidad al año 2050. Dicho Plan debe establecer metas de eficiencia energética para mediano, corto y largo plazo, considerando al menos las siguientes temáticas: eficiencia energética residencial; estándares mínimos y etiquetado de artefactos; eficiencia energética en la edificación y el transporte; eficiencia energética y ciudades inteligentes; eficiencia energética en los sectores productivos y educación y capacitación en eficiencia energética. Además, el Plan debe fijar metas de eficiencia energética sobre Consumidores con Capacidad de Gestión de Energía (CCGE). Para concretar dichas metas la Ley incorpora una variedad de instrumentos, como por ejemplo el etiquetado (etiquetado energético de edificación) y estándares como el EU Ecolabel [124] y Green Public Procurement (GPP) [125] [126], entre otros.

Recientemente (noviembre 2021), el Gobierno de Chile lanzó a consulta pública la primera propuesta de Plan de Eficiencia Energética, la que abarca el periodo 2022-2026. Tal y como se plantea en la Ley, se establecieron metas de corto, mediano y largo plazo (Figura 2-16). Para organizar la propuesta, el Plan se

dividió en cuatro sectores: Sectores Productivos, Transporte, Edificaciones y Ciudadanía. Cada uno de los sectores considera la implementación de medidas de eficiencia energética apropiadas para su contexto.

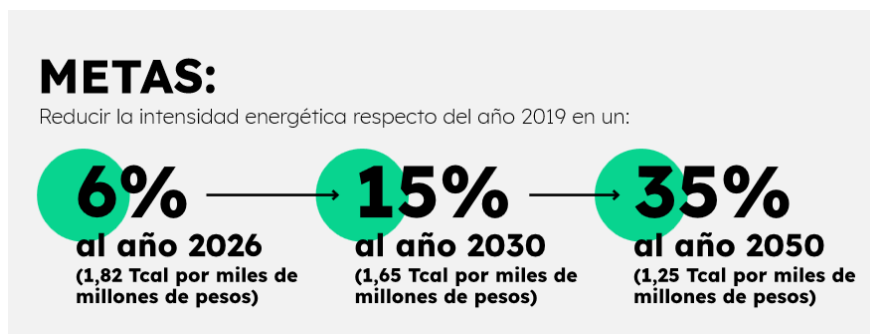


Figura 2-16 Metas globales de la propuesta de Plan de Eficiencia Energética 2022-2026 [133].

Como se mencionó, para cumplir con las metas globales impuestas se contemplan una serie de instrumentos y medidas sectoriales de eficiencia energética. Además, cada sector tiene por objetivo concretar metas de manera individual. En la Tabla 2-5 se resume la información extraída de la propuesta de Plan de Eficiencia Energética 2022-2026.

Tabla 2-5 Resumen de la propuesta de Plan de Eficiencia Energética 2022-2026.

Sectores	Metas	Medidas
Sectores Productivos	<p>1.- Reducir en un 4% la intensidad energética de los grandes consumidores al 2026, respecto al año 2021.</p> <p>2.- Reducir en un 25% la intensidad energética de los grandes consumidores al 2050, respecto al año 2021</p>	<p>Implementación sistemas de gestión de energía en grandes consumidores</p> <p>Facilitar la implementación de sistemas de gestión de energía en pequeñas y medianas empresas</p> <p>Actualización del estándar mínimo de eficiencia energética para motores eléctricos</p> <p>Promoción de la electrificación de usos térmicos y motrices en la industria y minería</p> <p>Fortalecimiento de la formación de especialistas en eficiencia energética para los sectores productivos</p> <p>Elaboración de indicadores de eficiencia energética para los distintos sectores productivos</p> <p>Difusión de los resultados y beneficios de la eficiencia energética aplicada a los sectores productivos</p>
Sector Transporte	<p>1.- Duplicar el rendimiento de los vehículos livianos nuevos que entran al país al año 2035, respecto del año 2019.</p> <p>2.- Cuadruplicar el rendimiento de los vehículos livianos nuevos que entran al país al 2050, respecto del año 2019.</p>	<p>Establecimiento de estándares de eficiencia energética para vehículos livianos, medianos y pesados</p> <p>Aceleración del despliegue de medios de transporte sustentables y eficientes</p> <p>Desarrollo de condiciones habilitantes para la infraestructura de carga de vehículos eléctricos</p> <p>Fomento a un uso eficiente del transporte</p> <p>Fortalecimiento de la formación de especialistas en eficiencia energética para el transporte eficiente</p> <p>Impulso a la industria nacional mediante el fomento a la investigación e innovación en el transporte eficiente y cero emisiones</p> <p>Difusión de los resultados y beneficios de la eficiencia energética aplicada al transporte</p>

Sector Edificaciones	<p>1.- Las nuevas viviendas lograrán un ahorro promedio de 30% en su demanda de energía térmica al año 2026, respecto del año 2021.</p> <p>2.- Las nuevas edificaciones lograrán un ahorro promedio de 50% en su demanda de energía térmica al año 2050, respecto del año 2021.</p>	<p>Actualización de los estándares de eficiencia energética de las edificaciones</p> <p>Impulso a la renovación energética del sector edificación</p> <p>Fomento al reacondicionamiento térmico de viviendas existentes</p> <p>Calificación energética de viviendas y otras edificaciones</p> <p>Implementación de eficiencia energética en edificios públicos</p> <p>Electrificación de los consumos de climatización en viviendas</p> <p>Habilitación de la energía distrital como alternativa de suministro energético</p> <p>Promoción de instrumentos económicos</p> <p>Fortalecimiento de la formación de especialistas en eficiencia energética para las edificaciones</p> <p>Difusión de los resultados y beneficios de la eficiencia energética aplicada al transporte</p>
Sector Ciudadanía	<p>1.- El 70% de las principales categorías de artefactos y equipos que se venden en el mercado corresponde a equipos energéticamente eficientes al año 2035.</p> <p>2.- El 100% de las principales categorías de artefactos y equipos que se venden en el mercado corresponden a equipos energéticamente eficientes al año 2050.</p>	<p>Difusión de información ciudadana sobre la relevancia del buen uso de la energía para la ciudadanía</p> <p>Fortalecimiento del programa educativo en energía y sostenibilidad</p> <p>Actualización y ampliación del etiquetado de artefactos</p> <p>Actualización y ampliación de estándares mínimos de eficiencia energética para artefactos</p> <p>Difusión del etiquetado de eficiencia energética de artefactos</p> <p>Fomentar el recambio de artefactos eficientes</p> <p>Analizar el impacto de las ciudades inteligentes en la eficiencia energética</p> <p>Coordinación institucional</p>

Otra iniciativa con implicancias o aspiraciones medioambientales relevantes para el sector energético es el **Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INGEI)**, que corresponde a una estructura estandarizada de reporte de emisiones sectoriales y sub sectoriales del país.

Capítulo 3: Propuesta de indicadores

A partir de las revisiones presentadas en el Capítulo 2:, se genera en el Capítulo 3: una propuesta de indicadores que integren el concepto de EC al contexto de los sistemas eléctricos, a través del uso del marco conceptual ew – MFA. Posteriormente, en el Capítulo 4:, se presenta una propuesta de la integración de este mismo grupo de indicadores en procesos de toma de decisiones del sector eléctrico. Luego, en el Capítulo 5:, se expone el uso de los indicadores propuestos a través de uno de los procesos de integración a los procesos de toma de decisiones del sector eléctrico en un caso de estudio chileno.

En el presente capítulo, se propone un set de indicadores de EC para el sector eléctrico. Para llevar a cabo esto se expone, en primer lugar, una revisión general de la metodología utilizada para el desarrollo y/o selección de indicadores. Posteriormente, se llevan a cabo las etapas del proceso metodológico descrito: Elección de marco conceptual, Aplicación de marco conceptual, Propuesta de set de indicadores, Test preliminar de indicadores.

La metodología empleada en este trabajo se extrae de recomendaciones internacionales para la elaboración y/o selección de indicadores [17]. Este proceso se aplica con un carácter sectorial (eléctrico), para el estudio particular del atributo escogido (EC). Esto quiere decir que el resultado del capítulo es una propuesta fija de indicadores para el sector eléctrico y su evaluación de economía circular, independiente de la región en donde se aplique. Ahora bien, el mismo procedimiento metodológico se puede aplicar al desarrollar indicadores para otro sector (transporte, por ejemplo), y con un enfoque en la misma u otra área (EC, sustentabilidad, tráfico, consumo de combustible, etc.).

Un primer elemento relevante para la metodología es adscribirse a una definición de economía circular. Pese a que no existe un consenso en lo que respecta a ésta, como se reconoce en la Sección 2.1.2, suscribir a una definición aporta una guía clara para el desarrollo del presente trabajo, evitando peligros de ambigüedades e incoherencias conceptuales. Sin perjuicio de las bondades de otras, se presenta a continuación la definición escogida, junto con los argumentos que respaldan dicha decisión.

“La economía circular es una economía construida a partir de sistemas de producción y consumo de la sociedad que maximiza el servicio producido a partir del flujo lineal de materiales y energía entre la naturaleza y la sociedad. Para ello se utilizan flujos de materiales cíclicos, fuentes de energía renovables y flujos de energía del tipo cascada. Una economía circular exitosa contribuye a las tres dimensiones del desarrollo sostenible. La economía circular limita el flujo de producción a un nivel que la naturaleza tolera y utiliza los ciclos de los ecosistemas en los ciclos económicos respetando sus tasas de reproducción naturales.” [40]

La elección se sustenta, principalmente, en las siguientes tres razones:

1. Establecer una acción comparativa, como lo es “maximizar”, permite discriminar y evaluar distintos escenarios y estrategias, lo que facilita una implementación más robusta del concepto. Como contraparte, otras definiciones se enfocan en la forma en la puede ser implementada, enunciando una extensa cantidad de estrategias (ver definición Ellen MacArthur, Sección 2.1.2).
2. Por medio del término “servicio producido” esta definición acoge de manera natural el sujeto de análisis de este trabajo, el servicio de energía eléctrica, conectando de manera práctica el concepto de EC con la ejecución del estudio.
3. Se hace mención explícita a las tres dimensiones del desarrollo sustentable. Más aún, se establece que debe haber una contribución en cada uno de sus ámbitos. Esto satisface una de las críticas mencionadas en la Sección 2.1.2.

Ahora bien, es necesario reconocer la importancia de Ellen MacArthur Foundation (EMF) en el desarrollo teórico y práctico de los conceptos de EC. En la misma línea, la definición que presenta esta organización (Sección 2.1.2) ha sido ampliamente acogida por distintos agentes de la academia e industria [134]. Es por lo anterior que resulta relevante identificar, de existir, elementos clave de la EC presentados por la definición de EMF, y que no estén explícitamente contenidos en la definición escogida para este trabajo. De dicha verificación se resaltan los conceptos de sistema “**restaurador**” y “**regenerador**”¹⁶, los que, sin consenso en su definición, forman parte del vocabulario transversal a la disciplina de EC [134]. Para este trabajo se entenderán restaurador y regenerador de la siguiente manera [135]:

Restaurador: “Restoring social and ecological systems to a **healthy state**”.

Regenerador: “Enabling social and ecological systems to **maintain a healthy state and to evolve**”.

Los sistemas social y ecológico se interpretan como el espacio socioambiental en el cual se inserta el sistema económico sujeto a las estrategias de economía circular. En el caso del presente trabajo, en donde las estrategias de EC se aplican al sector eléctrico enmarcado en un territorio dado, se entenderán como dicho espacio socioambiental las dimensiones sociales y ambientales del mismo territorio. En consecuencia, el afán de lograr o mejorar un “estado saludable” aplica para la dimensión social y ambiental del territorio bajo estudio. Se excluyen entonces los impactos de las estrategias de EC en las dimensiones social y

¹⁶ “Una economía circular es un sistema industrial que es regenerativo o restaurador por intención y diseño...”

ambiental fuera del territorio en cuestión, sin olvidar el riesgo de un “desplazamiento de la problemática” (Sección 2.1.2) que esto conlleva.

Ahora bien, una dificultad evidente para aplicar los conceptos expuestos recientemente (restaurar y regenerar) recae en la definición y medida de un “estado sano” de los sistemas social y ambiental del territorio. En particular, las dimensiones social y ambiental de un sistema se pueden caracterizar por una gran diversidad de subcategorías. Sin intenciones de profundizar en la materia, esta diversidad de subcategorías se ejemplifica en el marco conceptual de la economía de la donut (Figura 3-1). En este marco conceptual define un espacio teórico de sistema económico, donde se subsanan las necesidades sociales básicas sin sobrepasar los límites planetarios que permiten la vida tal y como se conoce. Esta es una representación ilustrativa de la diversidad de aspectos que se pueden considerar para definir o medir un “estado sano”, sin perjuicio de la existencia de marcos que indiquen otros o diferentes aspectos.

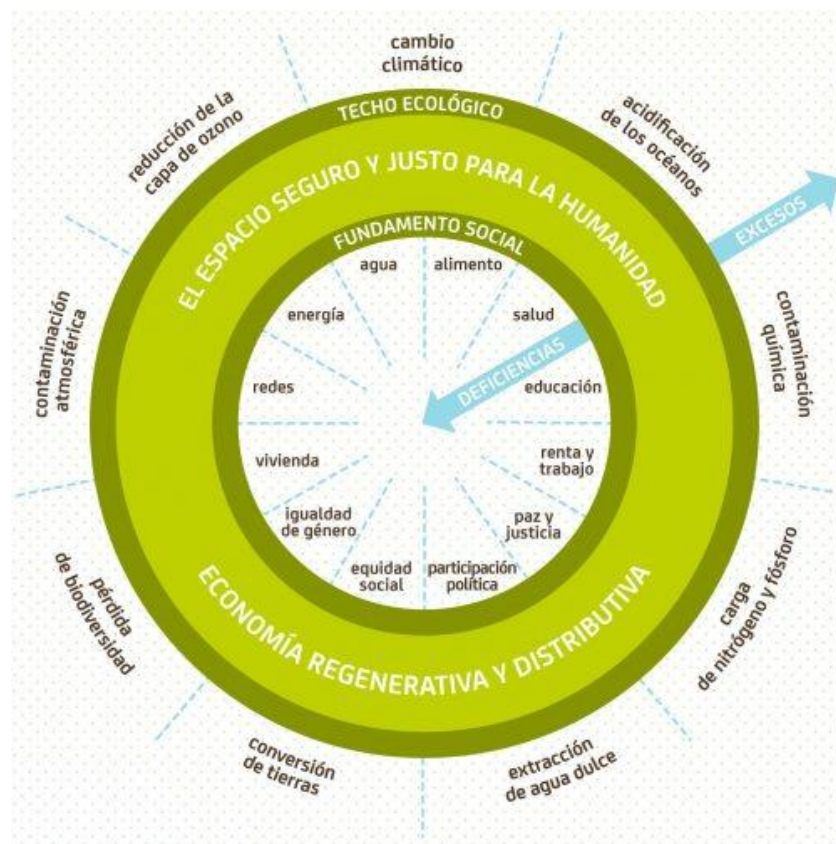


Figura 3-1 Representación “donut” de los límites sociales y planetarios [136]¹⁷.

Al estudiar una estrategia particular de EC del sector eléctrico sobre un territorio, por ejemplo, la instalación de una planta de reciclaje de paneles, o generar incentivos sobre alguna tecnología, se considera

¹⁷ Traducción por Ekalab en <https://www.ekalab.org/la-economia-del-donut-pensar-para-el-siglo-xxi/>.

posible identificar y/o trazar sus efectos sobre una diversidad amplia de aspectos sociales y ambientales. Sin embargo, dado que este trabajo se plantea de un nivel sistémico con interacciones complejas, los conceptos de restauración y regeneración se consideran poco aplicables de manera cabal. Considerando lo anterior, y que aspectos de la evaluación de desarrollo cubren parcialmente las dimensiones social y ambiental del territorio, es que se decide no incorporar dichos elementos en la formulación y/o selección de indicadores.

3.1. Descripción general de la metodología para la selección y/o elaboración de indicadores

En esta sección se presenta la visión general de un método para la selección y/o elaboración de indicadores utilizados para la realización del presente trabajo, en el contexto de integrar criterios de EC en el desarrollo del sector eléctrico. El procedimiento resultante, i.e. la agrupación de procesos y el orden en que se llevan a cabo, está basado en recomendaciones internacionales enfocadas en el desarrollo de indicadores [17], principalmente enfocadas en temas de sostenibilidad según fue expuesto en el Capítulo 2:.

En la Figura 3-2 se ilustra como diagrama de flujo el método a utilizar para la selección y/o elaboración de indicadores. En dicho esquema, un rectángulo (azul) indica algún proceso llevado a cabo en el contexto del presente trabajo, mientras que un set de ficheros (azul grisáceo) representa fuentes de información: bibliografía pertinente, entendimiento del sector o del problema, conocimiento de la disponibilidad de datos (no los datos en sí), entre otros. Por último, un rombo (azul claro) representa un proceso de discernimiento o decisión.

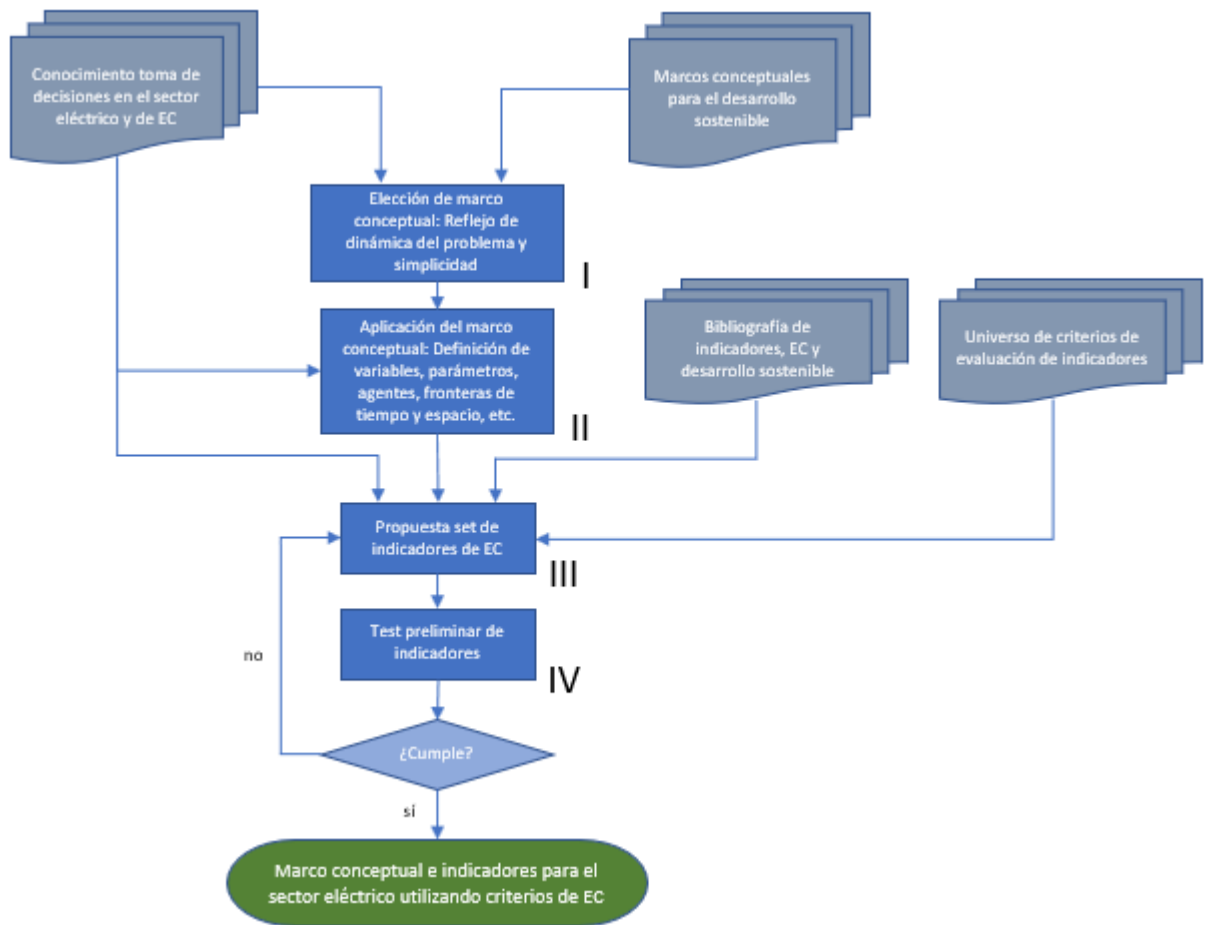


Figura 3-2 Método de selección y/o elaboración de indicadores; diagrama de flujo.

A continuación, se procede a describir de manera superficial cada uno de los procesos numerados que se indican en el diagrama de flujo, para posteriormente profundizar en el detalle de los mismos:

1. **Elección de marco conceptual (I):** Recapitulando, un marco conceptual es una forma de marco de medición, los cuales se utilizan para ordenar y articular la información del problema en cuestión, y dar relevancia a la propuesta de indicadores. Es necesario, entonces, escoger un prototipo de marco conceptual que sea capaz de reflejar las dinámicas de interés, puesto que será el modelo abstracto que represente la realidad. Para el presente trabajo se elige el modelo ew – MFA, marco conceptual maduro y estandarizado con un amplio prontuario en materia de evaluación material [92].
2. **Aplicación del marco conceptual (II):** Una vez se escoge ew – MFA ex como marco conceptual basal, es necesario aplicarlo en el contexto de análisis. Para esto se identifican las actividades económicas del sector eléctrico y los agentes que las llevan a cabo, junto con sus interacciones (al ser un sistema el objeto de estudio). Asimismo, se determinan las fronteras materiales del sistema, lo que requiere precisar términos como “residencia de un territorio”.

Finalmente, se entrega un diagrama de ew – MFA (ver Figura 2-6) que representa la dinámica de interés del sector para una región.

3. **Propuesta de set de indicadores (III):** A través de la descomposición de la definición de economía circular suscrita, y considerando el marco conceptual escogido, se elabora/selecciona una propuesta de indicadores. Además, se incluye un indicador complementario al campo de la economía circular, debido a las características particulares del problema regional. Este indicador busca transparentar la amenaza de externalizar la problemática del uso de recursos.
4. **Test preliminar de indicadores (IV):** Por último, en esta etapa se expone la racionalidad de utilizar el esquema RACER para evaluar los indicadores elaborados/seleccionados. Posterior a eso, se procede a estudiar el set de indicadores a la luz de los criterios contenidos en el acrónimo.

3.2. I: Elección de marco conceptual

El sector eléctrico chileno no cuenta actualmente con una política pública específica para tópicos de economía circular, i.e. no se ha interpretado la visión de EC para el sector como un todo, pese a que algunos elementos de la Ley REP (20.920)¹⁸ repercuten en elementos de manera aislada. Dado lo anterior, aún no se identifican lineamientos o estrategias que monitorear y perseguir en términos sectoriales. Así, frente a la opción binaria de enfoques de un marco de medición presentado en la Sección 2.2.3, basado en políticas públicas o en el concepto, se escoge este último para entregar un relato de EC para el sector eléctrico sumado al conjunto de indicadores.

En primer lugar, se debe manifestar que no existe un proceso estandarizado para generar o escoger un marco conceptual dado un entorno en el que se emplee. Dicho esto, se consideran los criterios de simplicidad y representatividad de la dinámica del problema a trabajar para discernir cual es la mejor opción dentro del grupo estudiado. En ese sentido, se examinan los tres esquemas mencionados en el Capítulo 2:, Marco Capital, DPSIR y de Contabilidad, a la luz de las características propias del contexto de aplicación, las cuales se presentan a continuación:

Dinámica de los sistemas eléctricos: Las redes eléctricas son sistemas complejos que requieren, no solamente de la participación de una cantidad importan de agentes, sino de, al menos, la acción coordinada entre cada uno de ellos en base a las condiciones del entorno. De esta forma, un agente X e Y se comportan según $\mathcal{F}_X(t)$ y $\mathcal{F}_Y(t)$ debido a que hay otros agentes A , B y C que se comportan como $\mathcal{F}_A(t)$, $\mathcal{F}_B(t)$ y $\mathcal{F}_C(t)$ respectivamente, además de la realización de un ambiente (clima, demanda, etc.), $\mathcal{E}(t)$. Más aún, existe una

¹⁸ Aparatos eléctricos y electrónicos forman parte de la lista de Productos Prioritarios de esta Ley REP. Por lo tanto, sus productores están sujetos a las obligaciones que impone esta Ley.

codependencia y corresponsabilidad entre los actores para llevar a cabo una función, por lo que el análisis de los elementos por separados no entrega la misma información que la interacción de estos. Dicho de otra manera, **el aporte de cada componente al sistema sólo se entiende por el entorno en el que se somete**. Se destaca este aspecto de los sistemas eléctricos, y no otros, para resaltar la característica de complementariedad de las infraestructuras y su funcionamiento; relevante para una perspectiva sistémica del uso de recursos, enfoque del presente trabajo.

El fenómeno descrito se ilustra de manera simple en la Figura 3-3. En el gráfico se sobrepone un perfil de generación de un sistema solar sobre un perfil de consumo residencial. La tecnología solar, $\mathcal{F}_S(t)$, se caracteriza, entre otras cosas, por su recurso primario: energía solar. Asimismo, el perfil residencial responde a la naturaleza del consumo que representa. Ahora, si se quisiesen estudiar los usos, efectos y beneficios de un elemento B , se deben considerar características del nuevo elemento pero también del sistema del cuál formaría parte. Evidentemente, un sistema de almacenamiento en base a baterías (BESS) se utilizaría de diferentes maneras, dependiendo de las siguientes preguntas: ¿Cuál es su finalidad dentro del sistema? ¿Qué características particulares tiene, o podría tener, el nuevo elemento BESS? ¿Qué otras características relevantes describen al sistema de cuál formaría parte? ¿Es un sistema aislado, o trabaja conectado a una red?

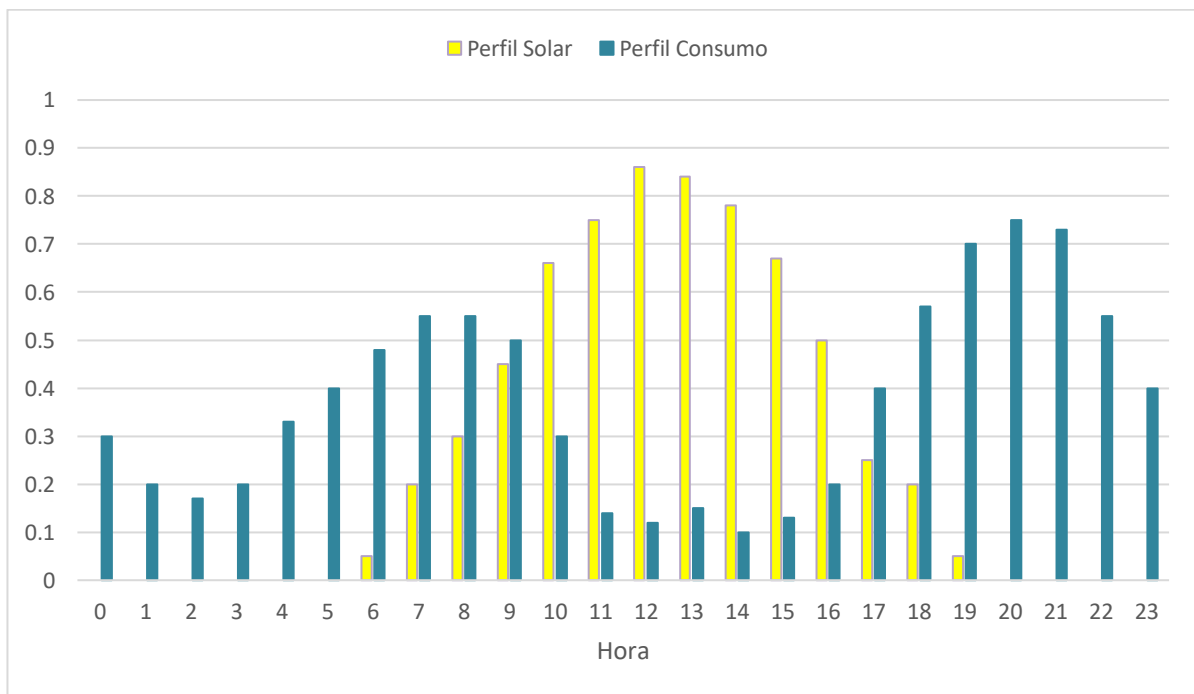


Figura 3-3 Ejemplo de interacción: dinámicas de generación solar y consumo [kW].

Aspectos de la EC: De la Sección 2.1 se extrae que la economía circular busca minimizar los recursos utilizados en actividades económicas para entregar un producto dado. Tanto en la revisión de antecedentes

como en la definición escogida, la energía se integra como recurso tal y como los materiales. Sin embargo, para el sector eléctrico ésta es una perspectiva incompleta. Si bien desde el lado del consumidor la energía se entiende como una entrada a sus procesos, desde el lado de la generación ésta tiene el carácter de producto. Así, por un lado (consumidor) se intenta maximizar el servicio provisto por la energía a sus procesos, y por otro lado (generador) se intenta maximizar el servicio de otros recursos (materiales, incluidos combustibles fósiles) para la producción de energía eléctrica.

Esta dualidad se resuelve en el presente trabajo ubicando la **energía eléctrica** como producto de la generación del sistema eléctrico y considerando las acciones de eficiencia energética de las cargas como mejoras respecto a un benchmark de consumo (ver Figura 3-4). Con esto, el problema de EC para el sector eléctrico se reduce a un ejercicio de optimización de materiales para un cumplimiento de servicio, donde tanto generadores como consumidores inciden en su uso eficiente. Este argumento resuelve la interrogante planteada al comienzo de la Sección 2.3.3, a propósito de utilizar un marco conceptual sensible al movimiento material, pero no energético.

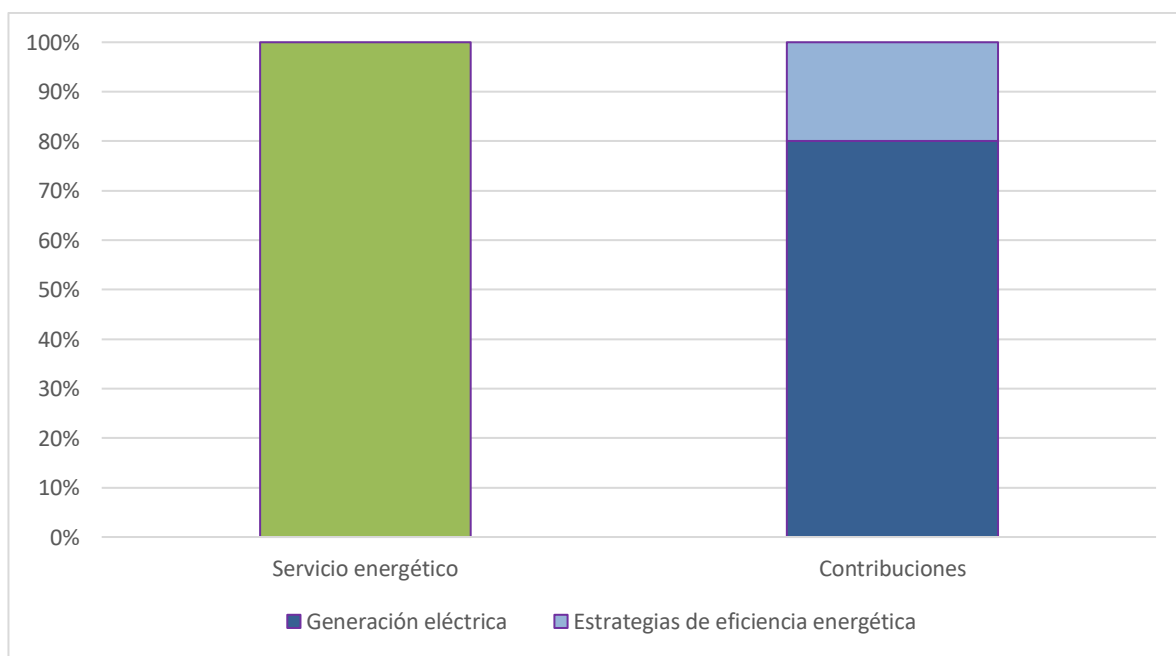


Figura 3-4 Conceptualización del servicio energético como suma de dos contribuciones.

Complementando lo expuesto, resulta evidente que la optimización de materiales no puede estar alienada de la dimensión del tiempo. Podría llegar a ser irrelevante la discusión sobre la cantidad de recursos si se comparase una infraestructura con vida útil de 1 año con otra de 40 años. Así, la temporalidad es una cualidad importante del problema de flujo de materia, cualquiera sea la forma en que se presente éste.

Habiendo señalado las características generales del problema, se procede a discutir la pertinencia o conveniencia del uso de distintos marcos conceptuales.

Es claro que la extracción de materia y la disposición de residuos conllevan cambios en los estados del medio ambiente, e.g. aumento temperatura media del planeta (cambio físico) o daño en hábitats de diversas especies (cambio biológico) y, subsecuentemente, éstos suponen impactos en el bienestar social. Aunque cualquier iniciativa relacionada con el concepto de economía circular está ligada irremediabilmente a distintos niveles de análisis, es prudente definir o determinar el foco del trabajo. Como ejemplo de la profundidad o alcance con que se puede estudiar un tópico, se ilustra en la Figura 3-5 un esquema DPSIR (Sección 2.2.3) aplicado a la problemática del cambio climático.



Figura 3-5 Esquema DPSIR para el tópico de cambio climático

Sin desmedro de que algunos autores o implementadores de EC extiendan la discusión al análisis de cambios de estado e impactos, este trabajo se enfoca en las presiones económicas-sociales representadas por flujos materiales a raíz de una necesidad (driver). Lo anterior en concordancia con la definición escogida de EC y atendiendo a los **alcances especificados**, sin perjuicio de que se utilice como insumo para extensiones y trabajos futuros. Es por eso, entonces, que se descarta la utilización de un marco conceptual del tipo DPSIR.

Como se menciona en la Sección 2.2.3, otra forma de representar el entorno es a través de la derivación de una unidad de beneficio (UB) común, independiente de la naturaleza de la utilidad (financiera, natural, social, etc.). Una posible unidad de beneficio para comparar capitales de distinta naturaleza es la utilización de un valor monetario. Pese a las buenas propiedades que pueda tener este método, transparentando el valor económico de los activos por ejemplo, encuentra dificultades (al menos) en reflejar el valor del capital natural para desarrollo y sustento de la vida [137]. Más aún, es posible que la monetización del capital

natural incluya más elementos que lo material, como por ejemplo los efectos de la extracción en diferentes hábitats, lo que nuevamente tendría un alcance más profundo que “presiones” en términos del marco DPSIR. Por simplicidad se resuelve no agrupar bajo una UB común capitales de diferente naturaleza para el presente trabajo, por lo que se descarta la utilización de un marco conceptual del tipo capital.

Teniendo en cuenta la definición escogida de EC y sus características, así como también la dinámica sistémica del sector eléctrico presentada, se opta por un marco conceptual del tipo contabilidad para seleccionar y/o elaborar los indicadores de EC para el sector eléctrico, foco del presente trabajo. A continuación, se exponen algunas características relevantes de estos tipos de marcos de medida.

Una de las cualidades de los marcos de contabilidad, los cuales tienen su origen en los SNA y se expanden posteriormente a SEEA, es que deben ser capaces de proveer una frontera económica para identificar los flujos de variables de interés. Este elemento es clave para registrar los materiales requeridos, en uso y desechados, tanto para identificar las actividades que se consideran en el estudio, así como para delimitar el territorio donde se acota el mismo. Respecto al territorio y sus dimensiones, la frontera de contabilidad es flexible en su expansión; esto permite su implementación en escala de agente individual, conjuntos regionales, nacionales y globales.

Otra particularidad de los marcos de contabilidad, de la mano con la flexibilidad en cuanto a la extensión del análisis, es la naturalidad para capturar dinámicas sistémicas. En esta línea, un sistema se evalúa de acuerdo a su desempeño en conjunto, al margen del desempeño de cada uno de sus componentes. Esto refleja en gran medida el carácter complejo de los sistemas eléctricos en el cual se enfoca este trabajo, sin desmedro de la importancia de estudios sobre agentes y tecnologías en particular.

En cuanto a la variedad de marcos de contabilidad, el SEEA se reconoce como el primer estándar que considera variables ambientales y no sólo económicas (como su predecesor SNA). Existen además un número de marcos de contabilidad que se pueden catalogar como submódulos del SEEA. Como se expone en la Sección 2.3.2, estos submódulos se diferencian entre sí según el tipo de fenómeno que contabilicen (flujos, activos ambientales o actividades económicas), según el sector en donde se apliquen (agua, por ejemplo), o en base a ambos (activos ambientales relacionadas con el tratamiento del agua, por ejemplo).

El ew – MFA es un estándar que se puede considerar como un submódulo del SEEA, el cuál contabiliza fenómenos de flujos naturales, particularmente materiales. El análisis exclusivo de la materia para un problema del sector eléctrico cobra sentido bajo el entendimiento conceptual entregado para la energía eléctrica, la cual se toma en cuenta por su dimensión de servicio entregado por la red hasta la entrada del consumidor, y no por sus usos dentro de un proceso particular. Es relevante remarcar que, si bien la energía

eléctrica se considera servicio, la energía contenida en la materia, i.e. carriers como combustibles fósiles o biomasa, se contabiliza en términos de su masa.

Por último, dado que la economía circular busca impulsar el uso cíclico de la materia, para el presente trabajo se implementa una versión modificada del ew – MFA (ew – Mex(c)), la cual reconoce flujos internos de los materiales con una aplicación limitada al sector eléctrico. Estos flujos internos representan estrategias como reciclaje y reutilización de infraestructura para su manejo **dentro de la misma industria**. Mantener los productos en circulación dentro de una industria incrementa la facilidad de aplicación del marco de contabilidad, pero también promueve la extensión del servicio original de cada elemento en línea con la definición escogida, aminorando fenómenos de downcycling¹⁹.

3.3. II: Aplicación del marco conceptual

Corresponde ahora aplicar el marco conceptual, ew-MFA, al problema en estudio. Éste persigue reflejar los flujos materiales referentes al sector eléctrico desde un punto de vista sistémico, para apoyar el proceso de selección y/o elaboración de indicadores que permitan integrar los principios de EC en el mismo. Se presentan, entonces, las nociones propias de este marco conceptual junto con su vinculación al sector eléctrico. Para llevar a cabo esto, se discuten los conceptos presentados en las Secciones 2.3.3 y 2.3.4 en base a la representación gráfica provista por la Figura 3-6.

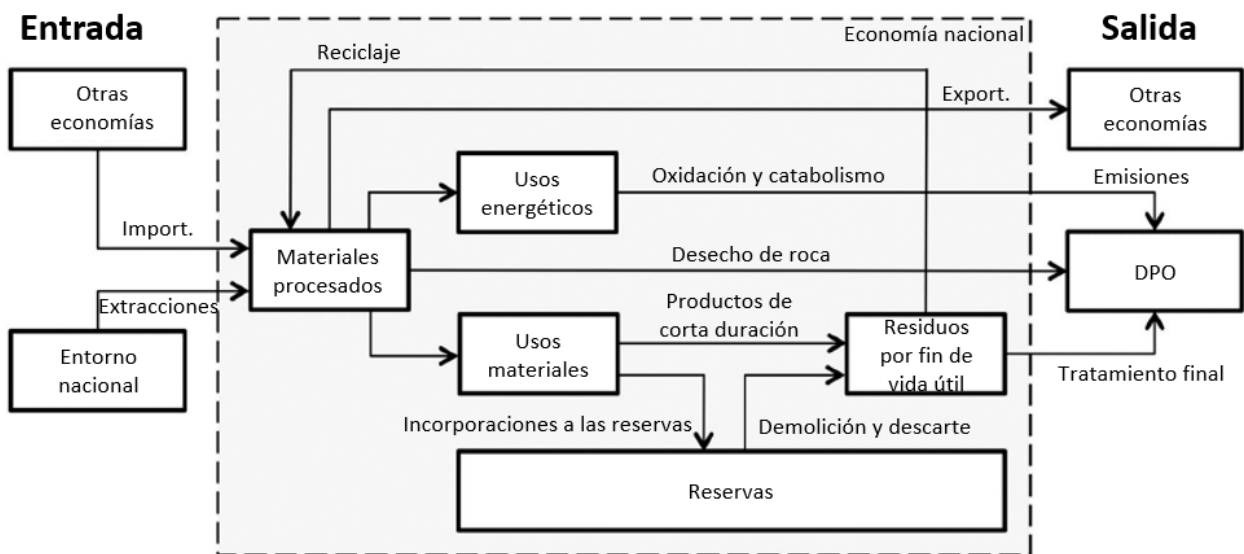


Figura 3-6 Diagrama ew – MFA considerando flujos internos [28]

¹⁹ Recircular un producto, generalmente reciclando sus materiales, para obtener uno de calidad inferior.

A lo largo del texto se ha resaltado el valor de los límites o barreras del sistema que se busca analizar. De la Figura 3-6, este límite está representado como economía nacional. Así, una primera tarea a desarrollar es traducir el significado de economía nacional al problema del **sector eléctrico restringido en una región**. Posterior a esto, se discute la interpretación de los vectores de entradas y salidas, así, como las componentes internas a la frontera (“economía nacional”). Se enfatiza el hecho de que, para este trabajo, se reduce la “economía nacional” en escala de administración terrenal (región, comuna, entre otras), pero también se reduce la “economía” a un sector particular bajo análisis (sector eléctrico). La adaptación responde a estos criterios.

Tal y como se mencionó en la Sección 2.3.3, la economía nacional se entiende como “el conjunto de actividades económicas llevadas a cabo por unidades residentes de un país” [91]. Así, en primer lugar, resulta necesario entender cuáles son las actividades económicas del sector eléctrico, circunscritas en una región. Posterior a esto, se examina el concepto de residencia para las instituciones correspondientes al sector eléctrico. Luego, se examinan las fronteras físicas y temporales del estudio.

Actividades económicas: Serán consideradas actividades económicas las acciones propias de los segmentos de la industria eléctrica descritos en la Sección 2.4.1. Dentro de las actividades, el marco conceptual refleja el subconjunto de éstas que tienen algún impacto en los flujos materiales, o estado material de la red; esto es, inciden en la infraestructura u operación de ésta (uso material en la operación).

Residencia: Como se enuncia en la Sección 2.3.3, la definición de residencia guarda estricta relación con el concepto “centro de interés económico”, el cual se define en el siguiente párrafo.

“Se dice que una unidad institucional tiene un centro de interés económico dentro de un país cuando existe algún lugar dentro del territorio económico del país en, o desde, el cual se dedica, y tiene la intención de seguir dedicándose, a actividades y transacciones económicas a una escala significativa, ya sea indefinidamente o durante un período de tiempo finito pero largo.” [138]

Generalizando esta definición se convendrá que, para una región (no necesariamente un país), aquellas instituciones que desempeñan alguna actividad económica de las descritas en la Sección 2.4.1 son residentes económicos de la misma. Se reitera que, la calificación de institución residente de una región resulta independiente de la ubicación organizacional (casa matriz) del agente. Este conjunto de instituciones residentes son las que, a priori, son objeto consideración de estudio para la aplicación del marco conceptual ew-MFA.

Frontera espacial: La frontera espacial se entiende como los puntos de cruce de los materiales desde fuera de la economía (actividades económicas del sector en este caso) hacia dentro de ésta, y viceversa.

En esta línea, cierto material forma parte de la economía cuando se emplean por un residente en una actividad económica. Esta última mención resulta relevante, puesto que según lo establecido un material resulta “expulsado” de la economía regional-sectorial en el momento en que deja de ser utilizado por los agentes residentes en actividades económicas.

Frontera temporal: Este esquema busca reflejar dinámicas materiales de un sector de la economía delimitado por un espacio territorial. Esta información podría considerarse incompleta si no se analiza la evolución en el tiempo del sistema, puesto que distintos requerimientos materiales permanecen distinta cantidad de tiempo dentro de las fronteras espaciales. Este alcance resulta particularmente relevante para el sector eléctrico, en donde las tecnologías pueden diferir ampliamente en términos de su vida útil, lo que guarda relación con fenómenos de codependencia descritos en la Sección 3.2.

Con lo anterior en mente, la elección del periodo de estudio influye de manera importante en el análisis material del sistema. Si bien la elección de este periodo se deja a juicio del aplicante del marco conceptual, se propone como regla general contemplar **al menos** la vida útil del elemento más duradero del sistema (l). Con esto se busca capturar la componente de longevidad de cada elemento, cobrando importancia dentro del análisis material. Ahora bien, para capturar dinámicas de constitución de la matriz del sistema (integración de renovables, por ejemplo), se propone como regla general contemplar al menos un periodo de $l \cdot n$, con l la vida útil del elemento más duradero o longevo del sistema, y $n > 1$.

Flujos: En la Sección 2.3.3 se establecen tres naturalezas para los flujos de entrada y salida; aquellas que provienen de economías internacionales, aquellas que provienen de la extracción natural y aquellas necesarias para complementar el balance másico. Tal y como se ha presentado el problema, la economía en cuestión consiste en la infraestructura y operación del sector eléctrico, y el servicio de suministro energético (eléctrico).

En base a lo anterior, se convendrá que la manufactura de infraestructura, así como la distribución de ésta, cae dentro de la categoría “otras economías” y no “extracción doméstica”, pese a la posibilidad de que se lleven a cabo en el mismo territorio. Esto debido que, a priori, no se considera en el marco conceptual la infraestructura requerida para el desarrollo y manufactura de la tecnología. Por otro lado, en cuanto a las salidas, la disposición de los elementos materiales correspondiente al fin de su vida útil se considerará dentro de “producción nacional procesada”. Se asume, entonces, que los flujos de materiales hacia “otras economías” son despreciables.

Como se enfatizó anteriormente, los flujos de ciclaje interno responden a la utilización de productos y materias primas dentro de la misma industria. Es por esto que, pese a que los procesos de tratamiento

y acondicionamiento no formen parte de las actividades económicas de estudio, no se contemplan flujos de salida y/o entrada al sistema para incluir la dinámica circular.

A continuación, en la Figura 3-7, se presenta el esquema del marco ew – MFA adaptado al problema del sector eléctrico y economía circular. Tal y como se precisó en los aspectos de la EC, los flujos de energía eléctrica responden al servicio y funcionalidad del sistema, es por esto que se presentan como ortogonales al flujo de materiales. En dirección vertical se ilustra el flujo energético (eléctrico) desde su generación hasta su consumo, pasando por el sistema de redes. En dirección horizontal se ilustra el flujo material, en donde la infraestructura pasa por un periodo de uso (activos en uso), y se incluye un flujo directo de emisiones hacia “producción nacional procesada” por motivos de combustión.

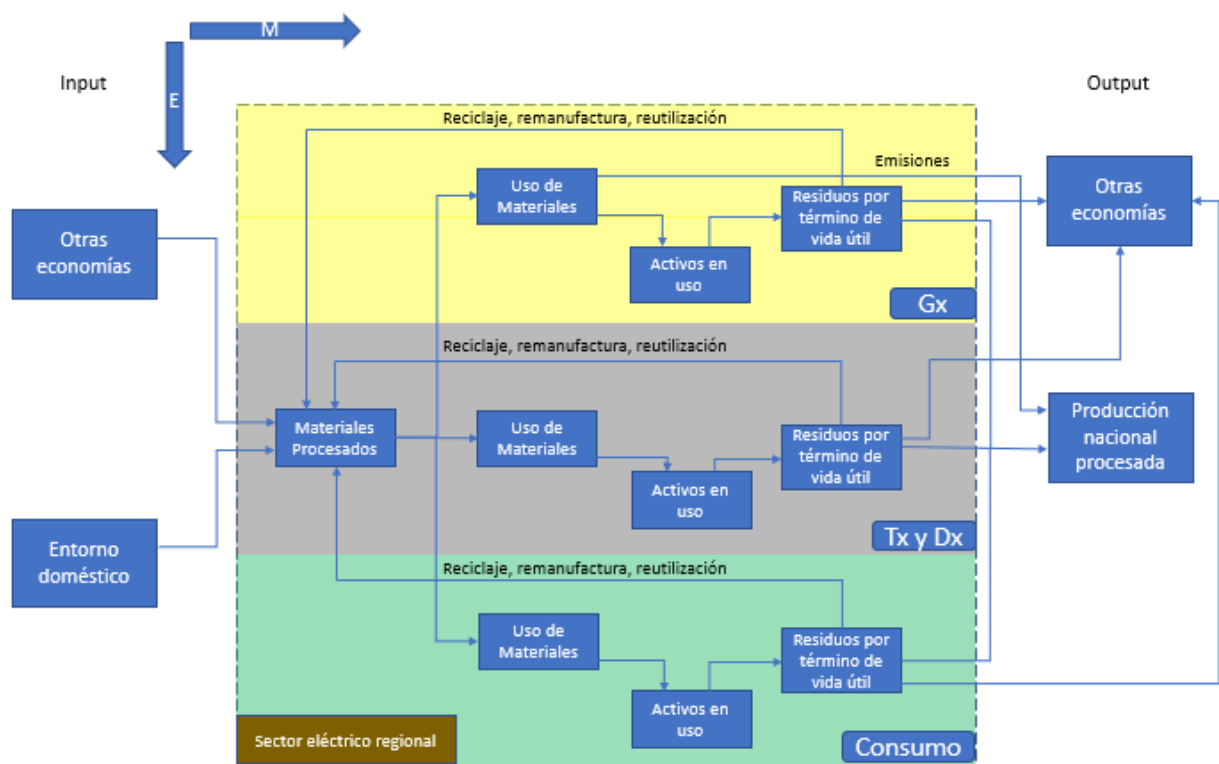


Figura 3-7 Esquema de ew – MFA para aplicación de EC al sector eléctrico.

3.4. III: Propuesta set de indicadores

Como se hace mención en un comienzo, este trabajo busca integrar el concepto de economía circular al proceso de toma de decisiones del sector eléctrico a través del uso de indicadores. Así, **el conjunto de indicadores tiene como principal propósito recoger el concepto de EC a través del marco conceptual desarrollado, y presentarlo en términos de variables esenciales del sector eléctrico**, independiente de su modelo organizacional. La “independencia del modelo organizacional” quiere decir que el cálculo de los indicadores requiere la misma información para cualquier modelo organizacional (de los presentados en la

Sección 2.4.1). Esto es consecuencia directa de la naturaleza física de los atributos que componen los indicadores (masa, energía). De cualquier forma, es necesario considerar el desafío de la disponibilidad y traspaso de información fiable para algunos modelos Sección 2.4.1.

La metodología adoptada en el presente trabajo para definir indicadores se basa en seccionar la definición suscrita (definición que fue expuesta al principio del capítulo). De ser necesario, se analizan los fragmentos de la definición en conjunto (relacionan) para clarificar ideas o acotar el alcance de algunos conceptos que, aislados del resto de la definición, escapan de la idea de EC. Con lo anterior, se proponen métricas (indicadores) para cada fragmento. Por último, y de acuerdo con las características del problema, se proponen indicadores complementarios a la definición. A continuación, en la Figura XXX, se describe gráficamente el procedimiento.

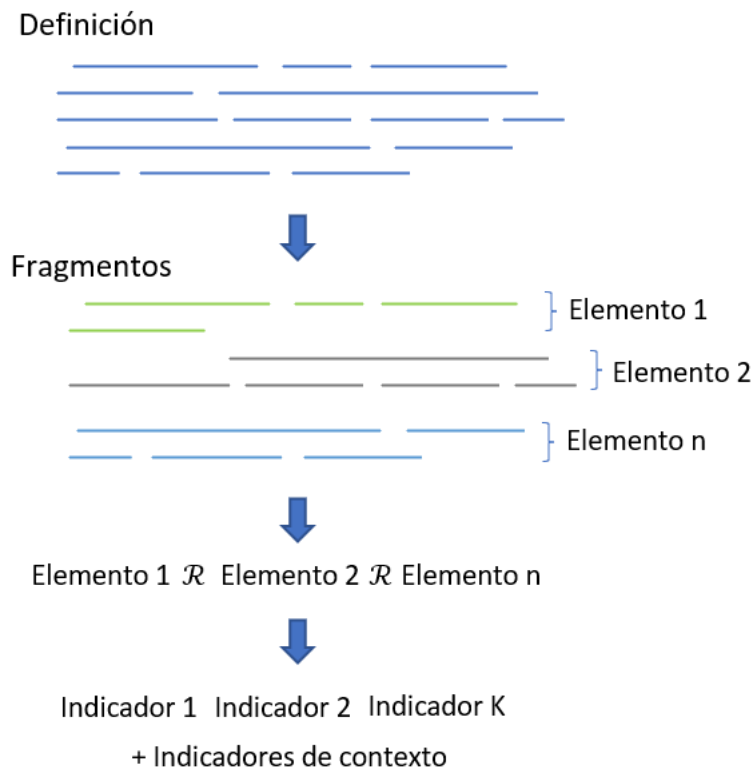


Figura 3-8 Metodología de selección y/o elaboración de indicadores

Para facilitar la comprensión de los indicadores, se introduce un ejemplo de red simplificada (uninodal) que corresponde a la región de interés, y que está conectada a un sistema que complementa el uso energético de la región de interés (entrega o consume energía según corresponda). Esta red se analiza a lo largo del capítulo, aplicando cada indicador de manera ilustrativa. Esto favorece no sólo al entendimiento de los indicadores y su cálculo por si solos, sino que también el entendimiento de la relación entre estos. A continuación, se expone el ejemplo en cuestión.

3.4.1. Ejemplo de sistema uninodal conectado a “Resto del Sistema”

El ejemplo se construye como una serie de tiempo (que puede ser pasada, i.e. retrospectiva, o proyectada, i.e. prospectiva) que describe la infraestructura de un sistema uninodal (Figura 3-9). Este sistema uninodal está conectado a un sistema mayor que se denomina “Resto” (sumidero o fuente de la diferencia energética según se requiera). El propósito del ejemplo es analizar el impacto de cada modificación de las **instalaciones** del sistema uninodal (región de interés²⁰) a la luz de los indicadores de EC propuestos, durante el periodo de estudio. En el ejemplo se omite el análisis de la **operación** y sus recursos (combustibles fósiles, principalmente) para simplificar el ejercicio, por cuanto su trato es análogo al desarrollo de la componente de infraestructura²¹.

A continuación, se presenta una primera información relevante del problema: el diagrama del sistema (Figura 3-9), el historial de cambio en la infraestructura y el consumo energético del sistema.

la producción y el consumo energético anual de la región (considerando efectos de implementar estrategias de eficiencia), y la composición material de los elementos (a un nivel simplificado).

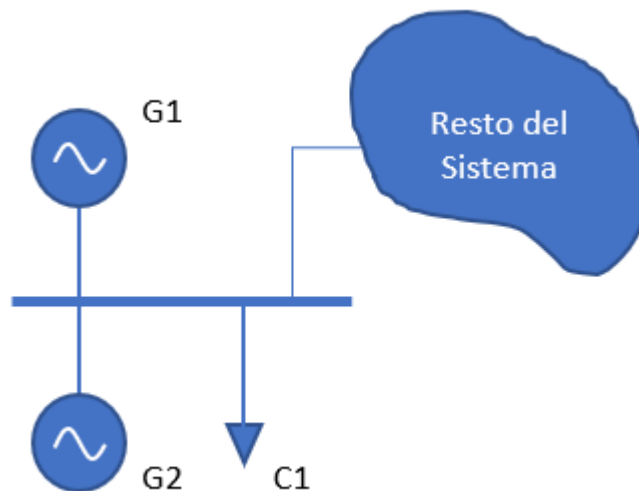


Figura 3-9 Diagrama del subsistema de ejemplo, conectado al “Resto del Sistema”

²⁰ Se escoge un sistema uninodal como región de estudio, por lo tanto, no se considera infraestructura de transmisión en el cálculo de indicadores. Asimismo, la conexión al Resto del Sistema (transmisión), se asume fuera de la región de estudio.

²¹ Se ahonda en este punto en un apartado posterior: Comentarios respecto al factor de normalización.

En la Tabla 3-1 Entradas y salidas de infraestructura energética [MW/año], se presenta el historial de cambios en la infraestructura energética en potencia instalada. La generación de energía eléctrica del sistema uninodal corresponde a la capacidad instalada con un factor de planta de 25% para la tecnología PV (G1), y de un 85% para la tecnología térmica (G2).

Tabla 3-1 Entradas y salidas de infraestructura energética [MW/año]²²

año	1	5	6	10	11	15	16	20	21	25
PV (G1)	22,8310	22,8310	0	22,8310	0	0	0	22,8310	0	45,6621
Térmico (G2)	53,7201	0	-26,8600	0	-26,8600	0	0	0	0	0
año	26	30	31	35	36	40	41	45	46	50
PV (G1)	0	45,6621	-22,8310	68,4931	-22,8310	114,1552	-22,8310	114,1552	0	0
Térmico (G2)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Se presenta el caso en el que el consumo regional es de 260 GWh/año, como se muestra en la Tabla 3-2. En adelante, el consumo anual aumenta a una tasa de 4% hasta el año 19 (incluido), para luego aumentar a una tasa de 3%. Este corresponde al consumo “benchmark”, el que no considera la implementación de estrategias de eficiencia energética.

Tabla 3-2 Consumo inicial y tasa de crecimiento

Consumo energético inicial [GWh/año]	260
Tasa de crecimiento consumo hasta año 19	4%
Tasa de crecimiento consumo desde año 20	3%

A continuación, se presenta cada uno de los indicadores seleccionados y/o elaborados, junto con su aplicación de forma ejemplar en el caso de estudio expuesto.

3.4.2. Indicador de Desacople Material Relativo (DMR)

De la definición se destaca como una primera pieza relevante el concepto de “eficiencia productiva” (“*maximiza el servicio producido a partir del flujo lineal de materiales y energía entre la naturaleza y la sociedad*”). Esta noción se encuentra de manera directa en el conjunto de elementos de EC presentado en la Tabla 2-1. De aquí se extrae el primer indicador de EC para el sector eléctrico como medida de recursos

²² Esta tabla no representa el stock acumulado. Se asume que en un año cero no existen instalaciones, así como no existe consumo eléctrico. De esta forma, para calcular la capacidad instalada total es necesario sumar cada entrada y salida durante el periodo de interés.

utilizados por servicio producido. Este indicador responde al afán de una desacople material relativo (*DMR*) del sector eléctrico; esto es, la desacople material del sector eléctrico relativo al servicio que entrega: suministro energético. Para este trabajo se expresa en términos matemáticos como:

$$DMR(T) = \frac{\sum_t^T \sum_i \bar{M}_{i,t}}{\sum_t^T E_t} \left[\frac{ton}{MWh} \right]$$

La variable *M* corresponde al **impacto ambiental asociado al consumo de recursos materiales no-renovables**²³ medido en masa (toneladas), necesarios para el funcionamiento del sistema, considerando por separado **capital (o infraestructura) y operación**: $DMR_{cap}(M_{cap}, E)$ y $DMR_{op}(M_{op}, E)$. La barra superior ubicada sobre la variable material (\bar{M}) indica que la masa de cada material está normalizada por un factor que habilita la comparación entre distintos recursos, siempre que sea posible. Por otro lado, la variable *E* corresponde a la **energía en servicio** (medido en MWh), cuyo suministro se entiende como la función o el propósito del sistema eléctrico. Para la energía en servicio, se considera tanto la generación eléctrica como los esfuerzos propios de la eficiencia energética por parte de los consumidores (suma de ambas contribuciones). Al considerar estrategias de eficiencia energética como servicio se busca incentivar esta misma práctica, que resulta ser menos intensiva en términos de infraestructura (evita o pospone ejercicios de expansión) y operación del sistema.

Analizar los recursos exclusivamente desde una perspectiva material en lugar de contabilizar su valor en unidades energéticas, como podría resultar intuitivo para los combustibles fósiles, se respalda tanto con la conceptualización de la economía circular desarrollada en la Sección 3.2 (energía como servicio y no como insumo), así como con el marco conceptual escogido (ew-MFA). Esto último considerando que, por definición, dicho marco sólo refleja movimientos materiales. Siguiendo, y según los lineamientos oficiales actualizados (2021) para la aplicación del ew-MFA [139], los materiales entrantes a la economía por extracción doméstica, y hasta cierto punto los de importación, se organizan en cuatro categorías: Biomasa²⁴, Minerales Metálicos, Minerales No-Metálicos y Combustibles Fósiles [140].

²³ El motivo por el cual se consideran exclusivamente recursos no-renovables se explica en detalle al presentar el segundo indicador. En pocas palabras, el impacto del agotamiento de recursos no-renovables, por su naturaleza finita, no tiene comparación con el impacto del agotamiento o uso de recursos renovables. Más aún, existen dificultades teóricas y prácticas para expresar la tasa de reproducción de los recursos renovables que escapan del alcance de este trabajo.

²⁴ Como se mencionó anteriormente, los recursos renovables no se consideran en este trabajo y, por lo tanto, no se contabiliza el uso de biomasa para los indicadores. Sin embargo, se nombra la categoría Biomasa por completitud al mencionar los lineamientos para la aplicación del ew-MFA.

Continuando con la descripción del indicador, los subíndices i y t corresponden a las tecnologías pertenecientes al sistema de estudio y el tiempo de análisis respectivamente. Es relevante recalcar que las tecnologías consideradas/contabilizadas son todas aquellas necesarias para el funcionamiento del sistema, lo que incluye redes de transmisión, distribución y servicios complementarios, por decir algunas además de generación. Por otro lado, el horizonte de tiempo dependerá del objetivo del trabajo que se lleve a cabo. Algunas características temporales a considerar son la vida útil de cada tecnología, como información requerida, y la amortización de los recursos materiales ingeridos a medida que aumenta la energía en servicio, como información obtenida del indicador. La ratio resultante pretende reunir la información histórica del sistema a lo largo del periodo de estudio.

Un atributo relevante del indicador presentado es la capacidad de endogenizar nociones relevantes para otras definiciones como son las estrategias de EC; i.e. reducir, reciclar, etc. (circular). Por ejemplo, remanufacturar unidades PV se traduce en que la misma cantidad material produciría (transformaría) más energía durante su ciclo de vida. La expresión también tiene un correlato con aumentar la longevidad de las componentes, lo que se traduce en un menor requerimiento de nuevos materiales.

Se recalca el carácter sistémico de la medida en cuestión, particularmente al contabilizar la energía en servicio. La dinámica de un sistema eléctrico depende de cada elemento, sus características de generación y consumo, pero también de la interacción entre estos elementos al velar por la operación confiable del sistema. Además, las características territoriales, ambientales (climáticas) y sociales también influyen en las instalaciones y su operación. Dado que el indicador propuesto se comporta como caja negra, en donde se contabilizan sólo los recursos requeridos y el servicio producido por el sistema, éste toma en cuenta todas y cada una de las influencias y relaciones de manera implícita, simplificando el análisis.

Las dificultades de considerar los esfuerzos de eficiencia energética (EE) para el cálculo de la “energía en servicio”, y por lo tanto del indicador, es clara ¿Cómo contabilizar energía que no ha sido consumida? ¿Cómo estudiar la energía que no se consumió o consumirá por estas medidas, y no por otro motivo? Para -escatar este punto, se desagrega la aplicación del indicador en dos enfoques: ex-ante, y ex-post a la aplicación de estrategias de EC²⁵ (considerando medidas de EE como parte de éstas). Mientras el primer enfoque apoya la toma de decisiones respecto a impactos futuros, el segundo apoya la toma de decisiones respecto a circunstancias actuales y pasadas.

Al acudir a la experiencia internacional en temas de evaluación de eficiencia energética se observan distintas herramientas [141]. Respecto a la evaluación ex-ante, las prácticas comunes son el modelamiento, simulación, estudios de escenarios, entre otros. En relación a esto, se fija una línea base (benchmark, o

²⁵ Se profundiza en esta separación en el siguiente capítulo del texto.

tendencia sin estrategias de eficiencia energética), y se compara con el escenario de aplicación de estrategias de eficiencia energética (lo que guarda relación con la herramienta chilena, PELP, presentada en la Sección 2.4.3). Por último, cabe destacar la importancia de la capacidad de recolección, mantención y procesamiento de información (datos), incorporados en la confección de modelos futuros más elaborados.

Respecto a la evaluación ex-post, existen una serie de instrumentos para la identificación y seguimiento de los resultados de implementar estrategias de eficiencia. Estos se pueden clasificar en instrumentos de enfoque “top-down” y “bottom-up” [141]. El primero, “top-down”, utiliza indicadores alimentados por información agregada del consumo de un sector. Ejemplos de estos indicadores son los consumos energéticos para refrigeración, calefacción o iluminación del sector residencial [142]. El análisis de indicadores “top-down” se realiza a través de la comparación con un año de referencia o base. Como consecuencia, se establece si las reducciones del consumo son resultados directos de las estrategias de EE, resultados indirectos de las mismas, o resultados de otro fenómeno (señales de mercado, por ejemplo).

Con enfoque “bottom-up”, se encuentran los mecanismos que requieren información detallada de la aplicación de una estrategia particular de EE. Un ejemplo podría ser la evaluación de una política pública que fomente o apoye la transición hacia el uso de artefactos domésticos (refrigeradores, por ejemplo) más eficientes. Para evaluar con un enfoque “bottom-up”, se requeriría al menos de la cantidad de refrigeradores sujetos a recambio, sus características originales, y las características de los nuevos artefactos. Dentro de las características originales, así como de los nuevos artefactos, se podrían considerar el consumo eléctrico, las dimensiones (capacidad de almacenamiento), alguna clasificación de uso, entre otras. Esta necesidad de información se subsana, por ejemplo, a través de programas de etiquetado, certificación de procesos de reconversión o reacondicionamiento, auditorías energéticas, transparencia de inventarios.

Es importante recalcar la diferencia entre ambas evaluaciones con los ejemplos entregados. Mientras el enfoque “top-down” no analiza una estrategia particular, sino que dinámicas sectoriales e intersectoriales con información agregada, el enfoque “bottom-up” refleja la implementación de proyectos determinados con información detallada. Para un análisis exhaustivo de la adopción e impacto de estrategias de eficiencia energética, se requiere de la aplicación de ambos enfoques de manera complementaria.

En todos los casos nombrados anteriormente, i.e. análisis ex-ante y ex-post (enfoques “top-down” y “bottom-up”), es crítico disponer de información suficiente y de calidad, así como de procedimientos para su obtención. Lo anterior en base a directrices y gobernanzas claras sobre el tópico de eficiencia energética. De esta forma es posible aproximarse a las respuestas de ¿Cuánta energía no se consumió? ¿Cuánta energía no se consumiría con la implementación de estrategias de eficiencia energética?

Ejemplo 3.1

Se hace énfasis en la simplificación del ejemplo expresada en la Sección 3.4.1:

“El propósito del ejemplo es analizar el impacto de cada modificación de las **instalaciones** del sistema uninodal (región de interés²⁶) a la luz de los indicadores de EC propuestos, durante el periodo de estudio. En el ejemplo se omite el análisis de la **operación** y sus recursos (combustibles fósiles, principalmente) para simplificar el ejercicio, por cuanto su trato es análogo al desarrollo de la componente de infraestructura²⁷.”

Es decir, de los cálculos DR_{cap} y DR_{op} sólo se calculará el primer término: desmaterialización capital del sistema eléctrico bajo estudio, relativo a la energía en servicio de éste.

El cálculo del indicador DR_{cap} para el ejemplo expuesto se realiza de la siguiente manera:

Para obtener el valor $\bar{M}_{i,t}$ se requiere identificar las toneladas utilizadas por el sistema de cada tecnología en cada periodo. Para realizar esto se identifica la infraestructura que compone el sistema, expuesta anteriormente en la Tabla 3-1, y el modelo material de cada tecnología. Finalmente se aplica el factor de normalización para agregar distintos materiales en una unidad material común.

Se muestran en la Tabla 3-3 los requerimientos materiales o modelo material de las tecnologías instaladas en el ejemplo. Para este ejercicio, el cual tiene un propósito ilustrativo, se consideran por simplicidad sólo los materiales utilizados en mayor escala en la infraestructura energética descrita (PV-Termo). Así, recursos empleados en menor escala se dejan a un lado en la contabilidad material.

Tabla 3-3 Requerimientos materiales de la infraestructura energética [143]

	PV [ton/MW]	Térmica [ton/MW]
Cement	45,5	155
Fe	87,5	85
Al	45,5	0,425
Cu	6	0,925

La descripción material depende de la disponibilidad de la información, así como también de los costos dispuestos a invertir en su obtención. En ese sentido, se pueden alcanzar resultados de diversas resoluciones

²⁶ Se escoge un sistema uninodal como región de estudio, por lo tanto, no se considera infraestructura de transmisión en el cálculo de indicadores. Asimismo, la conexión al Resto del Sistema (transmisión), se asume fuera de la región de estudio.

²⁷ Se ahonda en este punto en un apartado posterior: Comentarios respecto al factor de normalización.

según las restricciones del aplicante²⁸. En el ejemplo sólo se perciben materiales utilizados en mayor escala y fijos en el tiempo (carácter de resolución). Esto bajo un argumento de simplicidad y no por la importancia particular de dichos materiales. Puede ser que otros materiales ocupados en pequeñas proporciones sean muy relevantes por su escasez.

Con esta información, operando la capacidad de las tecnologías (Tabla 3-1) y su modelo material (Tabla 3-3), se obtiene una serie de tiempo que indica qué materiales (y cuánto de cada uno) se ingresaron al sistema en cada periodo como parte de la infraestructura. Los resultados de este desarrollo para la tecnología PV (G1, $M_{1,t}$) se observan en la Tabla 3-4. En dicha tabla se muestran los años en donde se instala infraestructura de generación al sistema de estudio.

Tabla 3-4 Serie de tiempo de infraestructura material para tecnología PV

año		0	5	10	15 ²⁹	20
PV (G1) [ton]	Cemento	1038,81	1038,81	1038,81	0	1038,81
	Fe	1997,712	1997,712	1997,712	0	1997,712
	Al	1038,81	1038,81	1038,81	0	1038,81
	Cu	136,986	136,986	136,986	0	136,986
año		25	30	35	40	45
PV (G1) [ton]	Cemento	2077,625	2077,625	3116,436	5194,061	5194,061
	Fe	3995,433	3995,433	5993,146	9988,58	9988,58
	Al	2077,625	2077,625	3116,436	5194,061	5194,061
	Cu	273,972	273,972	410,958	684,931	684,931

Con lo anterior, queda por aplicar un factor de normalización para agregar distintos materiales en una unidad material común.

Respecto al factor de normalización:

Para presentar el denominado “factor de normalización” se introduce brevemente el concepto de Análisis de Ciclo de Vida (LCA, por sus siglas en inglés). Éste se puede definir de la siguiente manera:

²⁸ Considerar que, para hacer dos estudios comparables, se debe utilizar la misma información material para la infraestructura y operación de una tecnología.

²⁹ Se hace explícito que el año 15 no se realizan instalaciones de infraestructura, ergo no se expresa ingesta material en infraestructura.

“Life-Cycle Assessment is a process to evaluate the environmental burdens associated with a product, process or activity by identifying and quantifying energy and materials used and wastes released to the environment; **to assess the impact of those energy and material uses and releases to the environment** and to identify and evaluate opportunities to affect environmental improvements. The assessment includes the entire life-cycle of the product, process, or activity, encompassing extracting and processing raw materials; manufacturing; transportation and distribution; use, re-use, maintenance; recycling, and final disposal (SETAC 1991)”

El proceso descrito en la definición se puede dividir en cuatro subprocesos, los que se indican en la Figura 3-10. Para el presente trabajo no se busca realizar un estudio de análisis de ciclo de vida completo. Con el propósito de obtener un “factor de normalización” para las masas de distintos materiales, se recurre exclusivamente a un subproceso como un recurso técnico. Dicho subproceso se destaca en la definición, y corresponde al análisis de potenciales impactos (LCIA) dentro del análisis de ciclo de vida.

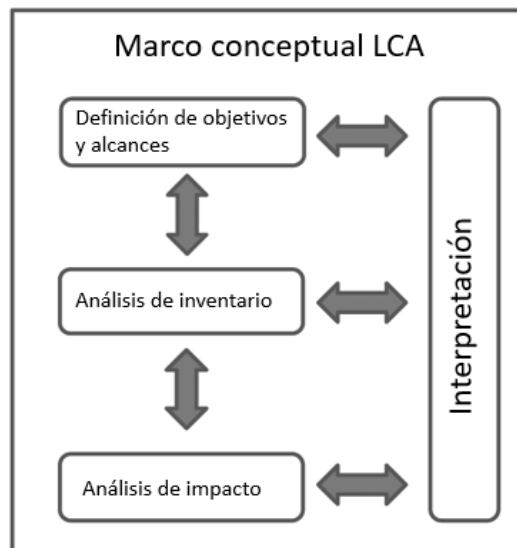


Figura 3-10 Esquema LCA

Ahora bien, en la bibliografía se pueden encontrar impactos de producción (producto, proceso o actividad) de distinta índole. Dichos impactos ambientales son una consecuencia de los flujos de materia y energía capturados en términos de masa. Algunas categorías de impactos son el cambio climático, acidificación, eutrofización, uso de tierras y el agotamiento de recursos [144]. Esta última categoría es el centro de atención en el presente trabajo.

Luego de seleccionar la o las categorías de impacto de interés (agotamiento de recursos para el presente trabajo), se identifican cuáles de los flujos materiales y/o energéticos contabilizados tienen un impacto sobre dichas categorías. Por ejemplo, el dióxido de carbono (CO_2) tiene una incidencia o impacta sobre la

categoría de cambio climático, sin embargo, no sobre la categoría de acidificación. Para la categoría de agotamiento de recursos se contabilizan los elementos y los combustibles fósiles ingeridos por el sistema en cuestión.

De ser posible, se aplica un factor de caracterización sobre los elementos agrupados en una categoría de impacto, con la finalidad de poder agrupar las masas como una sola medida representativa. Por ejemplo, al factor de caracterización de la categoría de cambio climático se le conoce como “potencial de calentamiento global” (GWP por sus siglas en inglés). El GWP convierte las masas de los compuestos relevantes liberados a la atmósfera en la medida relativa común dióxido de carbono ($CO_2 = 1 GWP_{100}$ referencia; $CH_4 = 28 GWP_{100}$ [145]) también llamado $CO_2 eq$.

Para la categoría de impacto “agotamiento de recursos”, se utiliza el factor de caracterización “potencial de agotamiento de recursos abióticos” (ADP por sus siglas en inglés). Así como el dióxido de carbono corresponde a la medida relativa para el factor de caracterización GWP en unidades de $CO_2 eq$, la medida relativa para el factor de caracterización ADP es la masa equivalente de antimonio (Sb_{eq} o $ADP Sb_{eq}$).

De esta forma, se utiliza el $ADP Sb_{eq}$ como factor de normalización de los materiales identificados en el trabajo, haciendo referencia a su impacto en el agotamiento de recursos. Por último, cabe reconocer que, si bien la categoría de impacto “agotamiento de recursos” identifica o contabiliza tanto elementos como combustibles fósiles, el factor de caracterización ADP agrupa ambas subcategorías de manera separada desde el 2009 [146][147]. Esta es la misma separación que recae sobre el sector eléctrico, distinguiendo capital (o infraestructura) y operación de éste. Dado que la manipulación de información es idéntica para ambas subcategorías, por simplicidad este trabajo se enfoca sólo en los elementos, ergo capital (infraestructura) del sector eléctrico.

A continuación, en la Tabla 3-5, se presentan los factores de normalización del uso de recursos en términos de la disponibilidad-agotamiento de estos, utilizando el factor de caracterización “potencial de agotamiento del recurso abiótico” ($ADP Sb_{eq}$). Esto guarda relación con la necesidad de agregar los impactos de distintos recursos.

Tabla 3-5 Factor de normalización $ADP Sb_{eq}$ aplicado al ejemplo del trabajo

	ADP [kg Sb_{eq} /kg]
Cemento (OPC ³⁰)	1.59 E -03 [148][149] ³¹
Fe	1.1 E -06 [147]

³⁰ Las siglas refieren a “Ordinary Portland Cement”, un tipo de cemento ampliamente mencionado en fuentes.

³¹ Se promediaron los valores de ambas fuentes, los que se encuentran en el mismo orden de magnitud.

Al	4.2 E -08 [147]
Cu	2.7 E -02 [147]

Siguiendo con el cálculo del indicador, y una vez que se identifican los materiales requeridos por todas las tecnologías a lo largo del tiempo, se normalizan a través del factor de caracterización $ADP S_{b_{eq}}$. En la Tabla 3-6 se presenta algunos valores de materiales normalizados ingeridos por el sistema. Como es de esperarse, la tabla sigue una tendencia creciente debido a que sólo contabiliza la ingesta material del sistema.

Tabla 3-6 Ingesta material normalizado por el sistema de ejemplo a lo largo del tiempo

Ingesta material normalizada: $G1 + G2$ [ton $ADP S_{b_{eq}}$]					
año	0	5	10	15	20
	19,93859045	5,352583584	5,352583584	0	5,352583584
año	25	30	35	40	45
	10,70516717	10,70516717	16,05775075	26,76291792	26,76291792

Por último, para el cálculo del indicador se debe reconocer la energía en servicio del sistema bajo estudio, la que considera tanto los aportes de generación, así como también los aportes propios de estrategias de eficiencia energética. En cuanto a los resultados de las estrategias de eficiencia energética (EE), se asumirá para el ejemplo que el 1% de la tasa de crecimiento es cubierta por estas (estrategias de EE). Esto se ve representado en la siguiente fórmula.

$$EE_t = CSEE_t - CSEE_{t-1}(1 + tasa - 0,01) + EE_{t-1}$$

Esta ecuación quiere decir que, el ahorro por eficiencia energética el año t es igual a la diferencia entre el consumo original (sin eficiencia energética aplicada sobre el crecimiento de dicho año, $CSEE$) del año t y el valor del consumo sin las estrategias de eficiencia energética que hubiera tenido el año t si la tasa hubiera sido 1% menor. Esto es equivalente a decir, para el ejemplo, que la tasa de aumento de consumo hubiera sido 3% hasta el año 19 y 2% desde el año 20. Además, se le debe sumar la cantidad de energía no consumida por EE los años anteriores, puesto que son medidas que se perpetúan en el tiempo de manera independiente. Por ejemplo, al acondicionar la instalación A existe un ahorro permanente anual, que se suma a las futuras modificaciones de las instalaciones B y C .

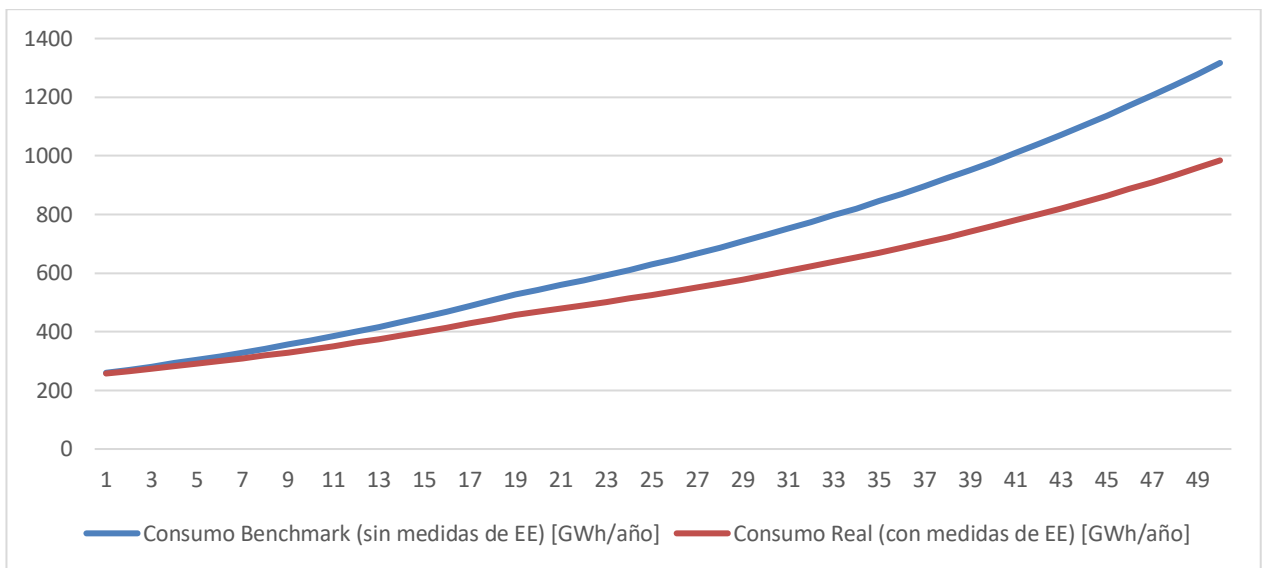


Figura 3-11 Consumo eléctrico con y sin medidas de EE

Ambas componentes de la energía en servicio se presentan por separado en la Tabla 3-7 y la Tabla 3-8, cuyos valores se van acumulando año a año. Estos valores se calculan a través de los parámetros expuestos anteriormente, utilizando el factor de planta, el porcentaje de ahorro y de crecimiento del consumo, así como también el consumo inicial. Para obtener el valor de energía en servicio se suman ambas series de tiempo.

Tabla 3-7 Generación de energía eléctrica del sistema de estudio

Algunos valores de generación energía eléctrica anual acumulada [GWh/año]					
año	0	5	10	15	20
	450	500	350	150	200
año	25	30	35	40	45
	300	400	500	700	900

Tabla 3-8 Ahorros de consumo basado en estrategias de EE

Algunos valores de ahorro anual por eficiencia energética [GWh/año]					
año	0	5	10	15	20
	0	13,5408064	30,01526781	50,05896909	74,44519644
año	25	30	35	40	45
	103,2479836	136,638308	175,3468454	220,2206493	272,2416867

Con todo lo anterior, sumando ambas componentes de la energía en servicio E_t , se calcula el indicador DMR . Para esto se operan los valores del uso acumulado de recursos normalizados y energía en servicio,

según la ecuación $DMR(T) = \frac{\sum_t^T \sum_i \bar{M}_{i,t} \left[\frac{ton}{MWh} \right]}{\sum_t^T E_t}$. Particularmente, para este ejercicio se calcula el indicador DMR para todo $T \in [0,50]$, el que se presenta como un gráfico en la Figura 3-12. De esta manera, el valor del año 35 se calcula como $DMR(35) = \frac{\sum_t^{35} \sum_i \bar{M}_{i,t} \left[\frac{ton}{MWh} \right]}{\sum_t^{35} E_t}$, lo que acumula los recursos ingeridos por el sistema, amortizados por la energía en servicio correspondiente, desde el 0 hasta el año 35.

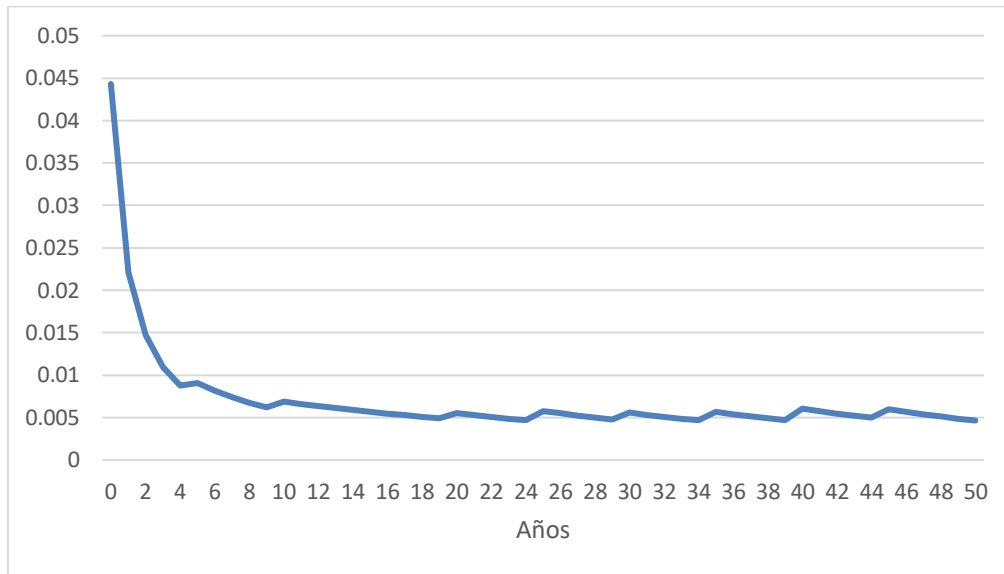


Figura 3-12 Compuo del indicador DMR [ton ADP Sbeq/GWh] para cada tiempo t en el periodo de estudio

3.4.3. Indicador de Desacople Material Absoluto (DMA)

Una segunda pieza relevante que se puede extraer de la definición es la “tolerancia de la naturaleza” a los niveles de producción, y su relación con los ciclos ecosistémicos (“*La economía circular limita el flujo de producción a un nivel que la naturaleza tolera y utiliza los ciclos de los ecosistemas en los ciclos económicos respetando sus tasas de reproducción naturales.*”). Esta noción también está representada dentro de los elementos de la EC mencionados, como por ejemplo con la idea de “*System stability*”, o “*Supply risk and scarcity of resources*”. Un mensaje directo del extracto de la definición es que la búsqueda de eficiencia o desacople material relativo no es suficiente si se aspira a una EC; esto también se menciona en la bibliografía de EC [78]. Además, es fácil notar que esta segunda idea no está cubierta por el primer indicador postulado.

Tómese como ejemplo el caso en que una región sostiene una tendencia de desmaterialización relativa (aumento de eficiencia) de su producción energética, por integración de tecnologías eficientes, como se ilustra en la ecuación a continuación.

$$DMR(T) = \frac{\sum_t^T \sum_i \bar{M}_{i,t}}{\sum_t^T E_t} = \frac{k}{(1.05)^t}$$

Puede darse la situación en que, dado un aumento en la demanda, se requiere n-tuplicar la infraestructura. En dicho escenario, el indicador *DR* destacaría o señalaría un comportamiento positivo del sistema. Al mismo tiempo, este escenario impondría exigencias o presiones sobre el medio ambiente que contribuyen a su degradación, lo que es equivalente a un comportamiento negativo respecto a la “tolerancia de la naturaleza”. Es por esto que surge la necesidad de una medida adicional de economía circular que considere este aspecto. Ahora bien, comprender la noción “tolerancia de la naturaleza³²” de manera independiente y general escapa del campo de la EC, y por tanto excede los alcances de este trabajo. Por lo tanto, resulta necesario entender esta noción en concordancia con el resto de la definición, esto es, acotada al concepto de EC. Para llevar a cabo esto, se vincula dicha noción con el extracto de donde se obtiene el indicador *DMR*: “*maximiza el servicio producido a partir del flujo lineal de materiales y energía entre la naturaleza y la sociedad*”. En este fragmento, donde los flujos de recursos son el sujeto de análisis, la “tolerancia de la naturaleza” sugiere ser parcialmente entendida como la capacidad de proveer estos recursos, o la disponibilidad de estos mismos en el entorno³³. Considerando lo anterior, y sin desmedro de otras posibles variables que puedan representar el concepto, se propone como medida de “tolerancia” el conteo de la ingesta o agotamiento de recursos. Esta medida está estrechamente relacionada con la “tolerancia de la naturaleza” por cuanto un agotamiento de recursos supone un daño en la “tolerancia” del entorno natural.

En este punto es necesario diferenciar recursos renovables y no-renovables, puesto que la relación disponibilidad-agotamiento de los primeros depende de su tasa de reproducción. En el presente trabajo se aborda exclusivamente la problemática de recursos no-renovables por dos motivos. En primer lugar, la presión ecosistémica que provoca el consumo no-renovable sobre la disponibilidad no es comparable con la que provoca el consumo renovable, debido al carácter finito de estos recursos (no-renovables). En segundo lugar, la tasa de reproducción de los recursos renovables conlleva un problema importante de incertidumbres [150]. Con esto, el tratamiento renovable (la categoría Biomasa) se considera propuesto para un trabajo futuro.

³² En adelante, se considera que “tolerancia de la naturaleza” identifica la idea del extracto presentado para el segundo indicador. Así, representa también a otras ideas importantes como “ciclos ecosistémicos”, y “tasas de reproducción natural”.

³³ Vale la pena aclarar que la interpretación de la noción “tolerancia de la naturaleza” como disponibilidad de recursos en el marco de la EC no restringe otras posibles lecturas.

En consecuencia, se propone como indicador la ingesta absoluta de **materiales no-renovables** por el sistema en cuestión, lo que corresponde a tres de las cuatro categorías de extracción doméstica: Minerales Metálicos, Minerales No-Metálicos y Combustibles Fósiles [140]. Así, se establece la siguiente hipótesis anidada o subyacente a la hipótesis del trabajo: “en la medida que se minimice el consumo de recursos no-renovables, se contribuye a maximizar la tolerancia de la naturaleza”. Dada su esencia, el indicador se denomina de desacople material absoluto (*DMA*), y se representa matemáticamente como:

$$DMA = \sum_t \sum_i \bar{M}_{i,t} [ton ADP Sb_{eq}]$$

De igual manera que para el indicador anterior (*DMR*), la variable *M* corresponde al **impacto ambiental asociado al consumo de recursos materiales no-renovables** medido en masa (toneladas), necesarios para el funcionamiento del sistema, considerando por separado **capital (o infraestructura) y operación**: $DMA_{cap}(M_{cap})$ y $DMA_{op}(M_{op})$. Asimismo, los subíndices *i* y *t* corresponden a las tecnologías y periodos de estudio.

Este indicador también es capaz de endogenizar otras propiedades como estrategias de circularidad o longevidad de la infraestructura (tal y como se expuso para el indicador anterior). Por otro lado, esta medida tensiona el desarrollo del sistema dentro de un espacio físico limitante (tolerancia natural), lo que sirve de complemento para un indicador de *DMR* que persigue un resultado no físico (ratio). Un ejemplo de la interacción de estos indicadores podría ser la instalación tecnológica para la explotación de una fuente renovable para la producción energética. Si bien puede ser deseable aprovechar un nicho de buenas características, lo que podría dar luces de eficiencia, un enfoque de desmaterialización absoluta podría también elevar las preguntas: ¿Con qué propósito? ¿Es estrictamente necesario? ¿Cómo evitarlo?

Ejemplo 3.2

El cálculo de este indicador corresponde a una componente del indicador anterior. En concreto, se utiliza exclusivamente el impacto del sistema en la disponibilidad de los recursos, independiente de la energía en servicio. De igual manera que para el indicador *DMR*, en el ejemplo se omite el análisis de la **operación** y sus recursos (combustibles fósiles, principalmente) para simplificar el ejercicio. Es decir, de los cálculos DMA_{cap} y DMA_{op} sólo se calculará el primer término: desacople material capital absoluto del sistema eléctrico bajo estudio. De esta manera, se presenta la ecuación $DMA = \sum_t \sum_i \bar{M}_{i,t} [ton ADP Sb_{eq}]$ como una serie de tiempo o historial de la infraestructura. Es decir, tal y como para el primer indicador, se realiza el cálculo para cada periodo. El computo de los resultados se presenta en la Figura 3-13.

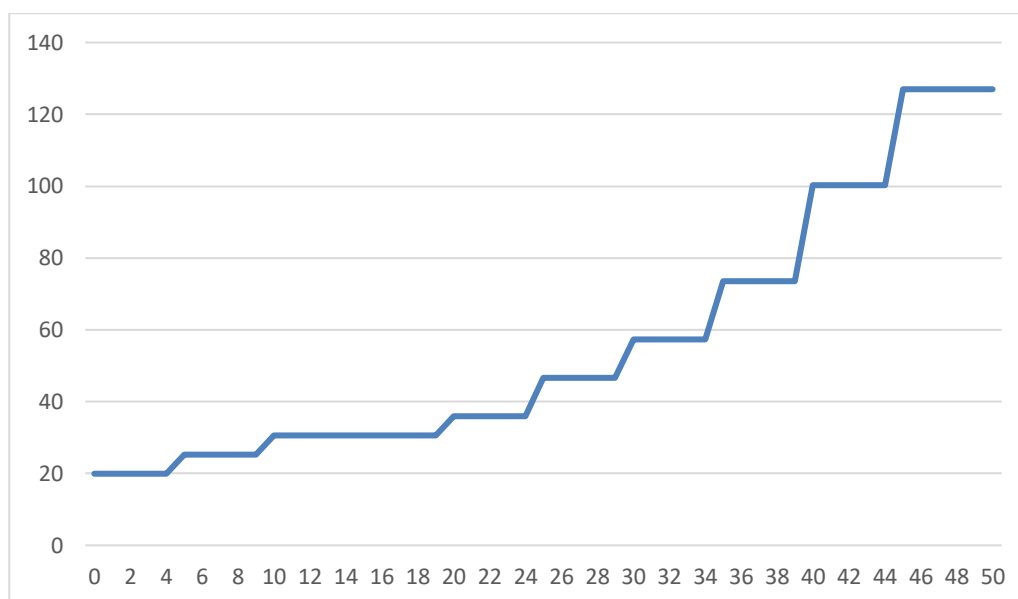


Figura 3-13 Computo del indicador DMA [ton ADP *Sbeq*] para cada tiempo *t* en el periodo de estudio

3.4.4. Indicador complementario, autoabastecimiento eléctrico (*AE*) - dependencia

Se propone un tercer indicador al conjunto. Este último con un carácter complementario, puesto que no se extrae de la definición de EC. Sin embargo, se propone con un afán de identificar la posible amenaza del “desplazamiento de problemática” enunciada en la Sección 2.1.2. Dicha medida busca reflejar la coincidencia energética anual de la producción y el consumo regional (incluyendo eficiencia energética); i.e. la diferencia entre cantidad energética producida y consumida dentro de la región. El indicador, denominado de autoabastecimiento energético (*AE*), sigue la siguiente representación matemática:

$$AE(T) = \frac{\sum_{t=0}^T (Gen_t - CR_t)}{\sum_{t=0}^T CP_t} = \frac{\sum_{t=0}^T Gen_t - (CP_t - EE_t)}{\sum_{t=0}^T CP_t} = \frac{\sum_{t=0}^T (E_t - CP_t)}{\sum_{t=0}^T CP_t}$$

La variable Gen_t corresponde a la cantidad de energía producida dentro de la región en el periodo t . La variable CR_t corresponde al consumo real de la región en el periodo t . Asimismo, el consumo real se separa en el consumo proyectado (CP_t) y la porción no consumida debido a medidas de eficiencia energética EE_t . Por último, E_t corresponde a la energía en servicio, tal y como se definió para el indicador *DR*.

De la expresión se extrae el carácter normalizado del indicador respecto al consumo proyectado para cierto periodo T . El valor resultante evidencia si la región en estudio se comporta como excedentaria o deficitaria, dependiendo si exporta o importa (respectivamente) energía a través de sus conexiones con el exterior. Así, por ejemplo, un resultado de 0,3 (o 30%) quiere decir que la región es “excedentaria, y que exporta lo equivalente 30% del consumo proyectado. Más aún, al incorporar la suma de valores durante un historial dado ($t \in [0, T]$), se analiza si la región es excedentaria o deficitaria en términos acumulados, al

margen periodos (años) específicos. Esta última característica es relevante en concordancia con el carácter acumulado de los otros indicadores, y la conceptualización de la EC para los sistemas eléctricos.

El indicador AE sólo es posible de interpretar en conjunto con los indicadores DR y DA . Más aún, la real utilidad del tercer indicador se aprecia cuando se analizan conjuntos de regiones y escenarios, puesto que cobra relevancia la pregunta ¿Qué sustituyo al exportar o importar energía? Es decir que un valor de 0,3 no tiene una connotación negativa ni positiva a priori, sino que será positivo en cuanto sustituya acciones que sean más exigentes en términos de menor eficiencia o mayor demanda absoluta de materiales.

Ejemplo 3.3

Para el cálculo del indicador se requieren los valores de E_t y CP_t para cada año. En la Figura 3-14 se presenta esta información de manera gráfica.

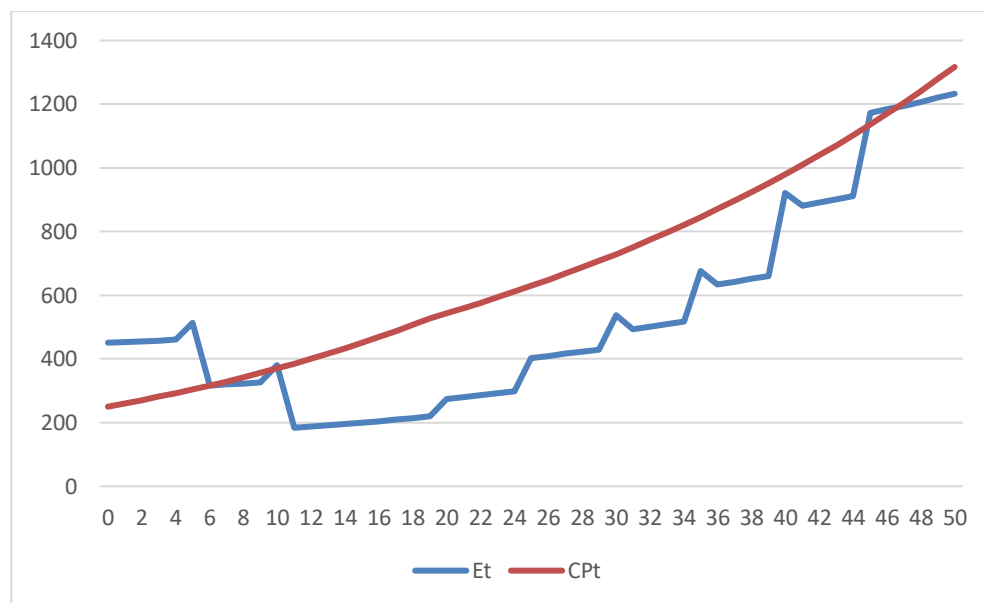


Figura 3-14 Energía en servicio y consumo proyectado (E_t, Cpt) para cada periodo t en [GWh].

Con un propósito ilustrativo, se presenta en la Figura 3-15 el cálculo $\frac{E_t - CP_t}{CP_t}$ para cada periodo (no acumulado). Se puede apreciar como el sistema tiene un comportamiento Excedentario y Deficitario en distintos periodos. Ahora bien, estos valores por si solos no son suficientes para apoyar el análisis de dinámicas de largo plazo, como la instalación de infraestructura y la producción energética a lo largo de vidas útiles prolongadas. Es por esto que se utilizan una medida acumulada como indicador.

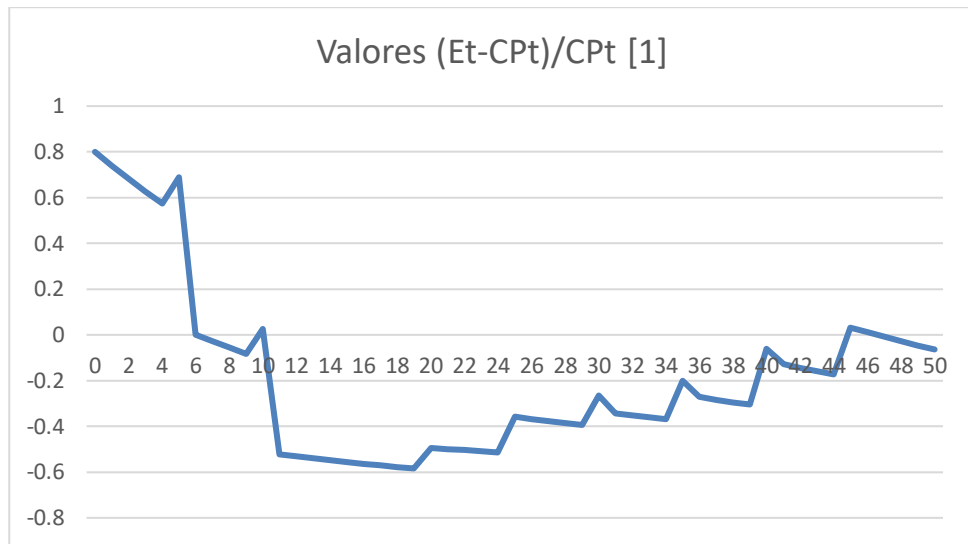
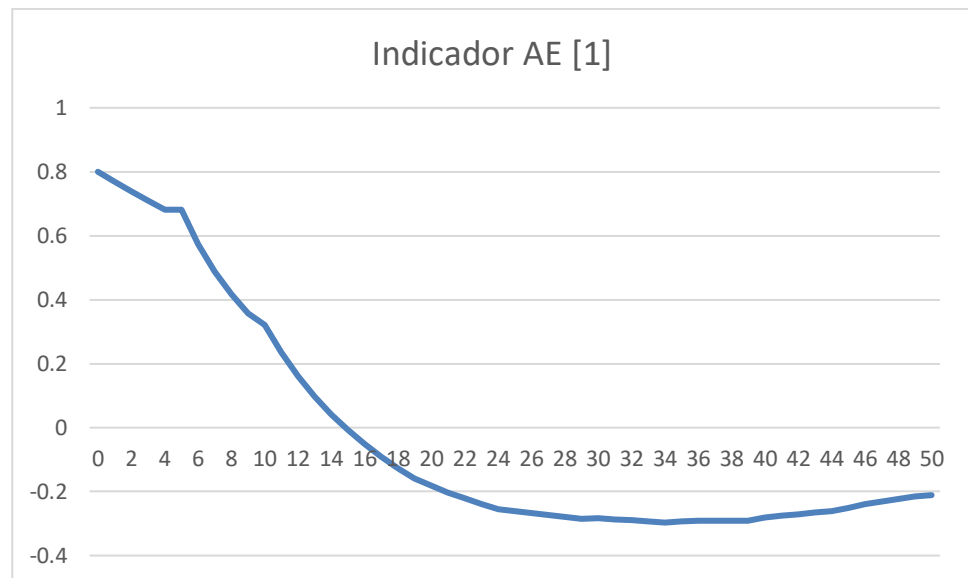


Figura 3-15 Caracterización anual de auto abastecimiento energético del sistema ejemplo; esto es, valores de $\frac{Et-CPt}{CpT}$ [1].

Como se ve en la Figura 3-15, durante los primeros 6 años del análisis el sistema de ejemplo ha funcionado, año a año, de manera Excedentaria. En adelante, posterior al año 6, hay un comportamiento Deficitario hasta el año 45. Debido a que el indicador AE funciona como un promedio ponderado por el consumo anual de los primeros T elementos de la Figura 3-15, el sistema alcanza un valor nulo de autoabastecimiento el año 16 (posterior al caso de la Figura 3-15). Es decir el año 16, se observa que la energía proyectada acumulada iguala a la energía en servicio acumulada durante el historial analizado. Luego, a medida que el comportamiento Deficitario año a año del sistema se atenúa, el indicador $AE(T)$ adopta con retraso y paulatinamente este comportamiento.



3.5. IV: Test preliminar, evaluación de indicadores en base a criterios

En el Capítulo 2: se expusieron tres acrónimos que representan distintos conjuntos de criterios útiles para evaluar indicadores: RACER, SMART y CREAM. La elección del acrónimo RACER se debe, principalmente, a los siguientes tres motivos:

1. Como se menciona la Sección 2.2.4, el conjunto de criterios RACER se promueve y emplea actualmente por la Unión Europea [69], aplicándose además en tópicos de EC [71] [72]. Con esto se persigue un afán de uniformar procesos afines.
2. Como se menciona en la Sección 2.2.4, SMART fue, inicialmente, pensado para evaluar el establecimiento de objetivos [73]. A su vez, este origen tiñe su adaptación a la evaluación de indicadores, lo que se evidencia al mencionar conceptos como “resultados realistas”, o “tiempo esperado para el cumplimiento de resultados” (Sección 2.2.4). Sin desmedro de su utilidad para ciertos casos, se descarta el uso de este acrónimo puesto que no se espera, a priori, que los indicadores de EC respondan o se estructuren en torno a objetivos (independiente de los indicadores seleccionados y/o elaborados).
3. En cuanto al acrónimo CREAM, en base a un análisis de lo expuesto en la Sección 2.2.4, se considera para este trabajo que sus criterios de evaluación están contenidos dentro del acrónimo RACER. En particular, se tiene que “Clear” está contenido en “Credibility”, “Relevant” está contenido en “Relevant”, “Economic” está contenido en “Easy”, “Adequate” está contenido en “Relevant”, y “Monitoreable” está contenido en “Robust”.

Cabe mencionar que los criterios de evaluación de indicadores se escogen sin influencia de los indicadores propuestos. Si bien se anuncia el uso de RACER en este apartado, con el afán de favorecer la narrativa del texto, no existe una razón por la cual no pudiese aparecer al principio de la Etapa III (Sección 3.3). Finalmente, resulta importante destacar que, si bien se escoge el uso del acrónimo RACER para este trabajo por las razones expuestas, los otros dos conjuntos también son opciones válidas para utilizar.

A continuación, se procede a evaluar los indicadores propuestos según los criterios contenidos en el acrónimo RACER. Para llevar esto a cabo, se confrontan y analizan cada uno de los indicadores respecto a cada uno de los criterios.

RACER: Relevant – Accepted – Credibility – Easy – Robust

1. **Relevant (Relevante/Pertinente):** El indicador debe cubrir el tópico de manera adecuada (suficiente), y establecer un vínculo estrecho con el objetivo que representa (necesario);

Por construcción, dado que los indicadores *DMR* y *DMA* se plantean a partir de la definición de EC, y son excluyentes en términos de sus enfoques (no se superponen), se consideran **ambos necesarios**. El tercer indicador, *AE*, responde a un afán de evidenciar la amenaza del “desplazamiento de problemática”, propia del análisis de una región (delimitada) y la posible transferencia del servicio producidos y sus beneficios (energía). En consecuencia, pese a ser complementario a la definición y no propio de ésta, el indicador *AE* también se considera necesario.

Ahora bien, queda por estudiar si los indicadores son exhaustivos o suficientes respecto al tópico que buscan cubrir. Para esto se espera verificar que a través de los indicadores se pueda reconstruir la definición en cuestión. Particularmente, se espera reconocer qué secciones de la definición se ven cubiertas por los indicadores, y en qué medida.

“La economía circular es una economía construida a partir de sistemas de producción y consumo de la sociedad que maximiza el servicio producido a partir del flujo lineal de materiales y energía entre la naturaleza y la sociedad. Para ello se utilizan flujos de materiales cíclicos, fuentes de energía renovables y flujos de energía del tipo cascada. Una economía circular exitosa contribuye a las tres dimensiones del desarrollo sostenible. La economía circular limita el flujo de producción a un nivel que la naturaleza tolera y utiliza los ciclos de los ecosistemas en los ciclos económicos respetando sus tasas de reproducción naturales.”
[40]

El primer indicador, de *DMR*, presenta la ratio entre los recursos materiales³⁴ utilizados por el sector, y el servicio producido por el mismo (costo/beneficio). Este valor permite comparar distintas estrategias, revelando cuál de éstas “*maximiza el servicio producido a partir del flujo lineal de materiales*”. Mientras menor sea el número resultante, mayor es el servicio producido a partir del flujo de recursos requerido, por lo que el indicador captura esta idea de comparación y maximización. Por otro lado, dado que la segunda oración de la definición refiere a expresiones o estrategias de EC que se comparan bajo el lente de “*...maximizar el servicio producido...*”, se concluye que el indicador de *DMR* es **suficiente** para representar ambos fragmentos. Este razonamiento no descarta otras posibles expresiones matemáticas que puedan plasmar las mismas ideas.

³⁴ Un elemento a recordar es la interpretación de la definición en el contexto del trabajo, particularmente en lo que refiere a la dualidad del rol de la energía (véase Sección 3.2, **Aspectos de la EC**). De esta manera, se considera únicamente el flujo material entre sociedad-naturaleza.

Por su parte, el análisis del segundo indicador, de *DMA*, requiere un tratamiento más cuidadoso. Esto por cuanto, como se explicó en la Sección 3.3 (Etapa III), éste se deriva como una métrica inspirada en la “tolerancia de la naturaleza” (“*La EC limita el flujo de producción a un nivel que la naturaleza tolera...*”) adecuada al contexto de la definición de EC, y no busca cubrir el concepto de “tolerancia” en su integridad. Considerando esto, se reduce el análisis de “tolerancia” a la “disponibilidad-agotamiento” de recursos en el medio ambiente. Más aún, se presentan argumentos para trabajar exclusivamente con el agotamiento de materiales no-renovables. En este escenario, en donde se realiza un proceso de interpretación y limitación claro del concepto de “tolerancia”, se considera que el indicador *DMA* es **suficiente** para representar la idea del fragmento expuesto.

En cuanto a la tercera oración, la cual apunta a las implicancias de la EC en las dimensiones del desarrollo sostenible, se opta por no proponer un indicador específico. Esta decisión se justifica en que un análisis de EC y de sostenibilidad, si bien se relacionan, son diferentes (Sección 2.1.2). En ese sentido, se propone la implementación de un **análisis complementario**, sinérgico y no jerárquico (de manera paralela) entre ambos conceptos, utilizando herramientas estandarizadas, como por ejemplo un análisis exhaustivo de los ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible) [151]. La selección y/o elaboración de indicadores para el desarrollo sostenible queda fuera del alcance de este trabajo. Por último, y en términos pragmáticos, los parámetros necesarios para el correcto análisis del desarrollo sostenible escapan del marco conceptual (ew-MFA) postulado para el estudio de la EC en el sector eléctrico.

De lo mencionado anteriormente se concluye que los indicadores *DMR* y *DMA* son suficientes para sostener la definición escogida, al considerar además un análisis complementario de desarrollo sostenible. El indicador *AE*, por su parte, no se origina de la definición de EC. Sin embargo, puesto que representa un atributo del sistema que podría invalidar las conclusiones de los indicadores *DMR* y *DMA*, resulta interesante mencionar su carácter de suficiencia. Para concluir que *AE* es **suficiente**, basta con notar la similitud con indicadores oficiales (IEA, Eurostat) que representan conceptos similares [152][153].

2. **Accepted (Aceptación):** El indicador debe validarse y entenderse por el personal a cargo de su utilización y mantención, así como por los stakeholders y usuarios en general;

Como se menciona en el apartado de alcances, este proyecto busca establecer una propuesta de indicadores. Así, debe existir un proceso participativo posterior al presente trabajo, el cual incorpore a distintos actores significativos para la consulta, evaluación y potencial

implementación de la propuesta. En consecuencia, la evaluación de este criterio se mantiene pendiente.

3. **Credibility (Credibilidad):** El indicador debe ser de fácil interpretación, sin dejar espacio a ambigüedades. Debe ser accesible en estos términos a personal no experto;

Para discutir sobre credibilidad, es necesario aclarar previamente tres puntos:

En primer lugar, se debe esclarecer un elemento que podría producir problemas de interpretación. Para este trabajo **se plantea el uso de los indicadores propuestos como conjunto, y no por separado**. Si bien cada uno de los indicadores representa de manera “suficiente” una arista particular de la EC, por si solas son visiones incompletas de ésta. Este punto es de especial importancia cuando dos de los indicadores planteados se tensionan mutuamente ($DA - DR$). Se recalca que dada la multidimensionalidad del concepto de EC no es posible reducir su análisis a una única medida o puntuación [69] [71].

En segundo lugar, se debe esclarecer un elemento con carácter metodológico que puede introducir ambigüedades. El uso de indicadores requiere de un marco conceptual capaz de proveer reglas claras de contabilidad (en este caso el ew-MFA, presentado en la Sección 2.3.3), así como un modelo material aplicado de manera homogénea a los casos de estudios que se busquen comparar. El modelo material refiere a la composición material de cada elemento (tecnología) del sistema, el que puede diferir según la fuente de información. Ambas componentes determinan qué elementos se cuentan como parte del sistema y cómo se constituyen materialmente cada uno de esos elementos respectivamente. De la mano con el modelo material, se debe aplicar un factor de normalización (\bar{M}), lo que habilita su comparación entre distintos materiales de una misma categoría. Estos factores materiales funcionan como supuestos para el cálculo de los indicadores, por lo tanto influyen directamente en su resultado.

En tercer lugar, se debe esclarecer otro elemento con carácter metodológico que puede introducir ambigüedades. Además del cálculo material, los indicadores requieren de un cálculo energético. Más aún, requieren de la estimación de un ahorro energético por motivos de estrategias de EE. Esto, sin lugar a dudas, deja espacio a múltiples formas de proveer la información, lo que influye sobre el resultado de los indicadores. De esta manera, al igual que para el caso material, el supuesto energético (de EE) debe estar presentado de manera clara para el cálculo del indicador.

Con lo anterior en mente, se procede a discutir sobre el criterio de credibilidad. Se entiende por “fácil interpretación, sin dejar espacio a ambigüedades” que el indicador esté respaldado por una teoría clara y sea producto de un desarrollo metodológico inteligible. Esto permite entender lo que representa el valor numérico del indicador en cuestión. Si bien la adaptación del concepto de EC a los sistemas eléctricos, así como la presentación de un marco conceptual pueden defender la credibilidad de los indicadores, existe la defensa última de credibilidad al momento de aplicar los supuestos para su cálculo.

Bajo esta significación, se argumenta que los indicadores *DMR*, *DMA* y *AE* son creíbles a priori, postergando la credibilidad de implementación. Dicha conclusión se funda en el proceso de elaboración y/o selección de indicadores utilizado, así como su aplicación al caso de EC para el sector eléctrico. Esta aplicación incluye las definiciones de marco conceptual y modelo material mencionado en párrafos anteriores.

Así como con el criterio de aceptación, el elemento “accesibilidad de personal no experto” se podrá estudiar en mayor medida al abrir un proceso participativo que involucre una diversidad suficiente de stakeholders.

4. **Easy (Factible/Sencillo):** El indicador debe basarse en datos y sistemas de monitoreo factibles de implementar en términos de costo y tiempo;

En el presente trabajo se presenta una propuesta de indicadores para estudiar el concepto de EC en los sistemas eléctricos. Para este fin, es necesario entender la composición de la red respecto a los elementos que se contabilizan (tecnologías de generación y redes), así como los materiales que constituyen dichos elementos. Además, se requiere información referente a la producción y consumo energético, y estrategias de eficiencia energética. Esto conforma el universo de datos necesarios para el cálculo de los indicadores. Así, y como se hizo anteriormente, se puede separar el universo de datos en términos materiales y en términos energéticos.

El parque tecnológico del sistema, así como también la producción y el consumo energético real, se encuentran generalmente disponibles a través las plataformas del operador del sistema eléctrico e instituciones públicas relacionadas. Lo anterior puesto que dicha documentación es necesaria para los procesos de planificación y operación de la red. Sin embargo, y como se mencionó en la Sección 3.4.2, el cálculo de EE puede significar un desafío. De no ocuparse información pública, se recomienda el mayor nivel de transparencia para permitir reproducir los cálculos realizados.

Por otro lado, respecto a la constitución material de cada tecnología, se encuentra un extenso número de fuentes que pueden suministrar de información a los indicadores. Ahora bien, vale la pena explicitar que cada fuente tiene un nivel de especificidad y/o un segmento material de interés. Así, por ejemplo, existen trabajos que se enfocan en “materiales claves de construcción” (Cemento, Aluminio, Cobre y Hierro) [143], mientras otros se enfocan en “metales críticos”, necesarios para generar cambios en el sector eléctrico [154] [155].

De acuerdo con lo expuesto, se presume que la implementación de los indicadores es factible desde un punto de vista de la existencia de la información requerida por estos. Ahora bien, en cuanto a la disponibilidad o facilidad de obtención de esta documentación, depende de los contextos y los alcances de la implementación. En cuanto a la información “institucionalizada” a través del SO y otras entidades, la comunicación entre agentes y la regularización de procesos de transparencias juegan un rol clave, y difiere en cada estructura organizacional en el sistema eléctrico (Sección 3.4). En cuanto a la información propia del modelo material y relacionados (ej., estimación de vida útil), la amplia disponibilidad presente en la bibliografía permite la implementación de los indicadores con diferentes escalas de detalle. Esto, a su vez, permite la adaptación del problema a un nivel de exigencia admisible para cada fin.

5. **Robust (Robusto):** El indicador se define de manera clara, es reproducible sin estar sujeto a manipulación de resultados, y es sensible a la introducción de cambios;

Como se menciona anteriormente para el criterio de credibilidad, el conjunto de indicadores requiere de manera previa un marco conceptual y un modelo material de las tecnologías involucradas, además de la información energética (datos o metodologías para su obtención). Pese a considerarse desafíos, estos esquemas poseen la oportunidad de aportar estructura y transparencia al procedimiento y las reglas involucradas en el cálculo y la interpretación. Se expresa la necesidad de información sujeta a diferencias, pero también se exige transparencia al momento de optar.

Capítulo 4: Propuesta de integración de indicadores de EC a la toma de decisiones del sector eléctrico

Posterior a definir un conjunto de indicadores que cumplan con reflejar el concepto de EC en el sector eléctrico y, en términos más generales, que cumplan con los criterios prestablecidos de un buen indicador para el objetivo en cuestión, corresponde identificar espacios para su uso. En esta sección se plantea formalmente una propuesta de integración de los indicadores, desarrollados tomando características del sector eléctrico y el concepto de EC, al campo de toma de decisiones públicas del sector. Se proponen dos espacios de acción y la relación entre estos, para luego, en el Capítulo 5., desarrollar el caso de estudio sobre un sistema eléctrico regional chileno abarcando uno de estos espacios.

La toma de decisiones del sector eléctrico son parte de la sociedad en distintas dimensiones, y su variada naturaleza guarda relación con los diferentes agentes que las llevan a cabo. Se encuentran las decisiones privadas del sector, como por ejemplo aquellas referentes a los negocios de inversión y operación de la infraestructura. Asimismo, están las decisiones de la esfera del cliente y la sociedad, que requieren los servicios eléctricos pero que también resienten sus impactos. Además, se pueden mencionar las decisiones del estado como ente regulador, que salvaguarda el funcionamiento del sistema eléctrico en última instancia. Este trabajo se enmarca en el último subconjunto de decisiones, particularmente aquellas que tienen que ver con la visión del sector y su evolución; esto es, el trabajo se enmarca en el espacio de políticas públicas con enfoque sistémico.

Referente a la materia de sustentabilidad, se han desarrollado diversas herramientas para el apoyo a la toma de decisiones a lo largo de la historia. Algunas de estas contribuyen a estructurar o establecer un procedimiento para el análisis, generar espacios de participación entre incumbentes, estudiar panoramas futuros, representar la realidad de manera simplificada y/o examinar elementos físicos del problema [156]. Estas herramientas se pueden categorizar en términos temporales respecto al momento de aplicación de políticas públicas como hito, esto es, ex-ante y/o ex-post. El uso de indicadores como herramienta complementaria tiene incidencia en ambos espacios temporales. Por un lado, los indicadores pueden asistir la descripción de la situación y tendencias actuales con datos pasados (análisis retrospectivo), y por otro lado pueden operar con datos provistos por modelos o escenarios futuros (análisis prospectivo) [55].

En este capítulo se presenta una propuesta de integración de indicadores en estos dos análisis temporales, ex-ante y ex-post, y la relación entre sí. En primer lugar, se bosqueja la estructura necesaria para integrar el set de indicadores con una finalidad de descripción, en la herramienta “evaluación y monitorización”; todo lo anterior con información pasada-real (análisis retrospectivo). En segundo lugar, se describe el proceso para el uso del set de indicadores en un análisis prospectivo, particularmente en base a

la herramienta “escenarios energéticos de largo plazo”, el cuál es un elemento clave en la toma de decisiones del sector [157]. Por último, se problematiza la posible incorporación de políticas públicas medioambientales (presentadas en la Sección 2.4.4) como respuesta a las señales de los indicadores propuestos.

4.1. Descripción general de la propuesta de integración de indicadores de EC a la toma de decisiones del sector eléctrico

Previo a presentar el esquema de integración de los indicadores, vale la pena mencionar cuáles son las posibles aplicaciones de estos. Dichas aplicaciones se ilustran en la Tabla 4-1 [55]. Así, el uso de los indicadores aporta a responder distintas preguntas. Algunas de estas preguntas corresponden a un ejercicio de análisis pasado o retrospectivo, mientras otras preguntas corresponden a un ejercicio de análisis futuro o prospectivo; incluso hay preguntas que aportan en ambas categorías.

Tabla 4-1 Aplicaciones de indicadores, y preguntas clave que apuntan a responder

Aplicación	Pregunta principal
Describir	¿Qué está sucediendo?
Pronóstico	¿Hacia dónde nos dirigimos?
Revisar	¿Cómo lo estamos haciendo?
Diagnóstico	¿Cómo llegamos hasta aquí?
Decidir	¿Qué deberíamos hacer?
Contabilizar	¿Quién es responsable?
Aprender	¿Cómo podemos mejorar?
Comunicar	¿Cómo comunicamos a otros?

El uso de indicadores no puede verse meramente desde una perspectiva “racional-positivista”, en donde se reduce la utilidad al análisis, comparación y/o cumplimiento de parámetros cuantitativos según objetivos; i.e. aspecto técnico de las preguntas de la Tabla 4-1. La perspectiva “discursiva-interpretativa”, por su parte, argumenta que los indicadores cumplen un rol en la definición e interpretación de los problemas sociales, dado su impacto en la narrativa y forma de presentar el tópico en cuestión; i.e. aspecto comunicativo de las preguntas de la Tabla 4-1. Por último, una perspectiva “estratégica”, defiende su impacto en espacios de negociación y/o competencia entre dos partes [158].³⁵

Continuando con el punto central de la sección, se presenta en la Figura 4-1 el esquema con dos herramientas para la toma de decisiones del sector eléctrico donde se introduce o integra el set de indicadores

³⁵ Esta tipificación (“racional-positivista”, “discursiva-interpretativa” y “estratégica”) pertenece al campo de estudio de la política y el uso de indicadores en este ámbito. Si bien no se profundiza mayormente en dichos conceptos para este trabajo, es conveniente mencionarlo por su importancia en los procesos formales del uso de indicadores.

propuesto como apoyo. Como se mencionó, este esquema trata de manera exclusiva el subconjunto de toma de decisiones de políticas públicas. Así, las herramientas a considerar (monitoreo y evaluación, y análisis de escenarios) se localizan en una línea temporal según su naturaleza retrospectiva o prospectiva. Por último, es relevante mencionar que este diagrama no busca ilustrar el proceso completo de la gestación de políticas públicas, sino que la intersección entre éstas y procedimientos técnicos de tomas de decisiones ambientales-energéticas (eléctricos).

Respecto a la simbología en la Figura 4-1, las formas rectangulares representan procesos, análisis, componente por definir en contexto (elementos del “Monitoreo y Evaluación”) o elementos sujetos a modificaciones y escrutinios. En cuanto a los colores, los rectángulos naranjos representan la herramienta de apoyo a la toma de decisiones en cuestión. Así, a la izquierda se encuentra la herramienta “Monitoreo y Evaluación”, el cual se lleva a cabo por el set de indicadores eminentemente. Por otro lado, a la derecha, se encuentra la herramienta “Análisis de Escenarios”, el cual se encuentra **apoyado** por la vinculación y uso del set de indicadores. Los cuadros verdes, por su parte, representan el uso del set de indicadores en dicho proceso cuando el contenido está escrito con tipografía color blanco. El cuadro verde con tipografía color negro representan un contexto de sustentabilidad en el cual se enmarcan los compromisos nacionales e internacionales. Por último, la forma de ficheros representa fuentes de información de diversa procedencia.

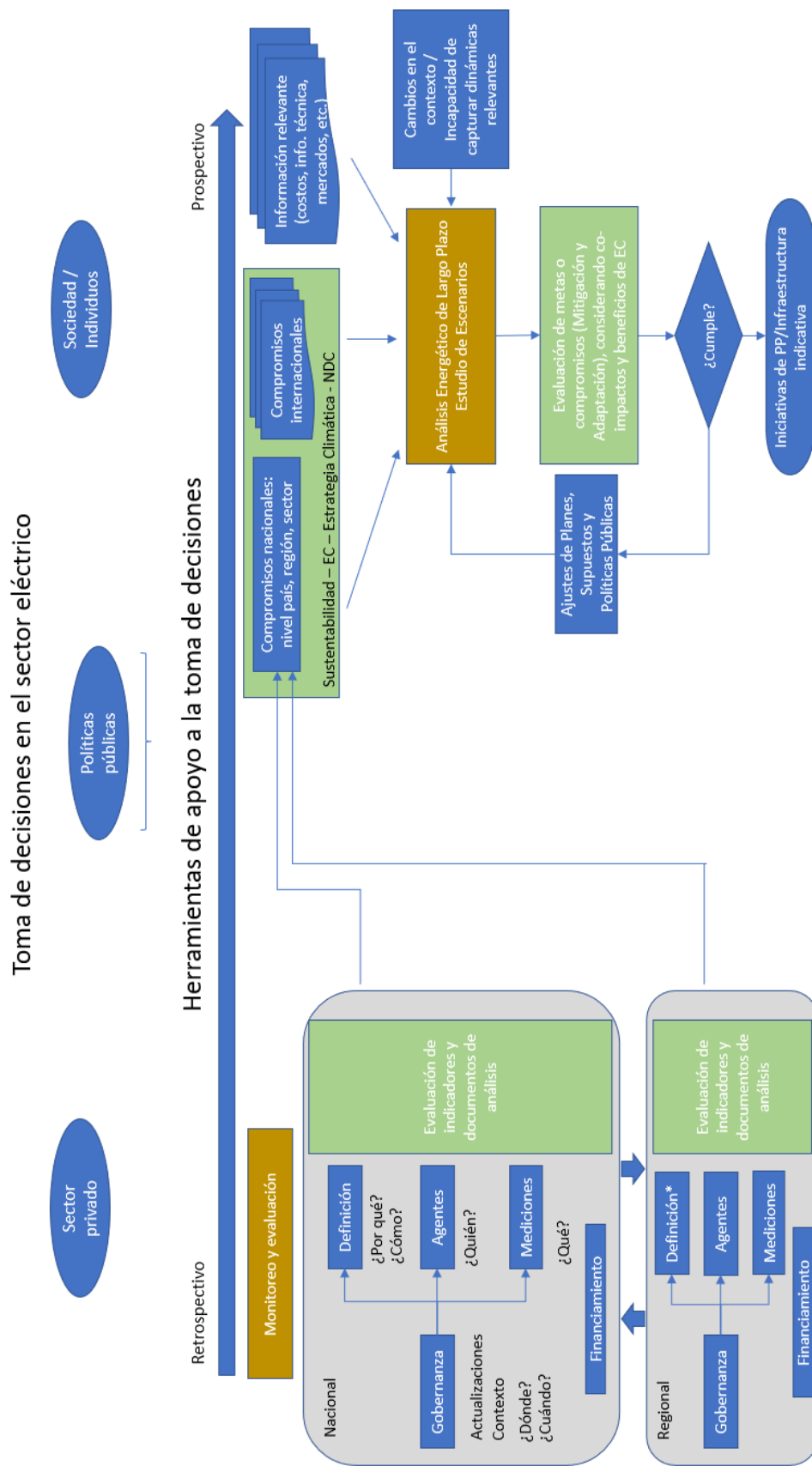


Figura 4-1 Representación esquemática de dos herramientas para la toma de decisiones pública del sector eléctrico chileno

4.2. Monitoreo y evaluación

Para el ejercicio de Monitoreo y Evaluación, el cual se entiende como la instrumentalización “natural o “común” de un indicador [159], se presenta una estructura general en la Figura 4-1. Esta estructura se desagrega desde una entidad, o grupo de entidades, que cumplen con la función de gobernanza. Gobernanza se entiende como el ejercicio de salvaguardar la organización e interacción entre los agentes, definir sus roles, representar el proceso ante el exterior y guiar su buen desempeño. Además, esta entidad es la encargada de mantener constantemente vigente la misión de la herramienta frente a un contexto cambiante.

Supeditados a la o las entidades gobernantes, se encuentran los elementos de definición, agentes y mediciones. Por último, y de manera aislada a la orgánica central, se considera el financiamiento como un componente clave a abordar para la aplicación y mantención de indicadores. Cada uno de estos elementos se presentan brevemente a continuación.

Definición: Este elemento busca capturar el propósito y la forma, el ¿Por qué? y ¿Cómo? del ejercicio de implementar el set de indicadores en el problema. Algunos puntos relevantes a cubrir pueden ser:

- Establecimiento de objetivos
- Metodología para cumplir objetivos
- Alcances
- Criterios de análisis

Agentes: Este elemento busca establecer quienes serán los agentes encargados de cada sector de implementar el set de indicadores en el problema, por tanto responde al ¿Quién? Algunos puntos relevantes a cubrir pueden ser:

- Responsables de recopilación y mantención de base de datos
- Responsables de análisis
- Responsables de comunicación

Mediciones: Este elemento, el cual responde al ¿Qué? y ¿Cuánto?³⁶, y busca definir de manera clara cuales son los datos relevantes para el análisis y sus fuentes, realizar el análisis correspondiente, y generar un reporte de comunicación. Esto requiere aplicar el marco conceptual ew-MFA a la región particular y escoger un modelo material. Algunos puntos relevantes a cubrir pueden ser:

- Aplicación de marco conceptual ew-MFA

³⁶ La pregunta ¿Cuánto? guarda relación con el procesamiento, análisis y posterior comunicación de los datos.

- Definir fuentes
- Definir el modelo material a utilizar
- Transparentar criterios de obtención de datos
- Análisis
- Reporte - Comunicación

Financiamiento: Este elemento no se deja supeditado completamente a la gobernanza de la herramienta debido a que se asume un financiamiento externo, pero la institucionalidad gobernante podría ser quién ordene y gestione los gastos.

Un punto relevante a mencionar es la ilustración explícita de dos dimensiones de gobernanza, nacional y regional. Lo anterior guarda relación con el ordenamiento territorial de cada país, el que asigna distintos niveles de administración a cada categoría de superficie, ya sea regional, estatal o incluso comunal. Esto se observa tanto en países federales como unitarios. Las flechas que unen ambas dimensiones representan la interacción coherente entre estas mismas. Por ejemplo, el modelo material utilizado en distintas escalas de análisis debería ser consistente entre sí. Asimismo, es razonable esperar que los objetivos nacionales y regionales de economía circular, representado a través del uso de indicadores, estén alineados.

4.3. Análisis Energético de Largo Plazo, Estudio de Escenarios

Los análisis energéticos de largo plazo son, actualmente, fundamentales en la discusión sobre el planeta en el cuál queremos vivir [157]. Estos encasillan variables de incertidumbre para distintos futuros, identificando posibles tendencias e impactos del sector eléctrico en el entorno. Suelen utilizar modelos que recogen dinámicas de interés, como se ilustra en la Sección 2.4.3 a propósito del instrumento chileno PELP con AMEBA y LEAP [160].

Los análisis energéticos de largo plazo son ampliamente utilizados en estudios sobre rutas de desarrollo energético bajo en emisiones de carbono. Debido a esto, inciden en el curso de políticas de largo plazo para apoyar o guiar el progreso de los sistemas energéticos en distintos niveles: locales, nacionales, globales, entre otros [160]. Dada su importancia para el sector eléctrico, sumado a la aplicabilidad del set de indicadores sobre las salidas de esta herramienta (escenario-modelo), y el carácter “venidero” o de “generaciones del futuro” de la problemática de recursos, es que se escoge como nicho de estudio interesante para el presente trabajo.

La herramienta de Análisis Energético de Largo Plazo se alimenta, principalmente, por los compromisos adquiridos en materia de sostenibilidad y la información técnica-económica del sector eléctrico (Figura 4-1). Los primeros, i.e. los compromisos, se dividen en dos categorías. Por un lado, están

los compromisos internacionales; estos se representan con una forma de fichero, puesto que al ser compromisos externos se asumen como no modificables por la entidad nacional o territorial. Por otro lado, se encuentran los compromisos nacionales; estos se representan con una forma de rectángulo, puesto que depende de los resultados de “Monitoreo y Evaluación”³⁷ y se asume que la entidad nacional o territorial posee soberanía sobre la modificación de dichos compromisos. Estos conjuntos de compromisos dan forma a las exigencias socioambientales del problema, las que requieren de políticas públicas para su cumplimiento.

Es posible notar que la simbología de compromisos nacionales difiere de la simbología de compromisos internacionales. Esto por cuanto para el primer caso la nación tiene la potestad de ajustar sus objetivos o aplicarlos de manera nacional o regionalmente apropiada, mientras que en el segundo caso los compromisos tienen un carácter más general y rígido frente a la herramienta de estudio de escenarios. Pese a lo anterior, se esperaría que ambas familias de compromisos se encuentren alineadas y potenciadas.

En cuanto a la información técnica-económica representada por el fichero, reúne lo necesario para la resolución de modelos de inversión y operación del sistema eléctrico (AMEBA, por ejemplo). Sin embargo, particularmente para el problema de EC, también incluye la información material de la red (descrita en la implementación del indicador 1 para el ejemplo de la Sección 3.4.1). Al igual que con los compromisos internacionales, se asume que la entidad nacional-territorial no tiene poder de modificar los parámetros de manera directa.

La casilla de “Cambio en el contexto / Incapacidad de capturar dinámicas relevantes” busca endogenizar la cualidad de incertidumbre extrema en un análisis prospectivo. A través de esta se considera la posibilidad de que la herramienta que se apoya con los indicadores, análisis de escenario dados, así como los indicadores mismos, pudiesen quedar obsoletos dado algún cambio en el entorno. Concretamente, en el caso de la PELP, al ser un proceso periódico y continuo se integra inherentemente este aspecto de renovación o actualización en la línea de un contexto cambiante.

El proceso de análisis energético de largo plazo, además de ser alimentado por compromisos e información técnica, evoluciona de manera iterativa al modificar planes, supuestos y políticas públicas que afectan al sector. Con los resultados de cada iteración, y en lo que respecta a la EC, se ofrecen respuestas a cuestionamientos respecto a los compromisos propios de la materia (EC), pero también se ofrecen respuestas a cuestionamientos en relación a compromisos de otros temas; crisis climática, por ejemplo. De esta manera se abre un espectro de análisis de co-beneficios y co-impactos entre distintas temáticas de interés

³⁷ Dependen del “Monitoreo y Evaluación” por cuanto este ejercicio da cuenta del estado actual y las tendencias del sistema, apoyando el establecimiento de metas.

público/social. Una vez alcanzado un punto de conformidad en cuanto a los posibles efectos del desarrollo del sistema, se deja de iterar sobre el esquema, extrayendo un set de Ajuste de Planes, Supuestos y Políticas Públicas necesarios para conducir al sector a este punto objetivo.

Por último, se puede destacar la relación entre las dos herramientas presentadas: Análisis retrospectivo y prospectivo. Por un lado, para el análisis retrospectivo, se propone un marco para estudiar cual es el estado actual del sistema eléctrico a la luz de los criterios de EC, y cómo se ha venido gestando este estado. Esto entrega nociones concretas para guiar compromisos de EC, visibilizando la variable material en el relato coherente de los escenarios energéticos de largo plazo.

Capítulo 5: Caso de estudio, Región de Tarapacá

Para este trabajo se aplica el set de indicadores propuestos en el Capítulo 3: (Sección 3.4) a un caso de estudio en la zona norte de Chile, particularmente en la Región de Tarapacá; por tanto, el ejercicio tiene un alcance regional³⁸. La implementación del set de indicadores se lleva a cabo en uno de los dos espacios de toma de decisiones presentados en el Capítulo 4: el espacio ex-ante, esto es, se lleva a cabo sobre un Análisis Energético de Largo Plazo. Para realizar lo anterior, se utiliza uno de los instrumentos en que el Análisis Energético de Largo Plazo toma forma para el contexto chileno: la Proyección Energética de Largo Plazo (PELP, Sección 2.4.3).

El capítulo se estructura de la siguiente manera. En primer lugar, se presenta la adaptación de la metodología de integración desarrollada en la Sección 4.3 al contexto del instrumento PELP. En segundo lugar, y a la luz de la propuesta de indicadores de la Sección 3.4, se enuncia la información requerida para alimentar el cálculo de estos indicadores, además de las fuentes a utilizar. En tercer lugar, se presentan como preámbulo al cálculo de indicadores las dinámicas particulares de la información de entrada. Por último, se calculan los indicadores propuestos y se presentan los exponen.

5.1. Adaptación de la integración de indicadores a la toma de decisiones del caso de estudio

Con la finalidad de narrar la adaptación de la metodología propuesta en la Sección 4.3 al instrumento chileno PELP, particularmente en la región de Tarapacá, se presenta en la Figura 5-1 el esquema metodológico genérico de este espacio de toma de decisiones. A continuación, se procede a discutir la pertinencia y configuración de cada una de las actividades ilustradas en el diagrama de flujo para el caso de estudio.

Vale la pena comenzar notando que, según lo expuesto en la Sección 4.1, existe una conexión entre los ejercicios ex-ante y ex-post, espacios de aplicación de los indicadores. Un diagnóstico de la situación actual y pasada (ejercicio ex-post) puede contribuir, entre otras cosas, al diagnóstico actual y la fijación de objetivos o metas futuras. En esa línea, si bien en el presente trabajo no se analiza la aplicación ex-post de los indicadores, es posible incluir metas de EC para alimentar el análisis prospectivo del sector eléctrico de

³⁸ Es importante destacar que el ejercicio tiene un carácter regional exclusivamente por aplicarse en una región. Los indicadores no varían ni requieren adaptación según la expansión o ubicación del territorio en donde se implementan.

manera exógena. Esta conexión se ilustra en la Figura 5-1 con flechas entrando al recuadro de compromisos nacionales.

En el recuadro de compromisos de sostenibilidad se estructura el marco de acción, presente y futuro, del sector eléctrico chileno. Cobran particular peso, como se menciona en la introducción del texto, los compromisos en materia de emisiones de GEI. Según lo revisado en la Sección 2.4.5, y en lo que respecta al campo internacional, el Acuerdo de París exige la elaboración y renovación periódica de la NDC, además de recomendar la formulación de la ECLP. Este último documento plantea, entre otras cosas, una ruta para llegar a la carbono neutralidad al año 2050. En el contexto nacional, se espera que a través del PLMCC (Proyecto de Ley Marco sobre el Cambio Climático) se genere un lazo jurídicamente vinculante con la ECLP, y por tanto de la carbono neutralidad al año 2050.

En lo que respecta a la intersección de la energía eléctrica con lo material, sujeto de estudio del presente trabajo, existen rutas incipientes para fijar compromisos. Un ejemplo de lo anterior es la Ley Marco para la Gestión de Residuos, la Responsabilidad Extendida del Productor y Fomento al Reciclaje (Ley REP), presentada en la Sección 2.4.5. Sin embargo, y a diferencia de lo que sucede con la ECLP y PLMCC, la Ley REP tiene como principal objetivo de mejora el uso de recursos en productos y no en sistemas. Pese a que el enfoque producto tiene impactos en el enfoque sistémico, lo que se podría incluir en el análisis, no hay registro de implementación vigente de la Ley REP o compromisos relacionados en el sector; es por lo anterior que no es un parámetro a considerar a priori.

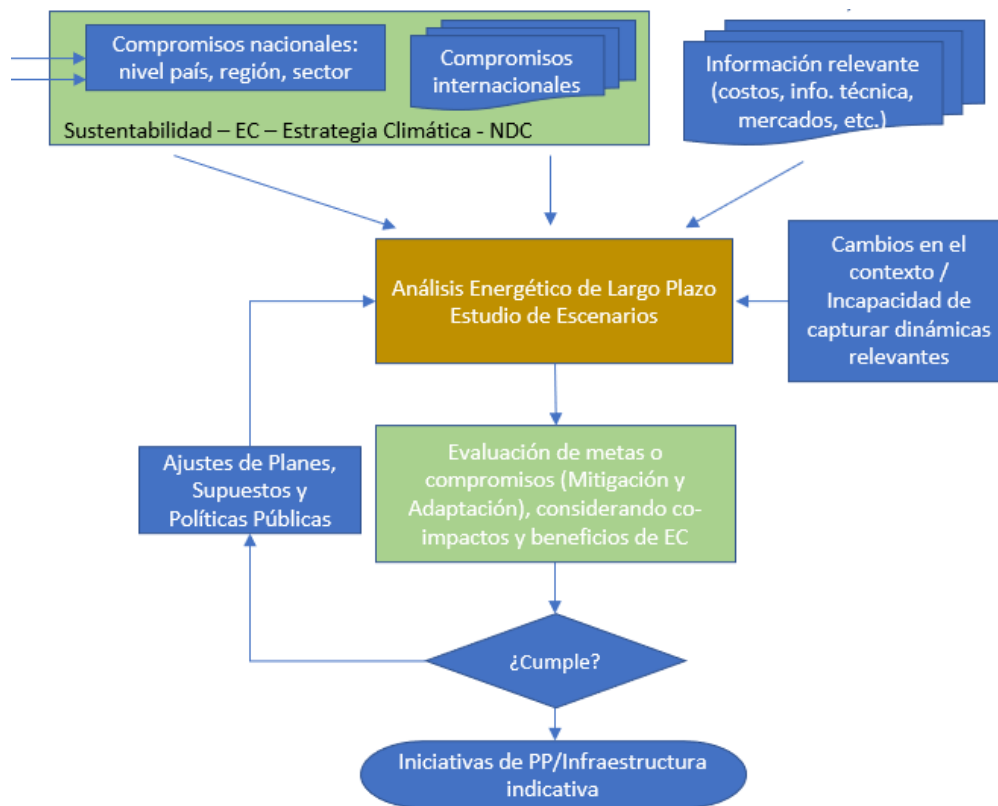


Figura 5-1 Esquema metodológico Análisis Energético de Largo Plazo, Estudio de Escenarios.

Respecto a la “Información Relevante” para realizar un Análisis Energético de Largo Plazo, la PELP considera actualmente una amplia gama de parámetros: precios de combustibles, disminución de costos de tecnologías ERNC, crecimiento económico, emisiones locales y globales, inserción de nuevas tecnologías, operación de red eléctrica, integración internacional, eficiencia energética, entre otros. Sumado a lo anterior, y como se hace hincapié al finalizar la Sección 2.4.3, “... la planificación deberá considerar dentro de sus análisis los planes estratégicos con los que cuenten las regiones en materia de energía.”. Así, todos los factores anteriores determinan el uso de recursos del sector eléctrico.

Por último, el proceso que vigila los “Cambios en el contexto, o Incapacidad de capturar dinámicas relevantes”, queda cubierto por la periodicidad de la realización de la PELP.

El esquema genérico descrito anteriormente se traduce al lenguaje PELP en la Figura 5-2. Ésta es la versión expandida del esquema expuesto en la Figura 2-11 (Sección 2.4.3). Para facilitar la relación entre los dos diagramas (genérico y PELP), se procura utilizar colores similares para elementos análogos, en la medida de lo posible. Además, se explicitan los elementos que se requieren agregar al proceso para el uso adecuado de los indicadores.

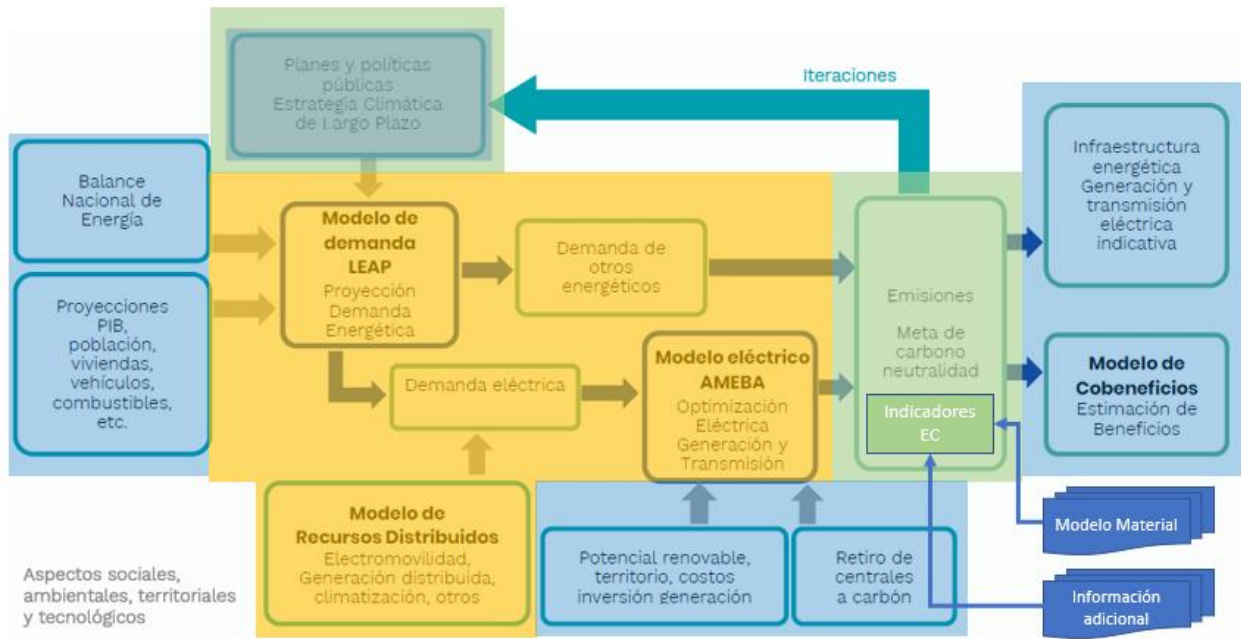


Figura 5-2 Relación metodológica del proceso PELP, adecuada al uso de indicadores de EC (modificado de [105]).

Comenzando con la relación entre los dos esquemas, se tienen los compromisos nacionales e internacionales en el marco de la sostenibilidad. Para PELP, estos se ven representados por el recuadro de Planes y políticas públicas, Estrategia Climática de Largo Plazo (recuadro azul dentro del recuadro verde). Ahora bien, es claro que no toda la información contenida en el recuadro de políticas públicas son compromisos. Sin embargo, se considera “información relevante” que está íntimamente relacionada con estos, y bajo el control del Ministerio Público.

Se ilustra la herramienta de toma de decisiones: el Análisis Energético de Largo Plazo, particularmente el Estudio de Escenarios. Este espacio se ilustra en el esquema PELP como el conjunto de modelos que constituyen el procesamiento de la información, así como los resultados intermedios entre estos, lo que se presenta dentro de un área color naranja. En particular, el centro de análisis se constituye por el Modelo LEAP, el Modelo AMEBA, y el Modelo de Recursos Distribuidos.

Siguiendo con la relación entre los esquemas, el fichero de “Información relevante” está cubierto por distintas entradas en el esquema PELP. Se encuentran los cuadros azules de “Balance Nacional de Energía” y de misceláneos que alimentan al modelo LEAP, así como también los cuadros azules de “Retiro de centrales a carbón” y misceláneos que alimentan al modelo AMEBA. La información anterior es necesaria, pero insuficiente para calcular los indicadores de EC elaborados y/o seleccionados. En particular, es esencial contar con una contabilidad detallada de la infraestructura³⁹. En segundo lugar, es imprescindible contar con

³⁹ Si bien esta información se encuentra en alguna medida, se hace hincapié en la necesidad de detalle.

un modelo material para traducir la infraestructura y la operación del sistema en recursos. Por último, en la medida de lo posible, se requiere una referencia detallada de los impactos de medidas de eficiencia energética⁴⁰. Dichos agregados se contemplan en los ficheros “Información adicional” y “Modelo material”.

Las salidas de los modelos alimentan la evaluación y análisis de compromisos y beneficios sin considerar aspectos de EC. Para poder incluir este último aspecto en la discusión, se requiere agregar además la información adicional descrita, tal y como se ilustra en la Figura 5-2. El cuadro verde que contiene “Emisiones”, “Meta de carbono neutralidad” e “Indicadores de EC” contempla la evaluación de metas, así como también el rombo de decisión del esquema genérico.

Por último, se ilustra la propiedad iterativa del esquema genérico en el esquema PELP a través del lazo cerrado que va desde la evaluación de las salidas del modelo hasta. Además, se obtienen y analizan las salidas del proceso completo en los cuadros de “Infraestructura indicativa” y “Modelo de Cobeneficios”.

5.2. PELP 2023 – 2027, Región de Tarapacá

El uso de indicadores tiene por objetivo evaluar los resultados del proceso PELP 2023 – 2027 que se obtuvieron para los distintos escenarios energéticos planteados en dicho espacio de toma de decisiones, a la luz del campo de economía circular. Como se menciona en la Sección 2.4.3, los escenarios son narrativas que configuran de manera coherente las distintas variables de interés para el sector eléctrico y sus magnitudes para cada caso. Los escenarios que se consideran en el proceso PELP 2023 – 2027 son tres: Carbono Neutralidad, Recuperación Lenta y Transición Acelerada.

Algunas características generales del proceso PELP 2023 – 2027 se presentan a continuación:

- El tiempo de estudio corresponde al periodo 2020 – 2060, es decir cubre un rango de 40 años, y la resolución con la que se entregan los resultados es anual; por ejemplo, instalaciones anuales, o generación anual.
- El espacio cubierto por el ejercicio contempla todo el territorio nacional, y la resolución con la que se entregan los resultados es regional; por ejemplo, instalaciones por región, o generación por región.
- La resolución con la que se entregan los resultados de infraestructura eléctrica abarca los subsectores de Generación y Transmisión del sistema eléctrico. No obstante lo anterior, si se

⁴⁰ Si bien esta información se contempla en el modelo, no se transparenta una contabilidad de impactos de las medidas de eficiencia energética en el sistema.

consideran aspectos del subsector Distribución, como por ejemplo las características de consumo, o generación distribuida.

- Las tecnologías que se consideraron en el proceso PELP 2023 – 2027 dentro de la Región de Tarapacá, ya sea como instalaciones existentes o por construir, corresponden a plantas de carbón, diésel, hidráulicas de pasada, almacenamiento (BESS y bombeo), solar CSP y solar FV.

5.3. Fuentes de información

En esta sección se introducen las principales fuentes que alimentan, para el caso de estudio, el cálculo de los indicadores elaborados y/o seleccionados. La presentación de dichas fuentes se organiza a partir de los requerimientos de información de los mismos indicadores, que se muestran en la Figura 5-3. Se describe someramente, además, el tratamiento de los datos para facilitar su uso en cada situación. En relación a esto último, se presentan los supuestos a considerar.

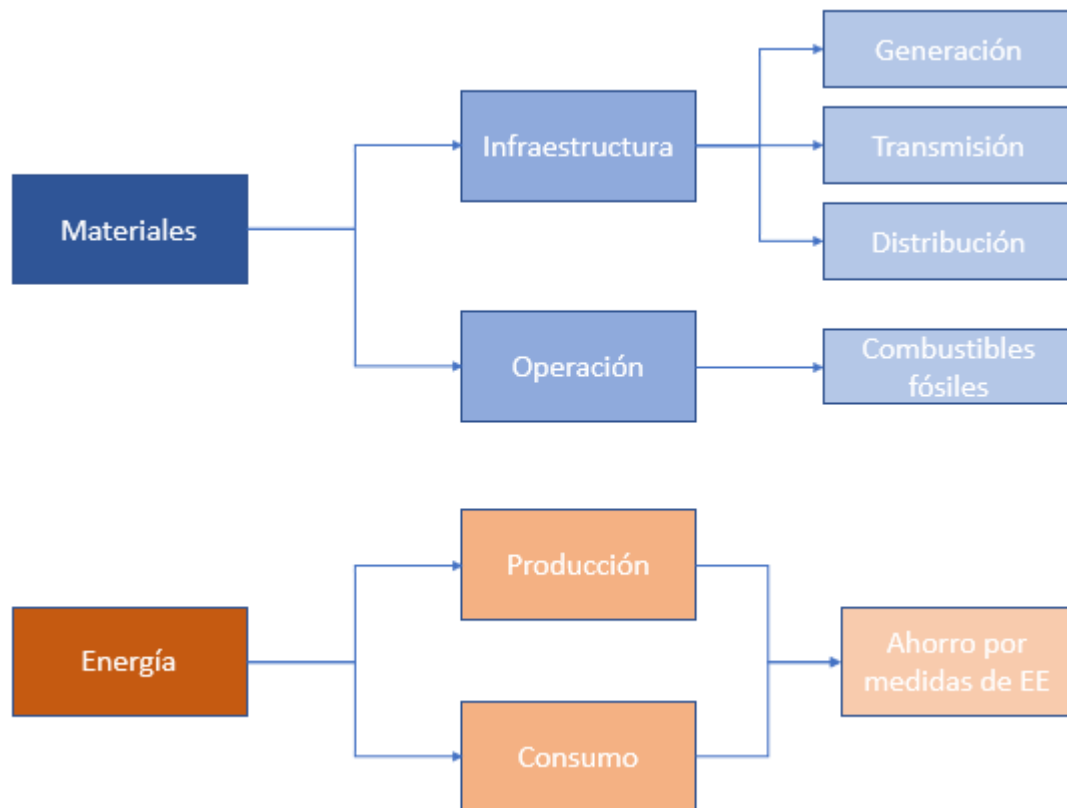


Figura 5-3 Requerimiento de información para calcular indicadores⁴¹

Ahora bien, para el caso de estudio se opta por limitar o simplificar el alcance de los indicadores, por el costo (temporal) que implica recabar y organizar una mayor cantidad de información. Así, tal y como se hizo para el ejemplo presentado en la Sección 3.4.1, se calculan exclusivamente los indicadores DMR_{cap} y DMA_{cap} . Además, de los tres subsectores que se contemplan dentro de la infraestructura, se toman en cuenta exclusivamente la Generación y Transmisión para el cálculo de indicadores. Lo anterior ignorando la Distribución como infraestructura, no como consumo, principalmente debido a la resolución del proceso PELP.

5.3.1. Expansión de la infraestructura de generación y generación energía eléctrica

En primer lugar, se presenta la expansión de la infraestructura del subsector Generación (Figura 5-4). Esta información es pública, se obtiene de la dirección web oficial del último proceso quinquenal PELP (2023 – 2027) [105], y considera cada uno de los escenarios energéticos del proceso PELP: Carbono

⁴¹ El “no-consumo”, o ahorro por medidas de EE, se conceptualiza como producción y como consumo. Sin embargo, para la obtención de información de este caso de estudio, las medidas de EE están íntimamente ligadas al consumo.

Neutralidad, Recuperación Lenta y Transición Acelerada. Como parte de los datos de infraestructura se contemplan, entre otras cosas, la tecnología de cada central de la región, su dimensión y el año de construcción. Lo anterior incluye la condición inicial de infraestructura (existente) para el año 2020. A continuación, en la Figura 5-4, se presentan los datos de forma gráfica.

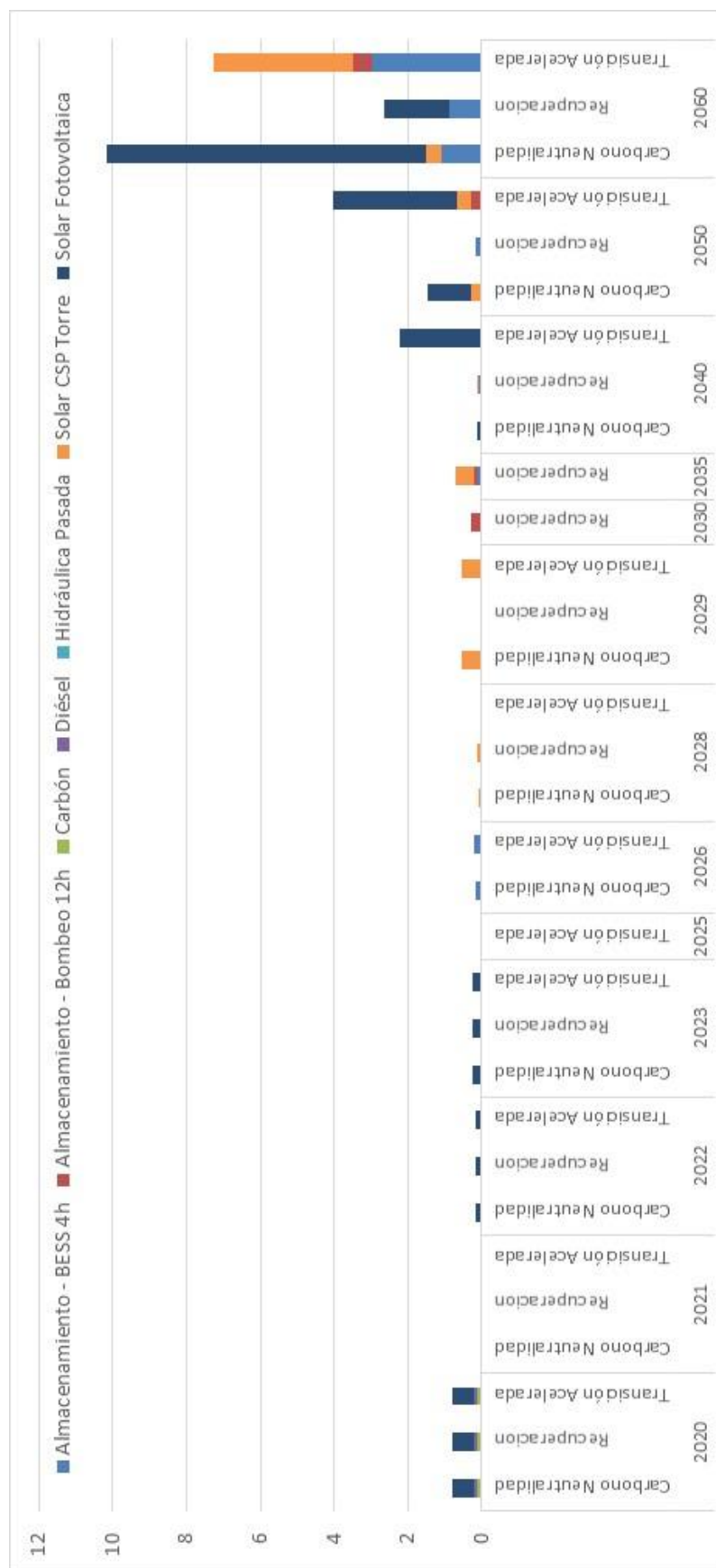


Figura 5-4 Expansión de la generación, Región de Tarapacá, PELP 2023 – 2027.

En segundo lugar, se presenta la generación o producción eléctrica (Figura 5-5). Esta información, al igual que la anterior, es pública y se obtiene en el mismo sitio web oficial. También considera cada uno de los escenarios energéticos del proceso PELP. Como parte de los datos de generación se contemplan, entre otras cosas, la tecnología de cada central de la región, la cantidad de energía generada anualmente y el factor de emisión de cada tecnología. En la Figura 5-5 se presentan los datos de forma gráfica.

Como se puede observar, después del año 2030 la resolución de los datos ya no es anual, sino quinquenal o decenal. Considerando que los indicadores requieren resolución anual, los valores ausentes se rellenan repitiendo el último dato conocido. De esta forma, la generación energética anual de los años 2031 – 2034 es idéntica a la del año 2030. Este método de interpolación se escoge por simpleza, sin desmedro de la existencia de otro más apto.

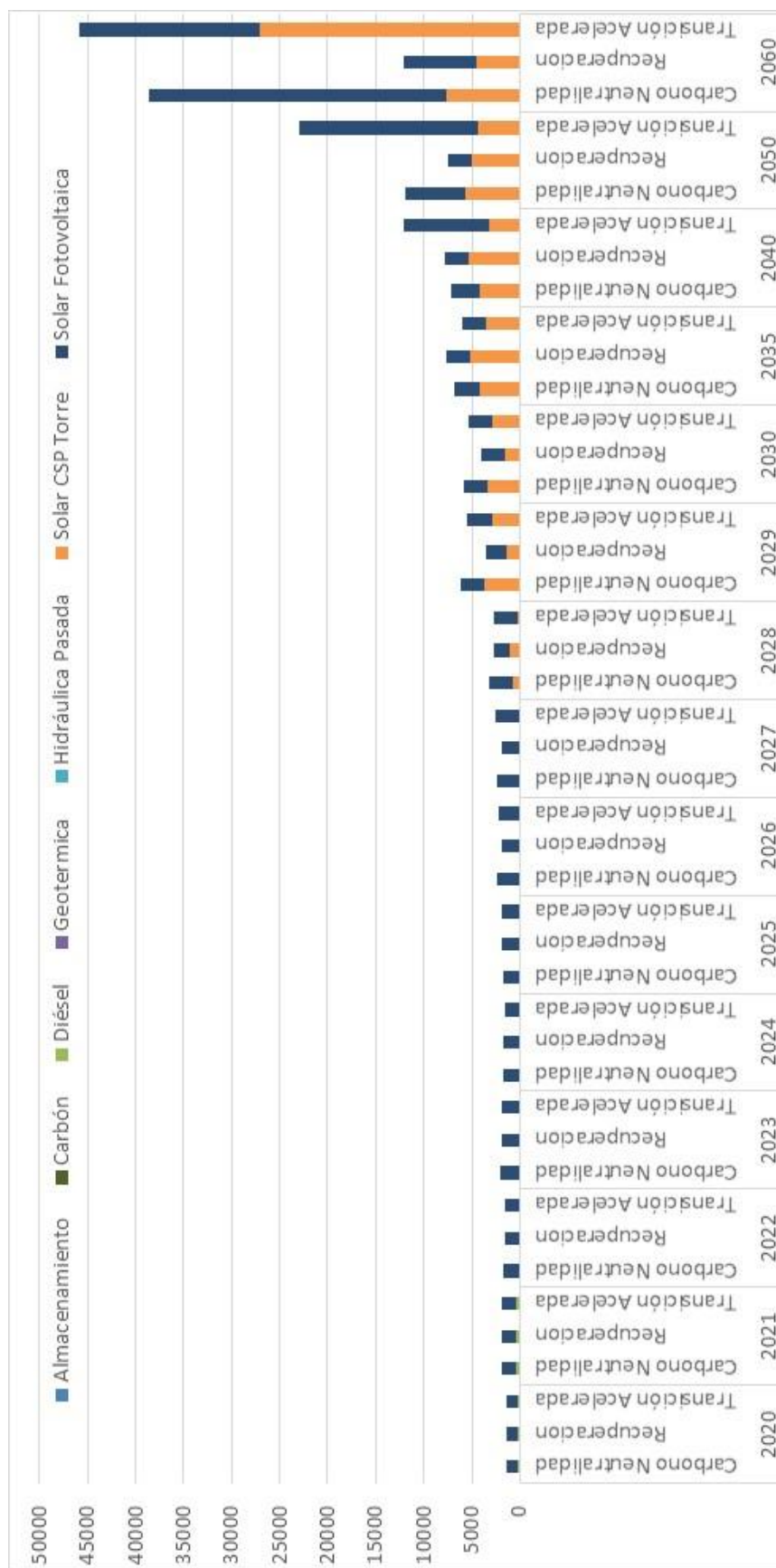


Figura 5-5 Producción de energía eléctrica, Región de Tarapacá, PELP 2023 – 2027.

5.3.2. Infraestructura de transmisión: Líneas, subestaciones y transformadores

Si bien la base de datos pública del proceso PELP contiene información sobre la infraestructura del sistema más allá de las instalaciones de generación, existe sitios del Ministerio Público que puede apoyar con datos para refinar los resultados. En particular, se utilizan las fuentes del sistema de Transmisión mantenidas por el Coordinador Eléctrico Nacional (Infotécnica)[161]. De aquí se extrae la longitud de cada línea que participa en el territorio y las subestaciones que lo integran. Por último, se utiliza el diagrama unilineal de la Región (se presenta a modo ilustrativo en la Figura 5-6) para contrastar la información anteriormente recabada (Infotécnica) e incluir la cantidad de transformadores a considerar en el análisis material.

A continuación, se presenta una lista de los supuestos tomados en cuenta:

- Todas las líneas tienen la misma constitución material por unidad de largo (km), independiente de su tensión nominal.
- Se considera la mitad del largo de las líneas que cruzan el límite regional como aproximación de la distancia perteneciente a la región e ilustración de la contabilidad de estos casos.
- Todas las subestaciones tienen la misma constitución material.
- Sólo se incluyen en el análisis los transformadores de poder de capacidad mayor a 1 MVA.
- Todos los transformadores contabilizados tienen la misma constitución material.
- Se aplica un recambio a la infraestructura según su año de entrada al sistema y la vida útil descrita en el modelo material, Sección 5.3.5.

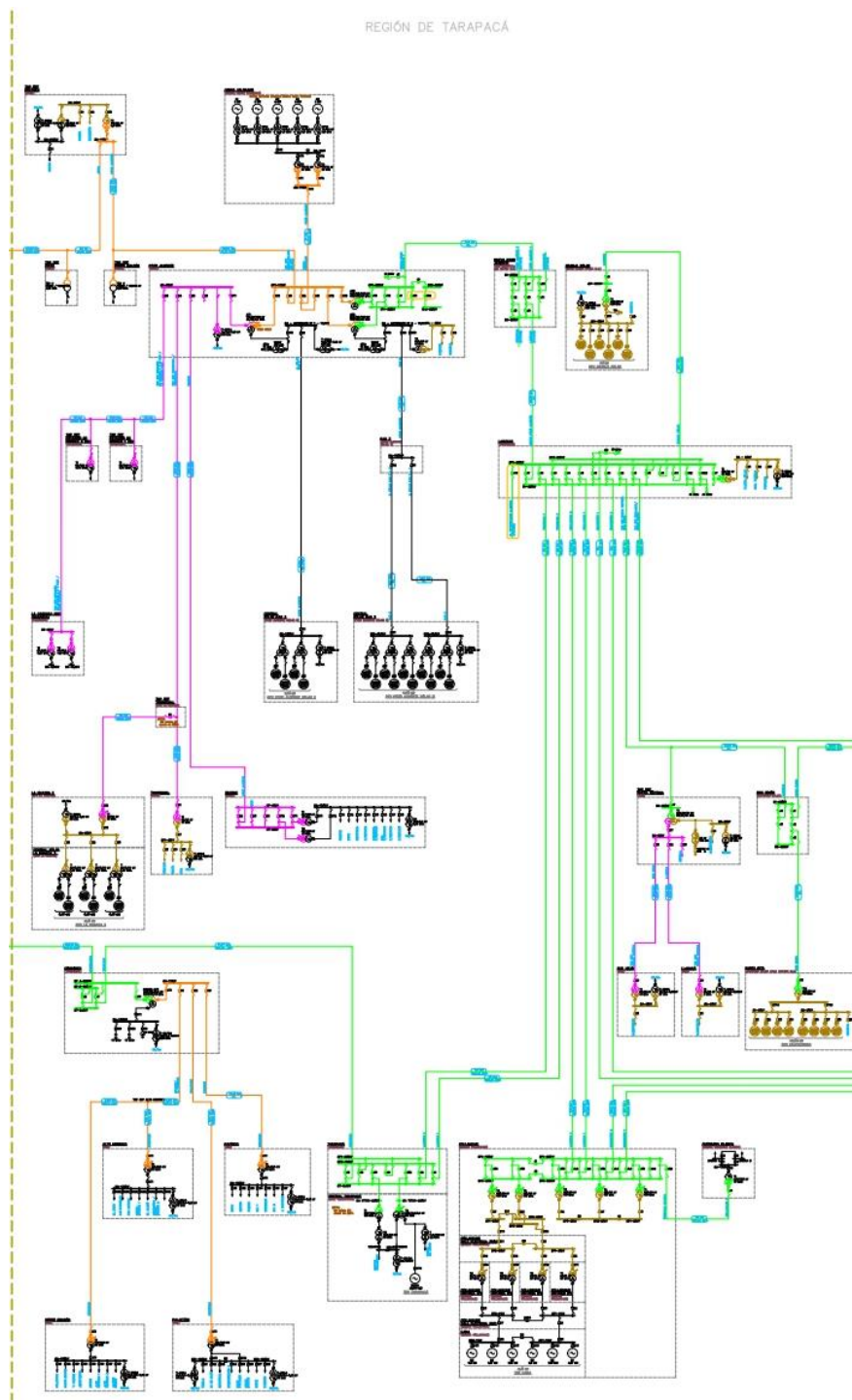


Figura 5-6 Diagrama unilineal Región de Tarapacá, ilustración representativa [161].

5.3.3. Demanda eléctrica

Si bien la información de la demanda eléctrica se emplea en los modelos contenidos en el proceso PELP 2023 – 2027, ésta no se encuentra disponible en su forma procesada en la plataforma web pública. Es por esto que se solicitaron los datos que constituyen los gráficos presentes en el Informe Preliminar PELP

2023 – 2027 pág. 121-122 [105] de forma bilateral a la Unidad de Planificación Energética y Nuevas Tecnologías del Ministerio de Energía. Dicha información, para los tres escenarios energéticos, se presenta en la (Figura 5-7).

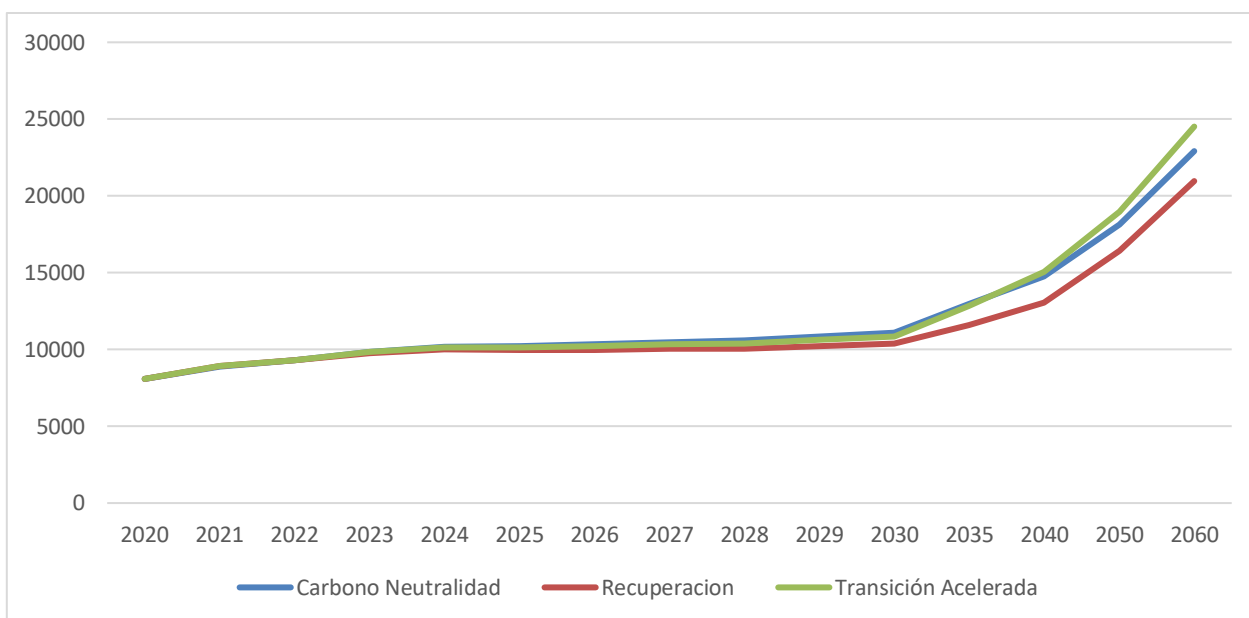


Figura 5-7 Demanda eléctrica de la Región de Tarapacá.

Es necesario dejar de manifiesto que la demanda eléctrica de la Figura 5-7 ya considera las medidas de eficiencia energética. Además, no existe una fuente con el consumo “benchmark” del sistema como punto de comparación. Esto crea la obligación de escoger algún método para extraer dinámicas de comparación de escenarios con y sin eficiencia energética sobre el caso de estudio, sin necesariamente aspirar a representar el caso real.

5.3.4. Eficiencia Energética

En el ejercicio PELP 2023 – 2027, la variable de eficiencia energética se representa dentro del sistema a través del cumplimiento de la Ley de Eficiencia Energética (LEE), complementado por distintos objetivos dependiendo del escenario. Esto se presenta en la Figura 5-8. En base a esto, y como se expuso en la Sección 2.4.5, se fijan metas de eficiencia para el **sistema energético** (Figura 2-16).

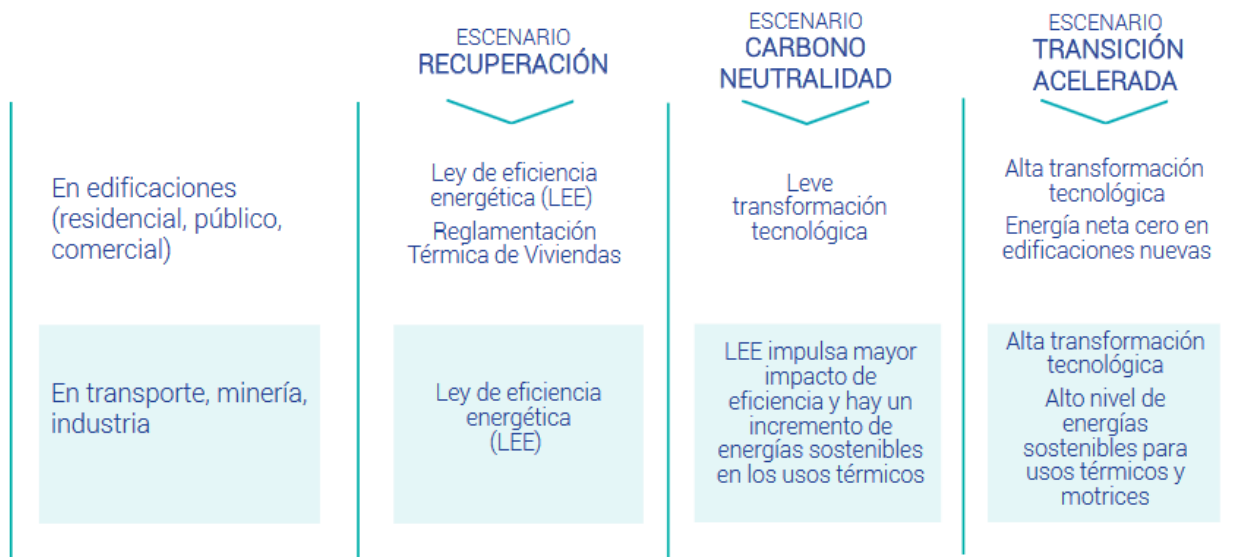


Figura 5-8 Consideraciones de eficiencia energética dentro del proceso PELP 2023 – 2027.

Para el presente trabajo, es importante notar la siguiente característica: No es claro identificar de manera sencilla el efecto de las medidas de la propuesta de Plan sobre el **sistema eléctrico**. Lo anterior puesto que, mientras existen medidas que apuntan a disminuir la intensidad del **consumo eléctrico**, otras medidas tienen como consecuencia aumentar esta intensidad del **consumo eléctrico**; por ejemplo, al promover la electrificación de otros tipos de consumo. Este problema, heredado de la homologación de distintos tipos de energía bajo una definición, también se ve reflejado en las metas propuestas, tanto sectoriales como globales. Por ejemplo, “reducir la intensidad energética” (meta global) considera los efectos del conjunto de medidas, pero también de las sinergias e interacciones entre ellas.

Hay otras dos características relevantes para el presente trabajo. En primer lugar, las metas de eficiencia energética establecidas en la propuesta de Plan corresponden a la mejora de una ratio entre el consumo energético del país y el PIB resultante (productividad o intensidad), respecto a esta medida para el año 2019. Con esto en mente, vale la pena preguntarse qué información se puede extraer para los niveles de consumo, y por tanto de ahorro, de cada año. Si bien la variable de consumo energético tiene una influencia en el PIB, la relación no es trivial. En particular la forma de proyectar el PIB para años futuros “asume una función de producción neoclásica de retornos constantes a escala del tipo Cobb-Douglas, donde los factores productivos, trabajo (LT) y capital físico (K), y la productividad total de factores (PTF) se relacionan con el nivel de PIB (Y) a través de la expresión $Y = PTF \cdot K\beta(LT)(1 - \beta)$, donde $1 - \beta$ representa la razón entre los ingresos de los trabajadores y el PIB.” [162]

En pocas palabras, es claro decir que la proyección del PIB considera más factores que el energético, y por lo tanto se entiende que puede haber variaciones (aumentos o disminuciones) en el valor del PIB al

margen de este sector (energético). Lo anterior sugiere una dificultad al momento de entender los efectos directos de la eficiencia energética.

En segundo lugar, es bueno mantener presente que las metas a considerar son a nivel global, en contraste con el alcance regional del presente documento. Los impactos del Plan sobre cada región dependen de, entre otras cosas, la estructura económica de ésta.

Con el afán de reflejar el impacto de las dinámicas de eficiencia energética sobre los indicadores de EC del sector eléctrico pese a las problemáticas presentadas, se propone un análisis de escenario de eficiencia energética anidado al análisis de escenario original de la PELP 2023 – 2027.

Análisis de escenario de eficiencia energética anidado

Como se mencionó, existen una serie de elementos que marcan una brecha de incertidumbre entre el sector energético y el (sub) sector eléctrico respecto a la definición de escenarios de eficiencia energética y sus impactos en los resultados del proceso PELP 2023 – 2027. Para incluir el elemento de eficiencia energética en el caso de estudio, se proponen tres escenarios (1,2,3 de la Tabla 5-1). Cada escenario se compone por tres situaciones (Bueno, Malo y Medio), que representan el impacto sobre el sector eléctrico de aplicar medidas de EE en el sector energético. Las consecuencias numéricas de estas condiciones son la aplicación de las medidas EE de manera aumentada sobre el sector eléctrico (Bueno), de manera idéntica (Medio), o de manera disminuida (Malo). Esto se ve reflejado en la Tabla 5-2.

Tabla 5-1 Análisis de escenario de EE anidado

Escenario Eficiencia	Recuperación	Transición Acelerada	Carbono Neutralidad
1	Bueno	Medio	Malo
2	Malo	Bueno	Medio
3	Medio	Malo	Bueno

Tabla 5-2 Impacto numérico de análisis de escenario anidado

Escenario Eficiencia	Recuperación	Transición Acelerada	Carbono Neutralidad
1	$LEE \cdot 1, \bar{3}$	LEE	$LEE \cdot 0, \bar{6}$
2	$LEE \cdot 0, \bar{6}$	$LEE \cdot 1, \bar{3}$	LEE
3	LEE	$LEE \cdot 0, \bar{6}$	$LEE \cdot 1, \bar{3}$

Para modelar el efecto de la LEE de manera anual, se interpolan linealmente las metas impuestas para los años 2026 – 2030 – 2050. Desde el año 2050 en adelante se considera un impacto anual fijo de las medidas de eficiencia energética. Los valores anuales de las metas LEE se reflejan en la Figura 5-9

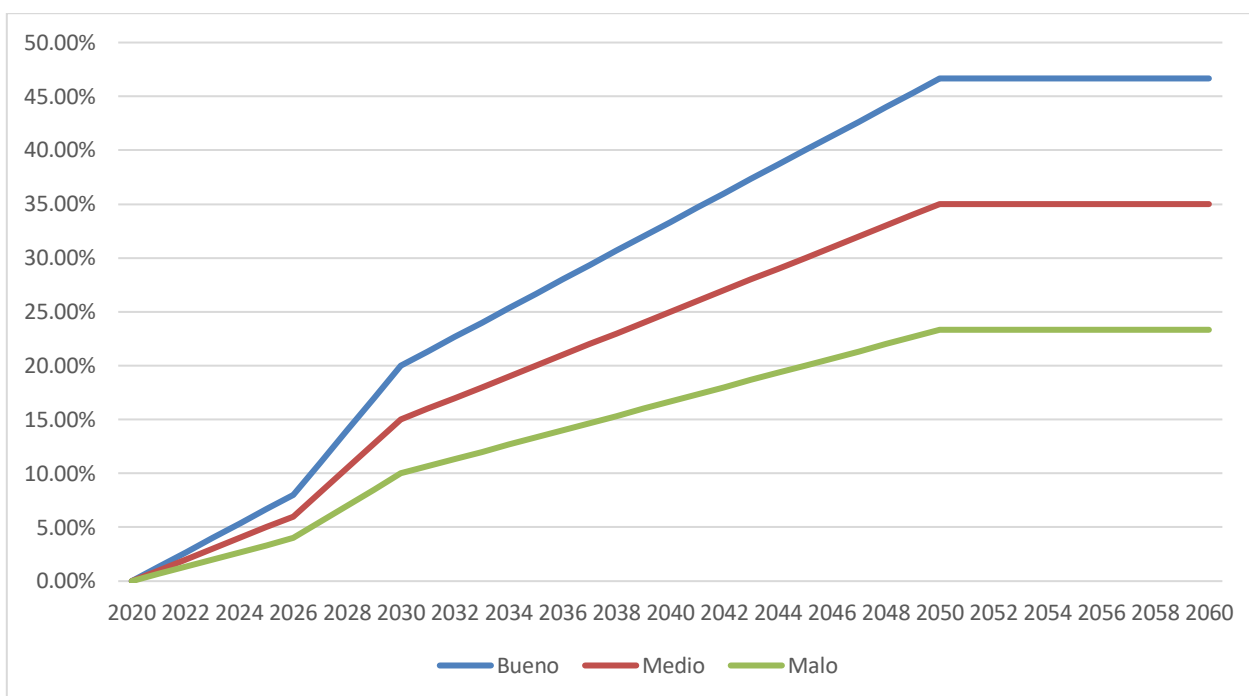


Figura 5-9 Metas anuales de LEE para cada escenario anidado, respecto a la referencia LEE de la Figura 2-16.

Por último, recordando que la demanda eléctrica que se presentó en la Sección 5.3.3 ya contempla las medidas de eficiencia energética (Consumo Real en términos de las expresiones del indicador *AE*), entonces se utilizan los valores de la Tabla 5-2 para despejar la demanda eléctrica sin EE (Consumo Proyectado en términos de las expresiones del indicador *AE*).

5.3.5. Modelo material y factores de caracterización (normalización de materiales)

Como se menciona en la Sección 3.5, la amplia disponibilidad y diversidad de modelos materiales presentes en la bibliografía permite la implementación de los indicadores de EC con diferentes escalas de detalle. Para el presente trabajo se utiliza la información contenida en la Tabla 5-3 y la Tabla 5-4, provenientes de una única fuente. Lo anterior, sin perjuicio de la existencia de otras bases con mayor detalle.

Tabla 5-3 Modelo material infraestructura de generación [154]

Tecnologías Utilizadas	Vida útil técnica [años]	Concreto	Acero	Aluminio	Plomo	Vidrio	Cobre	Cobalto	Unidades
BESS 4h	15	-	0,141	0,05	-	-	0,05	-	%masa ⁴²
Bombeo 12h	80	2833	71	-	0,005	-	1,7	-	ton/MW
Carbón	40	352,8	84,6	0,504	-	-	1,15	0,12	ton/MW
Diésel	40	213,4	72,9	0,6	-	-	0,76	0,07	ton/MW
Hidráulica Pasada	80	283,3	7,1	-	0,0005	-	0,17	-	ton/MW
Solar CSP Torre	25	1351,8	576	5,5	-	156	3,15	-	ton/MW
Solar Fotovoltaica	25	-	150	10,2	0,122	-	6,34	-	ton/MW

Tabla 5-4 Modelo material infraestructura de transmisión [154]

Tecnologías Utilizadas	Vida útil técnica [años]	Concreto	Acero	Aluminio	Plomo	Vidrio	Cobre	Cobalto	Unidades
Transformador AT	30	648	296	0,497	0	0	76,047	0	ton/unidad
HV Line	40	209,138	52,266	12,883	0	1,097	0	0	ton/km
Subestación	40	123,9	14,652	33,204	0	0,00005	4,611	0	ton/unidad

Por último, y como se ilustró al calcular el indicador *DMR* en el ejemplo de la Sección 3.4.2, se utilizan factores de caracterización propios de un ejercicio LCIA sobre el agotamiento de recursos. Para el caso de estudio, se muestran en la Tabla 5-5 los “Potenciales de Agotamiento de recursos Abióticos” (ADP’s por sus siglas en inglés) de los elementos utilizados en el modelo material.

Tabla 5-5 Factor de caracterización ADP Sbeq, herramienta de normalización [147]

	Concreto	Acero	Aluminio	Plomo	Vidrio	Cobre	Cobalto
ADP CF [kg Sbeq/kg]	0,001585	0,0000011	0,000000042	0,019	0	0,027	0,00047

⁴² Para calcular la relación ton/MW se utiliza la capacidad MWh del sistema de baterías instalado, se multiplica por 120 MWh/ton (caracterización de la misma bibliografía), y se divide por cuatro (4) considerando la duración de la tecnología “BESS 4h”.

5.4. Resultados: Indicadores de EC para el sector eléctrico de la Región de Tarapacá

En esta sección se muestran los resultados del cálculo de los indicadores, en base a la información presentada en la Sección 5.3. Además, se incluyen indicadores ambientales clave del sector energético como lo son el porcentaje de capacidad renovable instalada en la región, el porcentaje de generación renovable y las emisiones de CO₂ acumuladas. Exponer la propuesta de indicadores en conjunto con los indicadores clave establecidos en el sector es importante para **construir una narrativa coherente y relevante, que agregue valor a los esfuerzos actuales y no busque reemplazarlos**.

La presentación de los indicadores sigue el siguiente orden: *AE* – *DMR* – *DMA* – Otros. Esta disposición no es arbitraria. El indicador *AE* se exhibe en primer lugar puesto que señala el periodo en que es racional evaluar los otros indicadores propuestos. Los indicadores *DMR* y *DMA* se encuentran contiguos uno con el otro puesto que, como se mencionó en la Sección 3.5, se plantea el uso de indicadores como conjunto y no por separado. Se releva nuevamente esta característica, teniendo en cuenta que ambos indicadores se tensionan mutuamente.

5.4.1. Resultados Indicador AE

Recordando, el indicador *AE* esclarecía qué porcentaje del **consumo proyectado** era servido desde dentro de la región, ya sea por producción energética o por medidas de eficiencia energética (ahorro). Esta fracción busca reflejar cuánto del análisis que se pueda hacer con los otros indicadores refiere a la región en estudio, y cuanto al sistema externo. De esta manera, se puede fijar un umbral para el indicador *AE*, a partir del cual se considere válido estudiar los indicadores de EC propuestos. Para este trabajo el umbral se establece para valores de cada escenario a comparar tengan un valor de $AE \geq 0$. Esto quiere decir que la energía en servicio anual (producción sumado con ahorros por EE) debe ser al menos igual que el consumo proyectado por la región.

En la Figura 5-10, Figura 5-11 y Figura 5-12 se presentan los resultados del indicador *AE* para cada escenario PELP 2023 – 2027, pero también para cada escenario anidado planteado en la Sección 5.3.4.

Se observa que, pese al efecto de los escenarios de eficiencia sobre el indicador, el umbral se cruza en todos los sub-escenarios (1, 2 y 3) en el año 2037. Es decir, se propone estudiar los indicadores *DMR* y

DMA desde el año 2037 en adelante⁴³. Más aún, se observa que el orden de cruce del umbral se mantiene para cada sub-escenario; en primer lugar se tiene que $AE_{CN} \geq 0$, luego $AE_{TA} \geq 0$, y finalmente $AE_{RL} \geq 0$.

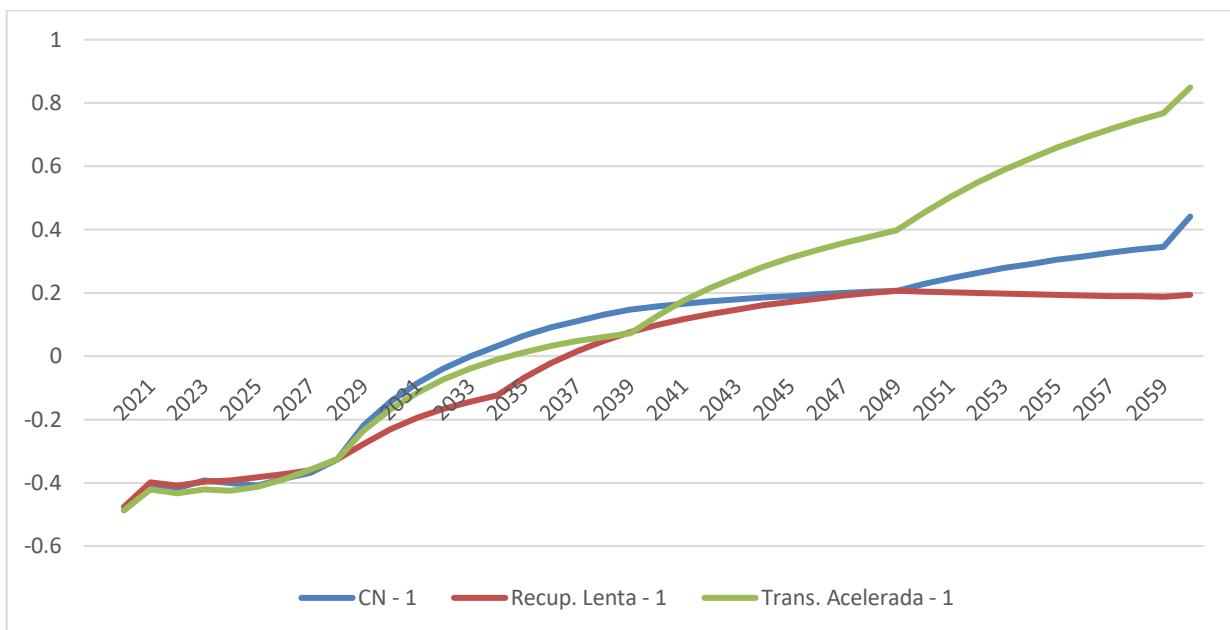


Figura 5-10 Indicador $AE[1]$ para el escenario anidado 1

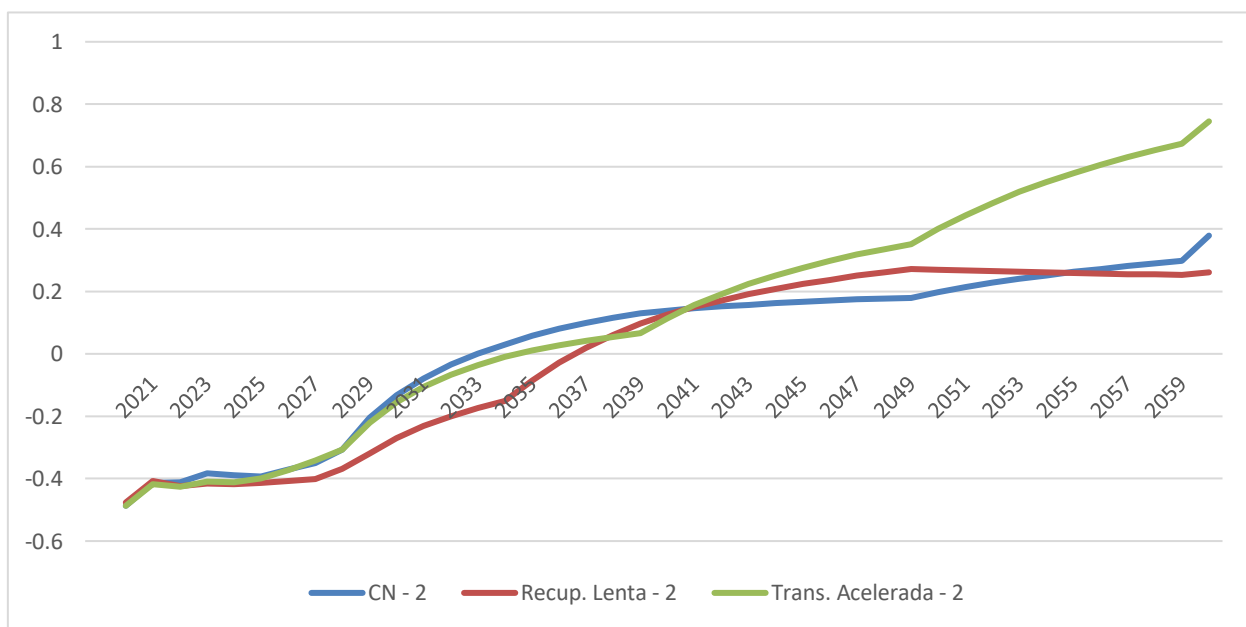


Figura 5-11 Indicador $AE[1]$ para el escenario anidado 2

⁴³ Sin perjuicio de esto, los indicadores DMR y DMA se calculan desde el año 2020 en adelante. El indicador AE propone un rango de análisis y no de cálculo.

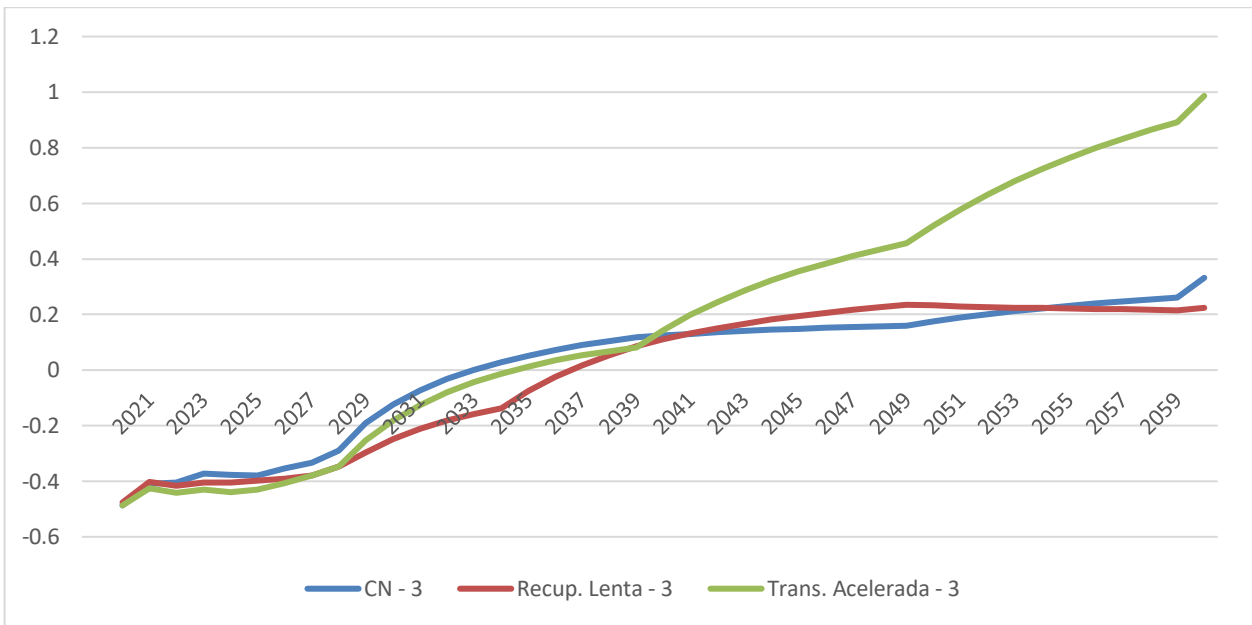


Figura 5-12 Indicador $AE[1]$ para el escenario anidado 3

5.4.2. Resultados Indicador DMR_{cap}

El indicador DMR representa la eficiencia de los recursos materiales para entregar un cierto servicio energético (eléctrico). En particular, DMR_{cap} representa la eficiencia de los recursos materiales de infraestructura del sector, y no de la operación. Dado que la cantidad se expresa en unidades de $\frac{ton\ Sb_{eq}}{Wh^{44}}$, entonces un valor menor del indicador se considera mejor.

En la Figura 5-13, Figura 5-14 y Figura 5-15 se exponen los resultados del cálculo $DMR_{cap}(T)$, para $T \in [2037, 2060]$, considerando cada escenario PELP 2023 – 2027 y subescenario de eficiencia energética.

De esta manera, la expresión para el indicador queda como $DMR_{cap}(T) = \frac{\sum_{2020}^T \sum_i \bar{M}_{i,t}}{\sum_{2020}^T E_t}$.

A diferencia de los resultados del indicador AE , los cuales no se ven mayormente impactados por los diferentes sub-escenarios (1,2 y 3) de eficiencia energética, los resultados del indicador DMR_{cap} si sufren variaciones apreciables. El resultado del indicador para el año 2050, por ejemplo, posiciona de peor manera el escenario de Transición Acelerada para los sub-escenarios 1 y 3, y posiciona de peor manera el escenario de Recuperación Lenta para el sub-escenario 2. El resultado del indicador para el año 2060, por su parte, posiciona como peor situación el escenario de Transición Acelerada; sin embargo, la diferencia que se marca

⁴⁴ Se puede expresar en MWh , GWh , TWh , etc.

para el escenario de Carbono Neutralidad y Recuperación Lenta en el sub-escenario 1, se reduce considerablemente en el escenario 2 y 3.

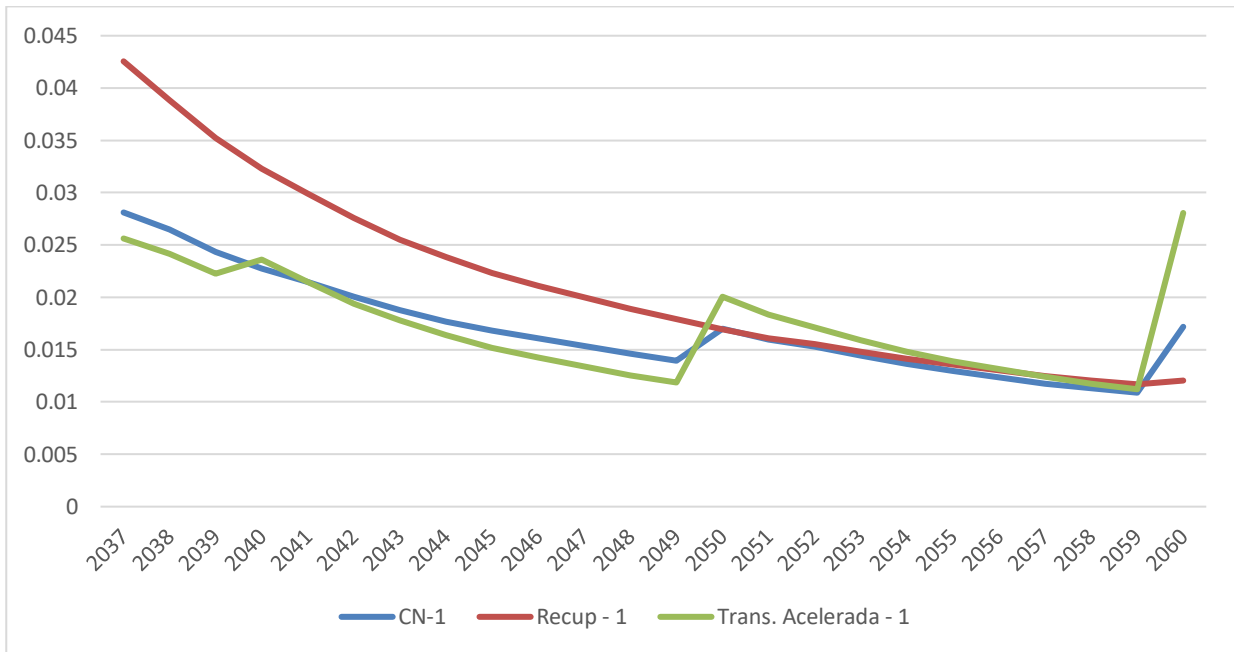


Figura 5-13 Indicador $DMR_{cap} [\frac{ton}{GWh}]$ para el escenario anidado 1

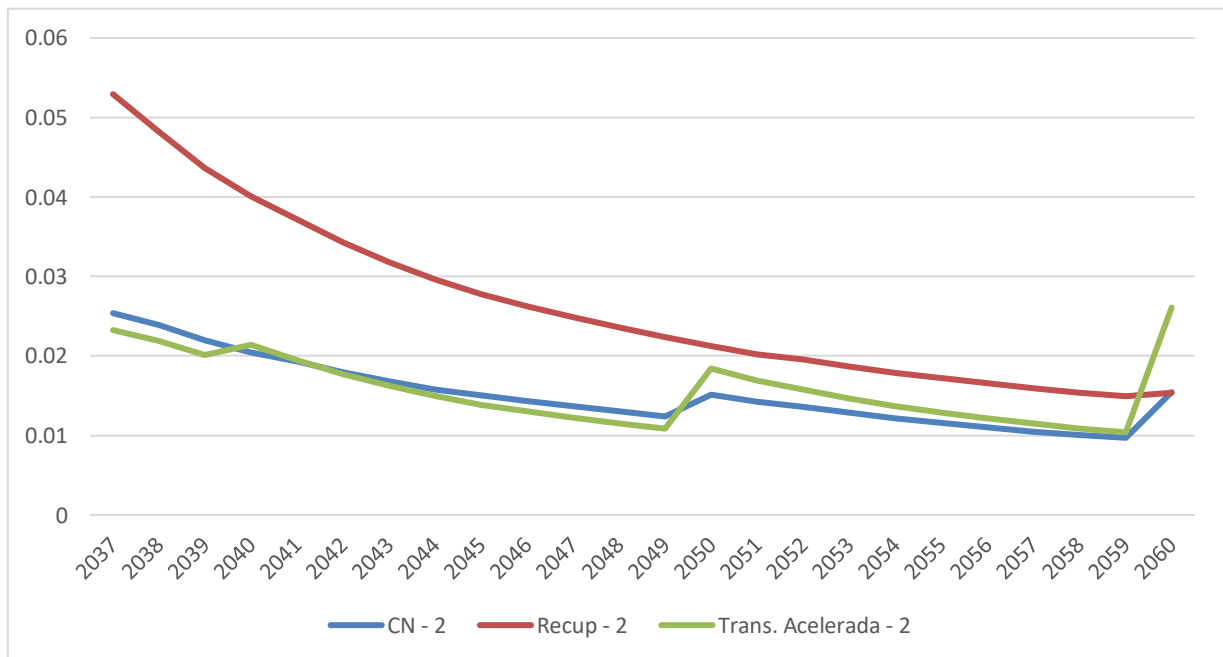


Figura 5-14 Indicador $DMR_{cap} [\frac{ton}{GWh}]$ para el escenario anidado 2

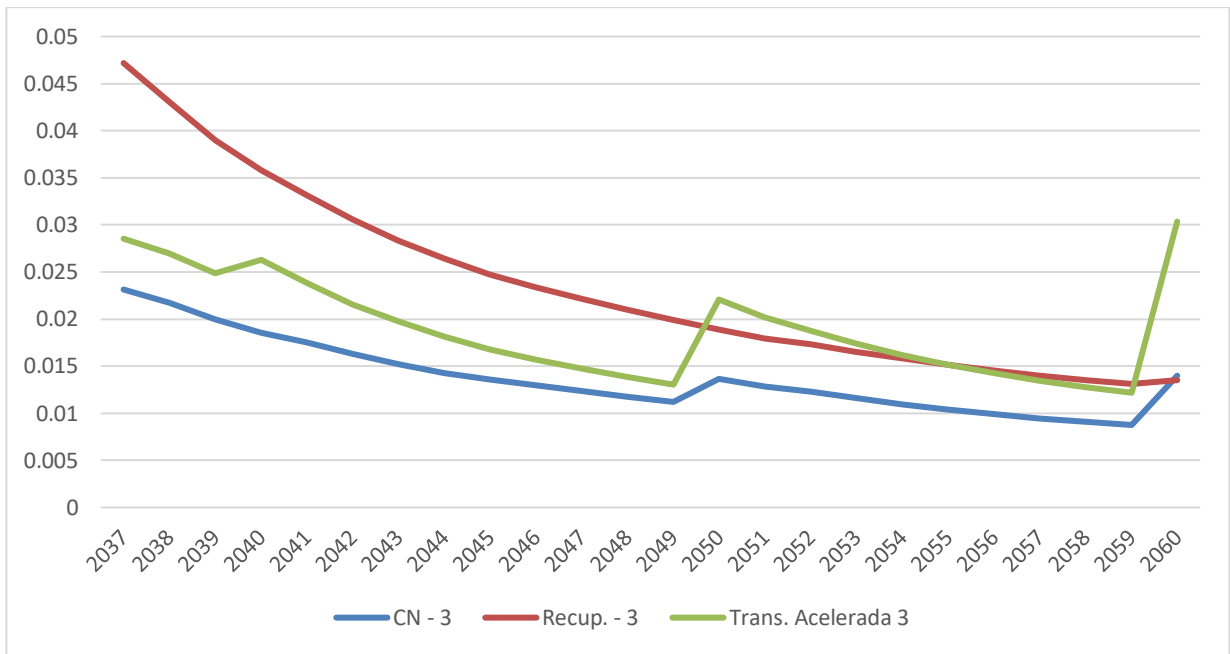


Figura 5-15 Indicador $DMR_{cap}[\frac{ton}{GWh}]$ para el escenario anidado 3

En la Indicador $DMR_{cap}[\frac{ton}{GWh}]$ para el escenario de Carbono Neutralidad, escenario anidado 1 (Figura 5-16, Figura 5-17 y Figura 5-18, se presentan de manera separada los escenarios de la PELP 2023 – 2027 para el sub-escenario 1 (Figura 5-13). En particular, se ilustran de manera explícita las influencias de las diferentes tecnologías sobre el indicador DMR_{cap} . Por ejemplo, la tecnología de generación solar CSP y la tecnología de almacenamiento de bombeo de 12h juegan un papel importante para posicionar de peor manera el escenario de Transición Acelerada, a la luz del indicador $DMR_{cap}(2060)$. En menor medida, las tecnologías solares FV y CSP tienen un impacto negativo en el indicador DMR_{cap} para el escenario de Carbono Neutralidad. Todo lo anterior tiene una correlación directa con la expansión de la infraestructura de generación, que se ilustra en la Sección 5.3.1.

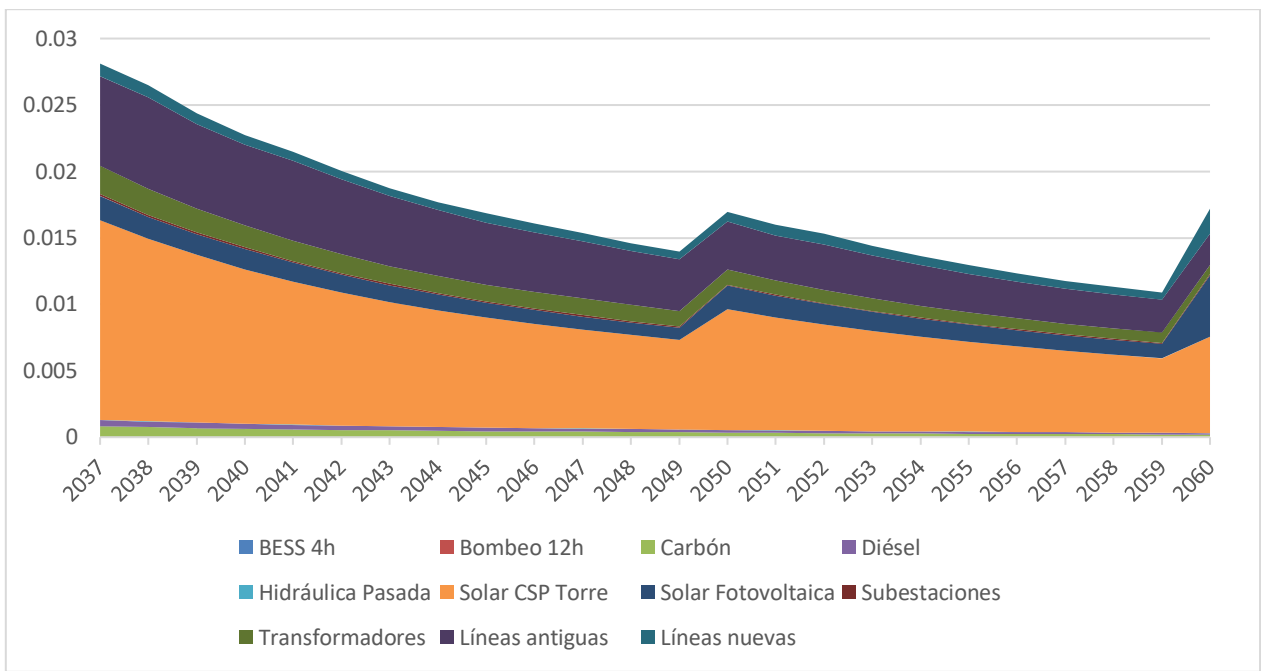


Figura 5-16 Indicador $DMR_{cap}[\frac{ton}{GWh}]$ para el escenario de Carbono Neutralidad, escenario anidado 1

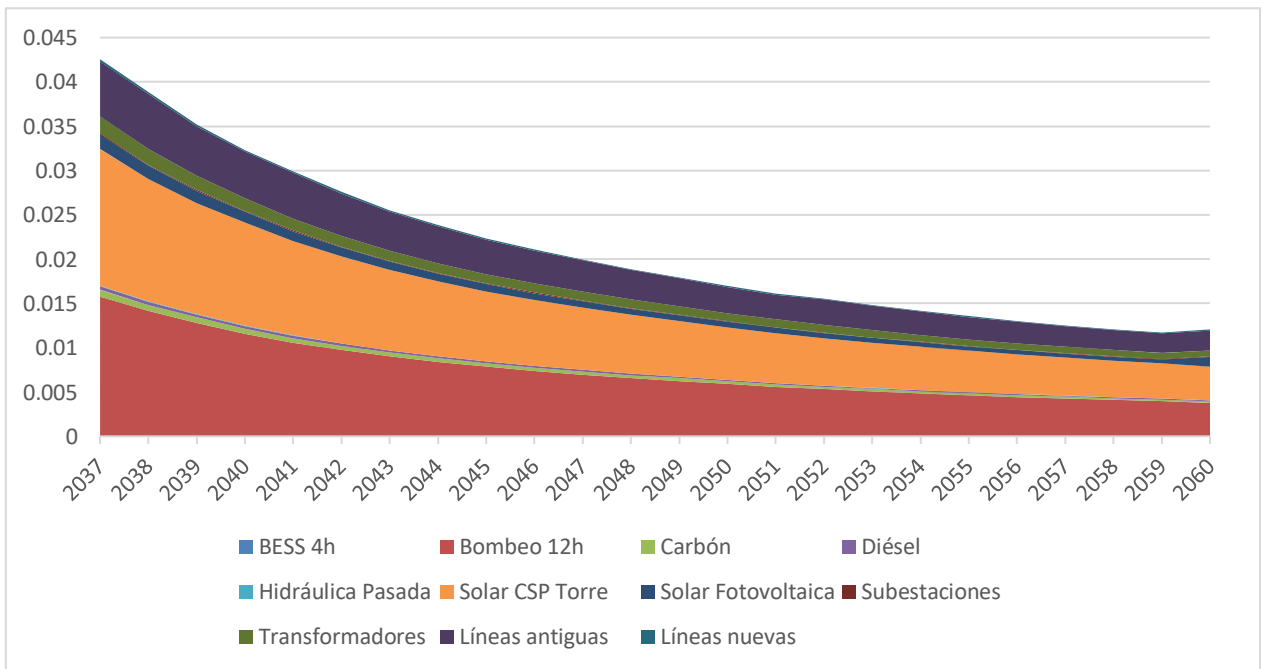


Figura 5-17 Indicador $DMR_{cap}[\frac{ton}{GWh}]$ para el escenario de Recuperación Lenta, escenario anidado 1

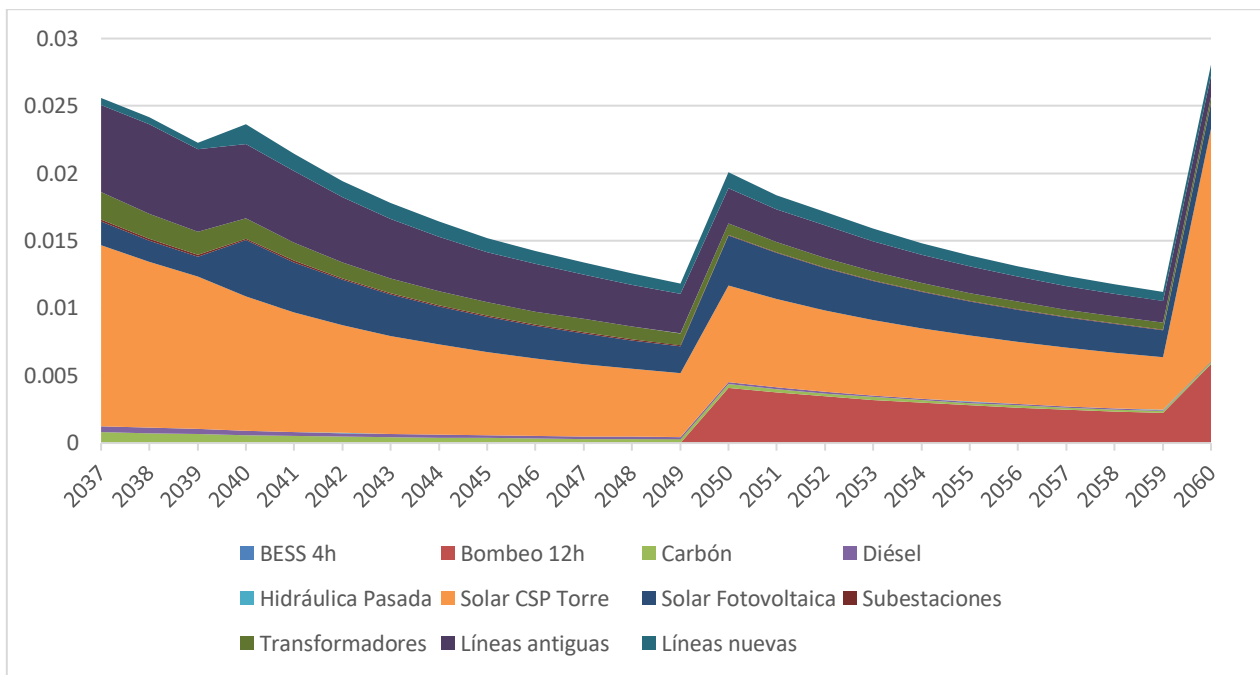


Figura 5-18 Indicador $DMR_{cap}[\frac{ton}{GWh}]$ para el escenario de Transición Acelerada, escenario anidado 1

5.4.3. Resultados Indicador DMAcap

El indicador DMA representa el impacto del agotamiento de recursos materiales, al margen del servicio energético (eléctrico) que entregue el sistema. En particular, DMA_{cap} representa el impacto del agotamiento de recursos materiales de infraestructura del sector, y no de la operación. En ese sentido, un menor valor de $DMA_{cap}[ton Sb_{eq}]$ se considera mejor.

Dado que este indicador no considera dentro de sus parámetros las medidas de EE, no se calculan sub-escenarios para los resultados. Así, la Figura 5-19 presenta de manera sintética los resultados del indicador DMA_{cap} para los tres escenarios del proceso PELP 2023 – 2027. En este caso, no hay ambigüedades en cuanto al posicionamiento final (año 2060) de los escenarios; el escenario de Recuperación Lenta es el mejor evaluado en este año, y el escenario de Transición Acelerada el peor. Sin embargo, el año 2059 la evaluación en base al indicador DMA_{cap} sugería que el escenario mejor evaluado según el aspecto de EC “tolerancia de la naturaleza”, era el de Carbono Neutralidad. Estos resultados reflejan de manera coherente las dinámicas ilustradas en la Sección 5.3.1.

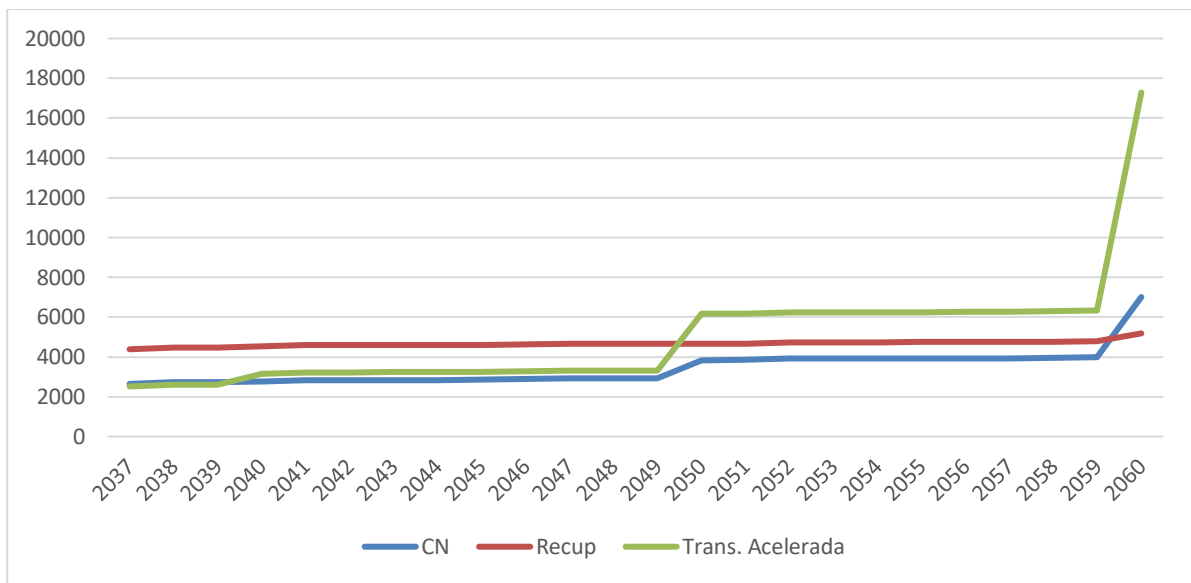


Figura 5-19 Comparación del indicador DMA_{cap} [ton] para los resultados de los tres escenarios PELP 2023 – 2027

Como en el caso del indicador DMR_{cap} , en la Indicador $DMR_{cap} \left[\frac{ton}{GWh} \right]$ para el escenario de Carbono Neutralidad, escenario anidado 1 (Figura 5-20, Figura 5-21 y Figura 5-22 se presentan de manera separada los escenarios de la PELP 2023 – 2027. En particular, se ilustran de manera explícita las influencias de las diferentes tecnologías sobre el indicador DMA_{cap} .

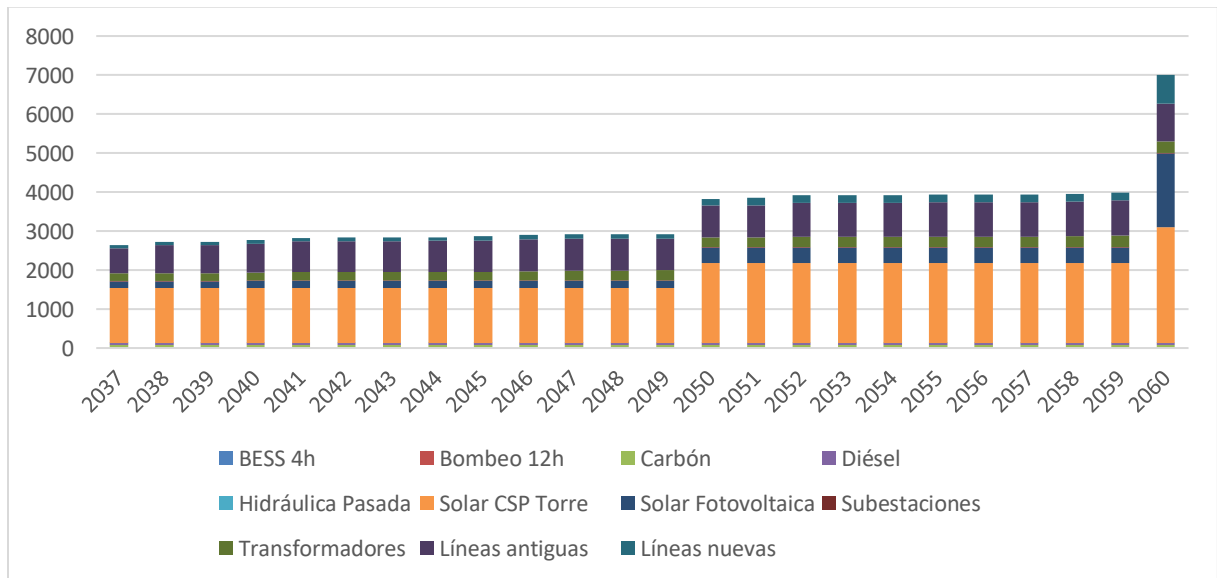


Figura 5-20 Indicador DMA_{cap} [ton] para el escenario de Carbono Neutralidad

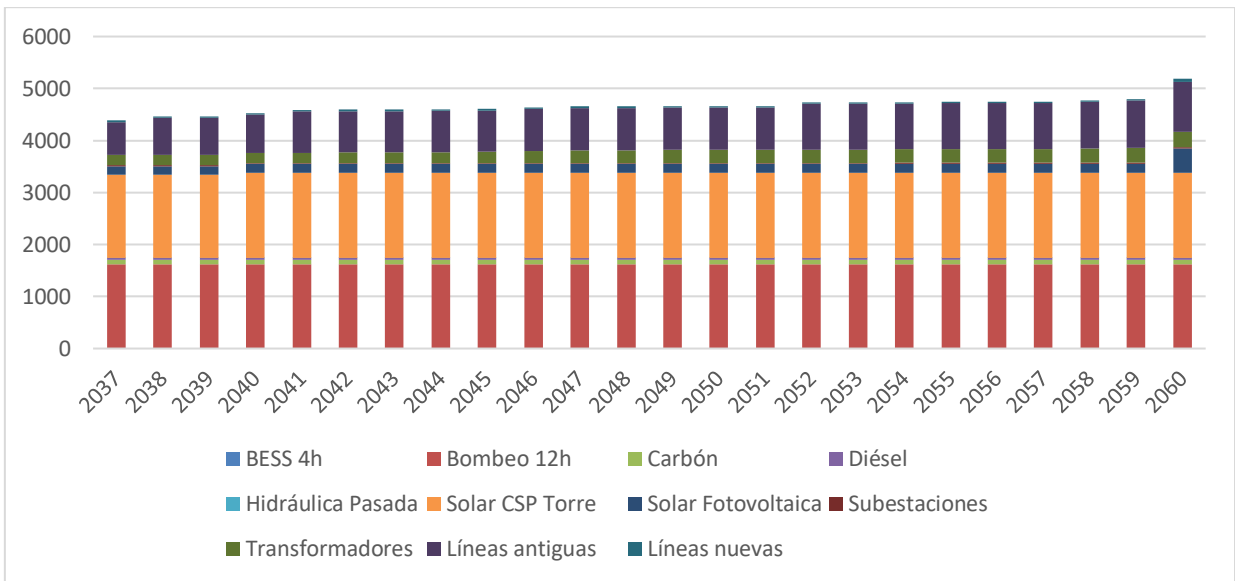


Figura 5-21 Indicador DMA_{cap} [ton] para el escenario de Recuperación Lenta

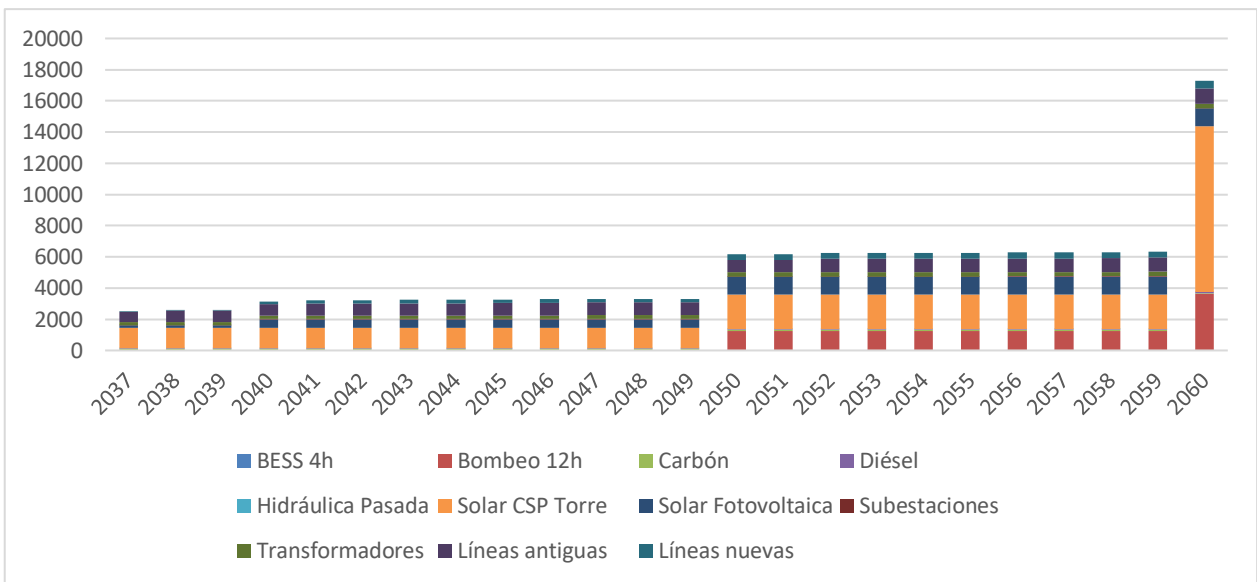


Figura 5-22 Indicador DMA_{cap} [ton] para el escenario de Transición Acelerada

5.4.4. Otros indicadores

Como se mencionó al comienzo de la sección, existen indicadores clave que ya se han establecido en el sector energético como herramientas de apoyo a la toma de decisiones. A continuación se exponen los resultados de calcular tres de los indicadores más relevantes y utilizados.

Generación renovable

El porcentaje de generación renovable anual del caso de estudio, calculado como $\frac{Gen_{renov}}{Gen_{total}} \cdot 100[\%]$, se presenta en la Figura 5-23.

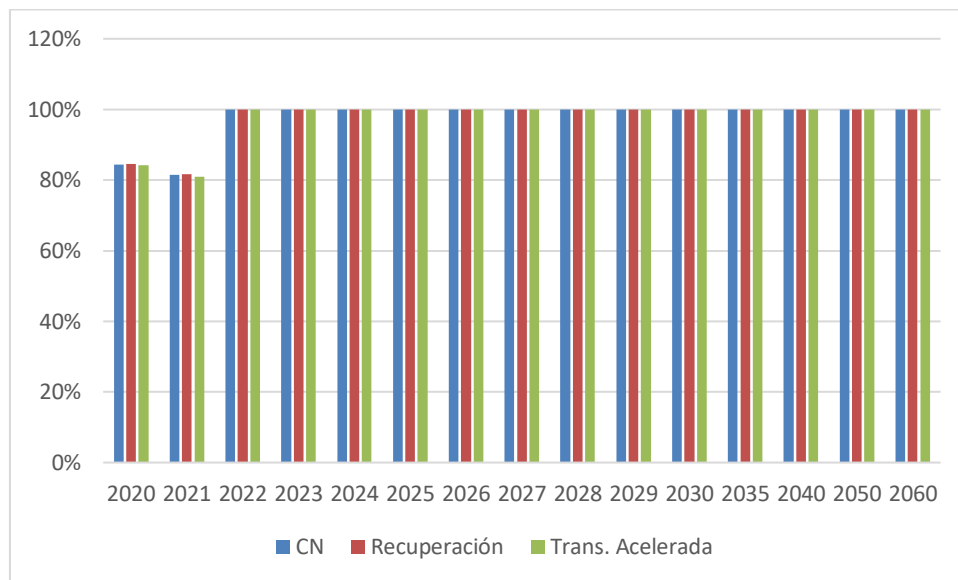


Figura 5-23 Indicador de porcentaje de generación renovable anual

Capacidad renovable

El porcentaje de capacidad renovable del caso de estudio, calculado como $\frac{Cap_{renov}}{Cap_{total}} \cdot 100[\%]$, se presenta en la Figura 5-24.

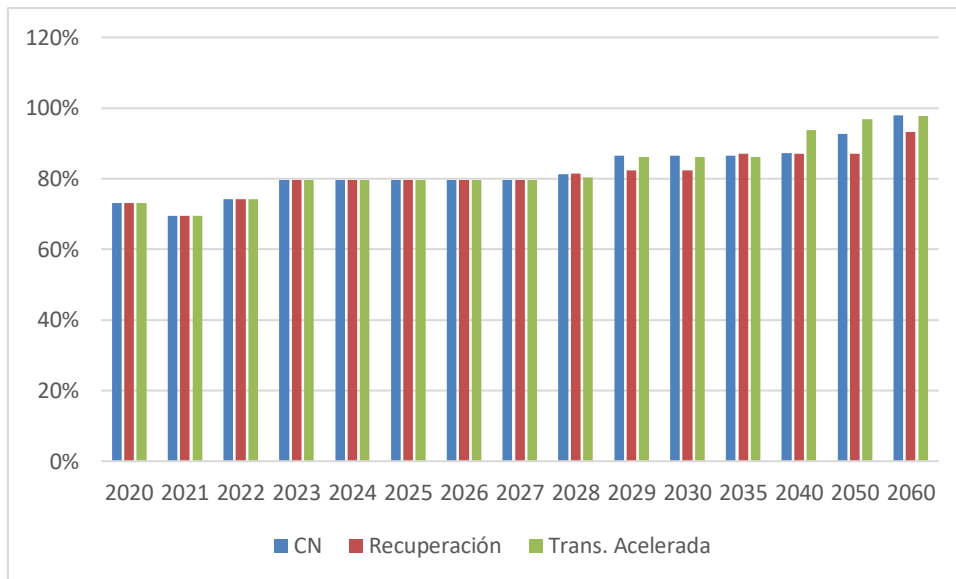


Figura 5-24 Indicador de porcentaje de capacidad renovable del sistema estudiado (Región de Tarapacá)⁴⁵

Emisiones CO₂ acumuladas

De manera consecuente con el indicador de % de generación renovable, los años 2020 y 2021, al no tener una operación 100% renovable (en ningún escenario), se utilizan combustibles fósiles para producir energía eléctrica dentro de la región en algún momento del año. Esto se traduce en que la acumulación de emisiones se acarrea, principalmente, de los años 2020 y 2021 (Figura 5-25).

En la Figura 5-25 se puede apreciar un leve aumento de las emisiones acumuladas del escenario RL, en contraste con los otros escenarios.

⁴⁵ Este indicador se calcula a partir de la capacidad acumulada de la Región; dicha información también se extrae el sitio oficial del proceso PELP 2023 – 2027.

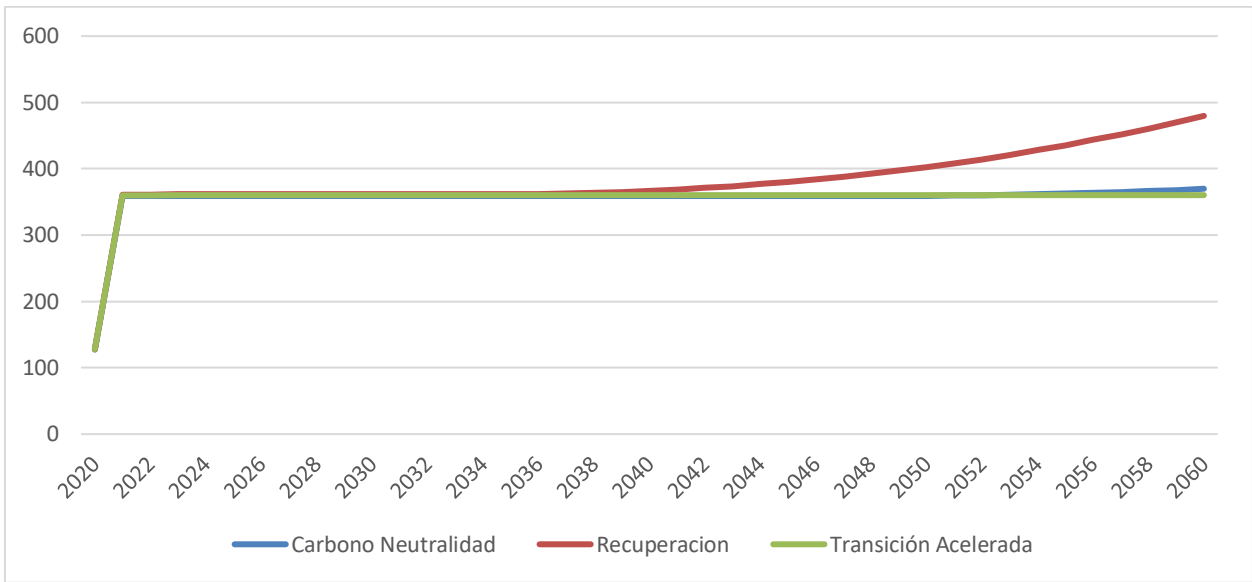


Figura 5-25 Emisiones acumuladas de generación eléctrica [kton CO2 eq], Región de Tarapacá

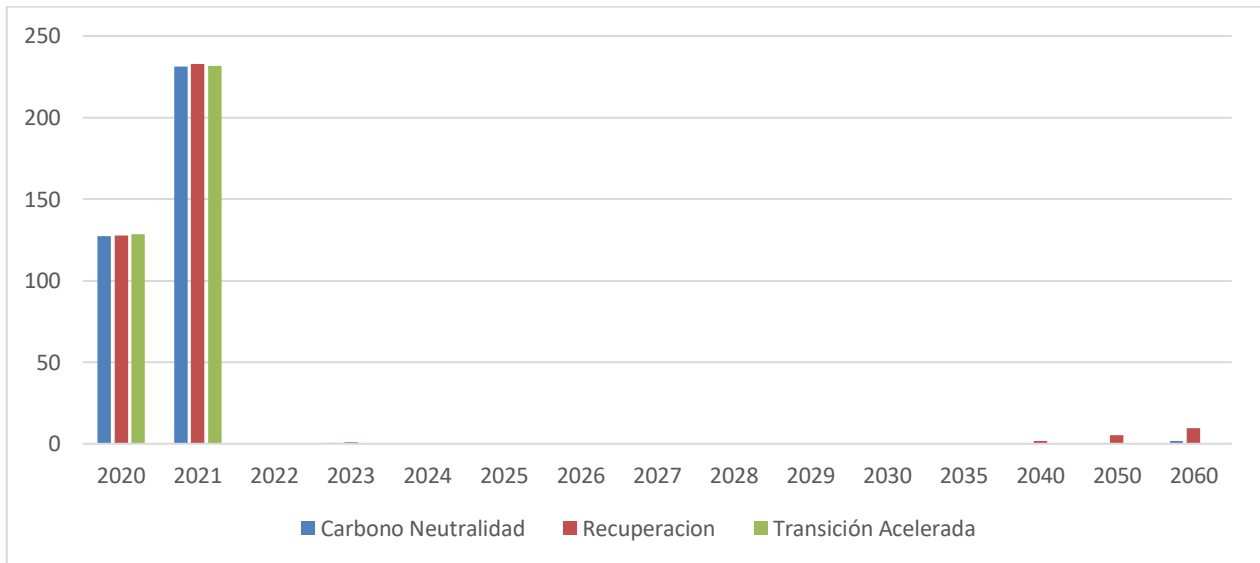


Figura 5-26 Emisiones anuales generación eléctrica [kton CO2 eq], Región de Tarapacá

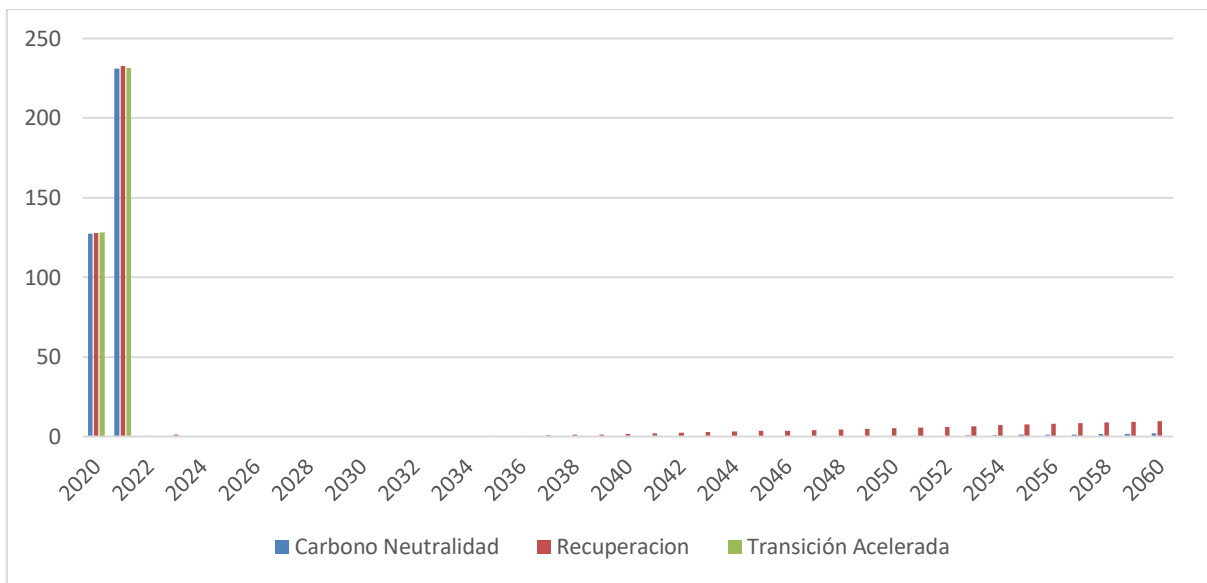


Figura 5-27 Emisiones anuales generación eléctrica con interpolación lineal⁴⁶ [kton CO2 eq], Región de Tarapacá

⁴⁶ Al ser un resultado acumulado, las emisiones acumuladas requieren de información anual. Debido a que esta información no está disponible directamente, sino que con saltos temporales, entonces se construye a través de una interpolación lineal de los valores.

Capítulo 6: Discusión de resultados

En el presente capítulo se discuten, principalmente, los resultados del caso de estudio a la luz de los indicadores propuestos. Además, como se hizo hincapié en el Capítulo 5:, se discute una narrativa coherente entre los indicadores propuestos y los indicadores tradicionales del sector eléctrico. Por último, y dado que el foco de este trabajo se pone en la propuesta de indicadores, se discuten aspectos de su formulación y aplicación a la luz del desempeño en el caso de estudio.

Respecto a los indicadores tradicionales, los escenarios de CN y TA obtienen un mejor desempeño que el escenario de RL para el año 2060, sin mayores diferencias entre los valores de cada uno de sus indicadores (CN y TA). Se puede observar, además, que no se destacan mayores diferencias a lo largo del periodo de análisis. Estos resultados responden a las características de expansión de la infraestructura y de generación eléctrica anual, presentadas en la Sección 5.3.1.

Vale la pena notar lo siguientes puntos. Si bien hay diferencias entre los volúmenes de expansión de los escenarios CN y TA (Figura 5-4), así como también de las tecnologías predilectas para el desarrollo de la matriz regional, la magnitud de crecimiento de las renovables en comparación con la capacidad fósil instalada originalmente es considerable (ver año 2020 de la Figura 5-4, tecnología diésel). De esta manera, el indicador porcentual invisibiliza la infraestructura fósil que se pudiese mantener. Esto último es un problema si se considera que el impacto de las emisiones no depende directamente de un porcentaje, sino que de la cantidad total de gases emitidos.

Para el caso del porcentaje de generación renovable y la contabilidad de emisiones, se observa que los tres escenarios dejaron de utilizar tecnologías emisoras de manera abrupta después del año 2021. Sin embargo, hacia el futuro existe una necesidad progresiva de contar con dichas tecnologías como parte de los parques CN y RL según los resultados. Sólo considerando estos indicadores y, por tanto, el aspecto de las emisiones del sector eléctrico de la Región, entonces se sugiere impulsar el escenario TA.

Si se considerase un **marco conceptual que sólo captura las entradas y salidas de combustibles fósiles** como materia o como emisión, y no de otros recursos, la EC también sugiere el fomento del escenario TA. Más aún, existen definiciones de EC, como la de EMF, que hacen referencia directa al uso de energías renovables (“...se orienta hacia el uso de energías renovables...”). Esta corolario es claro si se persigue minimizar el uso de los recursos que observa el marco conceptual. En este sentido, los indicadores clave tradicionales del sector son insuficientes para recoger de manera más completa el concepto de EC, no solamente por la definición de los indicadores, sino por el marco conceptual en el que se anidan.

El indicador AE se propuso como complemento a los indicadores principales de EC. El concepto de responsabilidad regional que busca capturar el indicador, relacionado con justicia ambiental⁴⁷, ya se considera en las discusiones actuales con medidas similares o idénticas. Así, el indicador también cumple un rol clave al complementar la discusión respecto a las medidas tradicionales del sector, como lo son el porcentaje de penetración renovable y las emisiones acumuladas.

Respecto a los años en donde se produce la mayor cantidad de emisiones, 2020 – 2021, el indicador AE presenta valores entre -0,4 y -0,5. Esto quiere decir que hay un porcentaje significativo de los requerimientos eléctricos de la región que abastecidos por el sistema externo (40 – 50%). Al integrar información externa al indicador regional, por ejemplo a través de factores de emisión del sistema, se pueden dar los casos en que las medidas de los indicadores empeoren o mejoren considerablemente. Por este motivo, al menos hasta alcanzar una vecindad suficientemente ajustada de $AE = 0$, los indicadores no entregan mucha información del sistema regional en cuestión.

Por último, y quizás menos evidente que el problema planteado recientemente, es entender la capacidad de toma de decisiones en base a la información presente. Posterior al año 2037, el indicador AE presenta valores positivos y crecientes. Para el año 2060, dependiendo del escenario, AE alcanza valores entre 0,2 y 0,9. Esto quiere decir que hay un porcentaje significativo del servicio eléctrico de la región destinada a abastecer al sistema externo⁴⁸ (20 – 90%). En esta situación, la toma de decisiones, objetivo de la definición de los indicadores, se complejiza. Sería necesario considerar, además, los indicadores del sistema externo para poder decir si es positivo o negativo, en términos globales, los niveles de producción de energía de este parque regional.

Para complementar los indicadores DMR_{cap} y DMA_{cap} se optó por utilizar el indicador AE de manera previa, con una connotación de permiso de racionalidad para futuros análisis. Es decir, en base a los resultados AE se determinó en que periodos de tiempo hacía sentido estudiar los otros indicadores. Particularmente, y como ejemplo de permiso umbral, se decidió tomar elementos $AE \geq 0$ exclusivamente. Ahora, si bien esta decisión exige que el sistema regional no sea eléctricamente deficitario como medida neta anual, no acusa las dinámicas de intercambio eléctrico con una granularidad menor. En este espacio de granularidad menor podría ser de utilidad entender la coincidencia de la demanda y la generación regional, más allá de los valores neto-anales. Para los periodos donde AE alcanza valores entre 0,2 y 0,9 no se

⁴⁷ Esta corresponde a la asignación equitativa de beneficios y costos consecuentes del aprovechamiento del medio ambiente y sus recursos [164].

⁴⁸ Considerando que el indicador contiene la medida de eficiencia energética, y el porcentaje se calcula relativo al consumo proyectado, puede existir una superposición entre la definición de “sistema externo” y ahorros por eficiencia energética en la región.

impuso ninguna restricción sobre el análisis, sin embargo es necesario considerar también las características del sistema externo para obtener un análisis más acabado.

Respecto a los indicadores de EC propiamente (DMR_{cap} y DMA_{cap}), se observan resultados concluyentes para el año 2060, el cual se caracteriza por la decisión de instalación de cada escenario para el mismo año. Para este punto el orden de preferencia de escenarios, según indicadores DMR_{cap} y DMA_{cap} , sería RL seguido relativamente cerca por CN, dejando una brecha notoria con AT. Ahora, hacia el año 2059 esta postura es completamente diferente. El indicador DMR_{cap} ilustra un peor desempeño de RL, seguido por AT, puntuando el escenario CN como preferido. Asimismo, el escenario DMA_{cap} secunda la preferencia por el escenario CN. Lo anterior da pie, entre otras, a las siguientes preguntas ¿Por qué es necesaria la inversión el año 2060? ¿Qué se puede hacer para evitar esta situación?

Ahora, es necesario recordar que sólo se consideraron los indicadores DMR_{cap} y DMA_{cap} , y no los indicadores DMR_{op} y DMA_{op} . Sin embargo, hace sentido hacer una relación entre este último, DMA_{op} , y los indicadores tradicionales del sector eléctrico. En particular, el indicador de emisiones acumuladas son parte de las salidas del sistema eléctrico analizado a través del marco conceptual planteado, y corresponden al uso de los recursos que contabiliza el indicador DMA_{op} en la entrada del sistema. De esta manera, se puede plantear una relación directa en términos de conclusión, aunque conceptualmente apunten a lugares distintos. En este aspecto, tal y como bajo el escrutinio de los indicadores tradicionales, el escenario de RL obtiene un peor desempeño, mientras que los escenarios de CN y AT puntúan de manera similar.

Con todo lo anterior, teniendo en cuenta los compromisos nacionales e internacionales en materia de emisiones, **se concluye que el escenario que mejor se desempeña considerando además los indicadores de EC es el de Carbono Neutralidad**. Además, se insta a explorar las preguntas planteadas: **¿Por qué es necesaria la inversión el año 2060? ¿Qué se puede hacer para evitar esta situación?**

Capítulo 7: Conclusiones y trabajo futuro

A modo de cierre del trabajo de tesis, en el presente capítulo se presentan las principales conclusiones a extraer, así como también los posibles desarrollos futuros que puede impulsar este estudio. De esta manera, el capítulo se separa en dos secciones.

7.1. Conclusiones

En esta tesis se desarrolla conceptualmente la relación entre los sistemas eléctricos y campo de estudio de la EC. Con esto, se incorpora la visión de EC en los espacios de toma de decisión del sector eléctrico a través del uso de indicadores. En los siguientes párrafos se resumen los aspectos esenciales abordados para concretar los objetivos planteados en esta tesis.

En primer lugar, se obtiene un entendimiento global de cada una de las disciplinas, y de su interacción. Para esto, se estudia en profundidad el concepto de EC, seleccionando y utilizando una definición como eje fundamental para el trabajo. Además, se examinan las limitaciones y críticas de la EC que pudieran incidir en el análisis, en donde el fenómeno de “desplazamiento de la problemática” cobra un rol central. Se realiza una indagación bibliográfica respecto a la diversidad de manifestaciones de la EC en el sector eléctrico. Finalmente, se conceptualiza el cruce entre las disciplinas, expandiendo y concretando el entendimiento del problema. Lo anterior queda expreso principalmente en las Secciones 2.1 y 3.2. Así, el objetivo específico 1 se considera cubierto.

Para traducir el cruce conceptual en una herramienta práctica, y como parte de la metodología para elaborar y/o seleccionar indicadores, se implementa un marco de medición con el fin de estructurar y dar coherencia a la información del sistema eléctrico bajo el escrutinio de la EC. Para esto se realiza una revisión profunda de los marcos de medición utilizados particularmente en el área de desarrollo sostenible (Sección 2.2.3). Luego, se escoge un marco conceptual del tipo contabilidad debido a la pertinencia de su uso dada la conceptualización del problema que se realizó previamente en la Sección 3.2. Más aún, se estudia de manera extensa el subgrupo de marcos de contabilidad para escoger el cual se adapte mejor a representar la fenomenología de interés (ew-MFA). Se recalca que un aspecto clave de este desarrollo es acudir a la definición que se presenta en la Sección 3.1 y la conceptualización que se desarrolla en 3.2. Por último, la implementación del marco de medición sobre el problema de interés requiere aterrizar y/o adaptar conceptos relevantes como lo son, por ejemplo, los límites del marco conceptual. Lo anterior está contenido en su totalidad en el Capítulo 3; particularmente en las Secciones 3.2 y 3.3. Con esto, el objetivo específico 2 se considera cubierto.

Ya identificadas las variables clave para el sector eléctrico, esto es, aquellas que logran representar la funcionalidad de este, y los elementos clave para la EC, conforme a la definición y el marco de medición escogidos, se propone el conjunto preliminar de indicadores. Lo anterior no es exclusivamente fruto de la conceptualización de la relación energía y recursos materiales, sino que también de la integración de herramientas estandarizadas para la contabilidad material, como lo es el uso de “factores de caracterización” derivados del LCIA. A la luz de esta herramienta, es posible tomar decisiones respecto de la estructura de los indicadores y de los alcances de su aplicación.

El conjunto preliminar de indicadores se somete a un escrutinio profundo de prefactibilidad, utilizando criterios universales que describen a un “buen indicador”, particularmente aplicando el acrónimo RACER. Este ejercicio requiere trabajar fuertemente con la definición y conceptualización de la EC en el sector eléctrico, recalcando una vez más éste como punto estructural en el trabajo. Además, exige comunicar esta información de manera coherente con las posibles implementaciones a través de criterios de uso como la Credibilidad y la Factibilidad o Sencillez de implementar, contenidos en RACER. Se concluye que el conjunto de indicadores cumple con estándares mínimos de bondad. Lo anterior está contenido en su totalidad en el Capítulo 3:, particularmente en las Secciones 3.3 y 3.4, con lo que el objetivo específico 3 se considera cubierto.

Para disponer de una metodología de apoyo al proceso de toma de decisiones del sector eléctrico, se lleva a cabo una revisión sobre su estructura y sus componentes organizacionales principales (Capítulo 4:). Ahora, si bien los espacios de toma de decisiones del sector eléctrico son fundamentales para el trabajo, igualmente importante son los espacios de aplicación de los indicadores. El cruce entre ambas esferas se propone en el Capítulo 4:, sin pretender abarcar de manera exhaustiva esta relación. Así, se escoge el terreno de políticas públicas como un nicho de interés. Particularmente se conceptualizan de manera general la inclusión de los indicadores propuestos en dos espacios: Monitoreo y Evaluación, y Análisis Energético de Largo Plazo. Con lo anterior, el objetivo específico 4 se considera cubierto.

Finalmente, se aplican las metodologías, marcos conceptuales e indicadores sobre un caso de estudio en la Región de Tarapacá. Como resultado, **se diferencian los escenarios planteados a la luz del concepto de EC, lo que anteriormente no era posible**. Más allá de una “prefactibilidad” que asegura el cumplir con el acrónimo RACER, **este resultado da cuenta de la efectividad de los indicadores elaborados/seleccionados**. Además, se incluyen en la discusión posibles narrativas que relacionan el conjunto de indicadores de EC con indicadores tradicionales del sector eléctrico. Lo anterior está contenido en su totalidad en el Capítulo 5:, con lo que el objetivo específico 5 se considera cubierto.

A modo general, basándose en una revisión bibliográfica y entendimiento profundo de los conceptos de EC, el sector eléctrico y el campo de indicadores, se propone “una forma de integración efectiva de los

conceptos de EC en el proceso de toma de decisiones del sector eléctrico”. Estos son aplicados en un caso de estudio en donde, gracias a la herramienta desarrollada, se puede “transparentar los efectos que tienen distintas estrategias de desarrollo o líneas de acción de un territorio en el uso de materiales”. Con esto, el objetivo general se considera cubierto.

Del argumento presentado en el Capítulo 6:, donde se discute acerca del uso de indicadores tradicionales del sector, en conjunto con la propuesta de indicadores de EC, se comprueba la primera hipótesis del trabajo: Los indicadores tradicionales del sector son insuficientes para entender e incorporar conceptos de EC. Más aún, se plantea que la responsabilidad primera de esta situación es la miopía de los marcos conceptuales con los que se estudia el sector eléctrico, más allá de la definición de un indicador.

Basándose en la totalidad del desarrollo, pero particularmente en el uso de la herramienta sobre caso de estudio, se comprueba la segunda hipótesis: Es posible plantear un conjunto de indicadores asociados a elementos clave de EC que complementen el proceso de toma de decisiones pública del sector eléctrico, entregando evidencia estratégica para el desarrollo sostenible de éste.

7.2. Trabajo futuro

A través del presente trabajo se espera, no solamente haber aportado con una herramienta para la toma de decisiones del sector eléctrico, sino también resaltar la necesidad de entender los impactos del sistema eléctrico desde una perspectiva más holística. En este sentido, al levantar discusiones respecto a otras temáticas se hace relevante desarrollar metodologías que permitan generar narrativas coherentes, que den cuenta de la naturaleza compleja de la realidad, pero que también sean resolutivas en términos de acción y guía.

En un espacio más acotado, un trabajo futuro para expandir el reflejo de la economía circular sobre el sistema eléctrico debería ser capaz de evaluar estrategias cuyos efectos escapen parcialmente del sector eléctrico. Por ejemplo, el reciclaje de infraestructura para otros usos, o el uso en cascada de la energía térmica. Ahora bien, de contemplar esta opción, se realza la necesidad de considerar conceptos como “downcycling”. Una forma de integrar este concepto podría ser penalizar la recuperación material si el valor del segundo uso es menor.

Un espacio de mejora referente al indicador DMR_{cap} , es la sensibilidad ante la entrada de la infraestructura en diferentes años. Podría considerarse positivo adelantar el uso material a propósito de las dinámicas de escasez de recursos, o quizás es positivo atrasar todo lo posible el uso material. Actualmente, el indicador DMR_{cap} se comporta de igual manera en su cálculo para el año T , al contabilizar

infraestructuras ingresadas el año $T - m$ y $T - n$. A pesar de esto, la silueta del indicador a lo largo del tiempo puede dar nociones de esta característica.

Otro espacio de mejora o discusión, también referente al indicador DMR_{cap} , es el de la amortización de materiales ingresados al sistema por energía preexistente; i.e., energía en servicio previa al ingreso de la infraestructura en cuestión. Ahora, desde un punto de vista de sistema únicamente, este podría no ser un problema, puesto que la amortización de materiales ingeridos por el sistema responde al servicio que ha entregado el sistema. Sin embargo, esto podría dar señales complejas desde el punto de vista de los elementos y estrategias particulares.

Los indicadores, además de presentar información de manera concisa, ilustran las necesidades de información para reflejar de mejor manera los fenómenos de interés. Con esto en mente, y como se dio a entender a lo largo del trabajo, los indicadores elaborados y/o seleccionados guardan una dependencia crítica con dos factores: en primer lugar, el modelo material que se utilice; en segundo lugar, el factor de normalización para uniformar distintos materiales. En ese sentido, es esencial contar con una buena base estadística material del sistema eléctrico, además de profundizar la investigación sobre la escasez y uso de recursos materiales.

Bibliografía

- [1] IPCC, “Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change,” 2018.
- [2] UN, “Paris Agreement.” 2015. [Online]. Available: <https://unfccc.int/es/process-and-meetings/the-paris-agreement/el-acuerdo-de-paris>
- [3] Gobierno de Chile, “Contribución determinada a nivel nacional (NDC) de Chile.” 2020. [Online]. Available: https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2020/04/NDC_Chile_2020_español-1.pdf
- [4] H. Ritchie and M. Roser, “CO₂ and Greenhouse Gas Emissions,” *Published online at OurWorldInData.org*, 2016. <https://ourworldindata.org/emissions-by-sector>
- [5] S. Chu, Y. Cui, and N. Liu, “The path towards sustainable energy,” *Nat. Mater.*, vol. 16, no. 1, pp. 16–22, 2016,
- [6] X. Liang, “Emerging Power Quality Challenges Due to Integration of Renewable Energy Sources,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 53, no. 2, pp. 855–866, 2017,
- [7] Y. Parag and B. K. Sovacool, “Electricity market design for the prosumer era,” *Nat. Energy*, vol. 1, no. 4, 2016,
- [8] K. Zou, A. P. Agalgaonkar, K. M. Muttaqi, and S. Perera, “Distribution system planning with incorporating DG reactive capability and system uncertainties,” *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 3, no. 1, pp. 112–123, 2012,
- [9] F. O. Ongondo, I. D. Williams, and T. J. Cherrett, “How are WEEE doing ? A global review of the management of electrical and electronic wastes,” *Waste Manag.*, vol. 31, no. 4, pp. 714–730, 2011,
- [10] H. I. Abdel-Shafy and M. S. M. Mansour, “Solid waste issue: Sources, composition, disposal, recycling, and valorization,” *Egypt. J. Pet.*, vol. 27, no. 4, pp. 1275–1290, 2018,
- [11] M. A. Hanjra and M. E. Qureshi, “Global water crisis and future food security in an era of climate change,” *Food Policy*, vol. 35, no. 5, pp. 365–377, 2010,
- [12] P. Taylor and D. Ness, “Resource productivity through integrated infrastructure systems Sustainable urban infrastructure in China : Towards a Factor 10 systems,” *Int. J. Sustain. Dev. World Ecol.*, vol. 15, no. 4 April 2014, pp. 288–301, 2008.

- [13] Ellen Macarthur Foundation, “Towards the circular economy - Economic and business rationale for an accelerated transition,” 2013.
- [14] Inter-Agency and Expert Group on Sustainable Development Goal Indicators, “Report of the Inter-Agency and Expert Group on Sustainable Development Goal Indicators (E/CN.3/2016/2/Rev.1), Annex IV.” p. Annex IV, 2016.
- [15] European Parliament & Council, “Regulation (EU) No 99/2013 of the European Parliament and of the Council of 15 January 2013 on the European Statistical Programme 2013-17,” *Off. J. L 39/12*, vol. Brussels, no. 9 February, pp. 12–29, 2013, [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32013R0168&from=EN>
- [16] P. Ghisellini, C. Cialani, and S. Ulgiati, “A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems,” *J. Clean. Prod.*, vol. 114, pp. 11–32, 2016,
- [17] D. Brown, *Good Practice Guidelines for Indicator Development and Reporting*, no. October. Cranberra: Australian Bureau of Statistics, 2009. [Online]. Available: <http://www.oecd.org/site/progresskorea/43586563.pdf>
- [18] Council of the European Union, “EU Policy Cycle 2018-2021: Guidelines on designing SMART KPI for MASP and OAP.” 2017.
- [19] T. Hák, S. Janoušková, and B. Moldan, “Sustainable Development Goals: A need for relevant indicators,” *Ecol. Indic.*, vol. 60, pp. 565–573, 2016,
- [20] Ministerio de Energía, “Energía 2050,” 2014. [Online]. Available: http://eae.mma.gob.cl/uploads/D03_Politica_Energetica_de__Chile_2050_Anteproyecto2.pdf
- [21] J. M. Alomar, “Centro Tecnológico para la Economía Circular alista inicio de operaciones con meta de instalar al norte de Chile como referente global en la materia,” *paiscircular.cl*, 2020. <https://www.paiscircular.cl/industria/centro-tecnologico-de-economia-circular-prepara-inicio-de-operaciones-para-abril-con-meta-de-posicionar-a-macrozona-norte-como-referente-global-en-la-materia/>
- [22] F. Sariatli, “Linear Economy Versus Circular Economy: A Comparative and Analyzer Study for Optimization of Economy for Sustainability,” *Visegr. J. Bioeconomy Sustain. Dev.*, vol. 6, no. 1, pp. 31–34, 2017,

- [23] K. Boulding, “The Economics of the Coming Spaceship Earth,” in *Environmental Quality in a Growing Economy*, RFF Press., P. H. E. Jarrett, Ed. 1966.
- [24] W. Steffen *et al.*, “Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet,” *Science* (80-.), vol. 347, no. 6223, 2015,
- [25] M. Wackernagel and W. Rees, “Footprints and Sustainability,” in *Our ecological footprint: reducing human impact on the earth*, Philadelphia, PA: New Society Publishers, 1996, pp. 31–60.
- [26] UNEP, “Decoupling natural resource use and environmental impacts from economic growth, A Report of the Working Group on Decoupling to the International Resource Panel,” 2011. [Online]. Available: <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/9816>
- [27] WBGU (German Advisory Council on Global Change), “Flagship Report: World in Transition—A Social Contract for Sustainability,” 2011. [Online]. Available: https://www.wbgu.de/fileadmin/user_upload/wbgu/publikationen/hauptgutachten/hg2011/pdf/wbgu_jg2011_en.pdf
- [28] W. Haas, F. Krausmann, D. Wiedenhofer, and M. Heinz, “How circular is the global economy?: An assessment of material flows, waste production, and recycling in the European union and the world in 2005,” *J. Ind. Ecol.*, vol. 19, no. 5, pp. 765–777, 2015,
- [29] European Environment Agency, *The European environment — State and outlook 2005*. Copenhagen, 2005.
- [30] I. Schulze and M. Colby, *A Conceptual Framework To Support Development And Use Of Environmental Information In Decision-making*. EPA Environmental Statistics and Information Division (ESID), 1995.
- [31] J. Kirchherr, D. Reike, and M. Hekkert, “Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 127, no. September, pp. 221–232, 2017,
- [32] K. L. Ang, E. T. Saw, W. He, X. Dong, and S. Ramakrishna, “Sustainability framework for pharmaceutical manufacturing (PM): A review of research landscape and implementation barriers for circular economy transition,” *J. Clean. Prod.*, vol. 280, p. 124264, 2021,
- [33] A. E. Bonilla Hernandez, T. Lu, T. Beno, C. Fredriksson, and I. S. Jawahir, “Process sustainability evaluation for manufacturing of a component with the 6R application,” *Procedia Manuf.*, vol. 33, pp. 546–553, 2019,

- [34] European Council, “Directive 2008/98/CE of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives.,” *Off. J. Eur. Union*, vol. L312, pp. 1–59, 2008, [Online]. Available: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:312:0003:01:ES:HTML>
- [35] OECD, “RE-CIRCLE: resource efficiency and circular economy,” 2018. <https://www.oecd.org/environment/waste/recircle.htm> (accessed Mar. 29, 2021).
- [36] European Commission, “Circular Economy Action Plan.” 2020.
- [37] R. Engelman, “Beyond Sustainability,” in *State of the World 2013: Is Sustainability Still Possible?*, The WorldWatch Institute, Island Press, 2013.
- [38] A. Murray, K. Skene, and K. Haynes, “The Circular Economy: An Interdisciplinary Exploration of the Concept and Application in a Global Context,” *J. Bus. Ethics*, vol. 140, no. 3, pp. 369–380, 2017,
- [39] A. S. Homrich, G. Galvão, L. G. Abadia, and M. M. Carvalho, “The circular economy umbrella: Trends and gaps on integrating pathways,” *J. Clean. Prod.*, vol. 175, pp. 525–543, 2018,
- [40] J. Korhonen, A. Honkasalo, and J. Seppälä, “Circular Economy: The Concept and its Limitations,” *Ecol. Econ.*, vol. 143, pp. 37–46, 2018,
- [41] J. Korhonen, “Industrial ecology in the strategic sustainable development model: strategic applications of industrial ecology,” *J. Clean. Prod.*, vol. 12, pp. 809–823, 2004,
- [42] R. J. Welford, “Editorial: Corporate environmental management, technology and sustainable development: Postmodern perspectives and the need for a critical research agenda,” *Bus. Strateg. Environ.*, vol. 7, no. 1, pp. 1–12, 1998,
- [43] F. Figge and A. S. Thorpe, “The symbiotic rebound effect in the circular economy,” *Ecol. Econ.*, vol. 163, no. May, pp. 61–69, 2019,
- [44] W. B. Arthur, *Increasing Return and Path Dependence in the Economy*. The University of Michigan Press, 1994.
- [45] B. Norton, R. Costanza, and R. C. Bishop, “The evolution of preferences - Why ‘sovereign’ preferences may not lead to sustainable policies and what to do about it,” *Ecol. Econ.*, vol. 24, no. 2–3, pp. 193–211, 1998,
- [46] M. Geissdoerfer, P. Savaget, N. M. P. Bocken, and E. Jan, “The Circular Economy - A new

sustainability paradigm?,” *J. Clean. Prod.*, vol. 143, pp. 757–768, 2017,

- [47] L. Acero and P. Savaget, “Plural understandings of sociotechnical progress within the Organisation for Economic Cooperation and Development (OECD),” in *12th Globelics International Conference*, 2014, no. # Track 8: Science, technology and innovation policy and politics.
- [48] European Commission and Eurostat, “Circular economy – Overview.” <https://ec.europa.eu/eurostat/web/circular-economy> (accessed Apr. 17, 2021).
- [49] J. R. Peeters, D. Altamirano, W. Dewulf, and J. R. Duflou, “Forecasting the composition of emerging waste streams with sensitivity analysis: A case study for photovoltaic (PV) panels in Flanders,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 120, pp. 14–26, 2017,
- [50] IRENA and IEA-PVPS, ““End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels,.”” International Renewable Energy Agency and International Energy Agency Photovoltaic Power Systems, p. 100, 2016. [Online]. Available: www.irena.org
- [51] C. C. Farrell *et al.*, “Technical challenges and opportunities in realising a circular economy for waste photovoltaic modules,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 128, no. February, p. 109911, 2020,
- [52] R. Poukka and Deloitte Finland, “The future of the global energy market – circular economy in energy industry,” 2018. [Online]. Available: https://www.valmet.com/globalassets/media/events/2018/customer-days-2018/energy/the-future-of-the-global-energy-market_riikka-poukka.pdf
- [53] L. Gitelman, E. Magaril, M. Kozhevnikov, and E. C. Rada, “Rational behavior of an enterprise in the energy market in a circular economy,” *Resources*, vol. 8, no. 2, 2019,
- [54] OECD, “Development Results: An Overview of Results Measurement and Management,,” pp. 1–8, 2013, [Online]. Available: <https://www.oecd.org/dac/peer-reviews/Development-Results-Note.pdf>
- [55] H. Gudmundsson, R. P. Hall, G. Marsden, and J. Zietsman, *Sustainable Transportation - Indicators, Frameworks and Performance Management*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2016.
- [56] World Commission on Environment and Development, *Our Common Future*. Oxford University Press, 1987.
- [57] United Nations Division for Sustainable Development, “Agenda 21.” New York/Geneva, 1992.
- [58] United Nations Department of Economic and Social Affairs, “Indicators of Sustainable

Development : Guidelines and Methodologies,” *New York*. 2001.

- [59] E. Giovannini, “Accounting Frameworks for Sustainable Development : What Have We Learnt ?,” in *OECD, Measuring Sustainable Development: Integrated Economic, Environmental and Social Frameworks*, Paris: OECD Publishing, 2004.
- [60] M. Bunge, “What is a Quality of Life Indicator ?,” *Soc. Indic. Res.*, vol. 2, no. 1, pp. 65–79, 1975.
- [61] I. A. Pissourios, “An interdisciplinary study on indicators : A comparative review of quality-of-life , macroeconomic , environmental , welfare and sustainability indicators,” *Ecol. Indic.*, vol. 34, pp. 420–427, 2013,
- [62] Eurostat, *Getting messages across using indicators - A handbook based on experiences from assessing Sustainable Development Indicators*. 2014.
- [63] OECD, “OECD Environmental Indicators - Development, measurement and use,” 2001.
- [64] P. Kristensen, “The DPSIR framework,” in *A comprehensive / detailed assessment of the vulnerability of water resources to environmental change in Africa using river basin approach.*, 2004, pp. 1–10. [Online]. Available: [http://enviro.lclark.edu:8002/rid=1145949501662_742777852_522/DPSIR Overview.pdf](http://enviro.lclark.edu:8002/rid=1145949501662_742777852_522/DPSIR%20Overview.pdf)
- [65] R. Smith, “A capital-based sustainability accounting framework for Canada,” in *OECD, Measuring Sustainable Development Integrated Economic, Environmental and Social Frameworks*, Paris: OECD Publishing, 2004.
- [66] Anna McCord, R. Holmes, and L. Harman, “Indicators to measure Social Protection Performance, Concept Paper N° 5,” in *Tools and Methods Series*, no. January, R. Griffiths, Ed. European Union, 2017.
- [67] P. Hardi, T. Zdan, and I. I. for S. Development, *Assessing Sustainable Development: Principles in Practice*. 1997.
- [68] L. Pintér, P. Hardi, A. Martinuzzi, and J. Hall, “Bellagio STAMP: Principles for sustainability assessment and measurement,” *Ecol. Indic.*, vol. 17, pp. 20–28, 2012,
- [69] DEVCO (Directorate-General for International Cooperation and Development) — EU, “Integrating the environment and climate change into EU international cooperation and development, Towards sustainable development.” 2016.

- [70] Ramboll and European Commission, "Improving Monitoring Indicators System to Support DG Competition's Future Policy Assessment," 2017.
- [71] European Commission, "A monitoring framework for the circular economy. COM(2018) 29 final.16.1.2018," *COM/2018/29 Final*, vol. 29, no. final, pp. 1–11, 2018, [Online]. Available: http://ec.europa.eu/environment/circular-economy/index_en.htm
- [72] European Commission, *Development of a system of common indicators for European Regional Development Fund and Cohesion Fund interventions after 2020*. 2020.
- [73] G. Doran, "There's a S.M.A.R.T way to write management's goals and objectives.pdf," *Management Review*, vol. 70, no. 11, pp. 35–36, 1981. [Online]. Available: <https://community.mis.temple.edu/mis0855002fall2015/files/2015/10/S.M.A.R.T-Way-Management-Review.pdf>
- [74] A. Parida and U. Kumar, "Maintenance performance measurement (MPM): Issues and challenges," *J. Qual. Maint. Eng.*, vol. 12, no. 3, pp. 239–251, 2006,
- [75] J. T. Selvik, S. Bansal, and E. B. Abrahamsen, "On the use of criteria based on the SMART acronym to assess quality of performance indicators for safety management in process industries," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 70, no. January, 2021,
- [76] S. Schiavo-campo and A. D. Bank, "Strengthening ' Performance ' in Public Expenditure Management," *Rev. Lit. Arts Am.*, vol. XI, no. 2, 1999.
- [77] T. Hak, J. Kovanda, and J. Weinzettel, "A method to assess the relevance of sustainability indicators: Application to the indicator set of the Czech Republic's Sustainable Development Strategy," *Ecol. Indic.*, vol. 17, pp. 46–57, 2012,
- [78] A. Parchomenko, D. Nelen, J. Gillabel, and H. Rechberger, "Measuring the circular economy - A Multiple Correspondence Analysis of 63 metrics," *J. Clean. Prod.*, vol. 210, pp. 200–216, 2019,
- [79] V. Van Hoof, C. Maarten, and A. Vercalsteren, "Indicators for a Circular Economy," *SUMMA CIRCULAR ECONOMY POLICY RESEARCH CENTRE*. 2018. [Online]. Available: https://circulareconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/summa_-_indicators_for_a_circular_economy.pdf
- [80] A. Vanoli, "National Accounting at the beginning of the 21: Wherefrom? Whereto?" European Commission, 2016. [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/eurostat/cros/content/national->

- [81] United Nations, “A System of National Accounts and Supporting Tables.” 1953. [Online]. Available: <https://unstats.un.org/unsd/nationalaccount/docs/1953sna.pdf>
- [82] UN, IMF, C. of E. C.- Eurostat, and OECD, “System of National Accounts 1993.” 1993.
- [83] R. Smith, “Development of the SEEA 2003 and its implementation,” *Ecol. Econ.*, vol. 61, no. 4, pp. 592–599, 2007,
- [84] UN, “Integrated environmental and economic accounting.” New York, pp. 178–1, 1993. [Online]. Available: https://unstats.un.org/unsd/publication/SeriesF/SeriesF_61E.pdf
- [85] UN, *System of Environmental-Economic Accounting 2012: Central Framework*. New York, 2014.
- [86] UNSC (United Nations Statistical Commission), “Environmental-economic accounting (Decisions),” 2012. <https://unstats.un.org/unsd/statcom/decisions/> (accessed Mar. 16, 2021).
- [87] UN, *The System of National Accounts 2008*. New York, 2009.
- [88] UNSD, *System of Environmental-Economic Accounting for Energy: SEEA-Energy*. 2019.
- [89] UN, *SEEA-Water: System of Environmental-Economic Accounting for Water*. 2012. [Online]. Available: <https://unstats.un.org/unsd/envaccounting/seeaw/seeawaterwebversion.pdf>
- [90] U. Nations, *System of Environmental-Economic Accounting for Agriculture, Forestry and Fisheries (SEEA AFF)*. 2020.
- [91] Eurostat, *Economy-wide material flow accounts HANDBOOK*. 2018. [Online]. Available: http://ec.europa.eu/eurostat/about/policies/copyright%0Ahttps://ec.europa.eu/eurostat/documents/3859598/9117556/KS-GQ-18-006-EN-N.pdf/b621b8ce-2792-47ff-9d10-067d2b8aac4b%0Ahttp://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/product_details/publication?p_
- [92] M. Fischer-Kowalski *et al.*, “Methodology and indicators of economy-wide material flow accounting: State of the art and reliability across sources,” *J. Ind. Ecol.*, vol. 15, no. 6, pp. 855–876, 2011,
- [93] Eurostat, *European System of Accounts 2010*. 2010. [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-manuals-and-guidelines/-/KS-02-13-269>

- [94] OECD, “Air Transport CO2 Emissions.” https://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=AIRTRANS_CO2 (accessed Mar. 08, 2022).
- [95] E. W. Mfa, “Technical Note Further clarifying the conceptual treatment of physical imports and exports in economy - wide material flow accounts,” no. October, 2017.
- [96] CSIRO and A. N. S. Agency, “Technical annex for Global Material Flows Database,” 2018. [Online]. Available: http://www.csiro.au/~media/LWF/Files/CES-Material-Flows_db/Technical-annex-for-Global-Material-Flows-Database.pdf
- [97] Eurostat and UNSD, “SEEA Technical Note: Economy-Wide Material Flow Accounts,” 2017. [Online]. Available: https://seea.un.org/sites/seea.un.org/files/mfa_final_draft.pdf
- [98] P. L. Joskow, “Lessons Learned From Electricity Market Liberalization,” *Energy J.*, pp. 9–42, 2008.
- [99] IEA, “Re-powering Markets: Market Design and Regulation during the transition to lowcarbon power systems,” *Int. Energy Agency Electr. Mark. Ser.*, p. 246, 2016, [Online]. Available: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/REPOWERINGMARKETS.pdf>
- [100] D. S. Kirschen and G. Strbac, “Fundamentals of power system economics.” John Wiley & Sons, 2019.
- [101] W. Brokeing Christie and R. Palma Behnke, *Atrapando el sol en los sistemas eléctricos de potencia*. Santiago, 2018. [Online]. Available: http://sepsolar.centroenergia.cl/pdf/libro_download.pdf
- [102] GIZ 4eChile and M. de Energía, “Mapa Normativo del Sector Energético Chileno,” *Programa 4eChile*, 2019. https://energia.gob.cl/sites/default/files/mapeo_normativa_energetica_2021.pdf (accessed Mar. 08, 2022).
- [103] Ministerio Secretaría General de la Presidencia, “Ley 20936 ESTABLECE UN NUEVO SISTEMA DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA Y CREA UN ORGANISMO COORDINADOR INDEPENDIENTE DEL SISTEMA ELÉCTRICO NACIONAL,” *Biblioteca del Congreso Nacional de Chile / BCN*, 2016.
- [104] Ministerio de Energía, “Proceso de Planificación Energética de Largo Plazo, Informe de Actualización de Antecedentes 2019.” p. 93, 2019. [Online]. Available: <http://pelp.minenergia.cl/informacion-del-proceso/resultados>
- [105] Ministerio de Energía, “Planificación Energética de Largo Plazo - Informe Preliminar (PELP 2023 - 2027),” 2021. [Online]. Available: <https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/pelp2023-2027.pdf>

- [106] Ministerio de Energía, “Proceso de Planificación Energética de Largo Plazo: Plan de Trabajo (2016).” 2016.
- [107] Ministerio de Energía, “Proceso de Planificación Energética de Largo Plazo: Plan de Trabajo (2017).” 2017. [Online]. Available: http://www.energia.gob.cl/sites/default/files/plan_de_trabajo_pelp_6feb17.pdf
- [108] Ministerio Secretaría General de la Presidencia, “Ley 19300 APRUEBA LEY SOBRE BASES GENERALES DEL MEDIO AMBIENTE,” *Biblioteca del Congreso Nacional de Chile / BCN*, 1994. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=30667> (accessed Dec. 31, 2021).
- [109] Ministerio de Energía, “Planificación Energética De Largo Plazo, Informe De Actualización De Antecedentes 2020.” 2020.
- [110] Ministerio de Energía, “Plan Energético Regional TARAPACÁ: Diagnóstico y alternativas,” 2017. [Online]. Available: <http://energiaabierta.cne.cl/estudios/page/26/?lang=en%2Ffeed%2F&categoria-e&organismo-e&from=2015&to>
- [111] J. Tropman, C. E. Cochran, L. C. Mayer, T. R. Carr, and N. J. Cayer, *American Public Policy: An Introduction*. Michael Rosenberg, 2009.
- [112] A. L. Schneider, H. Ingram, and S. S. Nagel, “Chapter 6 - Policy Design: Elements, Premises, and Strategies,” in *Policy Theory and Policy Evaluation*, S. S. Nagel, Ed. Greenwood Press, 1990.
- [113] S. Sorrel, “Interaction in EU climate policy - Project No.: EVK2-CT-2000-0067,” 2003.
- [114] B. Görlach, “What constitutes an optimal climate policy mix? Defining the concept of optimality, including political and legal framework conditions.” 2013. [Online]. Available: [https://cecilia2050.eu/system/files/Görlach %282013%29_What constitutes an optimal policy mix_0.pdf](https://cecilia2050.eu/system/files/Görlach%202013%29_What%20constitutes%20an%20optimal%20policy%20mix_0.pdf)
- [115] Climate Policy Info Hub, “Discussion of Climate Policy Instrument Types Applied in the EU.” <https://climatepolicyinfohub.eu/discussion-climate-policy-instrument-types-applied-eu> (accessed Apr. 11, 2021).
- [116] K. Kosonen and G. Nicodème, “Taxation Papers: The role of fiscal instruments in environmental policy.” Luxembourg, 2009.

- [117] McLennan Magasanik Associates and P. LTD, “Policy Brief: Baseline And Credit Versus Cap And Trade Emissions,” 2004, [Online]. Available: http://www.climateinstitute.org.au/verve/_resources/cap_and_trade_vs_baseline_briefing_paper_june_25_2009.pdf
- [118] C. Coleman and E. Dietz, “Fact Sheet: Fossil Fuel Subsidies: A Closer Look at Tax Breaks and Societal Costs,” *Environ. Energy Study Inst.*, no. July, pp. 1–12, 2019, [Online]. Available: <https://www.eesi.org/papers/view/fact-sheet-fossil-fuel-subsidies-a-closer-look-at-tax-breaks-and-societal-costs#1>
- [119] H. Siebert, “Chapter 20 - Liability Issues in Pollution Control,” in *Persistent Pollutants: Economics and Policy*, J. B. Opschoor and D. W. Pearce, Eds. Springer, 1991, pp. 183–195.
- [120] Department for Environment Food & Rural Affairs, “Environmental Permitting Guidance Core guidance For the Environmental Permitting (England and Wales) Regulations 2016 (SI 2016 No 1154),” London, 2020.
- [121] Roland Berger Strategy Consultants, “Permitting procedures for energy infrastructure projects in the EU : evaluation and legal recommendations,” Berlin/Brussels, 2011.
- [122] U.S. Department of Energy, “California Solar Environmental Review (9-CA).” <https://openei.org/wiki/RAPID/Solar/California/Environment> (accessed Mar. 09, 2022).
- [123] A. De Serres, F. Murtin, and G. Nicoletti, “Framework for Assessing Green Growth Policies, OECD Economics Department Working Papers No. 774,” OECD Publishing, Paris, 2010. [Online]. Available: <https://dx.doi.org/10.1787/5kmfj2xvcmkf-en>
- [124] European Parliament and Council of the European Union, “REGULATION (EC) No 66/2010 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL.” 2009.
- [125] COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES, “COM(2008) 400 final COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS.” Brussels, 2008.
- [126] N. Dodd and N. Espinosa, “Solar photovoltaic modules , inverters and systems: options and feasibility of EU Ecolabel and Green Public Procurement criteria, Preliminary report,” Publications Office of the European Union, Luxemburg, 2021.

- [127] Ministerio Secretaría General de la Presidencia, “Decreto 30 PROMULGA EL ACUERDO DE PARÍS, ADOPTADO EN LA VIGÉSIMO PRIMERA REUNIÓN DE LA CONFERENCIA DE LAS PARTES DE LA CONVENCION MARCO DE LAS NACIONES UNIDAS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO,” *Biblioteca del Congreso Nacional de Chile / BCN*, 2017. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1103158> (accessed Dec. 31, 2021).
- [128] Ministerio del Medio Ambiente, “Estrategia Climática de Largo Plazo, Página Web.” <https://cambioclimatico.mma.gob.cl/estrategia-climatica-de-largo-plazo-2050/descripcion-del-instrumento/> (accessed Dec. 31, 2021).
- [129] ECLP2050 and Ministerio del Medio Ambiente, “Estrategia Climática de Largo Plazo de Chile: Camino a la Carbono Neutralidad y Resiliencia a más tardar al 2050,” 2021. [Online]. Available: <https://cambioclimatico.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2021/11/ECLP-LIVIANO.pdf>
- [130] Servicio de Evaluación Ambiental, “¿Cuál es el Proceso de Evaluación de Impacto Ambiental?” <https://www.sea.gob.cl/evaluacion-de-impacto-ambiental/cual-es-el-proceso-de-evaluacion-de-impacto-ambiental> (accessed Dec. 31, 2021).
- [131] GIZ 4eChile, “Serie de Folletos - Instrumentos de Precio al Carbono; PUNTO DE PARTIDA PARA EL DESPLIEGUE DE INSTRUMENTOS DE PRECIO AL CARBONO EN CHILE,” 2021.
- [132] Ministerio del Medio Ambiente, “Ley 20920 ESTABLECE MARCO PARA LA GESTIÓN DE RESIDUOS, LA RESPONSABILIDAD EXTENDIDA DEL PRODUCTOR Y FOMENTO AL RECICLAJE,” *Biblioteca del Congreso Nacional de Chile / BCN*, 2016. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1090894> (accessed Dec. 31, 2021).
- [133] Ministerio de Energía, “PLAN NACIONAL DE EFICIENCIA ENERGÉTICA 2022- 2026,” 2021.
- [134] P. Morsetto, “Restorative and regenerative: Exploring the concepts in the circular economy,” *J. Ind. Ecol.*, vol. 24, no. 4, pp. 763–773, 2020,
- [135] E. C. in S. & T. COST, “Sustainability, Restorative to Regenerative: An exploration in progressing a paradigm shift in built environment thinking, from sustainability to restorative sustainability and on to regenerative sustainability,” 2018. [Online]. Available: https://www.eurestore.eu/wp-content/uploads/2018/05/RESTORE_booklet_print_END.pdf
- [136] Doughnut Economics Action Lab, “About Doughnut Economics.” <https://doughnuteconomics.org/about-doughnut-economics> (accessed Dec. 31, 2021).

- [137] H. Haberl, M. Fischer-Kowalski, F. Krausmann, H. Weisz, and V. Winiwarter, “Progress towards sustainability? What the conceptual framework of material and energy flow accounting (MEFA) can offer,” *Land use policy*, vol. 21, no. 3, pp. 199–213, 2004,
- [138] OECD, “Glossary of statistical terms - Center of economic interest,” 2001. <https://stats.oecd.org/glossary/detail.asp?ID=724> (accessed Apr. 26, 2021).
- [139] Eurostat, United Nations Environment Programme, I. R. Panel, and OECD, “The use of natural resources in the economy A Global Manual on Economy Wide Material Flow Accounting,” 2021. [Online]. Available: <https://www.resourcepanel.org/reports/global-manual-economy-wide-material-flow-accounting>
- [140] IRENA, *Global energy transformation: A roadmap to 2050 (2019 edition)*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2019. [Online]. Available: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Apr/IRENA_Global_Energy_Transformation_2019.pdf
- [141] E2BIZ, “‘Apoyo a la implementación de reformas en modernización del sector eléctrico - Apoyo al Proyecto de Ley de Eficiencia Energética’ Informe de Avance 2,” 2021.
- [142] Ministerio de Hacienda y Administraciones Públicas - Gobierno de España, “Evaluación del Plan de Ahorro y Eficiencia Energética 2008 - 2012 Agencia estatal de Evaluación de las Políticas Públicas y Calidad de los Servicios (AEVAL),” 2014.
- [143] F. Li, Z. Ye, X. Xiao, J. Xu, and G. Liu, “Material stocks and flows of power infrastructure development in China,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 160, no. May 2019, p. 104906, 2020,
- [144] E. Nieuwlaar, “Life Cycle Assessment and Energy Systems,” *Encycl. Energy*, vol. 3, pp. 647–654, 2013.
- [145] T. T. and H. Z. Myhre, G., D. Shindell, F.-M. Bréon, W. Collins, J. Fuglestedt, J. Huang, D. Koch, J.-F. Lamarque, D. Lee, B. Mendoza, T. Nakajima, A. Robock, G. Stephens, “Anthropogenic and Natural Radiative Forcing,” in *Climate Change the Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, vol. 9781107057, Cambridge University Press, Cambridge, 2013, pp. 659–740.
- [146] S. Sala, L. Benini, V. Castellani, B. Vidal-Legaz, and R. Pant, “Environmental Footprint - Update of Life Cycle Impact Assessment methods ; DRAFT for TAB (status : May 2 , 2016) Resources , water , land,” pp. 1–114, 2016, [Online]. Available:

http://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/pdf/JRC_DRAFT_EFLCIA_resources_water_landuse.pdf

- [147] L. van Oers, J. B. Guinée, and R. Heijungs, “Abiotic resource depletion potentials (ADPs) for elements revisited—updating ultimate reserve estimates and introducing time series for production data,” *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 25, no. 2, pp. 294–308, 2020,
- [148] P. Van Den Heede and N. De Belie, “Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and ‘green’ concretes: Literature review and theoretical calculations,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 34, no. 4, pp. 431–442, 2012,
- [149] R. B. Meshram and S. Kumar, “Comparative life cycle assessment (LCA) of geopolymers cement manufacturing with Portland cement in Indian context,” *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, no. 0123456789, 2021,
- [150] J. Speirs, C. McGlade, and R. Slade, “Uncertainty in the availability of natural resources: Fossil fuels, critical metals and biomass,” *Energy Policy*, vol. 87, pp. 654–664, 2015,
- [151] United Nations (UN), “THE 17 GOALS, SDGs.” <https://sdgs.un.org/es/goals> (accessed Jun. 16, 2021).
- [152] European Union, “EU self-sufficiency for raw materials.” https://ec.europa.eu/eurostat/cache/metadata/en/cei_pc010_esmsip2.htm (accessed Dec. 31, 2021).
- [153] IEA, “IEA Atlas of Energy, Energy indicators.” <http://energyatlas.iea.org/#!/tellmap/-297203538> (accessed Dec. 31, 2021).
- [154] A. Elshkaki and L. Shen, “Energy-material nexus: The impacts of national and international energy scenarios on critical metals use in China up to 2050 and their global implications,” *Energy*, vol. 180, pp. 903–917, 2019,
- [155] R. Moss *et al.*, “Critical Metals in the Path towards the Decarbonisation of the EU Energy Sector: Assessing Rare Metals as Supply-Chain Bottlenecks in Low-Carbon Energy Technologies,” 2013.
- [156] W. de Ridder, J. Turnpenny, M. Nilsson, and A. Von Raggamby, “A framework for tool selection and use in integrated assessment for sustainable development,” *J. Environ. Assess. Policy Manag.*, vol. 9, no. 4, pp. 423–441, 2007,
- [157] IRENA, *Scenarios for the Energy Transition: Global experience and best practices*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2020. [Online]. Available:

<https://www.irena.org/publications/2020/Sep/Scenarios-for-the-Energy-Transition-Global-experience-and-best-practices>

- [158] P. M. Boulanger, “Political uses of social indicators: Overview and application to sustainable development indicators,” *Int. J. Sustain. Dev.*, vol. 10, no. 1–2, pp. 14–32, 2007,
- [159] B. Ness, E. Urbel-Piirsalu, S. Anderberg, and L. Olsson, “Categorising tools for sustainability assessment,” *Ecol. Econ.*, vol. 60, no. 3, pp. 498–508, 2007,
- [160] P. Fortes, A. Alvarenga, J. Seixas, and S. Rodrigues, “Long-term energy scenarios: Bridging the gap between socio-economic storylines and energy modeling,” *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 91, pp. 161–178, 2015,
- [161] Coordinador Eléctrico Nacional, “Infotécnica.” <https://infotecnica.coordinador.cl/> (accessed Dec. 31, 2021).
- [162] Banco Central de Chile, “CRECIMIENTO TENDENCIAL: PROYECCIÓN DE MEDIANO PLAZO Y ANÁLISIS DE SUS DETERMINANTES,” 2017. [Online]. Available: https://www.bcentral.cl/documents/33528/1325580/crecimiento_tendencial_sep2017.pdf/4a8878cf-a68b-caa3-0372-49b55032211d?t=1573288037550
- [163] División de Evaluación Social de Inversiones and Ministerio de Desarrollo, “Estimación del precio social del CO₂,” Santiago, 2017.
- [164] D. Hervéa, L. Corderob, and P. Moraga, “Cápsula Climática: ¿Qué es la justicia ambiental?,” *CR2*, 2020. <https://www.cr2.cl/capsula-climatica-que-es-la-justicia-ambiental/> (accessed Mar. 09, 2022).