



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

EVOLUCIÓN HISTÓRICA Y NUEVAS ALTERNATIVAS PARA LA MITIGACIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO (GEI) EN CHILE: ANÁLISIS DE TECNOLOGÍAS, COSTOS Y BENEFICIOS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

NICOLÁS ALEJANDRO RODRÍGUEZ ALBORNOZ

PROFESOR GUÍA:

MANUEL DÍAZ ROMERO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

REYNALDO CABEZAS CIFUENTES

MÓNICA ZAMORA ZAPATA

SANTIAGO DE CHILE

2024

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR

AL TÍTULO DE: Ingeniero Civil Mecánico

POR: Nicolás Alejandro Rodríguez Albornoz

FECHA: 2024

PROFESOR GUÍA: Manuel Díaz Romero

EVOLUCIÓN HISTÓRICA Y NUEVAS ALTERNATIVAS PARA LA MITIGACIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO (GEI) EN CHILE: ANÁLISIS DE TECNOLOGÍAS, COSTOS Y BENEFICIOS

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar la factibilidad técnica y económica de diferentes alternativas de mitigación innovadoras de Gases de Efecto Invernadero (GEI) para la Industria y Minería (I&M) en Chile. Para realizar lo anterior, en primer lugar, se recopiló información en el contexto de las medidas de mitigación actualmente utilizadas y proyectadas para Chile y el mundo en el sector de I&M. A partir de lo anterior, se determinaron cinco áreas con medidas particulares de mitigación, que poseen alto potencial y proyección, y que son innovadoras en el contexto chileno, categorizadas en: Economía circular, Hidrógeno verde, Captura de carbono, Digitalización e Instrumentos de mitigación.

Se determinó que la metodología más adecuada para este estudio corresponde a una metodología multicriterio del tipo AHP, para la cual se seleccionaron criterios en base a aprendizajes de esfuerzos de mitigación anteriores y bibliografía pertinente. Esta metodología fue utilizada para todas las categorías, exceptuando instrumentos de mitigación, debido a que no existe información concreta respecto a los costos y reducciones asociadas a su implementación. Por esta razón, se decidió realizar la elección de los instrumentos óptimos para el contexto chileno en base al análisis de factibilidad para el contexto chileno y revisión de antecedentes. Para la metodología AHP también se realizaron análisis de sensibilidad que muestran la influencia de los pesos relativos de los criterios en la elección de medidas. A su vez, en las metodologías de selección son consideradas las opiniones de expertos de las diferentes áreas estudiadas, las cuales sirven como guía y sustento de las elecciones realizadas.

Se concluye a partir de la metodología AHP y los análisis de sensibilidad, que las alternativas más viables para el contexto chileno son las alternativas de Digital Twin, AI Management, Hidrógeno verde para DRI y ecodiseño. Además, se determina que las medidas de digitalización poseen costos de abatimiento y potenciales de reducción bajos, mientras que la alternativa de Hidrógeno verde posee potencial de abatimiento alto y costos de abatimiento medio-alto, y la de ecodiseño costo de abatimiento alto y potencial de reducción medio-alto. Por otra parte, para los instrumentos de mitigación las opciones más viables corresponden a las alternativas de LCA y Carbon Tax-ETS, con el primero presentando un potencial de abatimiento medio, y los restantes un potencial de abatimiento medio-alto. Para cada una de estas medidas se genera un plan de acción y se entregan recomendaciones en base al contexto del país, dentro de las que se encuentran el aumento de legislación, de inversión, investigación, entre otros.

Agradecimientos

A través de este trabajo doy por finalizada esta etapa universitaria, una linda etapa que se me pasó más rápido de lo que creí y a partir de la cual obtengo valiosas herramientas, que espero me ayuden a ser un verdadero aporte en la sociedad.

Primero, quiero agradecer a mi familia, ya que sin ellos no sería posible estar acá. A mis padres, por el (gran) apoyo económico que me brindaron durante esta etapa, que estoy eternamente agradecido de haber recibido, sabiendo el privilegio que eso significa hoy en día, pero también por el enorme apoyo emocional que me han entregado siempre, los consejos y las conversaciones. A mis hermanas, a las que hace unos años vi pasar por este proceso, y en ese entonces, no me imaginaba tener que vivir la misma experiencia. A ustedes gracias por las risas y por siempre estar ahí, por entenderme y mostrarme otras formas de mirar la vida.

Infaltable también el agradecimiento a mi Toki, gracias por el amor que me das todos los días, por los paseos que me obligas a darte todas las semanas, por la alegría que me entregas cuando juegas conmigo, y el apoyo incondicional que me diste cada vez que me viste mal. Llegaste hace 5 años a cambiar mi vida, y la verdad me cuesta imaginarme que hubiese sido de mi sin ti.

Gracias a mi Giuli, por todo el apoyo y el cariño que me das todos los días, pero también gracias por tu apoyo en el ámbito académico, por esas correcciones en la ortografía, en la redacción, y como no nombrar todas esas referencias en APA 7 que revisaste. Gracias también por todos esos consejos que me diste en los momentos en que más lo necesitaba a lo largo de este trabajo, y que me dieron fuerza para seguir. Nunca pensé que me fueses a apoyar tanto en este ámbito en particular, pero te transformaste en un pilar fundamental. Eres sequísima.

A mis amigos, que no son muchos pero siempre están y han estado. A los que conocí cuando tenía 3 años, los del colegio, los que conocí acá en la U y los que han ido cruzándose en mi camino, gracias por siempre darse el tiempo, en los carretes, para tomar un café, o para juntarse a conversar. Se que en ustedes puedo confiar lo que sea, y no hubiese disfrutado tanto esta etapa si no fuese por ustedes.

Al Centro de Energía y en particular al profesor Manuel Díaz, por darme la oportunidad de trabajar en esto, un tema muy amplio, pero sumamente interesante, que me hizo confirmar la línea profesional en la cual quiero seguir desempeñándome. Gracias también profesor, por darse el tiempo en las reuniones, el apoyo, consejos y guía que me otorgó durante todo el trabajo, y gracias también a Reynaldo Cabezas por el apoyo académico y recomendaciones a lo largo de este semestre. Gracias también a todos los profesionales que se dieron el tiempo y lograron apoyarme en este trabajo a través de entrevistas, conversaciones y consejos.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
2. Chile en el Contexto del Cambio Climático	3
2.1 Emisiones de GEI en Chile	6
2.1.1 Emisiones de I&M	8
2.1.1.1 Sector Energía	8
2.1.1.2 Sector Procesos Industriales y Uso de Producto (IPPU)	11
2.2 Alternativas de mitigación	12
2.2.1 Alternativas de mitigación pasadas	12
2.2.2 Alternativas de mitigación actuales	14
2.2.3 Alternativas de mitigación innovadoras	20
2.2.3.1 Economía circular	21
2.2.3.2 Hidrógeno Verde	24
2.2.3.3 Digitalización	27
2.2.3.4 Instrumentos de mitigación:	31
2.2.3.5 Captura de carbono (CCS y CCU)	34
3. Metodologías para la selección de alternativas de mitigación en I&M.	38
3.1 Metodología multicriterio AHP	38
3.2 Método Delphi	38
3.3 Análisis costo-beneficio	40
3.4 Análisis costo-efectividad	40
4. Propuesta de metodología de selección de alternativas de opciones de mitigación innovadoras	41
4.1 Aprendizajes de esfuerzos de mitigación anteriores	42
4.2 Selección de criterios	46
4.3 Diseño de metodología de selección	47
4.3.1 Multicriterio AHP	47
5. Evaluación portafolio de medidas	51
5.1 Evaluación AHP	51
5.1.1 Reducciones directas de GEI	52
5.1.2 Costo-eficacia:	53
5.1.3 Resto de subcriterios:	54
5.2 Análisis de sensibilidad	55
5.3 Elección de instrumentos de mitigación	60

6. Plan de acción	63
6.1 Alternativas de mitigación.....	63
6.1.1 Medidas de digitalización (AI Energy Management y Digital Twin).....	63
6.1.2 Hidrógeno Verde para DRI.....	64
6.1.3 Ecodiseño	66
6.2 Instrumentos de mitigación	67
6.2.1 LCA	67
6.2.2 Carbon Tax	69
6.2.3 ETS	71
7. Conclusiones.....	79
8. Bibliografía.....	84
Anexos.....	101
Anexo A: Obtención de mitigación y costos anualizados de medidas.	101
A.1 Ecodiseño.....	101
A.2 Simbiosis industrial.	102
A.3 Hidrógeno verde para acero Direct Reduced Iron (DRI).....	102
A.4 Hidrógeno verde para industria del cemento.	102
A.5 AI Energy Management para la industria del acero.	103
A.6 Digital Twin para industria del cemento.	103
A.7 Oxyfuel CCS para industria del cemento.	104
A.8 CCU para la producción de acero y metanol.	104
Anexo B: Herramientas para el apoyo de decisiones.	105
B.1 Curvas de abatimiento	105
B.2 Nivel de Madurez Tecnológica (TRL).....	105
Anexo C: Evolución de PV a través de los años	107
Anexo D: Matrices AHP	109
D.1 Reducción de GEI:.....	109
D.2 Efectos ambientales indirectos	109
D.3 Costo-eficacia	110
D.4 Costo-eficacia dinámico	110
D.5 Flexibilidad.....	114
D.6 Factibilidad técnica.....	117
D.7 Factibilidad administrativa	120
D.8 Factibilidad económica.....	122
Anexo E: Descripción de medidas seleccionadas para el contexto chileno.	127
E.1 Digital Twin para la industria del cemento	127

E.2 AI Management para la industria del acero	128
E.3 Hidrógeno verde para acero Direct Reduced Iron (DRI)	128
E.4 Ecodiseño.	129
E.5 LCA.....	130
Anexo F: Implementación de tecnologías digitales en PYMES	133
Anexo G: Roadmap para diseño de ETS en países en vías de desarrollo.	134
Anexo H: Cuadro resumen de entrevistas con expertos	135

Índice de Figuras

Figura 2-1: Esquema de relación entre instrumentos de mitigación chilenos (MMA, 2022).	6
Figura 2-2: Inventario de emisiones de GEI de Chile (MMA, 2022).	8
Figura 2-3: Emisiones sector Energía (Equipo Técnico del MINENERGIA, s.f)	9
Figura 2-4: Emisiones sector Energía, subsector Industrias Manufactureras y de la construcción (Equipo Técnico del MINENERGIA, s.f)	10
Figura 2-5: Emisiones minería (con excepción de combustibles) y cantería, subsector industrias manufactureras y de la construcción, sector Energía (Equipo Técnico del MINENERGIA, s.f). .	11
Figura 2-6: A la izquierda, Inventario de emisiones histórico para el sector IPPU, a la derecha, gráfica de distribución de emisiones para sector IPPU 2020 (MMA, 2022).....	12
Figura 2-7: Inventario de emisiones de I&M (Elaboración propia)	12
Figura 2-8: Esquema de funcionamiento de SST (Enercity S.A, 2023).....	15
Figura 2-9: Esquema de operación de SGE (Gestiona Energía MiPyMEs, 2023).....	17
Figura 2-10: Gráfica de reducciones acumuladas a partir de medidas para I&M (Elaboración propia).....	19
Figura 2-11: Esquema mariposa de economía circular (Ellen MacArthur Foundation, 2019)	21
Figura 2-12: Diagrama de flujos de simbiosis industrial propuesta (Gast et al., 2023)	23
Figura 2-13: Esquema referencial de producción y utilización de hidrógeno verde (BioBio Chile, 2020).....	25
Figura 2-14: Esquema de producción de DRI (Liberty Steel Grupo, s.f.).....	25
Figura 2-15: Esquema de funcionamiento de horno rotatorio (FLSmidth, 2023).....	26
Figura 2-16: Principales técnicas de Digitalización e Industria 4.0 (World Economic Forum, s.f)	28
Figura 2-17: Esquema referencial de modelo de Digital twin (Collins, 2022).....	30
Figura 2-18: Esquema referencial de operación de captura de carbono (MasScience, 2023).....	34
Figura 2-19: Esquema de operación de Oxyfuel junto con CCS (Carpenter, et al., 2023).	35
Figura 3-1: Esquema de fases del método Delphi (Manrubia, et al., 2020).	39
Figura 4-1: Curva de abatimiento de medidas de mitigación de GEI proyectada para 2020 (McKinsey & Company, 2009)	43
Figura 4-2: Curva de aprendizaje paneles solares (Roser, s.f)	43
Figura 4-3: Evolución y proyección de mercado de SST en EEUU (Grandviewresearch, s.f).....	45
Figura 4-4: Evolución del precio de CSP y otras tecnologías (REN21, 2020).	45
Figura 4-5: Evolución de la capacidad anual de plantas CSP (REN21, 2020).....	46
Figura 4-6: Criterios y subcriterios a utilizar en análisis AHP.....	50
Figura 5-1: Puntajes de alternativas para cada caso.	59

Figura 5-2: Tendencias de Carbon Pricing 2023 alrededor del mundo, con Chile en verde presentando solamente un Carbon Tax que cubre entre un 20% y 40% de las emisiones (World Bank, 2023).	62
Figura B-1: Curva de abatimiento NDC Chile versión 2020 (MMA, 2020).....	105
Figura B-2: Escala TRL (Compra Pública de Innovación-Aragón, 2022)	106
Figura C-1: Evolución de eficiencia de diferentes tipos de paneles solares (Simms, 2023).....	107
Figura C-2: Evolución de costos e instalaciones de paneles solares (O'Connor, et al., 2023)	107
Figura C-3: Evolución y proyección de porcentaje de participación de fuentes energéticas en matriz energética mundial (IEA, 2022)	108
Figura E-1: Esquema de funcionamiento de modelo de Digital Twin (Planet A GmbH, 2022)..	127
Figura E-2: Esquema iterativo para aplicación de modelo LCA (Smith y Johnson, 2023)	131
Figura E-3: Reducciones obtenidas por medidas identificadas en modelo LCA según fase (Smith y Johnson, 2023).....	132
Figura F-1: Roadmap para aplicación de medidas de digitalización en pequeñas y medianas empresas (Cotrino, et al., 2020).....	133
Figura G-1: Roadmap de aplicación de ETS (World Bank, 2016).....	134

Índice de Tablas

Tabla 2-1: Medidas de mitigación pasadas para el sector de I&M (PROGEA, 2007).....	14
Tabla 2-2: Medidas y reducciones pasadas por eficiencia energética para el sector de I&M (PROGEA, 2007)	14
Tabla 2-3: Resumen medidas de mitigación actuales para I&M.....	19
Tabla 2-4: Ficha resumen para ecodiseño.	22
Tabla 2-5: Ficha resumen para simbiosis industrial.	24
Tabla 2-6: Ficha resumen de hidrógeno verde para DRI.	26
Tabla 2-7: Ficha resumen hidrógeno verde para cemento.....	27
Tabla 2-8: Ficha resumen para AI Management.	29
Tabla 2-9: Ficha resumen para Digital Twin.....	30
Tabla 2-10: Ficha resumen para Oxyfuel CCS.....	35
Tabla 2-11: Ficha resumen para CCU.	36
Tabla 2-12: Tabla resumen de reducciones de instrumentos de mitigación.....	36
Tabla 2-13: Tabla resumen de reducciones y costos anualizados de medidas innovadoras.....	37
Tabla 3-1: Escala de Saaty (Gonzalez 2019).....	38
Tabla 4-1: Tabla de índice de consistencia RI (Zhao, et al., 2021).....	48
Tabla 4-2: Matriz de evaluación criterios.....	48
Tabla 4-3: Matriz de evaluación subcriterios ambientales	49
Tabla 4-4: Matriz de evaluación subcriterios aceptabilidad política.....	49
Tabla 4-5: Matriz de evaluación subcriterios factibilidad de implementación.	49
Tabla 5-1: Reducciones anuales y orden de preferencias de las alternativas en efectividad ambiental (Reducciones asociadas a lo indicado para el caso de UE).	52
Tabla 5-2: Costos anualizados y orden de preferencias de las alternativas en costo-eficacia.....	53
Tabla 5-3: Matriz con evaluaciones de alternativas según subcriterios.	54
Tabla 5-4: Matriz de preferencias según análisis AHP (Pesos relativos de criterios según tabla 4-2).....	55
Tabla 5-5: Pesos relativos de criterios según caso.	56
Tabla 5-6: Puntajes de alternativas para cada caso de análisis de sensibilidad.....	57
Tabla 6-1: Resumen de plan de acción para medidas de mitigación óptimas	73
Tabla 6-2: Resumen de plan de acción para instrumentos de mitigación óptimos.....	74
Tabla 6-3: Propuesta de medidas concretas para alternativas de mitigación	75
Tabla A-1: Vida útil, costos y reducciones de productos ecodiseñados para la industria.....	101
Tabla D-1: Matriz de evaluación para reducción de GEI.....	109
Tabla D-2: Matriz de evaluación para efectos ambientales indirectos.....	111

Tabla D-3: Matriz de evaluación para costo-eficacia.....	112
Tabla D-4: Matriz de evaluación para costo-eficacia dinámico	114
Tabla D-5: Matriz de evaluación para flexibilidad.....	117
Tabla D-6: Matriz de evaluación para factibilidad técnica.....	119
Tabla D-7: Matriz de evaluación para factibilidad administrativa	122
Tabla D-8: Matriz de evaluación para factibilidad económica.....	124
Tabla D-9: CR y CI según subcriterios	125
Tabla D-10: Pesos relativos de alternativas en efectividad ambiental	125
Tabla D-11: Pesos relativos de alternativas en aceptabilidad política.....	126
Tabla D-12: Pesos relativos de alternativas en factibilidad de implementación	126
Tabla H-1: Cuadro resumen de entrevistas y nombres de expertos.	135

1. Introducción

Los Gases de Efecto Invernadero o GEI se definen como componentes gaseosos que se encuentran en la atmósfera, que pueden ser de origen natural o provenientes de la actividad humana, y contribuyen directamente a lo que se conoce como efecto invernadero, un proceso mediante el cual gases acumulan calor en la atmósfera, lo cual incrementa la temperatura (Estrategia de Cambio Climático Península de Yucatán, s.f.). La convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático reconoce 6 tipos de GEI: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF₆) (Estrategia de Cambio Climático Península de Yucatán, s.f.). Cada año, y a medida que la población global aumenta, también lo hace el nivel de emisiones de GEI, cuya concentración está directamente asociada a la temperatura media mundial de la Tierra. En la actualidad, el GEI más abundante del planeta corresponde al CO₂ (Naciones Unidas, s.f.), y es en base a lo anterior que las emisiones generalmente se miden las emisiones en toneladas de CO₂ equivalente (CO₂ eq.).

En el contexto del cambio climático, y con el objetivo de contribuir a la sostenibilidad, en Chile se han establecido leyes y decretado cumplimiento a los tratados internacionales, tales como la ley de cambio climático y el acuerdo de París respectivamente (MMA, 2021). Además, se fijaron metas con respecto a las emisiones de CO₂ equivalente para los años futuros, estableciendo para el año 2050 la meta de carbono neutralidad, y para 2030 una emisión máxima de 95 millones de toneladas (MMA, 2021). A pesar de lo anterior, las estimaciones realizadas por la National Determined Contribution (NDC) y el observatorio de carbono neutralidad indican que, con las medidas y políticas de mitigación consideradas actualmente, Chile está lejos de cumplir con lo comprometido en temas de emisiones. En consecuencia, es necesaria la implementación de nuevas medidas de mitigación de GEI en los diferentes sectores productivos del país.

El presente trabajo de título busca realizar un análisis de factibilidad técnica y económica de distintas alternativas de mitigación innovadoras de GEI en el sector I&M en Chile, para luego elaborar propuestas y recomendaciones en base a los resultados obtenidos.

Los objetivos planteados para este trabajo consisten en:

Objetivo general: Evaluar la factibilidad técnica y económica de diferentes alternativas de mitigación innovadoras de GEI para la Industria y Minería (I&M) en Chile.

Objetivos específicos:

1. Realizar una revisión histórica de las emisiones, tecnologías y medidas de mitigación de GEI en I&M en Chile.
2. Identificar los factores que influyen en el desarrollo y potencial de las diferentes alternativas de mitigación
3. Analizar alternativas innovadoras no utilizadas actualmente en la mitigación de GEI en la

industria y minería de Chile.

4. Formular propuestas y recomendaciones de políticas públicas para la mitigación en I&M.

La motivación para la realización de este trabajo se basa en contribuir a la disminución de emisiones de GEI en Chile, en particular en la industria y minería, al identificar alternativas viables e innovadoras que logren mitigar el efecto invernadero y cumplir con las metas de carbono neutralidad para Chile propuestas para el año 2030 y 2050.

Para realizar lo anterior, en primer lugar, se realizará una recopilación histórica de las medidas y emisiones de GEI en el sector de I&M en Chile, identificando las leyes establecidas, acuerdos internacionales, evolución de las emisiones del sector, así como medidas de mitigación pasadas y presentes del mismo. Posteriormente, se detallarán las alternativas de mitigación innovadoras para el sector de I&M basadas en bibliografía reciente y en proyecciones internacionales, que actualmente no están siendo utilizadas en Chile o que no poseen gran prospección en temas de mitigación. Este portafolio de alternativas posteriormente será evaluado para definir qué medidas son las más beneficiosas.

Una vez explicitadas las alternativas de mitigación utilizadas a través de los años, se revisarán y compararán distintas metodologías de selección de alternativas, identificando sus ventajas y desventajas, con el fin de seleccionar la más adecuada para el estudio.

Con la metodología a utilizar ya seleccionada, y con el fin de determinar los criterios a considerar para su aplicación, se realizará una comparación entre las alternativas pasadas y presentes, identificando la evolución que han tenido en el sector las medidas de mitigación utilizadas. Además, se identificarán mediante entrevistas con expertos y bibliografía asociada los aprendizajes que se han dado en el tiempo a partir de la evolución de estas alternativas y su potencial de mitigación, de manera de reconocer los factores que habilitan medidas innovadoras sin tanto alcance en la actualidad. A partir de lo anterior se extraerán aprendizajes con relación a cómo identificar opciones viables de manera prospectiva y cómo potenciar medidas de mitigación.

Combinando los criterios obtenidos a partir de los aprendizajes con criterios de diferentes investigaciones y estudios relacionados, es que se define en su totalidad la metodología a utilizar, explicando las herramientas, datos necesarios y software a emplear. Posteriormente, se procede a evaluar el portafolio de medidas innovadoras indicado previamente, en donde se identificarán las alternativas más viables para la mitigación en el sector de I&M.

Finalmente, con las opciones de mayor prospección ya seleccionadas, se procederá a desarrollar un plan de acción para su implementación, junto con propuestas y recomendaciones a seguir. A su vez, serán incluidos análisis de sensibilidad que permitirán observar el comportamiento de los resultados frente a variaciones de criterios relevantes.

2. Chile en el Contexto del Cambio Climático

Para hacer frente a los desafíos de carbono neutralidad y cumplir con los compromisos internacionales en la lucha contra el cambio climático, Chile ha promulgado una serie de leyes y ha participado en acuerdos globales. A continuación, se presentan algunas de las leyes, acuerdos y estrategias más destacados relacionados con el cambio climático en Chile:

- i. Ley REP: La ley 20.920 de Responsabilidad Extendida del Productor (REP) es una ley promulgada en 2016 y que establece que los productores de productos prioritarios son responsables de la organización y financiamiento de la gestión de los residuos derivados de la comercialización de los productos en el país (Ministerio de Medio Ambiente [MMA], s.f). A su vez, la Ley penaliza el tráfico de residuos peligrosos, e impulsa un fondo para el reciclaje como mecanismo de apoyo a la REP, que permite financiar proyectos, programas y acciones desarrollados por municipalidades y asociaciones, para prevenir la generación de residuos al mismo tiempo que fomenta su reutilización, reciclaje y otros tipos de valorización (MMA, s.f).

La Ley contempla la adecuación de otras normas para facilitar el funcionamiento del sistema REP, definiendo obligaciones específicas a los distintos actores asociados a la gestión de residuos, junto con implementar un régimen de fiscalización y sanciones (MMA, s.f). En la ley se establece preliminarmente como productos prioritarios sujetos a la responsabilidad extendida:

- Neumáticos
- Envases y embalajes
- Aceites lubricantes
- Aparatos eléctricos, electrónicos y pilas
- Baterías.

La promulgación de la ley REP corresponde a uno de los principales acercamientos de Chile a la economía circular, junto con la hoja de ruta de transición a economía circular, la cual establece un marco estratégico integral para la gestión sostenible de recursos y la reducción de residuos en el país.

- ii. Ley de eficiencia energética: La ley 21.305 de eficiencia energética promulgada en febrero de 2021 establece 5 puntos principales:
 - Institucionalidad de la Eficiencia Energética: Cada 5 años, el Ministerio de energía elaborará un plan nacional de eficiencia energética (EE) donde se incluya EE residencial, estándares mínimos y etiquetados, EE en edificación, EE y ciudades inteligentes, EE en los sectores productivos, educación y capacitación (Chile, 2021).
 - Gestión energética de los grandes consumidores: El Ministerio de energía

cuatrienalmente establecerá criterios para determinar las empresas que deberán reportar anualmente su consumo de energía. A su vez, se definen como grandes consumidores con capacidad de gestión de energía (CCGE) a aquellas empresas que consuman más de 50 Tcal al año. Las empresas que cumplan lo anterior deberán implementar uno o más sistemas de gestión de energía (SGE) que cubran al menos el 80% de su consumo total. Este SGE se deberá enviar anualmente al ministerio y superintendencia, incluyendo oportunidades y medidas de EE (Chile, 2021).

- **Etiquetado de edificación:** Se integra la calificación energética a las edificaciones, con el objetivo de informar sobre la EE de viviendas, edificios públicos, comerciales y oficinas. Esta calificación será realizada por evaluadores energéticos, y para lo cual se crea el registro nacional de gestores energéticos (Chile, 2021).
- **Gestión de Energía en sector público:** Las municipalidades regionales y otras instituciones deberán velar por el buen uso de la energía en los inmuebles utilizados, reportando al ministerio los consumos. Cada entidad deberá contar con al menos un gestor energético (Chile, 2021).
- **Vehículos eléctricos e hidrógeno:** El ministerio de energía regulará la interoperabilidad del sistema de recarga de vehículos eléctricos. A su vez, se impulsan medidas para la utilización de vehículos cero emisiones como los vehículos eléctricos o híbridos. Este tipo de vehículos contarán con depreciación acelerada. Además, el hidrógeno se declara fuente de combustible, lo que permite que este sea regulado por el Ministerio de Energía (Chile, 2021).

- iii. **Ley de cambio climático:** La ley 21.455 de cambio climático establece como objetivo la transición hacia la carbono neutralidad para el año 2050, aumentando a su vez la adaptación a los efectos del cambio climático y dando cumplimiento a los compromisos ambientales internacionales asumidos por el país (Chile, 2022).

La ley define un marco jurídico que permite asignar responsabilidades de reducción de emisiones, así como exigir implementación y reporte de medidas de mitigación de emisiones y adaptación a los impactos del cambio climático (Chile, 2022). A su vez, la ley reconoce la Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC), que contiene los compromisos de Chile ante la comunidad internacional en temas de mitigación y adaptación al cambio climático. Asimismo, se establece el compromiso del país de desarrollar e implementar la Estrategia Climática a Largo Plazo (ECLP), que corresponde a la hoja de ruta con respecto a los compromisos a cumplir (Chile, 2022).

A continuación, se nombran los principales compromisos ambientales internacionales en los que Chile ha participado:

- i. **Protocolo de Kyoto:** El protocolo de Kyoto consiste en un protocolo aprobado en 1997 y en vigencia desde el 2005, en el cual estableció la reducción obligatoria de la emisión de gases de efecto invernadero a 30 países industrializados a niveles un 5% por debajo de las

emisiones de la década de 1990, a cumplir entre 2008 y 2010 (Libertad y Desarrollo, 2005). Bajo este protocolo, se determinaron 3 mecanismos para la reducción de GEI:

- Implementación conjunta: Los países que acordaron reducciones legalmente vinculantes desarrollan proyectos conjuntos de reducción de emisiones con el resto de los países firmantes, repartiéndose los créditos de reducción que se obtengan.
 - Mecanismos de desarrollo limpio: A través de este mecanismo, los países no asociados suscriben proyectos en conjunto con los países asociados al protocolo, quedando los créditos de reducción en manos de estos últimos.
 - Transacción de emisiones: Permite transar libremente los créditos por reducción de emisiones entre los países estipulados.
- ii. Acuerdo de París: El acuerdo de París, adoptado en 2015 en la COP 21 de París por 196 países, tiene como objetivo reforzar la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, en el contexto del desarrollo sostenible y de los esfuerzos por erradicar la pobreza (Chile, 2017). Para lograr lo anterior se estipularon los siguientes puntos:
- A. Mantener el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de 2°C con respecto a los niveles preindustriales, y continuar los esfuerzos para limitar ese aumento de la temperatura a 1,5°C con respecto a los niveles preindustriales, reconociendo que ello reduciría considerablemente los riesgos y los efectos del cambio climático (Chile, 2017).
 - B. Aumentar la capacidad de adaptación a los efectos adversos del cambio climático, promover la resiliencia al clima y un desarrollo con bajas emisiones de gases de efecto invernadero, de un modo que no comprometa la producción de alimentos (Chile, 2017).
 - C. Situar los flujos financieros en un nivel compatible con una trayectoria que conduzca a un desarrollo resiliente al clima y con bajas emisiones de gases de efecto invernadero (Chile, 2017).

Finalmente, se nombran dos de las principales estrategias de Chile con relación al cambio climático:

- i. Estrategia climática a largo Plazo (ECLP): La ECLP corresponde al instrumento en el cual se definen los lineamientos a grandes rasgos que seguirá el país en un horizonte de 30 años, buscando combatir los desafíos asociados al cambio climático para cumplir los compromisos internacionales asumidos (MMA, 2021). Este instrumento corresponde a la hoja de ruta que contiene las metas que permitirán alcanzar estos objetivos a más tardar al 2050. La Estrategia Climática de Largo Plazo se actualizará cada 10 años, a través de un proceso participativo multisectorial y multi actoral (MMA, 2021).
- ii. National Determined Contribution (NDC): Corresponde a los compromisos para cumplir

con el objetivo internacional de limitar el aumento de la temperatura del planeta a través de la reducción de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (MMA, 2020). En Chile, su última actualización fue presentada en 2020 (Ministerio de Hacienda, 2020), y en esta se contemplan compromisos en cinco áreas: i) pilar social de transición justa y desarrollo sostenible, ii) mitigación, iii) adaptación, iv) integración, y v) medios de implementación.

En materia de mitigación, Chile se compromete a reemplazar el indicador de intensidad de emisiones anterior por un indicador absoluto incondicional, con un objetivo a alcanzar de 95 M. de Ton. de CO₂ equivalente para 2030, un máximo de emisiones en el año 2025 y un presupuesto de carbono que no supere los 1.100 M. de Ton. de CO₂ para el período 2020-2030 (Ministerio de Hacienda, 2020).

A continuación, se muestra un esquema con la vinculación que tienen las estrategias anteriormente nombradas con otros instrumentos de mitigación del país:

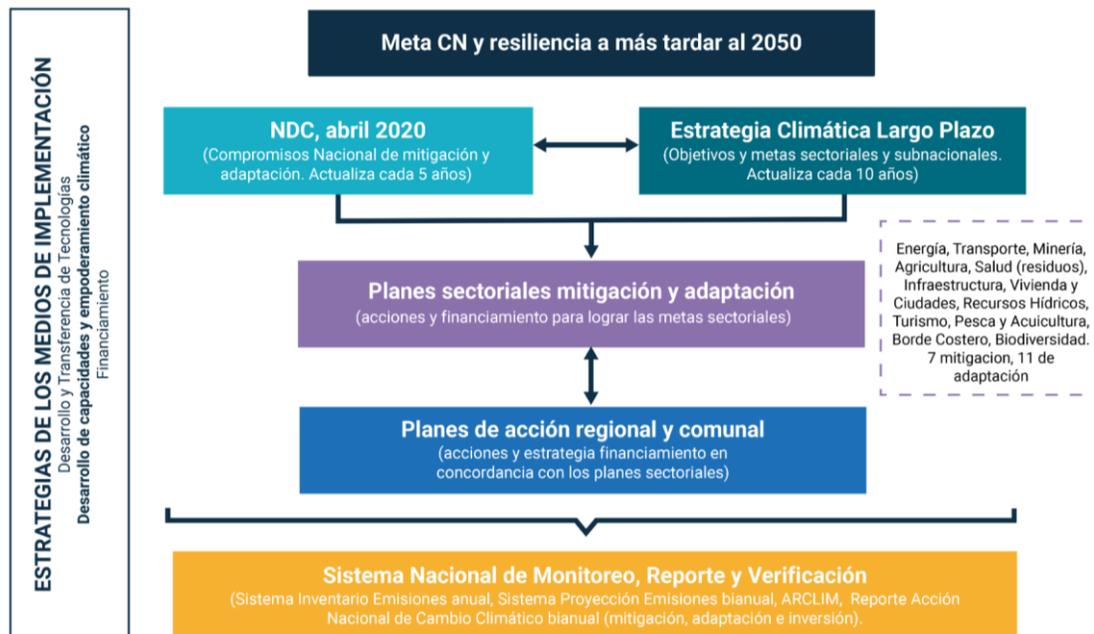


Figura 2-1: Esquema de relación entre instrumentos de mitigación chilenos (MMA, 2022).

2.1 Emisiones de GEI en Chile

En base a las estimaciones realizadas por el observatorio de Carbono neutralidad y la contribución determinada a nivel nacional (NDC), se estima que para el año 2030 Chile tendría una emisión estimada total de 102,7 millones de toneladas de CO₂ equivalente, superando el límite propuesto de 95 millones de toneladas de CO₂ equivalente (Observatorio de Carbono Neutralidad, 2023). Por otra parte, para el año 2050 (año propuesto para la carbono neutralidad), se estima un escenario

base sin la aplicación de medidas con un total de 77,2 millones de toneladas de CO₂ equivalentes emitidas (Observatorio de Carbono Neutralidad, 2023).

Durante 2020, las emisiones totales de GEI en Chile fueron de 105,552 M. de Ton. de CO₂ equivalente, lo cual corresponde a un incremento de 116 % desde 1990 y una disminución de 4 % desde 2018 (MMA, 2022). En el país se identifican 5 sectores productivos como los emisores de este tipo de gases:

- A. **Energía:** En este sector se incluyen las emisiones de GEI de la quema de combustibles (fósiles y biomasa) con fines energéticos de todas las actividades antrópicas, como, por ejemplo, generación eléctrica, transporte y minería. A su vez, se incluyen las emisiones de los procesos asociados a la extracción, procesamiento y distribución de combustibles (MMA, 2022).
- B. **Sector Procesos Industriales y Uso de Producto (IPPU):** En el sector IPPU se consideran los GEI emitidos por procesos industriales tanto físicos como químicos de transformación de materiales en subproductos o productos, como la producción de cemento o de acero. A su vez, se incluyen las emisiones derivadas del uso de GEI como refrigerantes y aislantes eléctricos, entre otros usos (MMA, 2022).
- C. **Agricultura:** Dentro de este sector se consideran las emisiones de GEI asociadas a las actividades agropecuarias de tierras en las que se ha intervenido y donde se han aplicado prácticas para la realización de actividades de producción, ecológicas o sociales. Entre estas actividades se destaca la fermentación entérica del ganado, el manejo del estiércol y el uso de fertilizantes nitrogenados (MMA, 2022).
- D. **Sector Uso de la tierra, cambio del uso de la tierra y silvicultura (UTCUTS):** El sector UTCUTS incluye las emisiones y absorciones de GEI generadas como resultado del uso, gestión y cambio de uso de los suelos. Se incluyen las absorciones asociadas al crecimiento de la biomasa y la contribución de los productos de madera, las emisiones de los incendios, de las cosechas de árboles para trozos y leña y las emisiones y absorciones asociadas a los cambios de usos de la tierra (MMA, 2022).
- E. **Residuos:** En el sector de residuos se incluyen las emisiones de GEI resultantes de procesos microbiológicos que ocurren en la materia orgánica bajo degradación anaeróbica, principalmente desde sitios de disposición de residuos sólidos (rellenos sanitarios, vertederos, entre otros), tratamiento biológico de los residuos, la incineración y el tratamiento anaeróbico de aguas residuales domésticas e industriales en fase líquida y sólida (lodos) (MMA, 2022).

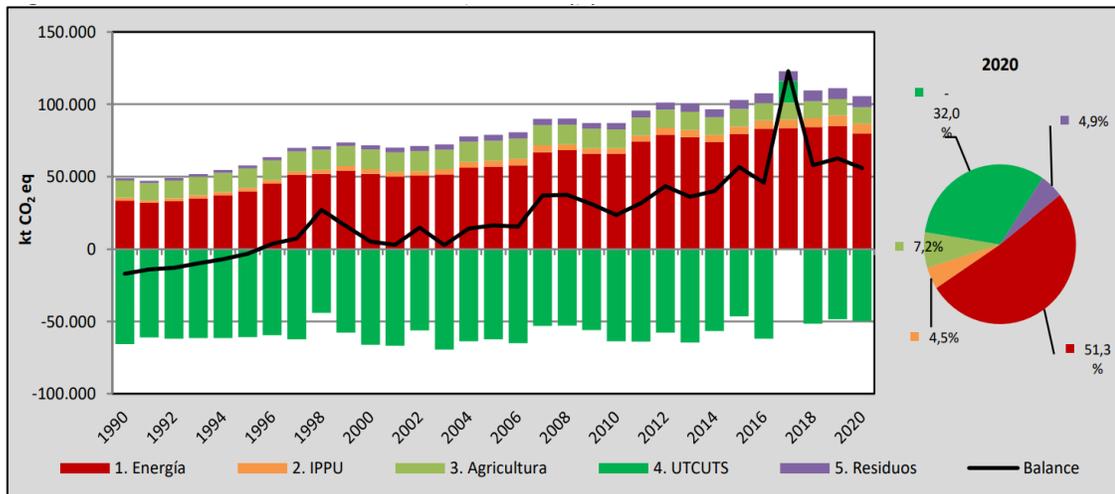


Figura 2-2: Inventario de emisiones de GEI de Chile (MMA, 2022).

2.1.1 Emisiones de I&M

Las emisiones de Industria y Minería (I&M) están consideradas tanto en el sector IPPU, como en el sector de Energía. Las emisiones de I&M contabilizadas en el sector IPPU corresponden a aquellas asociadas a los procesos productivos, mientras que, las emisiones contabilizadas en el sector de energía consideran las emisiones asociadas a la quema de combustibles.

Las emisiones anteriormente nombradas corresponden a emisiones directas, es decir, emisiones que provienen de fuentes que son propiedad o son controladas por la empresa. Por el contrario, las emisiones indirectas corresponden a aquellas asociadas a la generación de electricidad, vapor u otras actividades realizadas por terceros (MMA, s.f). Las emisiones indirectas asociadas a la electricidad consumida también se encuentran contabilizadas en el sector de Energía, bajo el nombre de industrias de la energía.

A continuación, se da detalle de las emisiones directas que aportan la I&M asociadas a cada uno de los sectores nombrados:

2.1.1.1 Sector Energía

En el sector de energía se incluyen las siguientes temáticas (MMA, 2022):

- La exploración y explotación de las fuentes primarias de energía.
- La conversión de las fuentes primarias de energía a fuentes secundarias en refinerías y centrales eléctricas.
- La producción, transporte y distribución de combustibles.
- El uso de combustibles en aplicaciones estacionarias y móviles.
- El transporte y almacenamiento de dióxido de carbono.

En base a lo anterior, para el sector energía se definen las siguientes categorías, donde las categorías de combustibles sólidos, petróleo y gas natural corresponden a emisiones fugitivas y el resto a emisiones asociadas a la quema de combustibles. (MMA, 2022):

1. Industrias de la energía.
2. Industrias manufactureras y de la construcción.
3. Transporte.
4. Otros sectores.
5. No especificado.
6. Combustibles sólidos.
7. Petróleo y gas natural.

A continuación, se muestran la distribución de emisiones asociadas a este sector:

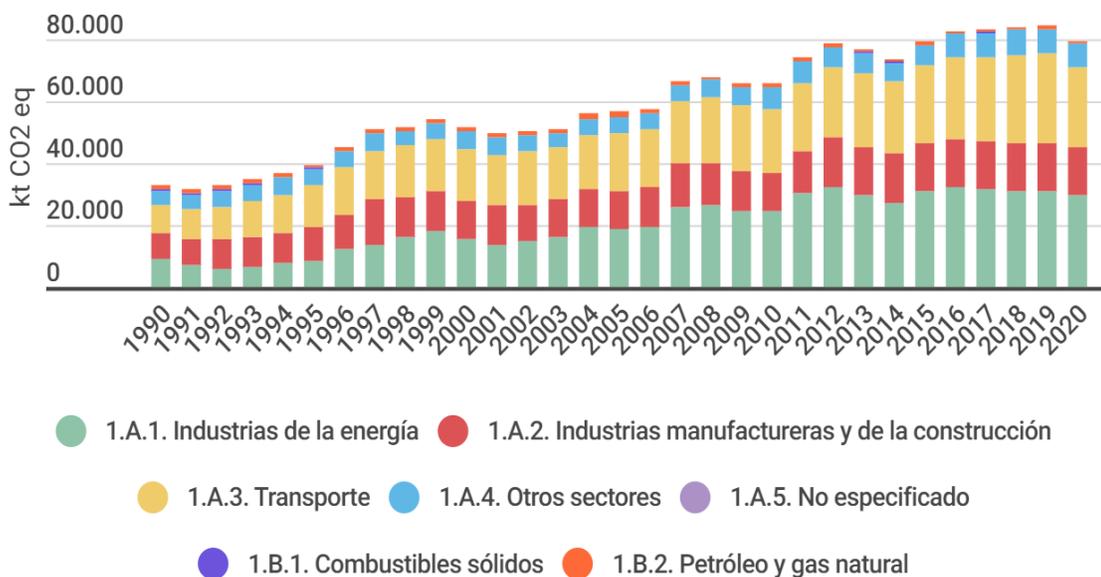


Figura 2-3: Emisiones sector Energía (Equipo Técnico del MINENERGIA, s.f)

Con relación a las emisiones del sector Energía que aportan la I&M, se encuentra la subcategoría “Industrias manufactureras y de la construcción”. Esta subcategoría incluye las emisiones de GEI generadas por la quema de combustibles fósiles en la industria, incluyendo la quema para generación de electricidad y calor para el uso propio de estas industrias (MMA, 2022). Se excluyen las industrias del rubro energético consideradas en la subcategoría Industrias de la energía.

A continuación, se indican las industrias asociadas a esta subcategoría (MMA, 2022):

- Hierro y acero: Se incluyen industrias y fundiciones que trabajan con hierro y acero.
- Metales no Ferrosos: Considera los procesos de extracción de las mineras.
- Sustancias químicas: Fabricación de sustancias y productos químicos, principalmente industria petroquímica.

- Pulpa, papel e imprenta: Producción de celulosa y papel.
- Procesamiento de alimentos, bebidas y tabaco: Incluye solo la producción de azúcar, las otras industrias de alimentos se reportan en Industrias varias.
- Minerales no metálicos: Corresponde a la industria del cemento.
- Minería (con excepción de combustibles) y cantería: Incluye las emisiones de la minería que se desarrolla en Chile (excepto la carbonífera) incluyendo la explotación, extracción y los procesos metalúrgicos asociados.
- Industria no especificada: Incluye todas las industrias no incluidas en las categorías mencionadas.

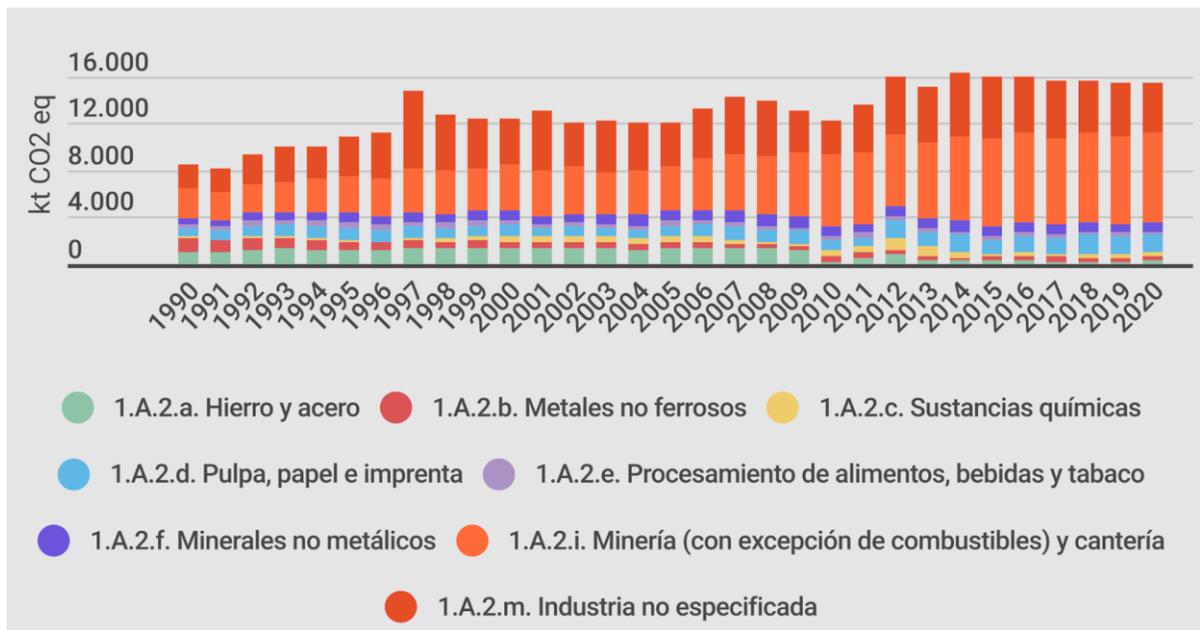


Figura 2-4: Emisiones sector Energía, subsector Industrias Manufactureras y de la construcción (Equipo Técnico del MINENERGIA, s.f)

A su vez, dentro de la actividad de minería (con excepción de combustibles) y cantería, es posible diferenciar la minería del cobre, minería de hierro, minería del salitre y minerías varias según se muestra en el gráfico a continuación:

GEI (kt CO₂ eq) por subcomponente, serie 1990-2020

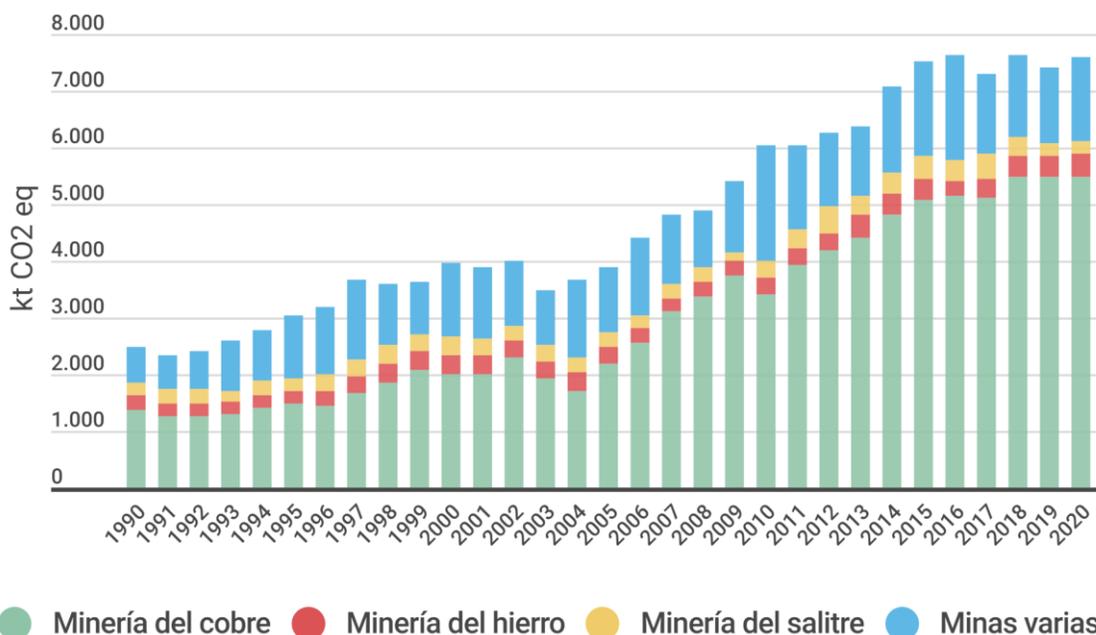


Figura 2-5: Emisiones minería (con excepción de combustibles) y cantería, subsector industrias manufactureras y de la construcción, sector Energía (Equipo Técnico del MINENERGIA, s.f).

2.1.1.2 Sector Procesos Industriales y Uso de Producto (IPPU)

Como se explicó previamente, en este sector se incluyen, por un lado, los GEI emitidos por procesos industriales que transforman materias primas por medios químicos o físicos, exceptuando la combustión que se considera en el sector Energía (MMA, 2022). Por otro lado, considera las emisiones por el uso de GEI en productos como refrigerantes y aislantes eléctricos o usos no energéticos del carbono contenido en los combustibles. En base a lo anterior, dentro de este sector se consideran las siguientes actividades (MMA, 2022):

1. Industria de los minerales: Incluye producción de cemento, producción de cal, producción de vidrio y otros usos de carbonatos en los procesos.
2. Industria química: Incluye producción de ácido nítrico, producción petroquímica y de negro de humo.
3. Industria de los metales: Considera la producción de hierro y acero, producción de ferroaleaciones y producción de plomo.
4. Productos no energéticos de combustibles y uso de solventes: Incluye el uso de lubricantes y uso de la cera de parafina.
5. Uso de productos como sustitutos de las Sustancias que Agotan la Capa de Ozono (SAO): Considera refrigeración y aire acondicionado, agentes espumantes, protección contra incendios, aerosoles y solventes.
6. Manufactura y utilización de otros productos: Incluye la utilización de equipos eléctricos y N₂O de usos de productos.

En el siguiente gráfico se muestra la distribución de emisiones por actividad para el sector IPPU:

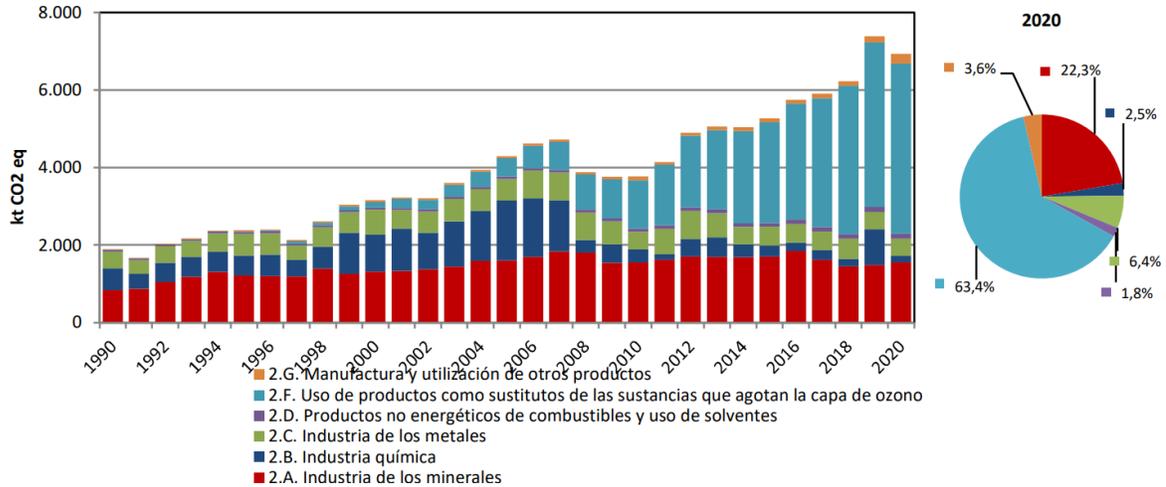


Figura 2-6: A la izquierda, Inventario de emisiones histórico para el sector IPPU, a la derecha, gráfica de distribución de emisiones para sector IPPU 2020 (MMA, 2022).

En base a todas las actividades de los distintos sectores del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INGEI), a continuación, se muestra el inventario de emisiones directas del sector de Industria y Minería, junto con un cuadro resumen de las categorías:

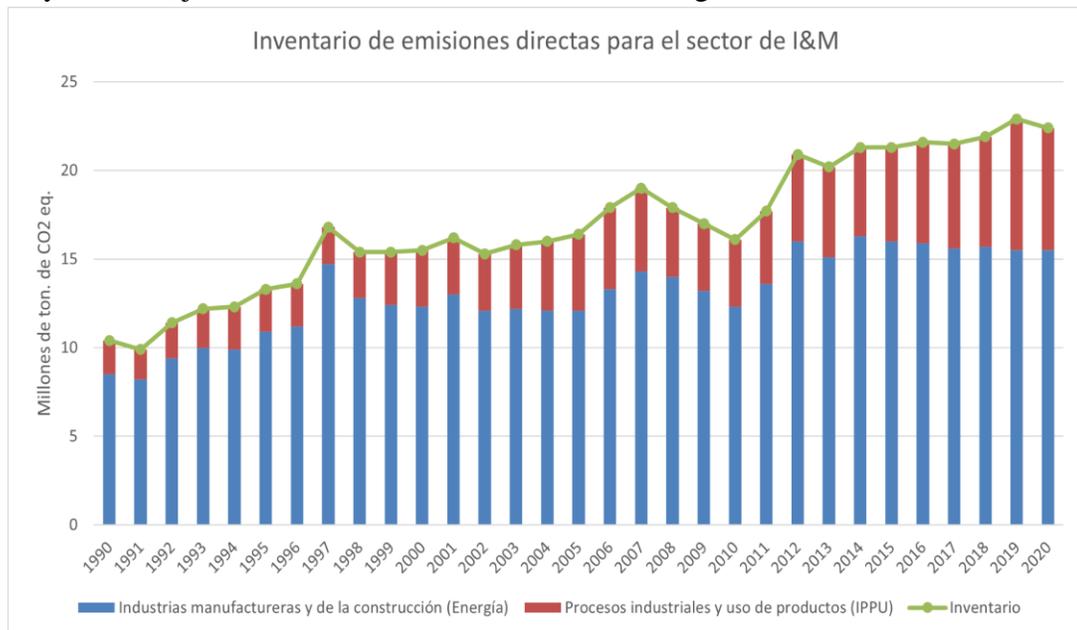


Figura 2-7: Inventario de emisiones de I&M (Elaboración propia)

2.2 Alternativas de mitigación

2.2.1 Alternativas de mitigación pasadas

En Chile, las alternativas de mitigación para la I&M han ido variando debido a diversos factores, como lo son la promulgación de leyes y el desarrollo de nuevas tecnologías. Uno de los primeros

estudios de las opciones de mitigación utilizadas y proyectadas para el sector en Chile corresponde al estudio del año 2007 “Consumo de Energía y Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en Chile 2007-2030 y Opciones de Mitigación” del Programa de Gestión y Economía Ambiental (PROGEA) de la Universidad de Chile (PROGEA, 2007). Se utilizará este documento para retratar las medidas de mitigación pasadas debido a ser, como se nombró previamente, uno de los primeros divulgados en el tema. En este se consideran las siguientes alternativas de mitigación:

1. Utilización de calor desperdiciado y CHP en industrias varias: Corresponde a la aplicación de proyectos de mejoramiento de procesos y uso de calor y energía desperdiciados en industrias varias. Según lo indicado, esta medida poseía un costo de abatimiento de -380 US por Ton de CO₂ equivalente, se esperaba una reducción anual de 85.000 Ton de CO₂ (PROGEA, 2007).
2. Reemplazo de motores del sector industrial y minero: Esta alternativa considera el recambio de motores estándar por motores eficientes. Según lo indicado, esta medida poseía un costo de abatimiento de -360 US por Ton. de CO₂ equivalente, se esperaba una reducción anual de 21.000 Ton. de CO₂ (PROGEA, 2007).
3. Modificaciones al proceso de la industria del cemento: Esta medida consiste en la optimización de los procesos productivos del cemento, de manera de utilizar menor cantidad de combustible, generar menor cantidad de residuos, generar ahorros de energía, entre otras. En el documento la medida es solamente nombrada, por lo que no se especifica que procesos en particular serían abordados por la misma. Según lo indicado, esta medida poseía un costo de abatimiento de -143 US por Ton. de CO₂ equivalente, se esperaba una reducción anual de 12.200 Ton. de CO₂ (PROGEA, 2007).
4. Sistemas de cogeneración eficientes en industria de papel y celulosa: La cogeneración se define como la producción conjunta de energía mecánica y/o eléctrica, y energía térmica útil (Estel, 2019). A partir del proceso de cogeneración es posible lograr importantes ahorros de electricidad, mejorar la eficiencia, y disminuir la emisión de GEI. Según lo indicado, esta medida poseía un costo de abatimiento de -411 USD por Ton de CO₂ equivalente, se esperaba una reducción anual de 49.400 Ton. de CO₂ (PROGEA, 2007).
5. Tecnologías de recuperación de calor en siderurgia: Las tecnologías de recuperación de calor buscan reutilizar el calor residual emanado en los procesos productivos, y que, de no ser utilizado, sería desperdiciado. En el documento no se detalla específicamente en qué procesos se implementan estas tecnologías. Según lo indicado, esta medida poseía un costo de abatimiento de -424 USD por Ton. de CO₂ equivalente, se esperaba una reducción anual de 36.000 Ton. de CO₂ (PROGEA, 2007).

A continuación, se muestra una tabla resumen con las medidas y sus reducciones proyectadas para 2030:

Medida	Potencial de reducción esperado al 2030 (M. Ton CO ₂ eq.)	Costo de abatimiento USD/Ton CO ₂ eq.
Utilización de calor desperdiciado y CHP en industrias varias	85.000,00	-380
Recambio de motores para uso industrial y minero	21.000,00	-360
Modificaciones al proceso productivo de la industria del cemento	12.200,00	-143
Sistemas de cogeneración eficientes en industria de papel y celulosa	49.400,00	-411
Tecnologías de recuperación de calor	36.000,00	-424

Tabla 2-1: Medidas de mitigación pasadas para el sector de I&M (PROGEA, 2007)

Cabe destacar que en el documento también se señalan como medidas generales las reducciones directas e indirectas, para las cuales no se especifica costo de abatimiento, pero sí reducciones esperadas para el año 2030. Es a partir de aplicación de estas medidas en todo el sector de I&M que se obtienen las reducciones más grandes:

Medida	Potencial de reducción esperado al 2030 (M. Ton CO ₂ eq.)
Reducciones directas de energía	12,8
Reducciones indirectas de energía	17

Tabla 2-2: Medidas y reducciones pasadas por eficiencia energética para el sector de I&M (PROGEA, 2007)

2.2.2 Alternativas de mitigación actuales

En la siguiente sección se detallan las medidas de mitigación actualmente utilizadas en el sector, junto con la estimación de reducciones asociadas a cada una de ellas en base a lo indicado por el

Observatorio de Carbono Neutralidad y obtenido mediante la plataforma computacional “Modelo Energético PMR” e información actualizada con respecto a los sectores y tecnologías (Observatorio de Carbono Neutralidad, 2023).

1. **Sistemas Solares Térmicos (SST):** Los sistemas solares térmicos o SST corresponden a equipos que logran transformar la energía radiante emitida por el sol en energía térmica, para posteriormente acumularla como agua caliente (Observatorio de Carbono Neutralidad, 2023). En la industria y minería son utilizados para procesos de calor-vapor tales como calefacción, calentamiento de fluidos, secado, entre otros. Las proyecciones indicadas por el Observatorio de Carbono Neutralidad indican un reemplazo paulatino de tecnologías en base a combustibles fósiles por SST desde el año 2026, llegando a alcanzar una participación del 10% al 2050 en industrias varias y una participación del 16% en procesos de minería de cobre (Observatorio de Carbono Neutralidad, 2023). Actualmente la participación de los sistemas SST en la industria es del 0% y en la minería es del 0,004%. Las reducciones esperadas de emisiones a partir del uso de esta tecnología en millones de toneladas CO₂ equivalentes son entre 0-0,1 para el año 2030, y entre 0-2,5 para el año 2050 (Observatorio de Carbono Neutralidad, 2023). Además, esta presenta un costo de abatimiento de -70 USD/Ton. CO₂ eq. (Ministerio de Energía, 2019).

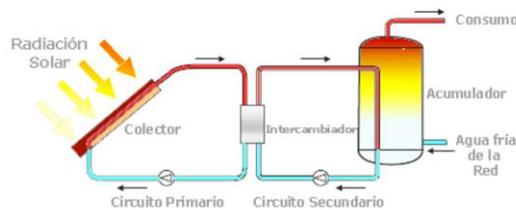


Figura 2-8: Esquema de funcionamiento de SST (Energcity S.A, 2023).

2. **Electrificación motriz:** Esta medida busca implementar la electrificación motriz en minería e industrias varias, reemplazando el uso de combustibles fósiles por el uso de electricidad. Por usos motrices se consideran todos los procesos que utilizan tecnologías que involucren fuerzas mecánicas, fijas o móviles; concepto que considera actividades como molienda, transporte de carga al interior de los establecimientos y maquinarias específicas tales como motores, grúas, entre otros (Observatorio de Carbono Neutralidad, 2023).

A continuación, se indican los datos actuales y estimados según la actividad sobre la cual se implementa la medida:

- **Industria:** Se estima que, en la industria, existe una participación cerca del 97,6% de motores eléctricos, aunque a pesar de lo anterior, no se ha presentado aumento en esta participación desde el año 2020 (Observatorio de Carbono Neutralidad, 2023). Las reducciones esperadas de emisiones a partir de la implementación de esta medida en millones de toneladas CO₂ equivalentes son entre 0,6-0,9 para el año 2030, y entre 1,8-2,6 para el año 2050 (Observatorio de Carbono Neutralidad, 2023). Además, esta presenta un costo de abatimiento de -97 USD/Ton. CO₂ eq.

(Ministerio de Energía, 2019).

- Minería del cobre: Para este sector, se tiene como meta la electrificación en minería a rajo abierto del 57% del consumo energético de usos motrices para el año 2050, y de un 74% en minería subterránea, respecto al escenario de referencia (Observatorio de Carbono Neutralidad, 2023). En términos de potencia, las metas anteriores equivalen a electrificar 4300 GWh en minería a rajo abierto y 400 GWh en minería subterránea al año 2050 (Observatorio de Carbono Neutralidad, 2023). Los datos actuales indican que esta medida no ha sido implementada tanto en minería a rajo abierto, como en minería subterránea, y se espera que la reducción esperada de emisiones a partir de la implementación de esta medida en millones de toneladas CO₂ equivalentes sean entre 0,3-0,7 para el año 2030, y entre 3-4 para el año 2050 (Observatorio de Carbono Neutralidad, 2023). Además, esta presenta un costo de abatimiento de -58 USD/Ton. CO₂ eq. (Ministerio de Energía, 2019).
 - Resto minería: El compromiso referencial que se tiene de esta medida por parte de las mineras es de un incremento de la participación en 20%, 30% y 40% en usos motrices eléctricos para los años 2020, 2030 y 2040 respectivamente (Observatorio de Carbono Neutralidad, 2023). Actualmente, la participación de usos motrices eléctricos en minas varias es cercana al 44,3% en base a las estimaciones realizadas, sin embargo, la participación no ha aumentado desde el año 2020 (Observatorio de Carbono Neutralidad, 2023). Las reducciones esperadas de emisiones a partir de la implementación de esta medida en millones de toneladas CO₂ equivalentes son entre 0,3-0,8 para el año 2030, y de 1,5 para el año 2050 (Observatorio de Carbono Neutralidad, 2023). Además, esta presenta un costo de abatimiento de -114 USD/Ton. CO₂ eq. (Ministerio de Energía, 2019).
3. Sistema de gestión de energía (SGE): Esta medida busca la promoción de medidas de eficiencia energética en los procesos productivos (más conocido como Sistemas de Gestión de la Energía) en los grandes consumidores de energía (GCE), que en total poseen un consumo energético superior a 50 Tera calorías anuales. El compromiso de referencia de los GCE corresponde a lograr un ahorro de 1,5% del consumo energético entre los años 2030-2040, y del 2,5% en los años 2040-2050 (Observatorio de Carbono Neutralidad, 2023). Actualmente el ahorro estimado mediante el SGE en los GCE es del 0,5%. En base al compromiso de referencia indicado se espera una reducción de emisiones en millones de toneladas CO₂ equivalentes entre 0-0,1 para el año 2030, y entre 0-2,5 para el año 2050 (Observatorio de Carbono Neutralidad, 2023). Además, esta presenta un costo de abatimiento de -126 USD/Ton. CO₂ eq. (Ministerio de Energía, 2019).



Figura 2-9: Esquema de operación de SGE (Gestiona Energía MiPyMEs, 2023).

- Estándares mínimos de eficiencia energética (MEPS) para motores de hasta 100 [HP]: La implementación de esta alternativa tiene como objetivo disminuir el consumo eléctrico del sector industria y minería, restringiendo la entrada de motores eléctricos nuevos exclusivamente a motores que cumplan con un estándar mínimo de eficiencia (Observatorio de Carbono Neutralidad, 2023). Actualmente existe un MEPS para motores de hasta 10 HP, por lo que esta medida busca abarcar un rango mayor. Se considera en la implementación, además, el recambio paulatino de motores del rango menor a 10 HP hasta llegar a un recambio total en el año 2030. Se estima además que la mejora en la eficiencia energética de los motores significaría un aumento del 3% en el rendimiento de estos (Observatorio de Carbono Neutralidad, 2023).

A la fecha, el único compromiso referencial que existe corresponde al recambio total de motores de hasta 100 [HP] para el año 2030, a su vez, en la actualidad la participación de motores que cumplen con MEPS es del 38% (Observatorio de Carbono Neutralidad, 2023). Las reducciones esperadas de emisiones a partir de la implementación de esta medida en millones de toneladas CO₂ equivalentes son entre 0-0,7 para el año 2030, y entre 0-0,4 para el año 2050 (Observatorio de Carbono Neutralidad, 2023). Además, esta presenta un costo de abatimiento de 292 USD/Ton. CO₂. (Ministerio de Energía, 2019).

- Usos motrices en industria y minería-Hidrógeno: La implementación de esta medida busca el reemplazo del uso de diésel por hidrógeno verde en usos motrices de la minería e industria nacional (Observatorio de Carbono Neutralidad, 2023). Al igual que en la medida detallada anteriormente, uso motriz se refiere a todos los procesos que utilizan tecnologías que involucren fuerzas mecánicas, fijas o móviles. El hidrógeno a utilizar se considera que es producido a partir del proceso de electrólisis, cuyos insumos son electricidad y agua, a

la vez que se considera que la producción de hidrógeno mediante este método genera emisiones despreciables de GEI (Observatorio de Carbono Neutralidad, 2023). Además, esta presenta un costo de abatimiento de -52 USD/Ton. CO₂ eq. (Ministerio de Energía, 2019).

Para esta medida se posee un compromiso referencial para el año 2050, el cual busca que hasta un 8%, 12% y 37% de la energía utilizada para fines motrices en los sectores de cobre de mina subterránea, industrias varias y cobre de mina rajo respectivamente, provenga de fuentes que utilizan hidrógeno como combustible (Observatorio de Carbono Neutralidad, 2023). A Julio de 2022, ninguna mina ni industria a las cuales busca ser implementada esta medida posee motrices que funcionen a base de hidrógeno, y para el futuro se estima una reducción de emisiones en millones de toneladas CO₂ equivalentes entre 0-0,8 para el año 2030, y entre 2,6-9,1 para el año 2050 (Observatorio de Carbono Neutralidad, 2023). Además, ésta presenta un costo de abatimiento de -52 USD/Ton. CO₂ eq. (Ministerio de Energía, 2019).

6. Electrificación térmica: La electrificación térmica busca reemplazar el uso de combustibles que emiten una gran cantidad de CO₂ en procesos térmicos como los que ocurren en calderas y hornos industriales y mineros, por electricidad de la red (Observatorio de Carbono Neutralidad, 2023). El compromiso corresponde a lograr una penetración adicional de 25% al año 2050, respecto al escenario referencial. Actualmente, se estima una participación adicional al escenario referencial del 0%, y mediante la implementación y cumplimiento de objetivos para esta medida, se estima una reducción de emisiones en millones de toneladas CO₂ equivalentes entre 0-0,4 para el año 2030, y entre 1,2-2,6 para el año 2050 (Observatorio de Carbono Neutralidad, 2023). Además, esta presenta un costo de abatimiento de 75 USD/Ton. CO₂ eq. (Ministerio de Energía, 2019).

Aplicando todas las medidas anteriormente nombradas de forma que se cumplan los compromisos referenciales indicados para cada una, se tiene una reducción total en millones de toneladas de CO₂ equivalente de 2,1 para el año 2030 y 13,7 millones de toneladas de CO₂ equivalente para el año 2050 (Observatorio de Carbono Neutralidad, 2023).

En la siguiente tabla y gráfico, se muestra un resumen de las medidas anteriormente nombradas y las emisiones totales del país considerando la implementación estimada de todas las alternativas por el observatorio de carbono neutralidad respectivamente:

Medida	Potencial de reducción esperado al 2030 (M. Ton CO ₂ eq.)	Potencial de reducción esperado al 2050 (M. Ton CO ₂ eq.)	Costo de abatimiento USD/Ton CO ₂ eq.
SST	0-0,1	0-2,5	-70
Electrificación motriz en industria	0,6-0,9	1,8-2,6	-97
Electrificación motriz en minería del cobre	0,3-0,7	3-4	-58
Electrificación motriz en resto de minería	0,3-0,8	1,5	-114
SGE	0-0,1	0-2,5	-126
MEPS para motores de hasta 100 HP	0-0,7	0-0,4	292
Usos motrices de Hidrógeno	0-0,8	2,6-9,1	-52
Electrificación térmica	0-0,4	1,2-2,6	75

Tabla 2-3: Resumen medidas de mitigación actuales para I&M.

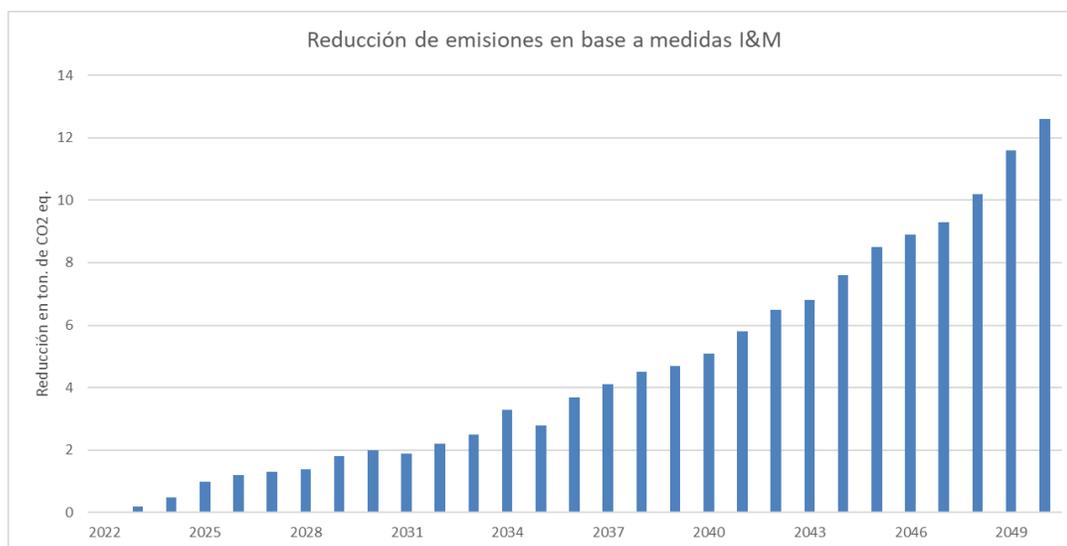


Figura 2-10: Gráfica de reducciones acumuladas a partir de medidas para I&M (Elaboración propia)

2.2.3 Alternativas de mitigación innovadoras

A continuación, y en base a la información recopilada de distintos roadmaps y artículos internacionales, se nombran una serie de medidas de mitigación innovadoras para la I&M con gran prospección y potencial de mitigación, que actualmente no son consideradas en Chile. Las siguientes medidas se separan en 5 grandes categorías:

- Economía Circular
- Hidrógeno Verde
- Digitalización
- Instrumentos de mitigación
- Captura de Carbono.

Como se indicó previamente, las categorías fueron escogidas en base a la prospección de mitigación indicada por distintos documentos internacionales. Se priorizó el análisis de estas alternativas por sobre otras nombradas en bibliografía debido a dos factores: El primero es que estas categorías corresponden a las más nombradas en registros internacionales, y son identificadas con la mayor prospección de mitigación. Por otra parte, se consideró el potencial “innovador” que estas poseen, al ser categorías emergentes o poco implementadas en Chile. Si bien asociadas a estas categorías existen avances o tecnologías, en general estas no son consideradas con gran potencial de mitigación, a excepción de la categoría de hidrógeno verde, cuya consideración se debe a la presencia de alternativas específicas que en Chile no están siendo aplicadas.

Las medidas a continuación se basaron en diferentes artículos en donde se indicaba la cantidad de CO₂ mitigada por estos proyectos, además de los costos de abatimiento e inversión en algunos casos. A modo de normalizar los datos para la futura comparación, se tomaron las siguientes consideraciones para los cálculos de toneladas mitigadas y costos asociados:

- La mitigación a comparar es en relación a toda la industria de la Unión Europea (UE). En los casos en que la mitigación del proyecto no sea indicada para toda la industria, se realizarán suposiciones basadas en datos y productivos para estandarizar.
- Se calculará un costo de abatimiento asociado a la implementación de cada medida en toda la industria europea. Al igual que para el cálculo de mitigación, cuando el costo no sea indicado por el proyecto o referencia, se realizarán suposiciones basadas en datos y productivos para estandarizar.
- Para los cálculos de costos de abatimiento, se asumió una relación lineal entre la mitigación y el costo.
- Los datos de costos y toneladas mitigadas deben entenderse como órdenes de magnitud debido a las consideraciones anteriores, la aplicación real de estos proyectos puede variar en relación a los costos y toneladas de CO₂ mitigadas.
- Considerando que los costos y reducciones son calculados para la UE, se trabajará utilizando € como moneda, considerando cuando sea pertinente la conversión 1 € = 1,05

USD, el cual corresponde al precio promedio del año 2022 (Statista, 2023).

- Debido a que el trabajo busca identificar las alternativas más viables para el contexto chileno, en la comparación de las siguientes secciones se tomará en cuenta la factibilidad técnica y económica de las alternativas adecuándose a la situación del país.

La normalización de los datos en relación con el continente europeo se debe a que algunos de los artículos considerados indican directamente la mitigación y costo asociado en este sector industrial de la UE, por lo que no es posible estimar preliminarmente la reducción que lograron estas medidas en el contexto chileno. Esta normalización y obtención de resultados se encuentra detallada para cada medida en el Anexo A.

Para cada una de las alternativas presentadas, exceptuando los instrumentos de mitigación, se incluirá una ficha resumen que permitirá visualizar de manera más clara los principales resultados y supuestos de cada medida.

2.2.3.1 Economía circular

La economía circular se define como un modelo de producción y consumo que implica compartir, alquilar, reutilizar, reparar, renovar y reciclar materiales y productos existentes todas las veces que sea posible para crear un valor añadido, con el fin de extender el ciclo de vida de los productos (EUROPARL, 2023). La economía circular corresponde a un concepto amplio que engloba diferentes técnicas y aplicaciones.

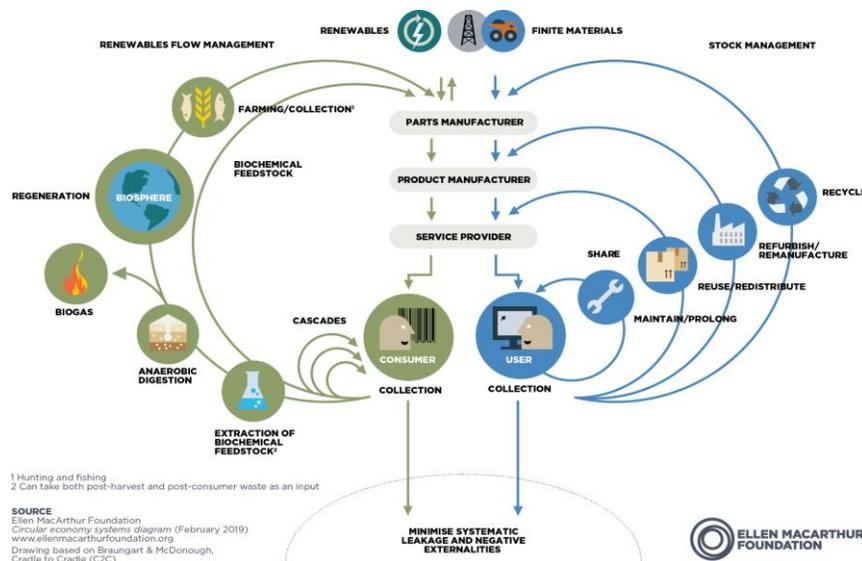


Figura 2-11: Esquema mariposa de economía circular (Ellen MacArthur Foundation, 2019)

Chile busca impulsar la economía circular mediante la hoja de ruta para un Chile circular al 2040, presentada el año 2021 (MMA, 2021), además de tener a la ley REP como una de las principales herramientas impulsoras. A pesar de lo anterior, las prácticas asociadas a la economía circular aún no poseen una aplicación a gran escala en el país. A continuación, se nombran 2 medidas innovadoras de mitigación asociadas a esta.

Ecodiseño: El Ecodiseño corresponde a una técnica que busca diseñar productos y servicios sostenibles, de manera de que el producto genere el menor impacto ambiental posible a lo largo de su ciclo de vida (Granieri, 2022). Para estos productos, el diseño corresponde a una etapa fundamental, en donde se busca maximizar la eficiencia de los procesos en los cuales serán utilizados los productos. A partir de lo anterior es que los productos ecodiseñados normalmente logran ofrecer una mayor vida útil y aumentar la eficiencia en su uso.

La medida de mitigación a analizar corresponde a la aplicación de ecodiseño en distintos equipos del sector industrial, los cuales se nombran a continuación:

- Ventiladores
- Motores eléctricos
- Artículos de soldadura
- Bombas de agua
- Transformadores utilitarios
- Neumáticos

Esta técnica es aplicada en la Unión Europea (UE) mediante la Directiva 2009/125 / CE, la cual establece regulaciones en temas de ecodiseño y eficiencia energética para diferentes categorías de productos (European Commission Directorate-General for Energy, 2022). La reducción de emisiones a partir de esta medida se logra ya que los productos ecodiseñados poseen un diseño más eficiente en términos de emisiones y energía, por lo que consumen menor cantidad, y, por ende, las emisiones directas e indirectas asociadas disminuyen. A continuación, se presenta la ficha resumen asociada a esta medida:

Ecodiseño para la industria (European Commission Directorate-General for Energy, 2022).			
Reducción a partir de ahorro de combustible por utilización de productos ecodiseñados (Ventiladores, motores eléctricos, artículos de soldadura, bombas de agua, transformadores utilitarios y neumáticos). Aplicación en industria de UE a partir de productos mencionados.			
Reducción anual (M. Ton CO ₂ eq.)	30	Consideraciones para reducciones	Reducciones estimadas por la UE (European Commission Directorate-General for Energy, 2022).
Costo de abatimiento (€/Ton. CO ₂ eq)	540,07	Consideraciones económicas	Costo de abatimiento en base a vida útil y costo de adquisición de productos (Anexo A)

Tabla 2-4: Ficha resumen para ecodiseño.

Simbiosis Industrial: La simbiosis industrial se define como un proceso a partir del cual dos o más empresas intercambian residuos o subproductos, para luego utilizarlos como insumos, generando beneficios en el proceso (Abriata y Masut, 2021). La simbiosis industrial puede ser aplicada en una gran cantidad de industrias.

Esta técnica se basa en la cooperación mutuamente beneficiosa entre diferentes empresas o industrias que trabajan juntas para aprovechar los recursos y reducir los desperdicios. En lugar de competir de manera directa o desperdiciar recursos de forma independiente, las empresas involucradas en la simbiosis industrial colaboran de manera estratégica para lograr objetivos comunes. Esto a menudo implica compartir recursos, subproductos, energía, conocimientos y tecnología para minimizar el impacto ambiental y optimizar la eficiencia en sus procesos de producción.

La reducción de emisiones a través de simbiosis industrial se logra, por una parte, utilizando estos subproductos en los procesos productivos, de manera de no integrar productos con nuevas emisiones asociadas al ciclo de producción, y, por otra parte, generando procesos en paralelo que aumentan la eficiencia (Gast et al., 2023). En este trabajo se analizará la propuesta de simbiosis industrial para la industria de acero, papel, cemento y aluminio.

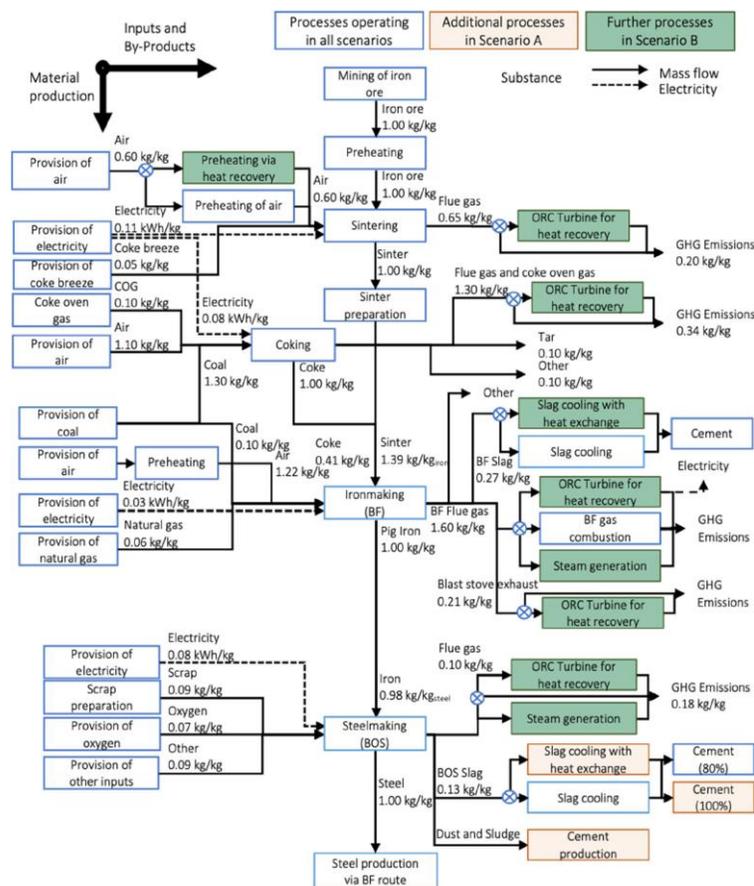


Figura 2-12: Diagrama de flujos de simbiosis industrial propuesta (Gast et al., 2023).

Simbiosis industrial (Gast et al., 2023)			
Reducción a partir de la utilización de subproductos, ejecución de procesos en paralelo y recuperación de calor. Aplicación en industria de aluminio, acero, cemento y papel de UE.			
Reducción anual (M. Ton CO ₂ eq.)	44,6	Consideraciones para reducciones	Reducción de 18% de emisiones considerando procesos de recuperación de calor (Gast et al., 2023)
			Emisiones totales de industria de acero, cemento, papel y aluminio en UE de 247,77 M. Ton de CO ₂ equivalente (European Environment Agency, 2023)
			Reducción total=% reducción x emisiones totales
Costo de abatimiento (€/Ton. CO ₂ eq)	91	Consideraciones económicas	Costo de abatimiento anual de 91 €/Ton CO ₂ (Material Economics, 2019)

Tabla 2-5: Ficha resumen para simbiosis industrial.

2.2.3.2 Hidrógeno Verde

Se llama hidrógeno verde a la obtención de hidrógeno a partir del proceso de electrólisis potenciados por energías renovables. En el proceso de electrólisis, se logra separar la molécula de agua H₂O en oxígeno O₂ e hidrógeno H₂ (Fundación Chile, 2023). En el contexto del cambio climático, la alternativa de hidrógeno verde se ha mostrado como una de las principales medidas de mitigación, esto debido a la nula emisión de GEI asociada a su uso como combustible, así como la amplia gama de sectores en los que puede ser aplicado, como por ejemplo energía, industria y minería (Fundación Chile, 2023).

El hidrógeno verde corresponde además a una de las principales alternativas de mitigación para Chile de cara hacia el futuro, teniendo una hoja de Ruta desarrollada para la utilización de este combustible en distintas aplicaciones, y buscando ser el productor de Hidrógeno verde con menores costos para el año 2030 (Ministerio de Energía, 2020).

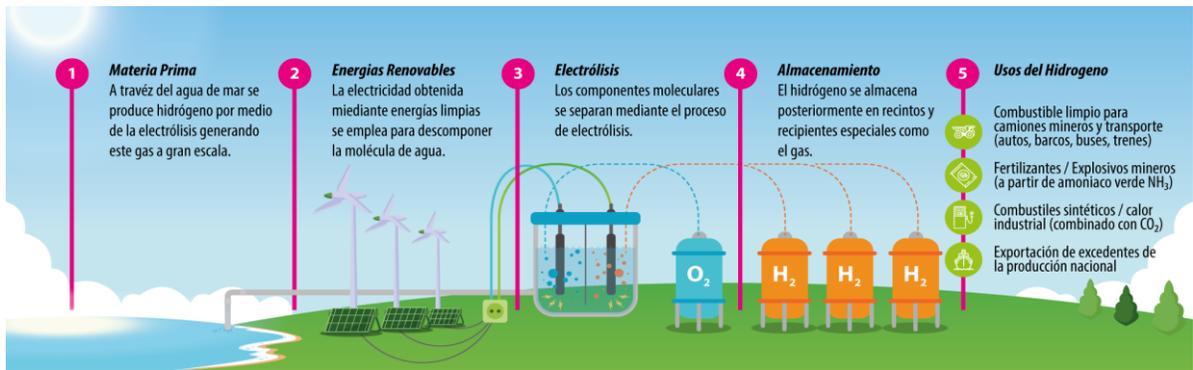


Figura 2-13: Esquema referencial de producción y utilización de hidrógeno verde (BioBio Chile, 2020).

A continuación, se nombran dos alternativas de mitigación asociadas a la utilización de hidrógeno verde que no han sido consideradas de forma relevante en el país actualmente:

Hidrógeno verde para acero Direct Reduced Iron (DRI): El término Direct Reduced Iron se refiere a un método de producción de acero en el cual busca la reducción química del oxígeno y otros componentes sin llegar a la fusión (Donoso, 2022). Para efectuar dicho proceso, se debe previamente condicionar el hierro de tal forma que posea la resistencia necesaria para cumplir el ciclo de transformación esperado. Una vez tratado, el hierro es triturado y enviado a un reactor de alta temperatura, en donde se fuerza una reacción química entre el hierro y un conjunto de agentes reactivos reductores (hidrógeno y monóxido de carbono), proceso a través del cual se elimina el oxígeno presente en el material sin alcanzar la fusión de este último (Donoso, 2022). A partir de lo anterior es que se obtiene el Direct Reduced Iron, el cual se utiliza como materia prima para la fabricación del acero sin necesidad de ser tratado o condicionado nuevamente.

La reducción de emisiones a través de este proceso se logra al utilizar el hidrógeno como agente reductor en vez del coque (Donoso, 2022). El hidrógeno reacciona con el oxígeno del mineral de hierro, liberando agua en lugar de CO_2 como producto de la reacción química.

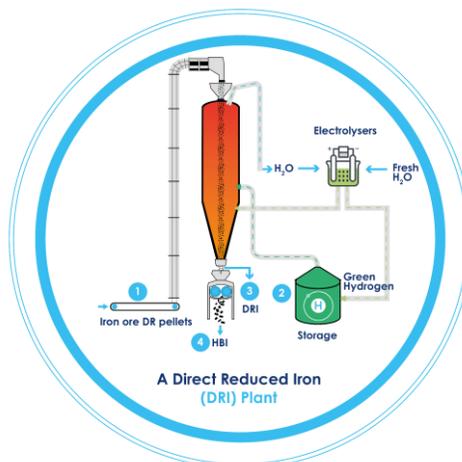


Figura 2-14: Esquema de producción de DRI (Liberty Steel Grupo, s.f.)

Hidrógeno para DRI (Agora Energiewende, 2020)

Reducción a partir de la utilización de combustible 0 emisiones. Aplicación en industria de acero de UE.

Reducción anual (M. Ton CO ₂ eq.)	66	Consideraciones para reducciones	Reducción total estimada para la UE (Agora Energiewende, 2020)
Costo de abatimiento (€/Ton. CO ₂ eq)	100	Consideraciones económicas	Costo de abatimiento anual de 100 €/Ton CO ₂ (Agora Energiewende, 2020)

Tabla 2-6: Ficha resumen de hidrógeno verde para DRI.

Hidrógeno verde para industria del cemento: Esta medida considera la utilización de hidrógeno verde como combustible para la producción de cemento, reemplazando así los combustibles fósiles comúnmente utilizados para los procesos de combustión (Titan, 2022). Al igual que en la alternativa anterior, la reducción de emisiones se logra en este caso a partir de la utilización de hidrógeno verde, que al combustionar no genera emisiones de CO₂.

La medida a estudiar considera la utilización de hidrógeno como combustible en la producción del cemento, a través del uso de un rotary kiln u horno rotatorio, el cual corresponde a un equipo industrial utilizado para llevar a cabo una variedad de procesos térmicos, como la calcinación y la pirólisis, y se caracteriza por su forma cilíndrica y capacidad para girar lentamente mientras se somete a temperaturas elevadas (Titan, 2022). En el caso de estudio, este horno utiliza como combustible principal el hidrógeno verde producido en la misma planta.



Figura 2-15: Esquema de funcionamiento de horno rotatorio (FLSmidth, 2023)

Hidrógeno para cemento (Titan, 2022).			
Reducción a partir de la utilización de combustible 0 emisiones. Aplicación en industria de cemento de UE.			
Reducción anual (M. Ton CO ₂ eq.)	8,8	Consideraciones para reducciones	Reducción de emisiones del 8%. (Titan, 2022)
			Emisiones totales de UE en industria de cemento de 110 M. Ton de CO ₂ (European Environment Agency, 2023)
			Mitigación indicada del documento por planta de 160.000 Ton. de CO ₂ (Titan, 2022)
			Reducción total=% reducción x emisiones totales
Costo de abatimiento (€/Ton. CO ₂ eq)	26,19	Consideraciones económicas	Costo de inversión de 60.000.000 USD. (Titan, 2022)
			Vida útil de 30 años para rotary kiln (Gerlach, 2018)
			Costo operacional del 4% de la inversión para proyectos de este tipo (Zhou, et al., 2022)
			Costo anualizado por planta= Costo de inversión + costo operacional
			Costo de abatimiento=Costo anualizado por planta/Mitigación por planta

Tabla 2-7: Ficha resumen hidrógeno verde para cemento.

2.2.3.3 Digitalización

Digitalización se refiere a la implementación de la llamada cuarta revolución industrial o industria 4.0, y que considera diferentes estrategias computacionales como por ejemplo automatización, Machine Learning, almacenamiento en la nube, entre otras (World Economic Forum, s.f.). A través de la tecnología digital y el procesamiento de datos, es que se logra el concepto conocido como fábrica inteligente.

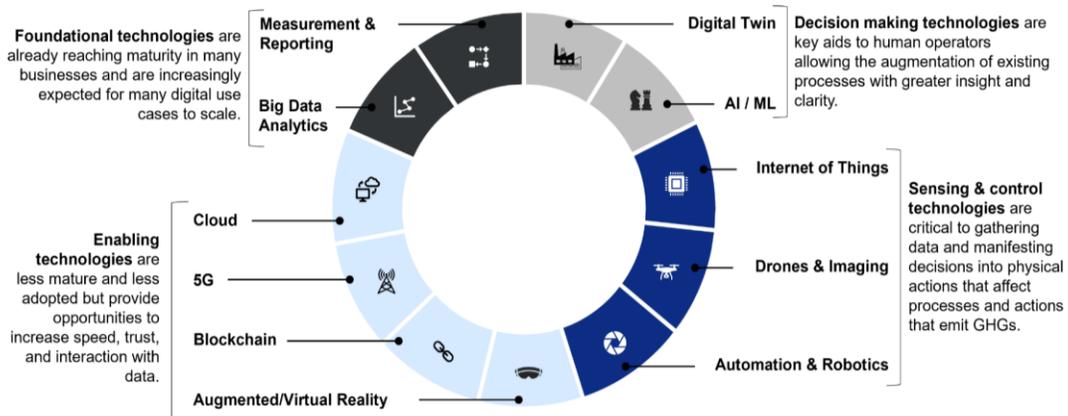


Figura 2-16: Principales técnicas de Digitalización e Industria 4.0 (World Economic Forum, s.f.)

En Chile actualmente el sector de energía es el que ha sido más beneficiado por esta revolución. A su vez, el país ha potenciado la digitalización a través de la promulgación de la ley 21.180 de transformación digital, así como también la publicación de la hoja de ruta energética 2018-2022, donde se detalla la aplicación de diferentes técnicas de digitalización y modernización (GIZ, 2022).

A continuación, se detallan dos medidas asociadas a la implementación de la industria 4.0 con potencial de mitigación de CO₂:

AI Energy Management para la industria del acero: La reducción de emisiones a partir de esta técnica se logra en primer lugar, realizando un monitoreo de las emisiones de las empresas a través de la IA, para luego predecir y reducir estas emisiones, identificando los puntos claves de la cadena de valor a optimizar. La medida a estudiar en este trabajo considera la implementación de un sistema de AI Management en la industria del acero (BCG, 2021).

AI Energy Management (BCG, 2021).			
Reducción a partir de la optimización automática de procesos poco eficientes. Aplicación para industria de acero de UE.			
Reducción anual (M. Ton CO ₂ eq.)	5,65	Consideraciones para reducciones	Reducción de emisiones del 5% (BCG, 2021)
			Emisiones de UE en industria de acero (113,11 M. Ton de CO ₂) (European Environment Agency, 2023)
			Mitigación indicada del documento por planta de 230.000 Ton. de CO ₂ (BCG, 2021)
			Reducción total=% reducción x emisiones totales
Costo de abatimiento (€/Ton. CO ₂ eq)	0,12	Consideraciones económicas	Costo anualizado de 30.000 USD por software (Microsoft, 2024)
			Costo de abatimiento=Costo anualizado por modelo/Mitigación referencial por planta

Tabla 2-8: Ficha resumen para AI Management.

Digital Twin para la industria del cemento: Un Digital Twin corresponde a un modelo virtual de un objeto físico, en el que se busca abarcar el ciclo de vida del objeto y utiliza los datos en tiempo real enviados por los sensores del objeto para simular el comportamiento y supervisar las operaciones (Calderon Cardona, 2022). Los modelos de Digital Twin pueden replicar varios elementos del mundo real, desde piezas individuales de un equipo en una fábrica hasta instalaciones completas. La tecnología de Digital Twin permite supervisar el rendimiento de un activo, identificar posibles fallos y tomar decisiones mejor fundamentadas en cuanto al mantenimiento y el ciclo de vida (Calderon Cardona, 2022). Al utilizar esta técnica en las diferentes industrias y procesos productivos, es posible lograr reducciones en las emisiones de CO₂ al potenciar la eficiencia energética en los procesos asociados, además de optimizar el uso de combustible en los mismos.

La medida de mitigación a analizar en este trabajo corresponde al sistema de la empresa CarbonRe,

el cual utiliza IA para el desarrollo de un Digital Twin en la industria del cemento, optimizando el combustible de los hornos (Planet A GmbH, 2022).

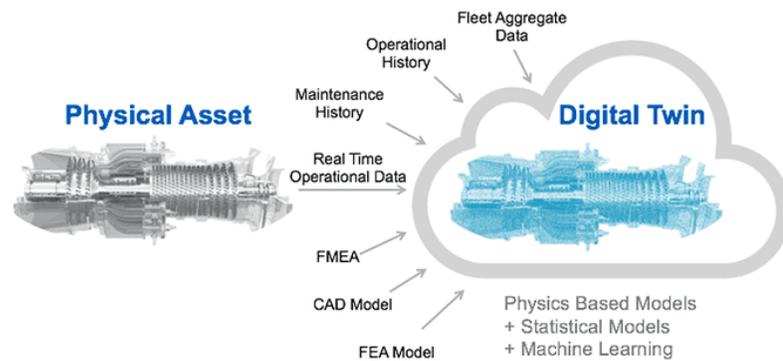


Figura 2-17: Esquema referencial de modelo de Digital twin (Collins, 2022).

Digital Twin (Planet A GmbH, 2022)			
Reducción a partir de reducción de combustible. Aplicación en industria de cemento de UE.			
Reducción anual (M. Ton CO ₂ eq.)	4,34	Consideraciones para reducciones	<p>Reducción de 30,4 kg de CO₂ por Ton. de Clinker (Planet A GmbH, 2022)</p> <p>Promedio de 78,1% de clinker en el cemento producido en EU (Statista, 2023)</p> <p>Producción de 183 M. Ton de cemento en EU (Cembureau, 2023)</p> <p>Reducción total=Promedio clinker x Reducción x Producción</p>
Costo de abatimiento (€/Ton. CO ₂ eq)	10,41	Consideraciones económicas	<p>Costo anualizado cercano a 200.000 € por modelo (Oettl, et al., 2023)</p> <p>Implementación de medida en 226 empresas (Ecofys, 2009)</p> <p>Costo de abatimiento=(Costo anualizado de modelo x Empresas)/Reducción total</p>

Tabla 2-9: Ficha resumen para Digital Twin.

2.2.3.4 Instrumentos de mitigación

Los instrumentos de mitigación se refieren a acciones y estrategias no tecnológicas que logran impulsar el desarrollo de medidas concretas de mitigación de CO₂. Los instrumentos de mitigación pueden ser obligatorios, como el caso del impuesto al carbono en Chile, o voluntarios, como las certificaciones ambientales (BCN, 2020). Destacan como instrumentos los mercados de carbono y los SGE.

Estos instrumentos poseen potencial de reducción bastante elevado en algunas ocasiones y son especialmente útiles cuando los costos marginales para la mitigación comienzan a ser altos. Dado que la efectividad de estos mecanismos varía según el área en la cual se aplica, los instrumentos de mitigación pueden ser especialmente útiles en el sector de Minería, debido a la gran cantidad de emisiones que este rubro posee. Además, posee un respaldo económico robusto que le permite soportar las eventuales repercusiones económicas de éstas.

Environmental, Social and Governance (ESG): Los ESG corresponden a factores ambientales, sociales y de gobierno corporativo que se tienen en cuenta a la hora de invertir en una empresa (Álvarez, s.f.). Aunque su origen se remonta a varias décadas atrás, en los últimos años se han convertido en la referencia de la inversión socialmente responsable (ISR).

La reducción a partir de la implementación de los ESG se logra ya que en estos se definen metas de reducción de carbono, lo cual funciona como fomento a las empresas. Lo anterior se debe a que la inclusión y cumplimiento de las metas ambientales les significa una mejor posición frente a los inversores internacionales. La medida a considerar en este estudio corresponde al fomento de prácticas de ESG en la I&M chilena, con el fin de disminuir las emisiones de GEI de las empresas. Para esta medida, no se encontraron datos claros de la mitigación que podría lograr en el sector.

Carbon Tax y permisos transables (ETS): Los Carbon Tax y los permisos transables (ETS según sus siglas en inglés) corresponden a dos instrumentos asociados al carbon pricing. El Carbon Pricing corresponde a una herramienta que logra identificar los costos externos de los GEI (costo por las emisiones que sufre la sociedad como por ejemplo gastos en salud, aumento del nivel del mar, entre otros), y les asigna un costo monetario, usualmente en base a las toneladas de CO₂ equivalente emitidas (The World Bank, s.f.).

El carbon pricing puede ser aplicado de forma directa o indirecta, siendo la primera la opción más común. La aplicación de forma directa se refiere a aquellos métodos en donde se entrega un precio claro por tonelada de CO₂ equivalente emitida con el fin de reducir las emisiones de GEI. Por otra parte, carbon pricing indirecto corresponde a instrumentos que cambian el precio de los productos en base a las emisiones de GEI asociada, pero con un cambio que no es directamente proporcional a estas emisiones (World Bank, 2023). Los Carbon Tax y ETS corresponden a las dos maneras más reconocidas y utilizadas de Carbon Pricing directo, y en gran parte de los estudios suelen considerarse como medidas complementarias.

Carbon Tax o impuesto al carbón corresponde a un impuesto al carbono que establece explícitamente un precio a las emisiones de GEI liberadas a la atmósfera. Actualmente, el Carbon Tax se aplica como un impuesto directo sobre las emisiones de dióxido de carbono (CO₂), aplicado a las mismas fuentes fijas del punto anterior, exceptuando a las fuentes fijas que operen en base a medios de generación renovable no convencional cuya fuente de energía primaria sea la biomasa (BCN, 2018). Este hoy en día tiene un valor fijo de \$5 USD por tonelada de CO₂ emitida (MMA, 2021).

Por otra parte, el concepto de permisos transables consiste en un mecanismo donde se permite que las metas individuales de una fuente o establecimiento se puedan cumplir por reducciones propias en las emisiones, o por reducciones equivalentes de otra fuente autorizada. Lo anterior se logra gracias a que las reducciones alcanzadas por las empresas son comercializadas en un mercado regulado similar al del mercado de bonos de carbono. En este mercado, las empresas pueden comprar los permisos que acrediten la disminución de cierta cantidad de toneladas de CO₂ equivalente. Este instrumento es complementario a los demás instrumentos que se utilizan para controlar emisiones, como lo son normas de emisión, normas de calidad, prohibiciones y cargos (O’Ryan, 2011). Actualmente, en Chile el mercado de permisos transables está en consideración, pero sigue sin ser aplicado (World Bank, 2023).

Los instrumentos anteriormente nombrados sirven como fomento para las empresas para aplicar nuevas medidas de mitigación de GEI, y así no incurrir en sanciones económicas. Uno de los casos más emblemáticos de sistema de permisos transables corresponde al aplicado por el sistema europeo, que actualmente se encuentra en su cuarta versión (European Commission, s.f).

La medida a considerar en este estudio consiste en la implementación del sistema de comercio de emisiones en la I&M chilena, además de un reajuste del impuesto al carbono. Para estos instrumentos, es difícil evaluar la mitigación efectiva que logran, ya que depende de los precios de carbono fijados, sectores en donde se aplica, entre otros. A pesar de lo anterior, estudios indican que las reducciones anuales promedio a partir del Carbon Tax son cercanas al 2% anual, mientras que para los ETS varían entre 0 y 1,5% anual (Green, 2021). Lo anterior varía dependiendo del sector, del país, del valor impuesto, entre otras, pero siendo generalmente los Carbon Tax más efectivos en términos de mitigación alrededor del mundo.

Precio interno del carbono (Internal carbon pricing): El precio interno del carbono corresponde a otro tipo de Carbon Pricing directo, y en el cual las empresas fijan un precio por tonelada de carbono emitida, con el fin de internalizar las emisiones de GEI. El precio interno del carbono permite a las empresas gestionar las implicancias financieras de sus emisiones, incentivando así la eficiencia energética y medidas de mitigación (ADEC ESG, s.f). Actualmente en Chile no hay registro de que esta sea una práctica comúnmente utilizada.

Existen dos mecanismos principales mediante el cual las empresas pueden aplicar un precio interno

del carbono:

- **Shadow cost pricing:** Shadow cost pricing corresponde a un costo teórico asumido por las toneladas de carbón que permite a las empresas cuantificar el impacto económico de las emisiones de carbono asociadas con sus decisiones. (Anthesis, s.f).
- **Internal Tax or Trading System:** En un internal tax or trading system, la empresa genera un sistema de impuestos y/o emisiones transables entre sus áreas comerciales. Este mecanismo es similar a la alternativa de Carbon Tax y ETS explicada previamente, pero aplicada a nivel empresa. (Anthesis, s.f).

La medida a implementar consiste en fomentar la fijación del precio interno en la I&M chilena. Para esta medida, no se encontraron datos verificables de la mitigación que podrían lograr, y al igual que en la medida de Carbon Tax y ETS, esta mitigación depende del rubro de la empresa, precio impuesto al carbón, entre otras.

Life Cycle Analysis (LCA): Los Análisis de Ciclo de Vida (LCA por sus siglas en inglés) corresponden a una técnica utilizada para determinar los aspectos ambientales e impactos potenciales asociados a un producto. Lo anterior se logra identificando las entradas y salidas de flujos relevantes del sistema, evaluando los impactos ambientales potenciales asociados a esas entradas y salidas, e interpretando los resultados de las fases de inventario e impacto en relación con los objetivos del estudio (Organización Internacional de Normalización, 2006). Esta técnica está asociada directamente a la economía circular, dado que entrega una visión integral del ciclo de vida de los productos, permitiendo así optimizar la cadena de suministros y promover medidas asociadas a la economía circular como el reciclaje y reutilización.

Los LCA permiten estimar el impacto ambiental a lo largo de la vida del producto en relación a su huella hídrica, energía utilizada, o en relación a las toneladas de CO₂ emitidas, identificando estos indicadores en cada una de las actividades asociadas al proceso productivo (Poratelli, 2022). Esta última medición es relevante al considerar los LCA como instrumentos de mitigación. La reducción de emisiones al utilizar herramientas de LCA se logran a partir de la identificación de las emisiones asociadas a diversas actividades que integran la cadena de valor de un producto determinado, para posteriormente aplicar medidas de mitigación concretas que logren abatir las emisiones y optimizar los procesos con mayor impacto (Smith y Johnson, 2023).

A diferencia de los instrumentos anteriores, para este instrumento se analizará la propuesta específica que integra los LCA para comparar diversas medidas de mitigación asociadas a economía circular en la industria del acero (Smith y Johnson, 2023). A partir de la información entregada por los LCA para las diversas actividades que integran este proceso productivo, se logra identificar qué medidas de mitigación logran la mayor reducción en cada una de estas actividades.

En base a lo indicado por el documento (Smith y Johnson, 2023), la reducción de emisiones

asociada a la etapa productiva del acero a partir de la utilización de esta metodología es cercana al 8% anual, y del 30% anual considerando toda la cadena de valor del producto. Las reducciones anteriores se logran identificando los procesos con mayor impacto, para posteriormente aplicar una serie de medidas de mitigación concretas como lo son el reciclaje y uso de hidrógeno.

2.2.3.5 Captura de carbono (CCS y CCU)

Los sistemas de captura de carbono (Carbon Capture and Storage CCS y Carbon Capture and Utilization CCU) corresponden a tecnologías que logran extraer el CO₂ de una determinada fuente, evitando que este se difunda en la atmósfera, para posteriormente almacenarlo o utilizarlo en procesos productivos, como por ejemplo en la producción de combustibles sintéticos (MasScience, 2023). La captura de carbono puede ser clasificada según la fuente de la cual se extrae el carbono o según el método de captura.

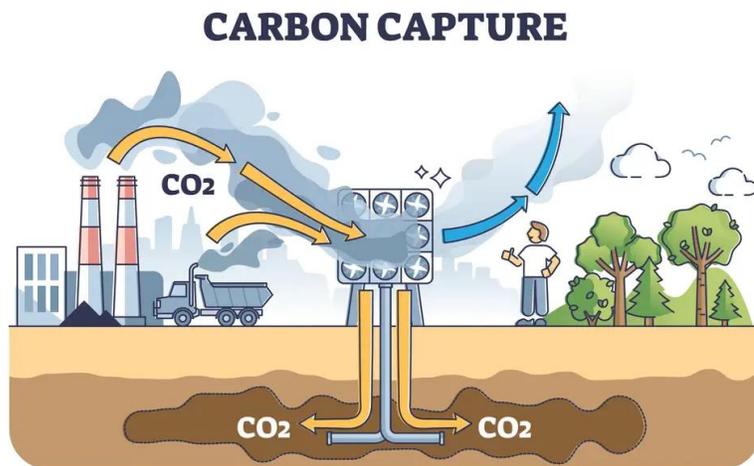


Figura 2-18: Esquema referencial de operación de captura de carbono (MasScience, 2023)

Los sistemas de captura de carbono corresponden a una tecnología conocida desde hace varios años, y cuya principal limitación para su uso ha sido el elevado costo que estos poseen. A pesar de lo anterior, durante los últimos años, varios países han incluido estas medidas como fundamentales para la carbono neutralidad en sus hojas de ruta. Actualmente en Chile, la utilización de sistemas de captura de carbono sigue siendo una medida poco frecuente, siendo utilizada mayoritariamente en grandes empresas dedicadas a la producción de combustibles sintéticos, como es el caso de HIF (HIF Global, 2019). A continuación, se detallan 2 alternativas innovadoras para la utilización de captura de carbono en la Industria y Minería chilena:

Oxyfuel CCS para la industria del cemento: Oxyfuel CCS se refiere a la combinación de la tecnología de combustión con oxígeno puro (o alta concentración de oxígeno) con la captura y almacenamiento de carbono. El uso de CCS se ve potenciado gracias a la utilización de Oxyfuel, debido a que este tipo de combustión genera emisiones con mayor contenido de CO₂, lo cual facilita la posterior captura y almacenamiento de CO₂ al requerir una menor energía (GIZ, 2021).

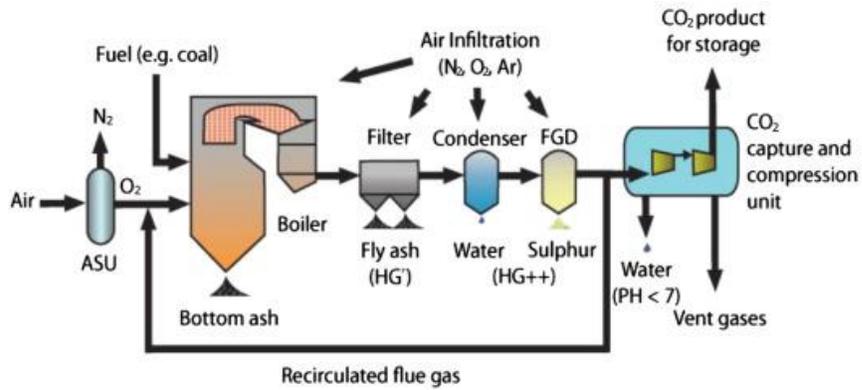


Figura 2-19: Esquema de operación de Oxyfuel junto con CCS (Carpenter, et al., 2023).

Las reducciones asociadas al uso de estas medidas se logran al atrapar el CO₂ que se produce durante la combustión, para posteriormente almacenarlo.

Oxyfuel CCS (Agora Energiewende, 2020).			
Reducción a partir de la captura y almacenamiento del CO ₂ emitido. Aplicación en industria de cemento de UE.			
Reducción anual (M. Ton CO ₂ eq.)	9	Consideraciones para reducciones	Reducción total estimada para la UE (Agora Energiewende, 2020).
Costo de abatimiento (€/Ton. CO ₂ eq)	70	Consideraciones económicas	Costo de abatimiento anual de 70 €/Ton CO ₂ (Agora Energiewende, 2020).

Tabla 2-10: Ficha resumen para Oxyfuel CCS.

CCU para la producción de acero y metanol: Esta medida corresponde a la captura del CO₂ emanado en los procesos productivos del acero, para su posterior utilización en la producción de metanol. La reducción de emisiones se debe justamente a este proceso al lograr utilizar y aprovechar el carbono emanado, a diferencia de los procesos tradicionales (Wich-Konrad, 2021).

La medida a considerar en este estudio consiste en la utilización de esta tecnología en el total de la industria de acero y metanol, considerando la reducción de emisiones en la producción de 1 tonelada de acero y 0,4 toneladas de metanol (Wich-Konrad, 2021).

CCU para la producción de acero y metanol (Wich-Konrad, 2021)			
Reducción a partir de la captura y utilización del CO ₂ emitido en la producción de acero. Aplicación para industria de acero de UE.			
Reducción anual (M. Ton CO ₂ eq.)	169,386	Consideraciones para reducciones	Reducción de 1,11 M. de Ton. de CO ₂ por Ton de acero producida (Wich-Konrad, 2021)
			Producción de 152,6 M. Ton de acero en EU (EUROFER, 2022)
			Reducción total=Reducción x Producción
Costo de abatimiento (€/Ton. CO ₂ eq)	230	Consideraciones económicas	Costo de abatimiento anual de 230 €/Ton CO ₂ (Agora Energiewende, 2020)

Tabla 2-11: Ficha resumen para CCU.

En base a todas las alternativas anteriores, a continuación, se muestran tablas resumen de las medidas e instrumentos de mitigación a analizar:

Instrumento	Reducción
ESG	-
Carbon Tax y ETS	5% de las emisiones de industrias manufactureras en Francia a partir de Carbon Tax, 13,5-19,8% de las emisiones de la industria manufacturera en Francia a partir de ETS
Precio interno del carbono	-
LCA	8% anual para la cadena de valor del acero, 30% considerando su fase de utilización

Tabla 2-12: Tabla resumen de reducciones de instrumentos de mitigación.

Área	Medida	Reducción anual (M. Ton CO ₂ eq.)	Costo de abatimiento (€/Ton. CO ₂ eq)
Economía Circular	Ecodiseño para la industria	30	540,07
	Simbiosis industrial para industrias manufactureras (aluminio, acero, celulosa, papel)	44,6	91
Hidrógeno Verde	Hidrógeno para acero DRI	66	100,00
	Hidrógeno para industria del cemento	8,8	27,50
Digitalización	Digital Twin en la industria del cemento	4,34	10,41
	AI Management para la industria del acero	5,65	0,12
Captura y utilización de carbono	CCS para industria del cemento	9	70,00
	CCU para la producción de acero y metanol	169,386	230,00

Tabla 2-13: Tabla resumen de reducciones y costos anualizados de medidas innovadoras.

Es importante considerar que las reducciones y sus costos fueron calculados para el total de la industria europea en base a las consideraciones explicitadas, por lo tanto, estos representan un orden de magnitud, no valores exactos.

3. Metodologías para la selección de alternativas de mitigación en I&M.

Con el fin de priorizar las alternativas innovadoras propuestas en la sección anterior, en el siguiente capítulo se detallan cuatro metodologías de selección que pueden ser utilizadas para la priorización de medidas de mitigación:

3.1 Metodología multicriterio AHP

El método de Analytic Hierarchy Process (AHP), corresponde a una metodología multicriterio propuesta por Thomas Saaty en 1980, a través de la cual se generan escalas de prioridades para los distintos criterios, para luego en base a estos generar una toma de decisiones (Nantes, 2019). El proceso de decisión con AHP se puede descomponer en los siguientes cuatro pasos esenciales (Nantes, 2019):

1. La definición del problema y el tipo de conocimiento que se quiere obtener.
2. La estructuración del problema a través de la descomposición jerárquica en subproblemas (criterios y subcriterios), que deben resolverse para arribar a una solución satisfactoria. Las alternativas se encuentran en el nivel más bajo de dicha jerarquía.
3. La construcción de matrices de comparación, en las que se cargan los juicios expertos mediante el método de comparación uno a uno con la escala sugerida del método.
4. La síntesis de cada una de las matrices y finalmente del modelo completo para obtener la prioridad global de cada alternativa.

Para realizar la comparación, se utiliza la Escala Fundamental de Saaty, la cual a través de valores del 1 al 9, establece prioridades de una alternativa sobre otra (Gonzalez 2019). A continuación, se indican los significados de cada uno de los valores:

VALOR	DEFINICIÓN	COMENTARIOS
1	Igual importancia	El criterio A es igual de importante que el criterio B
3	Importancia moderada	La experiencia y el juicio favorecen ligeramente al criterio A sobre el B
5	Importancia grande	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente el criterio A sobre el B
7	Importancia muy grande	El criterio A es mucho más importante que el B
9	Importancia extrema	La mayor importancia del criterio A sobre el B está fuera de toda duda
2,4,6 y 8	Valores intermedios entre los anteriores, cuando es necesario matizar	

Tabla 3-1: Escala de Saaty (Gonzalez 2019)

3.2 Método Delphi

El método Delphi se clasifica como un tipo de metodología prospectiva, que busca acercarse al

consenso de un grupo de expertos respecto a un tema, mediante el análisis y la reflexión de un problema definido (Varela-Ruiz et al., 2012). El método Delphi posee 4 características claves:

1. **Proceso iterativo:** Los expertos participantes en el proceso deben emitir su opinión o respuestas en más de una ocasión, a través de varias rondas que llevan a estabilizar las opiniones. A través de esta secuencia el experto tiene la posibilidad de reflexionar o reconsiderar su opinión, en base a planteamientos propios o de otros expertos (Varela-Ruiz et al., 2012).
2. **Anonimato:** En este caso se refiere a que los expertos del grupo no pueden saber las respuestas ni las opiniones de los demás participantes. A partir de este anonimato, se logra evitar las influencias negativas de los miembros dominantes del grupo o la inhibición de algún participante. El grupo coordinador se encarga del control de la comunicación, por lo que nunca se establece una participación directa entre los expertos involucrados (Varela-Ruiz et al., 2012).
3. **Retroalimentación o feedback controlado:** Antes del inicio de cada ronda, el grupo coordinador transmite la posición de los expertos como conjunto frente al problema o situación que se analiza, destacando los aportes significativos, las posturas discordantes o información adicional solicitada por algún experto. De esta forma, la retroalimentación a través del análisis del grupo conductor del método permite la circulación de información entre los expertos y facilita establecer un lenguaje común (Varela-Ruiz et al., 2012).
4. **Respuesta estadística del grupo:** En caso de que al grupo de expertos se le haya solicitado una estimación numérica, se maneja el promedio de las respuestas individuales. A partir de lo anterior, se consigue la inclusión de las respuestas individuales en el resultado final del grupo (Varela-Ruiz et al., 2012).

A continuación, se muestra un esquema de las fases de esta metodología:



Figura 3-1: Esquema de fases del método Delphi (Manrubia, et al., 2020).

3.3 Análisis costo-beneficio

El análisis costo-beneficio (ACB) es una herramienta que permite evaluar la conveniencia de realizar un proyecto o política a partir de la cuantificación de los costos y beneficios asociados a su implementación a lo largo de un período de tiempo, y la comparación de éstos frente a un escenario de línea de base (MGAP, 2023). Este análisis se puede realizar desde dos perspectivas: la evaluación privada y la evaluación social o económica.

Por un lado, la evaluación privada se realiza desde el punto de vista del inversor o ejecutor del proyecto o política, por lo que se consideran los flujos de costos y beneficios financieros asociados a la implementación de la medida (FAO & PNUD, 2019). Por otra parte, en el caso de la evaluación social o económica, también interesa saber qué impactos tendrá la medida de mitigación en la economía en su conjunto y en la sociedad, por lo que se evalúan los cambios en el bienestar social como consecuencia de la intervención (FAO & PNUD, 2019).

En un ACB los beneficios adicionales o beneficios sociales netos están asociados con la ganancia en el excedente social generado por la intervención o proyecto. Estos beneficios netos incrementales se expresan en términos monetarios. El resultado se expresa en unidades monetarias, como el valor presente neto (VPN) o como la tasa a la cual el VPN cambia de positivo (hacer la intervención) a negativo (no hacerla) (BID,s.f.).

3.4 Análisis costo-efectividad

El análisis costo efectividad (ACE) es una metodología que permite comparar el costo por unidad de efecto en una opción de proyecto o programa específico con los costos por unidad de efectos en alternativas (BID,s.f.). La comparación entre costo y efectividad permite la clasificación de las alternativas o una comparación con intervenciones o proyectos similares.

En un ACE, el costo es en unidades monetarias, mientras que los efectos incrementales se expresan en términos no monetarios. El resultado de lo anterior es típicamente una relación, el costo por efecto (BID,s.f.).

Junto con las metodologías anteriormente presentadas, existen herramientas tales como curvas de abatimiento y escalas TRL que apoyan la toma de decisiones en temas de mitigación (Anexo B).

4. Propuesta de metodología de selección de alternativas de opciones de mitigación innovadoras

Considerando las metodologías de selección mencionadas en la sección anterior, se decide la utilización de la metodología AHP para la comparación de las tecnologías de mitigación (Economía circular, digitalización, Captura de carbono e Hidrógeno verde).

En primer lugar, se descarta la utilización de la metodología Delphi debido a la dificultad que supone organizar y moderar varias reuniones con los expertos de las áreas a trabajar. Por otra parte, se descarta la metodología de Costo-beneficio debido a que el portafolio de medidas a comparar tiene como base la innovación, por lo que muchas de las alternativas de mitigación a comparar no poseen aún datos específicos asociados a los costos de los proyectos y gran parte de los costos anualizados están basados en supuestos, por lo que no es posible realizar un análisis costo-beneficio exacto. Además, para la transformación de efectos en costos monetarios que esta metodología supone se requiere la validación de expertos en el área, lo cual está fuera del alcance de este trabajo.

Finalmente, se decide utilizar una metodología multicriterio AHP por sobre un análisis costo efectividad, debido a que a partir del primero es posible considerar más factores que afectan en la elección de medidas, como lo son la factibilidad técnica, económica y política. En base a la consideración de más criterios que solamente el costo asociado al cumplimiento de cierto efecto (en este caso la reducción de toneladas de CO₂ lograda), es posible obtener resultados más adecuados para el contexto chileno.

Con respecto a los instrumentos de mitigación, no todos estos presentan información clara respecto a las toneladas de CO₂ mitigadas, o costos asociados a la implementación, y además la efectividad de los instrumentos asociados al carbon pricing varía dependiendo del precio de carbono o permisos impuestos. Por estas razones, no es posible comparar estas alternativas directamente con las otras presentadas. A partir de lo anterior, es que se decide comparar los instrumentos entre ellos, utilizando como criterio principal para la elección revisión bibliográfica, identificando las ventajas y desventajas asociadas a la implementación de cada una de estas alternativas, para posteriormente generar el plan de acción para aquellas que entreguen más certeza y preliminarmente, tengan mayor potencial de mitigación.

Para la comparación entre las distintas alternativas e instrumentos de mitigación, se estudiarán en primer lugar los aprendizajes obtenidos de las tecnologías de mitigación pasadas, analizando que alternativas aumentaron su potencial de mitigación, junto con los factores que influyeron en este cambio. A su vez, se considerará la opinión de expertos en las diferentes categorías de alternativas definidas, con el fin de obtener retroalimentación y juicios de valor.

4.1 Aprendizajes de esfuerzos de mitigación anteriores

Con el fin de identificar los criterios y factores que influyen en el aumento de potencial de las medidas de mitigación, en la siguiente sección se estudiarán los aprendizajes obtenidos a partir de la evolución de las alternativas de mitigación.

En base a las medidas presentadas en la sección Alternativas de mitigación pasadas y Alternativas de mitigación actuales (Tabla 2-1, Tabla 2-2 y Tabla 2-3), es posible observar que el enfoque principal para la mitigación de GEI era en las mejoras en la eficiencia del uso de energía eléctrica y térmica (reducciones de energía, recuperación de calor). Actualmente, el enfoque se basa principalmente en el recambio de tecnologías y la electrificación de procesos (electrificación motriz, térmica y uso de SST, por ejemplo). Además, de las alternativas pasadas, la única que está proyectada a utilizar en la actualidad consiste en el recambio de motores (recambio por motores eficientes en el pasado, estándares MEPS en la actualidad).

Para explicar el aumento de potencial de las medidas actuales, se determinó en base a entrevistas realizadas a expertos asociados al área de mitigación, que una de las principales causas en el aumento de potencial de éstas corresponde a la implementación de leyes y regulaciones con respecto a las emisiones de CO₂ (Anexo H). Estas regulaciones logran potenciar la innovación en las empresas, así como también el uso de tecnologías de mitigación. Lo anterior es posible verlo en los SGE, que actualmente son considerados como una alternativa de mitigación para el sector de la I&M y su principal impulsor fue la promulgación de la ley de eficiencia energética.

Otro elemento que se reconoce como influyente en el potencial de reducción de emisiones de las tecnologías es la masificación de éstas, ya que esto incide directamente en sus precios y costos de abatimiento. A medida que estas tecnologías se vuelven más accesibles económicamente, su relevancia en temas de mitigación aumenta, potenciando así su impacto en la reducción de emisiones.

Los dos factores previamente mencionados logran explicar el cambio de enfoque en las medidas de mitigación del sector. El aumento en la regulación junto a la disminución de precios generó un cambio en la matriz energética chilena, lo cual potenció la utilización de energías que emiten menos GEI, y, por ende, la electrificación se convirtió en una alternativa viable para la mitigación.

Un caso reconocido de aumento de potencial de mitigación corresponde al de los paneles solares. Para el año 2009, se proyectaba que esta tecnología tendría un costo de abatimiento cercano a los 35 € por tonelada de CO₂ equivalente para el 2020 y no era proyectada a ser utilizada a gran escala, tal como es posible ver en la siguiente curva de abatimiento de McKinsey & Company (McKinsey & Company, 2009):

Global GHG abatement cost curve beyond business-as-usual – 2020

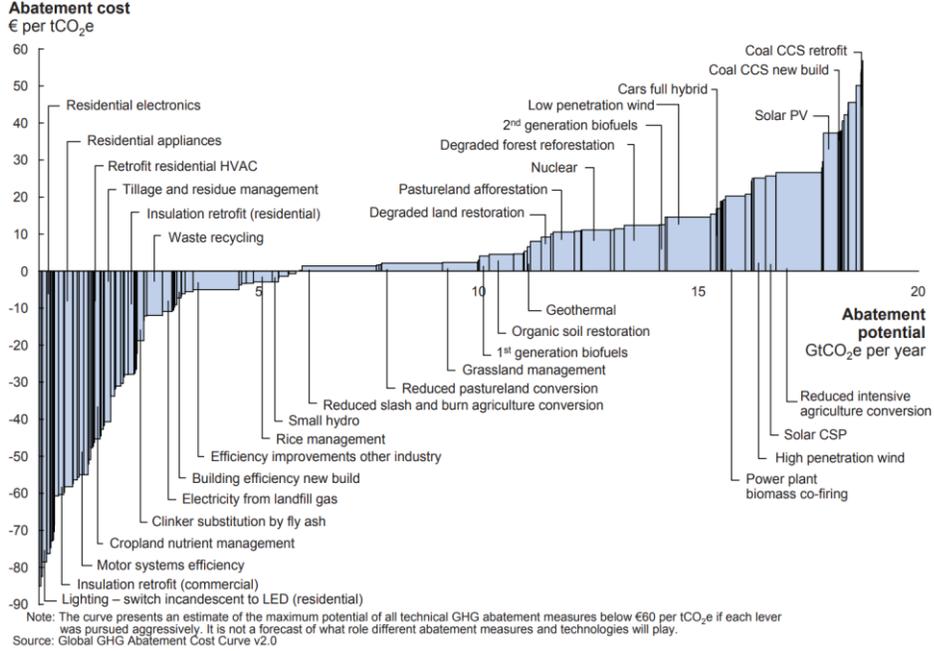


Figura 4-1: Curva de abatimiento de medidas de mitigación de GEI proyectada para 2020 (McKinsey & Company, 2009)

Contrario a lo proyectado por herramientas como la curva mostrada, en la actualidad la energía solar fotovoltaica corresponde a una de las principales fuentes de energía a nivel mundial y una de las principales alternativas de descarbonización implementadas a gran escala durante los últimos años (IEA, 2022). Este aumento de potencial de mitigación, por una parte, es posible explicarlo a partir de la disminución de los precios de esta tecnología, lo cual es observable en la siguiente curva de aprendizaje:

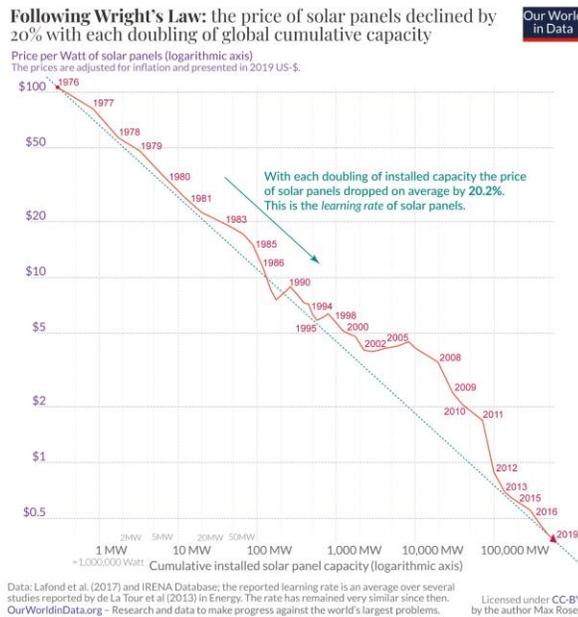


Figura 4-2: Curva de aprendizaje paneles solares (Roser, s.f)

La curva de aprendizaje corresponde a un concepto matemático utilizado para describir como un proceso evoluciona en el tiempo debido al aprendizaje adquirido (Kagan, 2010). En particular, esta curva indica cómo ha evolucionado el precio por Watt instalado de panel solar.

En esta curva (la cual se encuentra en escala logarítmica) es posible ver la disminución de precio que esta tecnología ha ido experimentando desde el año 1976 y como a medida que la capacidad instalada aumenta a través de los años, el precio de la energía solar disminuye exponencialmente (Roser, s.f). Es posible ver también que los paneles solares poseen una tasa de aprendizaje cercana al 20%, lo cual indica que el precio de estos disminuye un 20% al doblar la capacidad acumulada.

En base a la curva, es posible afirmar también que la tecnología de paneles solares sigue la ley de Wright, la cual indica que esta se vuelve más barata a una tasa constante, a medida que la producción acumulada aumenta (Roser, s.f).

Esta caída en precios se explica a través de cuatro factores (Polonsky, 2019):

- Investigación y desarrollo.
- “Aprendizaje” de producción.
- Economías de escala.
- Aprendizaje “por espera”.

Donde el concepto de aprendizaje de producción hace referencia a las mejoras que desarrollan las empresas en sus operaciones, instalaciones, ventas y procesos de financiamiento, que conlleva finalmente a una mejora en los productos (Polonsky, 2019). Por otra parte, el aprendizaje “por espera” hace referencia al desarrollo e innovación que ocurre en otros sectores que termina afectando el desarrollo de la tecnología.

Otro factor importante a considerar en el caso de la generación fotovoltaica es la aplicación de instrumentos legislativos. Uno de los instrumentos más importantes asociados a la masificación de esta tecnología son los Feed-In Tariff (TIF). Los TIF son una herramienta diseñada para promover la inversión en fuentes de energía renovables, proveyendo un “above market price” garantizado (capacidad de vender más caro que al precio de mercado) a los proveedores (Kenton, 2011). Los TIF fueron implementados en 1978 por EE. UU. en respuesta a la crisis energética de los años 70, y desde entonces, varios países alrededor del mundo los han utilizado para aumentar el desarrollo de energías renovables. Se estima que tres cuartos de la energía solar global está asociada a los TIF, con Alemania siendo uno de los casos más emblemáticos de la aplicación de este instrumento. En este país, los TIF impulsaron la instalación de más de 1.6 millones de proyectos solares en un país con menos de 40 millones de hogares, y donde en niveles máximos, la energía solar puede proporcionar más del 40% de la electricidad (Polonsky, 2019).

Los aspectos previamente nombrados generaron un aumento en la eficiencia de los paneles, así como una disminución en precio que promovieron la masificación de esta tecnología (Anexo C).

Gracias a los eventos anteriores, es que la energía solar se encuentra en un momento clave, con las proyecciones por primera vez indicando que la inversión en este tipo de energía superará a la inversión en petróleo (IEA, 2023) y que al 2030 superará la capacidad instalada de carbón en la matriz energética mundial (IEA, 2022).

Es en base a los factores anteriores, que la tecnología de SST utilizada actualmente se proyecta que experimente un aumento de potencial similar al de los paneles solares hace algunos años. Lo anterior, debido al aumento en regulación de la tecnología solar, así como también el crecimiento que ha experimentado esta tecnología durante los últimos años y que se espera que siga en aumento.

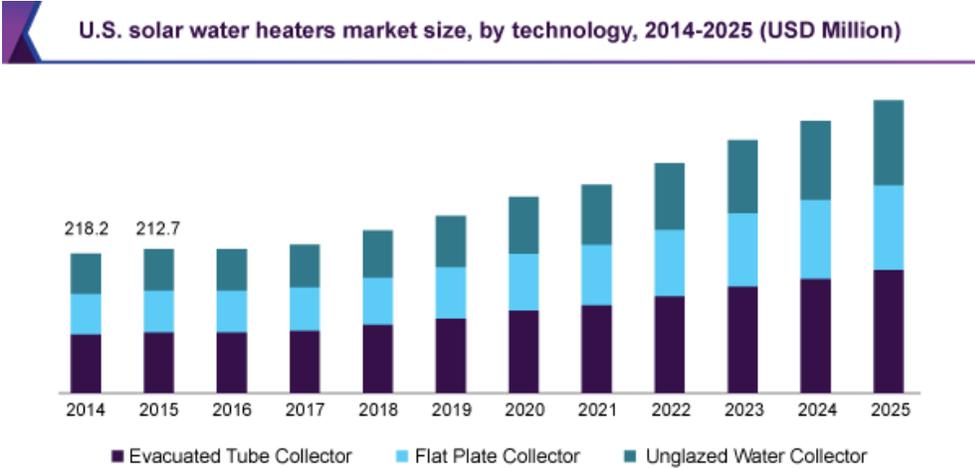


Figura 4-3: Evolución y proyección de mercado de SST en EEUU (Grandviewresearch, s.f).

Este aumento de potencial también se proyecta que ocurra en las plantas tipo CSP, también basado en el crecimiento de capacidad instalada y disminución de costos que ha experimentado durante los últimos años, tal como se puede observar en las figuras a continuación:

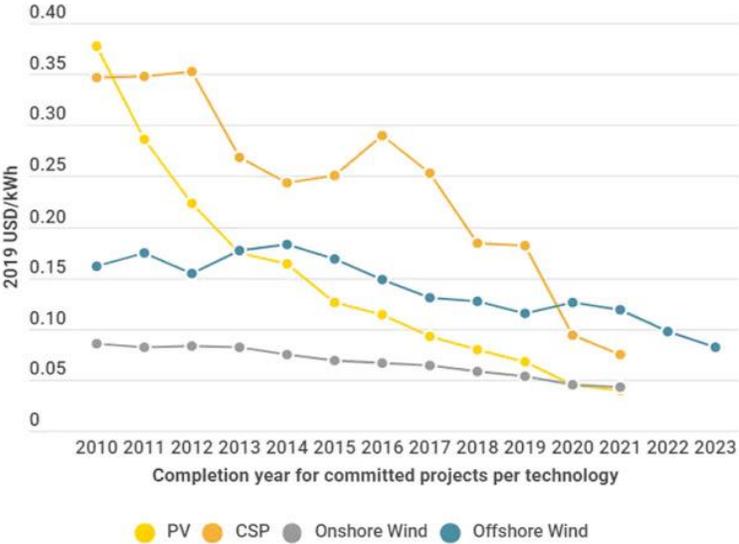


Figura 4-4: Evolución del precio de CSP y otras tecnologías (REN21, 2020).

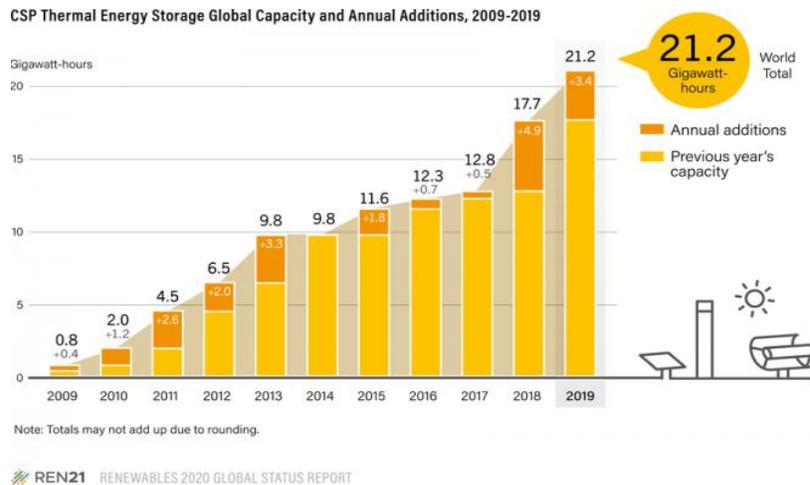


Figura 4-5: Evolución de la capacidad anual de plantas CSP (REN21, 2020)

4.2 Selección de criterios

En base a la metodología definida, se seleccionaron los criterios y subcriterios del documento “A multi-criteria evaluation method for climate change mitigation policy instruments” (Konidari et al., 2007). Lo anterior se debe a que este documento contiene una serie de criterios que permiten realizar un análisis desde distintos enfoques de las alternativas propuestas. Además, hoy en día el documento sigue vigente, siendo citado en varios documentos de mitigación, e incluso compartiendo criterios con el documento nacional de “Plan de mitigación de gases de efecto invernadero para el sector de energía” (Ministerio de Energía, 2017). A continuación, se nombran los criterios y subcriterios indicados por el documento:

1. Efectividad ambiental: Corresponde a la contribución ambiental del instrumento de mitigación (Konidari et al., 2007). Se divide en 2 subcriterios:
 - a. Reducciones directas de GEI: Disminuciones de GEI asociadas a la medida. Generalmente se mide en Toneladas de CO₂ equivalente.
 - b. Efectos ambientales indirectos: Otros efectos ambientales positivos asociados a la implementación de la medida, como, por ejemplo, reducción de consumo hídrico, ahorro de energía, entre otras.

2. Aceptabilidad política: Se refiere a la actitud y opinión de las partes afectadas hacia el instrumento de mitigación (Konidari, et al., 2007). La aceptabilidad política la componen los siguientes subcriterios:
 - a. Costo-eficacia: Costo económico asociado al cumplimiento de una meta de reducción. Puede medirse en €/Ton. CO₂ eq. mitigada, €/kWh ahorrado, entre otras.
 - b. Costo eficacia dinámico: Corresponde a la capacidad de la medida para incentivar o crear otras medidas de mitigación.
 - c. Competitividad: Capacidad para competir a través de precios, productos, entre otras, con otras entidades. Incluye el aumento de trabajo asociado, productividad,

- inversión, etc.
- d. Equidad: Equidad de la medida para distribuir las emisiones, beneficios y costos asociados. En el contexto de un país, hace referencia al horizonte de tiempo asociado para empezar a mitigar.
 - e. Flexibilidad: Cantidad de leyes y mecanismos de influencia asociados que facilitan la implementación y operación en los sectores a mitigar.
 - f. Rigor en caso de incumplimiento: Cantidad de leyes y mecanismos de influencia que aseguren la implementación y operación de las medidas.
3. Factibilidad de implementación: Corresponde a la aplicabilidad de la medida en diferentes ámbitos (Konidari, et al., 2007). Está compuesto por 2 subcriterios:
- a. Factibilidad técnica: Viabilidad técnica para la implementación de la medida bajo el contexto nacional.
 - b. Factibilidad administrativa: Viabilidad política para la implementación de la medida bajo el contexto nacional.
 - c. Factibilidad económica: Viabilidad económica para la implementación de la medida bajo el contexto nacional.

La evaluación para los criterios de reducción directa y costo-eficacia será realizada en base a los datos presentados en la Tabla 2-13, mientras que, para los otros criterios, se analizará caso a caso el desempeño en base a bibliografía asociada.

Para esta evaluación, se decide no utilizar los subcriterios de equidad, competitividad y rigor en caso de incumplimiento de las alternativas, debido a que no existe una gran cantidad de información fidedigna con respecto al desempeño de éstas bajo estos aspectos y la determinación específica de estos desempeños conlleva un estudio aparte.

Es posible notar además que los criterios mencionados consideran los factores de aumento de potencial de mitigación identificados en la sección de aprendizajes de esfuerzos de mitigación anteriores.

4.3 Diseño de metodología de selección

4.3.1 Multicriterio AHP

Para la utilización de la metodología AHP, se decide utilizar el programa Excel para la creación de matrices de decisión, obtención de valores propios y ponderaciones finales.

Al momento de implementar la metodología AHP, es importante considerar los siguientes aspectos:

- La diagonal en las matrices de evaluación está solamente conformada por 1. Esto se debe a

que en la diagonal se evalúa el criterio A v/s el criterio A, por lo que no hay preferencia.

- Al evaluar las matrices según la escala de Saaty, se debe cumplir que el valor traspuesto de cada término en la matriz sea igual a su inverso, es decir, el término $a_{j,i} = 1/a_{i,j}$
- Para calcular los pesos relativos de cada matriz se deben calcular los valores propios λ de esta, para posteriormente normalizarlos y obtener los pesos correspondientes. El valor propio máximo de cada matriz se identifica como λ_{max} .
- Para todas las matrices de evaluación se debe cumplir que el Ratio de consistencia (CR) sea menor o igual que el 10% (Zhao, et al., 2021). El Ratio de consistencia evalúa la consistencia de la matriz de decisión y depende del índice de consistencia (CI) y del promedio del índice de consistencia (RI). El primero está dado por la fórmula 1, mientras que el segundo depende del tamaño de la matriz n y adquiere los valores que se indican en la imagen a continuación. Finalmente, el CR se calcula en base a lo indicado en la fórmula 2 (Zhao, et al., 2021).

$$(1) CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \text{ Fórmula índice de consistencia CI}$$

$$(2) CR = \frac{CI}{RI} \text{ Fórmula ratio de consistencia CR}$$

Matrix Order	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

Tabla 4-1: Tabla de índice de consistencia RI (Zhao, et al., 2021).

Según lo indicado por el documento “A Multi-Criteria Evaluation Method for Climate Change Mitigation Policy Instruments” (Konidari, et al., 2007), se determinaron los siguientes pesos relativos para los criterios y subcriterios indicados previamente:

	Efectividad ambiental	Aceptabilidad política	Factibilidad de implementación	Peso relativo
Efectividad ambiental	1	1/5	2	17%
Aceptabilidad política	5	1	7	74%
Factibilidad de implementación	1/2	1/7	1	9%

Tabla 4-2: Matriz de evaluación criterios

	Reducciones directas de GEI	Efectos ambientales indirectos	Peso relativo
Reducciones directas de GEI	1	5	83%
Efectos ambientales indirectos	1/5	1	17%

Tabla 4-3: Matriz de evaluación subcriterios ambientales

	Costo-eficacia	Costo-eficacia dinámico	Flexibilidad	Peso relativo
Costo-eficacia	1	5	7	73%
Costo eficacia dinámico	1/5	1	3	19%
Flexibilidad	1/7	1/3	1	8%

Tabla 4-4: Matriz de evaluación subcriterios aceptabilidad política.

	Factibilidad Técnica	Factibilidad administrativa	Factibilidad económica	Peso relativo
Factibilidad Técnica	1	1/2	3	31%
Factibilidad administrativa	2	1	5	58%
Factibilidad económica	1/3	1/5	1	11%

Tabla 4-5: Matriz de evaluación subcriterios factibilidad de implementación.

La distribución de los criterios y subcriterios de elección se muestra en el siguiente esquema:



Figura 4-6: Criterios y subcriterios a utilizar en análisis AHP

Para cada uno de estas matrices, se deben calcular los valores propios y los pesos relativos de cada criterio. Lo anterior es realizado en Excel con la ayuda del paquete Real Statistics, a través de la función eigVECT.

Una vez calculados los pesos relativos de cada criterio, se evalúa mediante la escala de Saaty las alternativas de mitigación para cada uno de los criterios mencionados. Para los criterios de mitigación efectiva de GEI y costo-eficacia, esto se realiza en base a las estimaciones de mitigación y costo anualizado detalladas previamente.

Por otra parte, para los demás criterios se procede a evaluar su desempeño en base a bibliografía asociada. Primero, se establecen las siguientes notas de desempeño como escala auxiliar:

- 1: Bajo
- 2: Bajo medio
- 3: Medio
- 4 Medio alto
- 5: Alta

Posteriormente, al comparar las alternativas en cada criterio, se le asigna un valor de la escala de Saaty en base a la diferencia entre sus notas de desempeño:

- Diferencia de 0 (misma nota): Equivalencia de 1 en escala de Saaty para ambas alternativas (misma prioridad).
- Diferencia de 1: Equivalencia de 3 en escala de Saaty para alternativa con mejor nota (prioridad moderada).
- Diferencia de 2: Equivalencia de 5 en escala de Saaty para alternativa con mejor nota (prioridad grande).
- Diferencia de 3: Equivalencia de 7 en escala de Saaty para alternativa con mejor nota (prioridad muy grande).
- Diferencia de 4: Equivalencia de 9 en escala de Saaty para alternativa con mejor nota

(prioridad extrema).

Lo anterior se realiza con el fin de estandarizar las diferencias de desempeño entre cada alternativa y obtener matrices con el menor *CR* posible.

Con las matrices de preferencia de cada subcriterio para las diferentes alternativas ya definidas, se procede a calcular los vectores de preferencia en cada uno de estos subcriterios, para después ponderar éstos con los pesos relativos definidos de los subcriterios y finalmente ponderar los vectores de preferencia de criterios obtenidos, con sus respectivos pesos relativos. A partir de lo anterior, se obtiene un vector global de preferencia indicado en porcentaje que define la prioridad de elección de cada medida, donde mayor porcentaje indica una mayor prioridad.

A modo resumen, a continuación, se indican los pasos a seguir para la determinación del orden de prioridad:

1. Calcular la matriz de preferencias relativas para los criterios y subcriterios utilizando la escala de Saaty.
2. Establecer los pesos relativos de los criterios y subcriterios.
3. Desarrollar la matriz de preferencias relativas para las alternativas en relación con cada subcriterio.
4. Determinar los vectores de preferencia de las alternativas para cada subcriterio.
5. Determinar los vectores de preferencia de las alternativas para cada criterio.
6. Calcular el vector de preferencia global.

Es importante mencionar que posterior a la obtención de vectores de preferencia y de pesos relativos de cada matriz, se debe verificar que el *CR* sea menor a 10%. Si esta condición no se cumple, se debe ajustar la matriz hasta que ocurra.

5. Evaluación portafolio de medidas

A continuación, se detallan los procesos de evaluación en base a las metodologías seleccionadas, así como los resultados obtenidos para ambos casos. Para el estudio mediante metodología AHP, también se incluyen análisis de sensibilidad realizados sobre los pesos relativos de los criterios.

5.1 Evaluación AHP

Tal como se indicó previamente, los órdenes de preferencia de los subcriterios de Reducciones directas de GEI y de Costo-eficacia fueron definidos según los valores obtenidos para cada alternativa en temas de reducción y costo anualizado. Para los demás subcriterios, se realizó una investigación bibliográfica, considerando además la opinión de expertos en entrevistas realizadas, de manera de determinar el desempeño de cada una. Las matrices de preferencia para cada criterio,

junto con las justificaciones asociadas al puntaje de cada alternativa, son especificadas en Anexo D.

Las preferencias de costos y reducciones asociadas a cada alternativa se encuentran asociadas al caso de estudio de la UE, mientras que las preferencias asociadas a los demás subcriterios se ajustan al escenario chileno, considerando a su vez las tendencias internacionales. Lo anterior se debe a que las alternativas estudiadas aún no son implementadas en Chile, por lo que se necesita un estudio con mayor profundidad para poder calcular fidedignamente las reducciones y costos asociados a cada una de ellas. Es por esto que los cálculos deben interpretarse como magnitudes y no como cifras concretas.

En la siguiente sección se indicarán las tablas de preferencias para los criterios de costo-eficacia y efectividad ambiental, así como la matriz de evaluación con notas de 1 a 5 para los demás subcriterios:

5.1.1 Reducciones directas de GEI

Para la realización de esta evaluación, no se asignaron notas a cada alternativa, si no que se ordenan de mejor a peor rendimiento en base a las reducciones asociadas e indicadas en la Tabla 2-13. Es en base a este orden que posteriormente se realiza la comparación según la escala de Saaty.

Área	Medida	Reducción anual (M. Ton CO ₂ eq.)	Orden de preferencia
Economía Circular	Ecodiseño para la industria	30	4
	Simbiosis industrial para industrias manufactureras (aluminio, acero, cemento, papel)	44,6	3
Hidrógeno Verde	Hidrógeno para acero DRI	66	2
	Hidrógeno para industria del cemento	8,8	6
Digitalización	Digital Twin en la industria del cemento	4,34	8
	AI Management para la industria del acero	5,65	7
Captura y utilización de carbono	CCS para industria del cemento	9	5
	CCU para la producción de acero y metanol	169,386	1

Tabla 5-1: Reducciones anuales y orden de preferencias de las alternativas en efectividad ambiental (Reducciones asociadas a lo indicado para el caso de UE).

5.1.2 Costo-eficacia

Para comparar el subcriterio de costo-eficacia, se comparará el costo de abatimiento calculado previamente (Tabla 2-13), asociado a la reducción de una tonelada de CO₂ equivalente (€/Ton. CO₂eq). A continuación, se muestra la tabla con los resultados y órdenes de preferencia:

Área	Medida	Costo de abatimiento €/Ton. CO ₂ eq	Orden de preferencia
Economía Circular	Ecodiseño para la industria	540,07	8
	Simbiosis industrial para industrias manufactureras (aluminio, acero, cemento, papel)	91	5
Hidrógeno Verde	Hidrógeno para acero DRI	100,00	6
	Hidrógeno para industria del cemento	27,50	3
Digitalización	Digital Twin en la industria del cemento	10,41	2
	AI Management para la industria del acero	0,12	1
Captura y utilización de carbono	CCS para industria del cemento	70,00	4
	CCU para la producción de acero y metanol	230,00	7

Tabla 5-2: Costos anualizados y orden de preferencias de las alternativas en costo-eficacia.

5.1.3 Resto de subcriterios:

A continuación, se muestra una tabla resumen con las evaluaciones de 1 a 5 de las alternativas para el resto de los subcriterios. La justificación de cada nota se encuentra en detalle en Anexo D.

	Efectos ambientales indirectos	Costo eficacia dinámico	Flexibilidad	Factibilidad técnica	Factibilidad administrativa	Factibilidad económica
Ecodiseño	4	4	3	4	4	2
Simbiosis	5	5	4	2	2	3
Hidrógeno en acero	3	3	3	3	4	4
Hidrógeno en cemento	2	3	3	3	4	4
Digital Twin cemento	3	4	4	4	3	4
AI management en acero	3	4	3	3	3	4
CCS para cemento	3	3	3	2	2	2
CCU para acero y metanol	3	3	3	3	2	2

Tabla 5-3: Matriz con evaluaciones de alternativas según subcriterios.

Finalmente, a partir de los desempeños de cada alternativa, y posterior utilización de la escala de Saaty, se llega al siguiente vector de preferencia de alternativas:

Pesos relativos (Según Tabla 4-2)	17%	74%	9%	
	Efectividad ambiental	Aceptabilidad política	Viabilidad de implementación	Vector de preferencia
Ecodiseño	12%	5%	22%	7,92%
Simbiosis	20%	14%	4%	13,74%
Hidrógeno en acero	20%	5%	19%	8,98%
Hidrógeno en cemento	4%	13%	19%	12,24%
CCS para cemento	7%	9%	4%	8,53%
CCU para acero y metanol	29%	4%	6%	8,37%
Digital Twin para cemento	3%	22%	16%	18,06%
AI management en acero	4%	28%	11%	22,16%

Tabla 5-4: Matriz de preferencias según análisis AHP (Pesos relativos de criterios según tabla 4-2).

El vector de preferencia resultante demuestra una preferencia marcada por las alternativas de digitalización de Digital Twin y AI Management, con ambas siendo las únicas que presentan una preferencia sobre el 15%. Es en base a esto, que se decide generar un plan de acción para las alternativas nombradas anteriormente. Cabe mencionar que todas las matrices de preferencia elaboradas cumplen con tener un CR menor a 10%, y es posible verificarlas según subcriterio en el Anexo D.

5.2 Análisis de sensibilidad

Los análisis de sensibilidad realizados consistieron en el cambio de puntajes de los criterios, de manera de observar cómo estos influyen en la selección de alternativas. Considerando que con la matriz de preferencias original existe una mayor importancia sobre el criterio de aceptabilidad política, se analizaron cuatro casos:

- Caso 1: Mayor influencia de la efectividad ambiental.
- Caso 2: Mayor influencia de la factibilidad de implementación.
- Caso 3: Misma influencia de criterios.
- Caso 4: Mayor influencia de efectividad ambiental y factibilidad de implementación.

La elección de estos cuatro escenarios se basa en que permiten observar cómo varían los resultados según la prioridad que posea el ente selector:

- El caso 1 se vuelve relevante para organismos que deseen seleccionar alternativas que logren grandes reducciones, sin importar el costo y la factibilidad que éstas posean.
- El caso 2 toma importancia en situaciones donde se desee elegir alternativas factibles para el organismo. Este buen desempeño en factibilidad entrega la posibilidad de implementarlas al corto plazo.
- Los casos 3 y 4 representan situaciones en donde más de un criterio es relevante para el organismo selector. En el primero se busca un equilibrio entre todos los criterios analizados, y en el segundo un equilibrio entre la reducción lograda y la posibilidad real de implementación.

En la siguiente tabla se muestra la distribución de pesos relativos para cada caso de estudio:

	Efectividad ambiental	Aceptabilidad política	Factibilidad de implementación
Caso base	17%	74%	9%
Caso 1	74%	9%	17%
Caso 2	17%	9%	74%
Caso 3	33%	33%	33%
Caso 4	40%	20%	40%

Tabla 5-5: Pesos relativos de criterios según caso.

Para estos casos, se obtuvieron los siguientes resultados:

	Caso Base	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Ecodiseño	7,92%	13,13%	18,66%	13,07%	14,65%
Simbiosis industrial	13,74%	16,45%	7,82%	12,53%	12,31%
Hidrógeno en acero	8,98%	18,75%	17,68%	14,77%	16,69%
Hidrógeno en cemento	12,24%	7,67%	15,77%	12,10%	11,89%
CCS para cemento	8,53%	6,85%	4,98%	6,84%	6,33%
CCU para acero y metanol	8,37%	22,71%	9,48%	12,92%	14,69%
Digital Twin para cemento	18,06%	7,07%	14,30%	13,59%	11,97%
AI management en acero	22,16%	7,37%	11,31%	14,19%	11,49%

Tabla 5-6: Puntajes de alternativas para cada caso de análisis de sensibilidad

Caso 1: Mayor influencia de la efectividad ambiental.

Para el caso 1, las alternativas que destacan son las de CCU e hidrógeno en acero. Lo anterior se debe principalmente a las reducciones de GEI que se logran a partir de estas alternativas, ya que corresponden a los casos con mejor desempeño en este subcriterio. A pesar de que las alternativas seleccionadas cumplen con objetivo principal de entregar grandes reducciones, éstas presentan costos elevados y dificultades para su implementación tanto en términos técnicos como económicos.

Caso 2: Mayor influencia de la factibilidad de implementación.

Para el caso 2, las alternativas con mejor desempeño corresponden a ecodiseño en la industria e hidrógeno en acero. Lo anterior se debe al rendimiento en el criterio de viabilidad de implementación, y en particular en los subcriterios de factibilidad administrativa y técnica, en los cuales las alternativas presentan un buen desempeño que hace que sobresalgan del resto. Es en este último subcriterio donde el ecodiseño posee mayor puntaje, por lo tanto, se selecciona como la

alternativa más adecuada. Las alternativas seleccionadas también logran reducciones de GEI significativas, aunque lo anterior es particular a este estudio, ya que no necesariamente las medidas con gran cantidad de reducciones implican una mayor viabilidad técnica y política.

Caso 3: Misma influencia de criterios.

En el caso 3, las alternativas hidrógeno en acero y AI Management son las dos alternativas con mejor desempeño general. Estos resultados se deben al buen desempeño que poseen éstas medidas en al menos dos de los tres criterios principales. Este escenario es el que entrega una mayor cantidad de alternativas viables y la elección de medidas menos marcada, con siete de ocho alternativas obteniendo preferencia sobre el 10% y ninguna superando el 15%. Lo anterior se explica en que la única alternativa que presenta un desempeño bajo en todos los criterios es la de CCS para cemento, mientras que las otras presentan al menos un criterio con desempeño regular o bueno.

Caso 4: Mayor influencia de efectividad ambiental y factibilidad de implementación.

Para el caso 4, las alternativas hidrógeno en acero vuela a obtener el mejor desempeño, siguiéndole las alternativas de CCU para acero y metanol y ecodiseño, siendo la primera la única en este escenario en obtener una preferencia mayor al 15%. Lo anterior se debe al buen desempeño que poseen las alternativas de hidrógeno y ecodiseño en los criterios de efectividad ambiental y factibilidad de implementación, y las grandes reducciones que logra la medida de CCU en acero. Al igual que en el caso 3, siete de ocho alternativas obtienen un vector de preferencia mayor a 10%, aunque la diferencia radica que en este escenario se obtiene una alternativa con preferencia sobre 15%.

Caso base: Mayor influencia de aceptabilidad política.

Con respecto a las medidas seleccionadas para el caso base, se identifica cómo en éste las reducciones de GEI no tienen una gran implicancia, debido a que las dos alternativas seleccionadas en este caso poseen un mal desempeño en el caso 1. Fuera de este, el caso en donde las alternativas de digitalización obtienen mayor preferencia es el caso 3, pero sin llegar a obtener una preferencia notable sobre las demás medidas. Lo anterior indica que la preferencia del caso base está altamente marcada por la viabilidad de la implementación, en particular, por el costo-eficacia, que termina provocando que estas alternativas sean óptimas. Por lo tanto, cuando se le resta importancia a este criterio, las alternativas de digitalización no son seleccionadas, al no destacar en los demás aspectos considerados.

Los resultados de los análisis de sensibilidad indican que la preferencia por alternativas de digitalización es marcada solamente si el costo de implementación es el criterio con mayor relevancia, ya que éstas entregan la menor cantidad de reducciones y poseen un desempeño medio en temas de factibilidad. Este escenario no necesariamente representa las preferencias de todas las entidades, por lo que es probable que estas no sean las más óptimas en una gran cantidad de casos.

Probablemente la implementación de estas medidas no logre un gran efecto en temas de mitigación, por lo que no se recomienda si este es el principal objetivo a conseguir mediante su implementación.

Se determina que el único escenario en donde no se selecciona la alternativa de hidrógeno verde para DRI como óptima, es en el caso base estudiado, quedando como quinta opción y presentado una diferencia cercana a 9% con la segunda. Esto se debe a la gran importancia que se le da en el caso base al costo anualizado de la alternativa, ya que, en todos los otros criterios, esta alternativa presenta un buen desempeño. Lo anterior implica que una reducción en los costos significa que ésta se convierta en una de las medidas más viables a implementar, lo cual puede ocurrir considerando la prospección de Chile hacía la utilización y producción de hidrógeno verde. Junto con lo anterior, la alternativa de ecodiseño es seleccionada dentro de las óptimas en dos de los cuatro casos del análisis de sensibilidad, además de obtener buenos resultados en todos los escenarios exceptuando el caso base, lo que hace ver que también es una alternativa óptima si los costos no son la principal prioridad. A partir de esto se identifica la relevancia de las dos alternativas, por lo que se decide generar un plan de acción para éstas. Finalmente es importante mencionar también el desempeño de las alternativas de simbiosis industrial e hidrógeno para cemento que, si bien en ningún caso se encuentran dentro de las medidas con mejor desempeño, en cuatro de los cinco casos totales obtienen preferencia sobre el 10%.

Para concluir, la ponderación e importancia de los criterios debe ser bien definida por la entidad con el fin de que estos se adecuen y representen sus objetivos y metas a largo plazo.

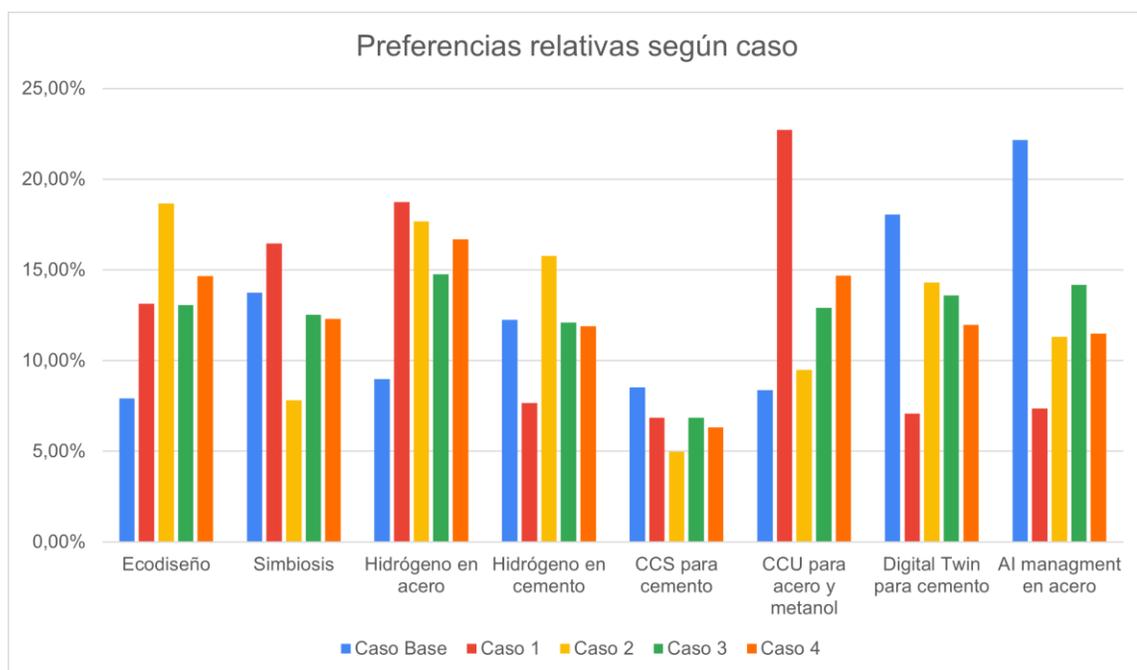


Figura 5-1: Puntajes de alternativas para cada caso.

5.3 Elección de instrumentos de mitigación

Dada la revisión de antecedentes y análisis de factibilidad, se definen como instrumentos de mitigación a seleccionar el LCA, Carbon Tax y ETS.

En primer lugar, se descarta el análisis de ESG debido a que según varios informes y opiniones de expertos, estos actualmente son poco confiables (Charlin et al., 2022) y no existe evidencia clara de que una forma general de información sobre ESG se asocie con la mitigación del carbono (Luo y Tang, 2023).

Por otro lado, se descarta el fomento de un precio interno del carbono en las empresas debido a que, si bien es un instrumento con mucho potencial, la determinación de los verdaderos efectos que conlleva su aplicación en términos de mitigación y costos varía dependiendo de la empresa y el rubro. Además, como se trata de una técnica relativamente nueva, aún existen muchas barreras para la implementación de este instrumento, como lo son el correcto conocimiento de las empresas acerca de sus emisiones directas e indirectas de carbono y el poco conocimiento en general de esta medida. (Riedel et al., 2021).

A pesar de lo anterior, el Internal carbon pricing es cada vez más utilizado en las industrias alrededor del mundo, siendo ya un instrumento utilizado por 8.402 compañías a nivel mundial que reportan en el Carbon Disclosure Project (CDP) y 1.203 de las que participan en este proyecto planeando implementarlo en los próximos dos años (World Bank, 2023). Para complementar lo anterior, este instrumento es utilizado actualmente por varias empresas internacionales como Microsoft y Mahindra (Lord, 2017), además, en países como India, la utilización de esta medida en empresas ha presentado un aumento constante durante los últimos seis años (CDP, s.f). Es por lo anterior, que el Internal carbon pricing se asoma como una interesante alternativa a implementar en las empresas con el fin de disminuir sus emisiones de carbono, y una mayor de estudios en el área asociado al contexto chileno podría funcionar como incentivo a esta medida.

Primero, se decide analizar la alternativa de LCA debido a que en el documento analizado (Smith y Johnson, 2023), esta presenta información detallada acerca de las reducciones anuales logradas y de las medidas implementadas a partir de este diagnóstico para lograr tal reducción. En este documento se obtienen reducciones de al menos un 8% asociadas a la cadena de valor de la industria del acero, lo cual para Chile significa reducciones de 55,92 kilo Ton. de CO₂ equivalente (considerando solamente emisiones directas) (MMA, 2022). Por otra parte, los LCA entregan información valiosa con respecto a diferentes indicadores asociados al ciclo de vida de un producto, como lo son huella hídrica, consumo energético y ocupación de suelos (Poratelli, 2022), además de ser una gran alternativa para el incentivo de medidas asociadas a la economía circular.

Con respecto a los costos, si bien el costo asociado a la implementación de este tipo de estudios depende del producto, rubro a analizar y profundidad del estudio, estos en general presentan costos entre 50.000 y 100.000 USD (The CEO Water Mandate, s.f.), y poseen una validez de información

cercana a diez años (Albertí et al., 2019).

Otro aspecto importante a considerar que hace que este instrumento destaque, es la regulación que posee, siendo un proceso guiado por la norma ISO 14.040, en donde se indican pautas asociadas a su implementación (Organización Internacional de Normalización, 2006). Observando la realidad de distintas zonas, en Europa existe la European Platform on Life Cycle Assessment (EPLCA), la cual corresponde a una plataforma que apoya el desarrollo de los LCA en distintos sectores (European Commission, s. f). Así mismo, en Chile la hoja de ruta hacia una economía circular, entrega lineamientos hacia la promoción de esta medida con la Red Chilena de Análisis de Ciclo de Vida, siendo un actor clave en este proceso (MMA, 2021). Cabe destacar que el documento de referencia utiliza como caso la industria del acero, pero los LCA pueden ser aplicados en una gran cantidad de rubros, permitiendo además de comparar alternativas, identificar los procesos más contaminantes asociados a la cadena de valor de un producto y a partir de esta identificación aplicar medidas de mitigación.

Por otra parte, se realiza la elección de Carbon Tax y ETS como instrumento a analizar debido a diferentes razones. Ante todo, corresponden a los dos instrumentos más reconocidos y utilizados para la mitigación de GEI, obteniendo resultados comprobados en distintas partes del mundo. Como se indicó en secciones anteriores, estudios indican que las reducciones anuales promedio a partir del Carbon Tax son cercanas al 2% anual, mientras que para los ETS varían entre 0 y 1,5% anual dependiendo de los sectores incluidos y país aplicado, siendo el Carbon Tax en general un instrumento más efectivo en términos de mitigación alrededor del mundo (Green, 2021). A su vez, se trata de instrumentos que llevan años siendo aplicados a nivel global, con el Carbon Tax aplicado por primera vez el año 1990 en Finlandia (Mengden, 2023), y el ETS desde el 2005 en Europa (European Commission, s.f), el que se encuentra actualmente en su cuarta fase. Finalmente, estos instrumentos externos pueden potenciar medidas de precio interno de carbono (Trinks, et al., 2022), por lo que su aplicación cobra aún más relevancia si se busca incentivar esta última medida a futuro.

Además, en base a la bibliografía consultada, se determinó que uno de los sectores con mayor potencial para la aplicación de Carbon Tax y ETS corresponde al sector de industrias manufactureras, donde se estima que durante la fase 2 del Europe ETS (entre 2008 y 2012) se lograron reducciones de 25% a 28% en Alemania a partir del ETS en las industrias manufactureras acogidas al sistema. Esto se traduce en reducciones anuales cercanas a 5-6% (Wagner, et al., 2014), mientras que el Carbon Tax en Francia logró reducir anualmente en esta industria un 5% de las emisiones de 2018 a partir de un impuesto de 45€ (Dussaux, 2020).

A modo de referencia, a continuación, se muestran las tendencias de carbon pricing (Carbon Tax y ETS) alrededor del mundo:

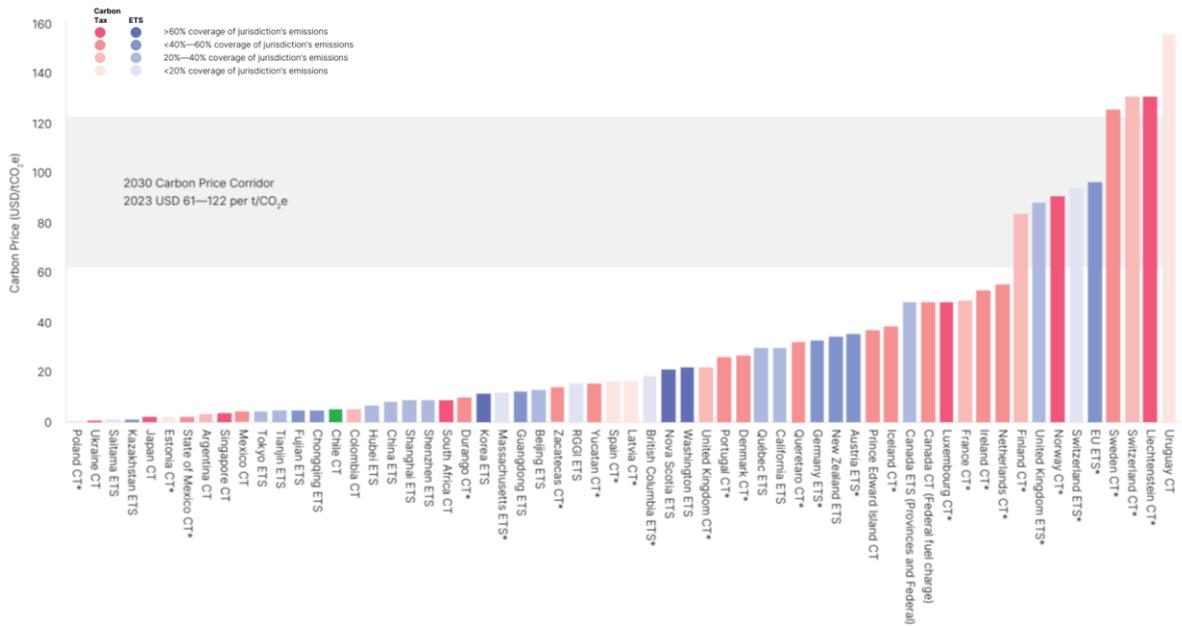


Figura 5-2: Tendencias de Carbon Pricing 2023 alrededor del mundo, con Chile en verde presentando solamente un Carbon Tax que cubre entre un 20% y 40% de las emisiones (World Bank, 2023).

En base al gráfico anterior, es posible notar que el Carbon Tax impuesto por Chile es bajo en comparación con la tendencia internacional, además de encontrarse bajo el Carbon Price Corridor definido para 2030, el cual corresponde a un rango determinado por expertos y que indica los precios recomendados para el Carbon pricing (World Bank, 2023). Lo anterior hace notar que un aumento en los precios y sectores abarcados son necesarios para estar acorde a las tendencias internacionales.

Finalmente, es importante destacar que, en las entrevistas realizadas a los expertos, los comentarios apuntaron a que los instrumentos de mitigación más óptimos para el caso chileno corresponde a los electos, en particular los instrumentos de Carbon Tax y ETS. Con respecto a éstos, se destacó que comienzan a ser útiles cuando los costos marginales para la mitigación comienzan a ser altos, con los ETS teniendo mayor aceptación dentro de las empresas. Con relación a los LCA, la conversación con el experto indicó que el levantamiento de información de este tipo corresponde a una estrategia innovadora y con gran potencial. A su vez, también existió consenso de que los ESG no son efectivos a la hora de mitigar, debido a su poca confiabilidad (Anexo H).

6. Plan de acción

En la siguiente sección, para las medidas propuestas y seleccionadas se identifican sus principales brechas y se generan recomendaciones para su implementación en el corto (< 5 años), mediano (5-10 años) y largo plazo (10 < años). Asimismo, se reconocen los actores relevantes, potenciales y costos de abatimiento en base a los resultados obtenidos. En el Anexo E se detallan más a fondo las medidas seleccionadas.

6.1 Alternativas de mitigación

6.1.1 Medidas de digitalización (AI Energy Management y Digital Twin)

Observando las reducciones de GEI que entregan estas medidas, y comparándolas con las entregadas con las otras alternativas de mitigación analizadas, se identifica que estas poseen un potencial de abatimiento bajo en el contexto nacional. A su vez, comparando el costo-eficacia que ofrecen estas alternativas con relación a las otras analizadas, también se le asocia un costo bajo de abatimiento.

Para estas medidas, las principales brechas identificadas corresponden a (Espinoza, 2023; GIZ, 2020):

- A. Falta de regulación: En la actualidad, la falta de leyes y decretos específicos asociados al tema dificulta la penetración de este tipo de tecnologías en empresas.
- B. Inversión: La implementación de tecnologías de digitalización requiere importante inversión en temas de infraestructura digital, ciberseguridad y capacitación de personal.
- C. Dificultad en el proceso de adaptación: Debido a la novedad de las medidas de la industria 4.0 es que se requieren acciones específicas para facilitar la adaptación de trabajadores y procesos asociados.

En base a los puntos anteriores, se establecieron las siguientes recomendaciones (Órdenes et al., 2023):

Corto Plazo:

- Promoción de tecnologías e infraestructura digitales habilitante, que posibiliten la comunicación e implementación de medidas más complejas.
- Aplicación de programas piloto de tecnologías y medidas de la industria 4.0.
- Promoción de habilidades digitales, que permitan a las personas y empresas entender cómo funcionan estas tecnologías.

Mediano Plazo:

- Aumento de ciberseguridad y estándares que afiancen la operación segura de este tipo de sistemas.
- Potenciar la digitalización de la economía en empresas.
- Potenciar derechos digitales básicos para las personas, que otorgan respaldo al momento de utilizar medidas de digitalización.
- Promulgación de leyes y desarrollo de regulación asociada a tecnologías de la industria 4.0, estableciendo metas y requisitos mínimos de uso de este tipo de alternativas.

Largo Plazo:

- Digitalización del estado, mediante la adopción de tecnologías de la industria 4.0 en los diferentes niveles gubernamentales e implementación de planes de digitalización.
- Aplicación de medidas en otros sectores, identificando aquellos con gran potencial y realizando acciones similares para su aplicación.

A su vez, se ha identificado especial dificultad en la implementación de tecnologías digitales en pequeñas y medianas empresas (PYMES). En relación con esto, se ha desarrollado un Roadmap con los pasos a seguir para la aplicación de este tipo de medidas en las entidades nombradas (Anexo F).

En base a las reducciones estimadas de las medidas, se proponen las siguientes acciones concretas para su aplicación (BCG, 2021):

- 1) Corto plazo: Implementación de programas piloto en sector de acero y cemento para disminución de emisiones y energía.
- 2) Mediano plazo: Establecimiento de metas de reducción de emisiones del 3% en empresas definidas.
- 3) Largo plazo: Aumento de industrias consideradas en estrategias de digitalización, aumento de meta de reducción a 5%.

6.1.2 Hidrógeno Verde para DRI

Dado que el documento indica directamente la cantidad de CO₂ abatida para la industria europea, no es posible saber específicamente la cantidad que esta medida lograría abatir en Chile (Agora Energiewende, 2020). Sin embargo, considerando la cantidad reducida que se proyecta en la UE mediante esta alternativa, comparándola con las reducciones de otras medidas y sabiendo que puede reducir las emisiones hasta en un 97% en comparación con el método a partir de hornos convencionales, es que se estima un potencial alto de reducción. Por otra parte, comparando el costo-eficacia que ofrece esta alternativa en relación a las otras analizadas, se le asocia un costo de abatimiento medio-alto.

Las principales brechas asociadas a la implementación de esta medida consisten en:

- A. Costo asociado: La inversión en nuevos equipos, así como en la obtención de hidrógeno verde, siguen siendo elementos costosos en la actualidad.
- B. Factibilidad técnica: La técnica de reducción directa junto con la utilización de hidrógeno requieren una mayor cantidad de estudios y pruebas de manera de asegurar una operación estable y segura.

En base a los anteriores puntos, se propone el siguiente plan de acción (Hall et al., 2021):

Corto Plazo:

- Aumento de estudios e investigaciones chilenas asociadas a la implementación de la producción por reducción directa en base a hidrógeno.
- Promover el reemplazo gradual de hornos convencionales por reactores de DRI.

Mediano Plazo:

- Implementar plantas de prueba de pequeña escala que funcionen a base de hidrógeno.
- Ayuda y financiamiento para plantas de pequeña y mediana escala que busquen transicionar.
- Fomento de utilización de proceso de reducción mediante gas natural como forma de adaptación.

Largo Plazo:

- Regulación más estricta para plantas que funcionan a partir de hornos convencionales, con el fin de promover la transición a una producción de DRI a partir de hidrógeno.

Las recomendaciones anteriores van de la mano con la hoja de ruta de Chile desarrollada para el hidrógeno verde, en donde se espera para 2030 que el país produzca el hidrógeno más económico del mundo y donde se dan lineamientos para el fomento, transporte y utilización en otros ámbitos de este combustible (Ministerio de Energía, 2020).

Para la alternativa, se proponen las siguientes acciones concretas para su aplicación (IEA, 2020, 2023):

- 1) Corto plazo: Promoción y establecimiento de metas de reemplazo de hornos para producción mediante método de reducción.
- 2) Mediano plazo: Implementación de plantas de prueba de hidrógeno verde para DRI, utilización de gas natural en proceso de reducción a gran escala que logre un 15% de reducción de emisiones.

- 3) Largo plazo: Utilización de hidrógeno verde para el proceso de reducción a gran escala, meta de producción de 5% de acero chileno a partir de hidrógeno

6.1.3 Ecodiseño

En este caso, la reducción asociada al contexto chileno es difícil cuantificar, debido a que gran parte de las reducciones de GEI que logran estos productos están asociadas a emisiones indirectas, por lo que se necesita un estudio aparte para calcular este total. Sin embargo, observando las reducciones que se proyectan en la UE mediante esta alternativa y comparándolas con las reducciones de otras medidas aplicadas al sector industrial, se podría estimar un potencial medio-alto de reducción en el contexto chileno, considerando además que el impacto actual de productos ecodiseñados en el país es bajo. Con respecto al costo económico asociado, comparando el costo-eficacia que posee esta alternativa en relación con las otras analizadas, se le asocia un costo de abatimiento alto.

Las principales brechas asociadas a la implementación de esta medida consisten en:

- A. Desinformación: Actualmente en el contexto chileno, las medidas asociadas a iniciativas de economía circular poseen poca llegada y penetración en las empresas debido a la falta de conocimiento que existe sobre ellas y sus beneficios.
- B. Costos de adquisición: Los productos ecodiseñados poseen costos de adquisición mayores que los de productos convencionales, lo cual puede desincentivar a las empresas en su adquisición.

En base a lo anterior, se propone el siguiente plan de acción:

Corto Plazo:

- Propagación de información de productos ecodiseñados y alternativas de economía circular, de manera de informar acerca de sus beneficios y aplicaciones.
- Definición de áreas de mayor potencial de aplicación y estudio de impactos asociados, de manera de identificar los productos con mayor potencial de reducción a través de la medida.
- Incentivo de ecodiseño a gran escala, promoviendo a las empresas chilenas a manufacturar sus productos bajo estándares de ecodiseño.
- Creación de organismo regulador para productos ecodiseñados, que se encargue de definir los estándares mínimos.

Mediano Plazo:

- Promoción de productos ecodiseñados en empresas, incentivando la compra y el uso de estos productos en los diferentes procesos productivos.

- Generación de ecoetiquetado y certificación de productos ecodiseñados por parte de organismo regulador, con el fin de que los consumidores distingan los productos ecodiseñados y se entregue respaldo acerca de los beneficios ofrecidos por estos.

Largo Plazo:

- Regulación para ecodiseño, estableciendo requisitos mínimos de uso y/o beneficiando a las empresas que utilicen este tipo de productos.
- Establecimiento de requisitos legales mínimos para productos ecodiseñados, a través de estándares mínimos de eficiencia energética y de utilización de materiales, por ejemplo.

Es importante considerar que el ecodiseño está fuertemente relacionado con los LCA, debido que a través de estos últimos es posible cuantificar el impacto real de un producto a lo largo de su ciclo de vida. Además, se pueden identificar las áreas de producción y de uso asociadas con mayor potencial de reducción. Por lo anterior, el potenciamiento de los LCA es clave en el éxito de esta medida.

Con respecto al ecoetiquetado, como referencia se recomienda utilizar el EU Ecolabel, un sistema de etiquetado regulado otorgado a los productos que cumplan con los requisitos establecidos (European Commission, s.f). Este etiquetado permite a los consumidores identificar fácilmente los productos de este tipo, junto con los beneficios que otorgan. Al mismo tiempo, beneficia a las empresas, debido a que el ecoetiquetado le entrega mayor visibilidad y preferencia frente a productos que no lo poseen.

A continuación, se proponen las siguientes acciones concretas para su aplicación (European Comission, 2022):

- 1) Corto plazo: Definición de estándares de ecodiseño en sector IPPU y energía para artículos estudiados (motores eléctricos, artículos de soldadura, neumáticos, bombas de agua, ventiladores, transformadores), creación de organismo regulador de ecoetiquetado.
- 2) Mediano plazo: Promoción en industria de productos ecodiseñados, estableciendo como meta voluntaria lograr un 5% de reducciones anuales de energía y emisiones a partir de su uso.
- 3) Largo plazo: Establecimiento de requisitos mínimos de uso de productos ecodiseñados en industria del que logren un 8% de reducciones anuales de energía y emisiones anuales

6.2 Instrumentos de mitigación

6.2.1 LCA

Sabiendo que los LCA poseen potencial para ser aplicados en una gran cantidad de rubros, que

permiten identificar alternativas de mitigación a lo largo de todo el ciclo de vida del producto y que en el caso de estudio, se llegan a reducciones del 30% de la cadena de valor del acero, es que se le asocia a esta medida un potencial de reducción medio.

Las principales brechas identificadas para la implementación de los LCA corresponden a (Balouktsi et al., 2020; Setac, s.f.):

- A. Investigación: La falta de investigación y resultados asociados a los estudios LCA dificulta la propagación de beneficios asociados y conocimiento en relación a la medida en el contexto chileno.
- B. Falta de regulación: La no existencia de leyes, decretos y estándares obstaculiza la promoción de LCA en empresas y entidades.
- C. Organismos de apoyo: A pesar de que actualmente la Red Chilena de Análisis de Ciclo de Vida funciona como organismo de apoyo, aún faltan entidades que promuevan y guíen el proceso de aplicación del instrumento.

A partir de lo anterior, se identifican las siguientes soluciones a corto, mediano y largo plazo:

Corto Plazo:

- Estimular la investigación académica y utilizar los resultados para respaldar la adopción del LCA.
- Identificar áreas con mayor potencial para la aplicación de LCA.

Mediano Plazo:

- Creación de organismos de apoyo para la aplicación de LCA que ayuden y guíen a las empresas en la utilización de esta herramienta.
- Integración de certificaciones que respalden y beneficien a las empresas que apliquen este instrumento.
- Creación de estándares para la aplicación de LCA en Chile, contribuyendo al desarrollo de metodologías y criterios a utilizar durante su aplicación.

Largo Plazo:

- Creación de un marco regulatorio robusto que establezca la obligatoriedad del uso de LCA en los contextos con mayor impacto.

Como organismo para el fomento y aplicación de LCA, se recomienda la creación de plataformas similares a EPLCA. La EPLCA es la base de datos de la UE que apoya a las políticas y negocios en relación a temas de consumo y producción sustentable (European Commission, s. f). En particular, la EPLCA apoya el desarrollo de los LCA, identificándose como un diagnóstico esencial

para la carbono neutralidad (European Commission, s. f). Al mismo tiempo, se recomienda la implementación de distintos instrumentos de fomento de LCA, como los son el Reglamento Ecolabel, Green Deal y Plan de Acción para la Economía Circular, las cuales corresponden a legislaciones europeas en donde si bien los LCA no son el foco central, se les menciona y fomenta como técnica complementaria y útil (European Comission, s.f).

En base a la información previa, a continuación, se indican las acciones concretas recomendadas (Smith y Johnson, 2023):

- 1) Corto plazo: Estandarización de metodologías y definición de sectores con mayor potencial, incentivo de herramienta LCA para reducir emisiones en empresas de acero principalmente.
- 2) Mediano plazo: Creación de plataforma de control de aplicación de LCA, otorgación de certificaciones y beneficios por uso de LCA.
- 3) Largo plazo: Establecimiento de requisitos legales de uso de LCA como herramienta de mitigación, metas de reducción asociadas a LCA del 4% en industria del acero, aplicación de LCA en más sectores.

6.2.2 Carbon Tax

Dado que el Carbon Tax ya se encuentra implementado en Chile, la principal estrategia para lograr una mayor eficacia en mitigación corresponde a un aumento gradual en el precio fijado por tonelada y en los sectores afectados por este impuesto. La correcta ejecución de estos aumentos debe ser estudiada a fondo de manera de repercutir lo menor posible en la economía de las empresas. Actualmente el Carbon Tax chileno cubre un 33,2% de las emisiones y posee un valor de \$5 USD por tonelada (OECD, 2022).

Un estudio realizado para el caso chileno (International Monetary Fund. Fiscal Affairs Dept, 2023), determinó entre 4 escenarios distintos que las mayores reducciones de CO₂ se logran con:

- Un aumento del Carbon Tax a \$15 USD por tonelada para 2024, y posterior un aumento lineal hasta \$60 en 2030 (reducciones acumuladas de 51 M.Ton CO₂ entre estos años).
- Un aumento del Carbon Tax basado en el precio social del carbón, a \$35 USD por tonelada para 2024, y posterior un aumento lineal hasta \$75 en 2030 (reducciones acumuladas de 59 M. Ton CO₂ entre estos años).

Lo anterior se traduce en un promedio de reducción entre 7,28 y 8,4 M. de toneladas de CO₂ eq. al año.

El Carbon Tax es considerado internacionalmente como un instrumento efectivo, en particular al influir en las emisiones de los sectores que utilizan una gran cantidad de combustibles fósiles. Como se nombró anteriormente, la aplicación de este en industrias manufactureras se ha comprobado que tiene un efecto significativo, logrando en Francia una reducción anual en el rubro

de 5% de las emisiones en 2018, con un precio de 45€ por tonelada (Dussaux, 2020). Es en base a lo anterior que se considera para el contexto chileno, un potencial de abatimiento medio-alto.

Las principales brechas identificadas para este instrumento según expertos corresponden a (Carattini et al., 2017):

- A. Aceptación pública: La desconfianza en el estado y la creencia de que los Carbon Tax no son efectivos a la hora de reducir emisiones generan una opinión negativa de la ciudadanía con relación a este instrumento.
- B. Incertidumbre: La incertidumbre ante eventuales aumentos del precio impuesto por tonelada, generan rechazo en las entidades emisoras.

En base a las brechas identificadas, se proponen las siguientes soluciones a corto, mediano y largo plazo (International Monetary Fund. Fiscal Affairs Dept, 2023):

Corto Plazo:

- La propagación de información y mejora en comunicación asociada al Carbon Tax previo a sus aumentos o reformas, para mantener informada a la población y mejorar la opinión pública.
- Establecer una trayectoria para el aumento gradual con el tiempo, con el fin de poder alcanzar un nivel consistente con la NDC del país.

Mediano Plazo:

- Aumento del valor del Diesel para fuentes móviles o ampliar la cobertura.
- Asignación de parte de los ingresos generados por el Carbon Tax al financiamiento de estrategias adicionales de mitigación, con el fin de generar más reducción de GEI.

Largo Plazo:

- Redistribución del Carbon Tax entre la población, financiando obras públicas u otros con el fin de mejorar aún más la aceptación pública del instrumento.
- Aumento del costo social de contaminantes, material particulado (MP), óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de azufre (SO₂) de manera de incentivar las mejoras en materia de mitigación de las fuentes emisoras.

Los Carbon Tax poseen ventajas prácticas sobre los ETS, especialmente en países en desarrollo, debido a la facilidad de administración, la certeza de precio para promover inversión, el potencial para juntar ganancias y la mayor cobertura de fuentes de emisión (Parry et al., 2022).

En base a la información previa, a continuación, se indican las acciones concretas recomendadas

(International Monetary Fund. Fiscal Affairs Dept, 2023):

- 1) Corto plazo: Establecimiento de Carbon tax en 15\$ USD en sector I&M
- 2) Mediano plazo: Aumento lineal hasta 60\$ USD en sector I&M
- 3) Largo plazo: Aumento de sectores afectos al Carbon Tax

6.2.3 ETS

En Chile, actualmente no se encuentra aplicado el ETS. Sin embargo, un estudio realizado logró cuantificar el aporte de esta medida en los distintos sectores productivos, indicando que para el año 2030 se pueden lograr reducciones anuales entre 1,8 y 2,8 M. de Ton de CO₂ equivalente en la I&M, o de hasta 27,9 M. de Ton de CO₂ equivalente considerando todos los sectores productivos, dependiendo del escenario (Benavides et al., 2021). Al igual que el Carbon Tax, este instrumento logra un gran efecto en los rubros con mayor uso de combustibles fósiles, como en la industria manufacturera, donde en Alemania logró entre 2008 y 2012 reducciones anuales entre 5-6% (Wagner et al., 2014). Es en base a lo anterior que se considera para el contexto chileno, un potencial de abatimiento medio-alto.

Para este instrumento, se identifica que las principales brechas corresponden a

- A. Aceptación: Debido a que se trata de un instrumento no implementado en el país, se debe trabajar en la propagación de información asociada a este.
- B. Implementación: Se deben establecer trayectorias claras asociadas a la ejecución del instrumento, identificando sectores claves y métodos efectivos de monitoreo.
- C. Adaptación: Se debe trabajar en la revisión del sistema una vez implementado, con el fin de implementar mejoras a su funcionamiento.

A continuación, se entregan las siguientes recomendaciones a corto, mediano y largo plazo (World Bank, 2016):

Corto Plazo:

- Propagación de información, para que los futuros sectores involucrados entiendan claramente el sistema.
- Establecer una trayectoria clara, identificando los sectores afectados y límites de emisión.
- Establecer regulación flexible y efectiva, que permita una correcta ejecución del sistema.
- Establecer un organismo regulador y sistema de monitoreo, que permita verificar el funcionamiento del sistema incluyendo los permisos y las emisiones.

Mediano Plazo:

- Promover programas piloto de ETS en rubros con un consumo importante de combustibles

fósiles, como las industrias manufactureras.

Largo Plazo:

- Revisión de funcionamiento del sistema, con el fin de aplicar mejoras.
- Establecer límites más bajos con respecto a las emisiones, de manera de incentivar con el tiempo a las empresas a incorporar más medidas de mitigación.
- Involucrar más empresas y sectores.

Es importante mencionar que organizaciones internacionales como el World Bank (2016), han establecido además manuales de diseño para los ETS en países donde aún no son implementados (Anexo G). Además, un estudio asociado a la Unión Europea y su ETS determinó que, a pesar de los bajos precios de los permisos (bajo el precio social del carbón), el sistema logró reducciones cercanas al 0,5% anual en comparación con el caso base sin la aplicación del ETS (Bayer y Aklin, 2020), por lo que no es necesario poseer precios altos para lograr reducciones efectivas.

Se recomienda además utilizar el ETS Europeo como guía de aplicación. Actualmente se encuentra en la fase 4, y desde la fase 2 se empezaron a ver resultados concretos. La fase 1 de este instrumento fue vital para alcanzar su éxito, ya que durante sus 3 años de duración funcionó como piloto de aprendizaje para la preparación de las siguientes fases (European Commission, s.f). Durante esta:

- Se cubrieron solo emisiones de industrias generadoras y de gran consumo.
- La mayoría de los permisos fueron entregados de manera gratuita a las empresas.
- Se estableció una multa de 40 € por tonelada de CO₂.

Esta fase fue clave para establecer un precio del carbono, libre comercio en permisos de emisiones en los países involucrados e infraestructura necesaria para el monitoreo, reporte y verificación de las emisiones cubiertas. Cabe destacar que, a pesar de las ventajas prácticas de los Carbon Tax, los ETS destacan por las ventajas económicas que poseen (Parry, et al., 2022).

En base a la información previa, a continuación, se indican las acciones concretas recomendadas (International Monetary Fund. Fiscal Affairs Dept, 2023; European Commission, s.f):

- 1) Corto plazo: Establecimiento de trayectoria, creación de organismo regulador.
- 2) Mediano plazo: Programa piloto en sector de industrias afectadas, establecimiento de límites de emisión y multas, con precios entre 5\$-11\$ USD por tonelada de CO₂.
- 3) Largo plazo: Aumento de sectores involucrados, disminución cercana al 5% con relación al máximo de emisiones permitidas, aumento de precio de multas por tonelada hasta 60\$ USD.

Finalmente, se muestran cuadros resúmenes de las acciones concretas y planes de acción para cada medida, incluyendo potencial de abatimiento, brechas y reguladores:

Medida	Actores relevantes	Potencial de abatimiento	Costo de abatimiento	Brechas	Lineamiento estratégico			Comentarios
					Corto Plazo (< 5 años)	Mediano Plazo (5-10 años)	Largo Plazo (10 < años)	
Digital Twin y AI Management	Ministerio de Energía, Ministerio del Medio Ambiente, División de Gobierno Digital	Bajo	Bajo	Regulación, inversión, adaptación	Promoción de tecnologías e infraestructura digital, promoción de habilidades digitales, aplicación de programas piloto	Aumento en ciberseguridad y estándares, digitalización de economía en empresas, potenciar derechos digitales, promulgación de leyes y regulación,	Digitalización del estado, aplicación de estrategias digitales en otros sectores	Dificultad para implementación en PyMES
Hidrógeno Verde para DRI	Ministerio de Energía.	Alto	Medio-alto	Costo, factibilidad técnica	Aumento de investigación, reemplazo gradual de hornos convencionales	Implementar plantas de prueba, financiamiento para transición, utilización de gas natural para proceso de reducción	Regulación más estricta para plantas convencionales	Recomendaciones considerando Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde
Ecodiseño	Ministerio del Medio Ambiente	Medio-alto	Alto	Desconocimiento, costos	Propagación de información, definición de áreas de mayor potencial, incentivo de ecodiseño a gran escala, creación de organismo regulador.	Promoción de productos ecodiseñados en empresas, generación de ecoetiquetado y certificación de productos	Regulación para ecodiseño, establecimiento de requisitos mínimos	Potenciación con LCA, recomendación de ecoetiquetado según EU Ecolabel

Tabla 6-1: Resumen de plan de acción para medidas de mitigación óptimas

Instrumento	Actores relevantes	Potencial de abatimiento	Brechas	Lineamiento estratégico			Comentarios
				Corto Plazo (< 5 años)	Mediano Plazo (5-10 años)	Largo Plazo (10 < años)	
LCA	Ministerio del Medio Ambiente.	Medio	Investigación, regulación, organismos de apoyo	Promoción de investigación, identificación de áreas de enfoque	Creación de organismos de apoyo, integración de certificaciones de LCA, desarrollo de normas para estandarización	Creación de marco regulatorio	Creación de plataforma tipo EPLCA.
Carbon Tax	Ministerio de Hacienda, Ministerio de Energía, Ministerio de Medio Ambiente	Medio-Alto	Opinión pública, incertidumbre	Propagación de información, mejora en comunicación, establecer trayectoria.	Asignación de ingresos a estrategias adicionales, aumentos de coberturas y/o precios para fuentes móviles.	Redistribución de ingreso entre la población, aumento de costo social de contaminantes	Mayores reducciones con precio cercano al precio social del carbón, ventajas prácticas sobre ETS, mayor potencial en sector manufacturero
ETS	Ministerio de Hacienda, Ministerio de Energía, Ministerio de Medio Ambiente	Medio-Alto	Aceptación, implementación, adaptación	Propagación de información, establecer trayectoria y regulación, establecer sistema de monitoreo y organismo regulador	Implementación de ETS piloto	Revisión del sistema, ampliar cobertura, disminuir límites.	Roadmap para implementación en países en desarrollo, ventajas económicas sobre Carbon Tax, ETS Europeo como guía, mayor potencial en sector manufacturero

Tabla 6-2: Resumen de plan de acción para instrumentos de mitigación óptimos.

	AI Management y Digital Twin	Hidrógeno Verde para DRI	Ecodiseño	LCA	Carbon Tax	ETS
Corto plazo (< 5 años)	Implementación de programas piloto en sector de acero y cemento.	Promoción y establecimiento de metas de reemplazo de hornos para producción mediante método de reducción.	Definición de estándares de ecodiseño en sector IPPU y energía, creación de organismo regulador de ecoetiquetado.	Estandarización de metodologías y definición de sectores con mayor potencial, incentivo de herramienta LCA en empresas de acero	Establecimiento de Carbon tax en 15\$ USD en sector I&M	Establecimiento de trayectoria de aplicación de instrumento, creación de organismo regulador.
Mediano Plazo (5-10 años)	Establecimiento de metas de reducción de emisiones del 3% en empresas definidas.	Implementación de plantas de prueba de hidrógeno verde para DRI, utilización de gas natural en proceso de reducción a gran escala que logre un 15% de reducción de emisiones.	Promoción en industria de productos ecodiseñados, meta voluntaria de 5% de reducciones anuales de energía y emisiones.	Creación de plataforma de control de aplicación de LCA, otorgación de certificaciones y beneficios por uso de LCA.	Aumento lineal hasta 60\$ USD en sector I&M	Programa piloto en sector de industrias afectadas, establecimiento de límites de emisión y multas, con precios entre 5\$-11\$ USD por tonelada de CO ₂ .
Largo Plazo (10 < años)	Aumento de industrias consideradas en estrategias de digitalización, aumento de meta de reducción a 5%.	Utilización de hidrógeno verde para el proceso de reducción a gran escala, meta de producción de 5% de acero chileno a partir de hidrógeno	Establecimiento de requisitos mínimos de uso de productos ecodiseñados en industria del que logren un 8% de reducciones anuales de energía y emisiones anuales	Establecimiento de requisitos legales de uso de LCA como herramienta de mitigación, metas de reducción asociadas a LCA del 4% en industria del acero, aplicación de LCA en más sectores.	Aumento de sectores afectos al Carbon Tax	Aumento de sectores involucrados, disminución cercana al 5% con relación al máximo de emisiones permitidas, aumento de precio de multas por tonelada hasta 60\$ USD.

Tabla 6-3: Propuesta de medidas concretas para alternativas de mitigación.

Las recomendaciones para las diferentes alternativas se resumen en los siguientes puntos:

Digital Twin y AI Management: En base a la información entregada por documentos internacionales, para estas alternativas se identificaron tanto costos de abatimiento, como potenciales de reducción de GEI bajos. En relación con las recomendaciones para su implementación en el contexto chileno, el avance en regulaciones para la interoperabilidad y estándares en sistemas de inteligencia artificial podría facilitar una ejecución eficiente de soluciones asociadas a la industria 4.0. La revisión de la flexibilidad de las leyes en la digitalización de la industria abordaría aspectos legales, asegurando adaptabilidad a cambios tecnológicos. Al mismo tiempo, la aplicación de programas piloto y regulaciones específicas asociadas a medidas de digitalización son esenciales para la correcta adaptación. En particular, en Chile se detectan desafíos asociados a la inversión, regulación y adaptación a este tipo de sistemas, especialmente en PYMES, para las cuales existen Roadmaps que buscan ayudar en el proceso de inclusión de este tipo de medidas (Anexo F).

Hidrógeno verde para DRI: Considerando que la bibliografía indica que las reducciones pueden ser de hasta un 97% con respecto al método de producción tradicional, se estima un potencial de abatimiento alto para el contexto chileno, además de un costo de abatimiento medio-alto según los valores económicos considerados. Como brechas de esta medida, se identificaron principalmente los costos y la factibilidad técnica, y es en base a estas dificultades que las recomendaciones para el caso chileno consisten en el aumento de investigación, reemplazo gradual de hornos convencionales, implementación de plantas de prueba y uso de gas natural para el proceso como forma de adaptación. Estas recomendaciones van acompañadas de la estrategia de hidrógeno verde definida para el país, por lo que esta alternativa en particular se ve potenciada por lo anterior.

Ecodiseño: La medida de ecodiseño considera el reemplazo de productos industriales tales como bombas, neumáticos y artículos de soldadura, por otros con estándares de ecodiseño. En base a información de la UE en relación a las reducciones obtenidas y los costos de adquisición para este tipo de productos, es posible identificar un potencial de abatimiento medio-alto y costos de abatimiento altos para el contexto chileno. Las principales brechas identificadas para esta medida corresponden al desconocimiento del ecodiseño y los costos asociados, para lo cual se recomiendan acciones como la propagación de información, creación de organismos, regulación para ecodiseño y establecimiento de requisitos mínimos. Esta medida se encuentra fuertemente relacionada con los LCA, ya que a partir de éstos es posible realizar un correcto ecodiseño, por lo que se recomienda la potenciación de LCA para una ejecución adecuada de esta medida. Por otra parte, se recomienda seguir un plan de ecoetiquetado similar al utilizado en la UE con el fin de promover en la industria los productos ecodiseñados.

LCA: El instrumento de LCA analizado, combina la estrategia clásica de LCA con un Material Flown Analysis, para identificar las alternativas de mitigación más óptimas a implementar en la industria del acero. El instrumento de LCA posee un gran potencial de aplicación en diferentes sectores, y puede servir para comparar más alternativas que las propuestas (que son particulares al

documento estudiado), por lo que se determina que posee un potencial de abatimiento medio. Por lo anterior, se presenta como una opción interesante que puede complementar a otras medidas, siendo incluso utilizada para la alternativa estudiada de Digital twin. Su importancia también radica en la posibilidad de identificar los puntos más relevantes en la cadena de valor de un producto, como el consumo hídrico, eléctrico, y las emisiones de CO₂, para estudiar alternativas particulares a los puntos de interés del proceso que permitan maximizar la sustentabilidad.

Las recomendaciones para la implementación de este instrumento consisten principalmente en la estimulación de investigaciones académicas financiadas para analizar impactos ambientales, utilizando resultados para respaldar su adopción. Se destaca también el desarrollo de normas y metodologías coherentes, la publicación de directrices claras y la integración de los LCA en certificaciones y marcos legislativos. Además, se sugiere la creación de plataformas similares a EPLCA, que funcionen como base de datos que respaldan políticas de sostenibilidad.

Carbon Tax y ETS: Considerando que el Carbon Tax ya se encuentra aplicado en Chile, se destaca que, a través de un aumento gradual en su valor, es posible lograr reducciones acumuladas de 51-59 M. de Ton de CO₂ equivalente entre el 2024 y 2030. Por otra parte, a partir de la implementación de un ETS es posible reducir entre 1,8 y 2,8 M. de Ton de CO₂ equivalente de forma anual en el sector de I&M para el año 2030. Con relación a estos instrumentos, las tendencias internacionales demuestran que Chile necesita ampliar sus mecanismos, aumentando su cobertura y precio en el Carbon Tax, e implementando un ETS. Además, se determina que estos instrumentos poseen un potencial de abatimiento medio-alto, con gran prospección en aquellos sectores más dependientes de combustibles fósiles, como lo son, por ejemplo, la industria manufacturera.

Para el Carbon Tax, se sugieren aumentos en el precio y en la cobertura del impuesto, procurando estudiar su ejecución de manera de minimizar impactos económicos. Para lograr lo anterior, se sugiere la propagación de información asociada, el establecimiento de una trayectoria de aplicación clara que combata la incertidumbre, además de la asignación de ingresos recaudados a nuevas estrategias de mitigación y redistribución de éstos entre la población, junto con aumentos de precios y coberturas. Por último, se destaca que el Carbon Tax posee ventajas prácticas en la implementación por sobre el ETS.

En relación con el ETS, las acciones asociadas a su implementación consideran la propagación de información, establecimiento de trayectoria y regulación, establecimiento de sistema de monitoreo y la aplicación de mejoras al sistema posterior a su puesta en marcha. En particular, se destaca el caso del ETS Europeo como guía potencial para Chile. Este sistema, actualmente en su fase 4, tuvo una fase inicial clave que sirvió como piloto de aprendizaje para establecer aspectos como el precio del carbono, el libre comercio de permisos y la infraestructura para monitorear emisiones. A su vez, se recomienda seguir las guías y manuales de implementación internacionales, como la entregada por el Banco Mundial para la integración de ETS en países no implementados. Es importante destacar que los ETS no necesitan precios altos para ser efectivos y que poseen ventajas económicas sobre los Carbon Tax.

A su vez, se establecen para todas las alternativas e instrumentos nombrados las siguientes recomendaciones generales para la implementación y adaptación:

- a) *Capacitación de personal en las diferentes áreas:* La capacitación de personal se hace necesaria para la implementación de las diferentes medidas e instrumentos propuestos. Lo anterior con el fin de que los integrantes de todos los niveles del organismo logren comprender la manera adecuada para trabajar con las diferentes alternativas. Las capacitaciones de personal pueden ser realizadas a través de la elaboración de estrategias o training roadmaps que a través de una secuencia de pasos permitan a los trabajadores adentrarse más en las estrategias
- b) *Establecimiento de hojas de ruta o trayectoria:* Se propone como acción esencial la aplicación de hoja de ruta o estrategias particulares para las estrategias consideradas. A partir de lo anterior es posible definir acciones concretas más detalladas, áreas con mayor potencial y plazos de aplicación más específicos. Lo anterior puede ser definido por ejemplo en los planes sectoriales de mitigación y adaptación. A través de las hojas de ruta es posible identificar de manera gráfica los procesos y actores asociados, así como la integración de estos en el objetivo a lograr.
- c) *Aumento y promoción de investigación:* A partir del aumento de investigación es posible superar brechas de factibilidad técnica y desconocimiento asociadas a las medidas. La investigación puede ser promovida tanto por el Estado como por privados, y a través de sus resultados es posible respaldar el uso de las medidas en la industria, así como acelerar los procesos de transición asociados.
- d) *Monitoreo, verificación y corrección:* Para la correcta ejecución de las medidas, las fases de monitoreo, verificación y aplicación de correcciones se hacen necesarias. Se recomienda la creación de organismos independientes que cumplan estas funciones y que posterior a la implementación de alternativas, logre entregar información valiosa acerca del funcionamiento de estas para aplicar mejoras si es que es necesario

7. Conclusiones

En esta sección se presentan las principales conclusiones obtenidas a partir de cada uno de los capítulos del trabajo.

Se concluye en primer lugar, que fueron logrados los objetivos propuestos para el trabajo. Con relación al objetivo general, se logró evaluar la factibilidad técnica y económica de las diferentes alternativas, logrando identificar además las más adecuadas para el contexto chileno (Alternativas de digitalización, Hidrógeno Verde, Ecodiseño, LCA, Carbon Tax y ETS)

Con relación a los objetivos específicos, se logró realizar una revisión histórica de las emisiones y medidas, identificando los enfoques que existían en el pasado y actualmente en relación con las tecnologías utilizadas. A su vez, se identificó el aumento de legislación y la disminución de costos como factores influyentes en el aumento de potencial de mitigación.

Por otra parte, se analizaron alternativas innovadoras de mitigación para el caso chileno a través de análisis multicriterio, bibliografía y opinión de expertos. Posteriormente, se formularon propuestas y recomendaciones de políticas públicas para las alternativas óptimas identificadas previamente, dentro de las que se encuentran por ejemplo el aumento de investigación y capacitación de personal.

En base a la recopilación de antecedentes, se reconoce cómo con las emisiones de GEI en Chile en la actualidad y en particular para el sector I&M, no es posible llegar al objetivo de carbono neutralidad para el año 2050 sin aplicar nuevas medidas de mitigación.

En relación a las alternativas de mitigación, se identifica como en el pasado estas se encontraban más enfocadas en la eficiencia de procesos, tanto eléctrica como térmica, mientras que en la actualidad, las medidas tienen un enfoque de recambio y electrificación. Por otra parte, las categorías de medidas innovadoras se seleccionan debido a la prospección que poseen en temas de mitigación según artículos internacionales, además del potencial “innovador” que poseen en Chile, al no encontrarse implementadas actualmente a gran escala. Estas nuevas medidas se separaron en cinco grandes áreas: Economía Circular, Hidrógeno Verde, Digitalización, Instrumentos de mitigación y Captura de Carbono. Para cada una de estas áreas, se identificaron las medidas de mitigación más relevantes asociadas, incluyendo las estimaciones de mitigación de CO₂ equivalentes y costos de abatimiento asociados a su implementación. Lo anterior fue realizado para todas las áreas exceptuando los instrumentos de mitigación, debido a que estos no poseen información clara con respecto a la reducción de costos asociada, si no que entregan rangos de reducciones que varían considerablemente dependiendo del sector y país. Con el fin de estandarizar, todos los cálculos fueron realizados considerando la aplicación de las medidas en toda la industria europea.

Al revisar las distintas metodologías posibles a utilizar para la clasificación y selección de

alternativas de mitigación innovadoras, se llegó a la conclusión de que, para este caso, una metodología multicriterio tipo AHP es la más adecuada. Lo anterior se debe a que ésta permite considerar más criterios a la hora de seleccionar la alternativa, que solamente el costo y la reducción obtenida, sino que también criterios de factibilidad técnica y política, por ejemplo, que son de gran relevancia para las nuevas medidas que surgen. Al mismo tiempo, permite identificar las ventajas y desventajas asociadas a la implementación de cada medida al momento de realizar el análisis. Por otra parte, se determina que para las alternativas como los instrumentos de mitigación, que poseen variabilidad en los diferentes criterios según el país y sector en que se utilizan, la revisión bibliográfica, junto con la identificación de ventajas y desventajas asociadas, así como la opinión de expertos se asoma como una metodología viable para dar al menos, una primera aproximación de selección.

Con el fin de determinar los criterios a tener en cuenta para la comparación de alternativas mediante AHP, fueron identificados los aprendizajes adquiridos a partir de la evolución de las medidas de mitigación en Chile. Estos aprendizajes fueron determinados en base a revisión bibliográfica y entrevistas con expertos del área y se identificó que el aumento de regulación y las caídas en precio corresponden a dos de los principales factores de potenciamiento de medidas de reducción de GEI. Estos factores influyeron en la masificación de los paneles solares como alternativas de mitigación, los cuales hace 15 años no eran proyectados a ser utilizados a gran escala y hoy en día son la principal alternativa de energía renovable. Las caídas en precio, mejoras en la eficiencia, y promulgación de instrumentos legislativos permitieron a la tecnología fotovoltaica dar este salto en potencial y en base a lo visto, se proyecta que otras tecnologías solares como los SST y plantas CSP puedan experimentar este mismo fenómeno.

Cada una de las alternativas de mitigación fue evaluada bajo criterios definidos por bibliografía, que incluyen los aprendizajes identificados y son acordes a la realidad chilena. Lo anterior se realizó mediante la metodología AHP y en base a este análisis se obtiene que las alternativas de digitalización de Digital Twin para la industria del cemento y AI Management para la industria del acero son las más adecuadas para el contexto nacional según los pesos de criterio definidos. Con respecto a los instrumentos de mitigación, se determina que los LCA para la industria del acero, junto con los Carbon Tax y ETS son los más confiables en términos de implementación y reducción de emisiones.

Los análisis de sensibilidad realizados sobre el modelo AHP determinaron que la ponderación de los criterios no es trivial y debe ser bien definida en base a los objetivos y metas de la entidad selectora. Para los distintos casos, se obtuvieron diferentes resultados que variaron según la importancia definida para cada criterio, con la opción de hidrógeno para DRI siendo óptima para cuatro casos de análisis y la opción de ecodiseño para dos. A su vez, las alternativas electas, según los pesos relativos de bibliografía (Digital Twin y AI Management), no fueron seleccionadas como las más óptimas en ninguno de los casos estudiados. Lo anterior indica que la elección de estas últimas se basa principalmente en la aceptabilidad política que poseen (principalmente el buen desempeño en costo-eficacia), pero dando más importancia a los criterios de factibilidad y

efectividad ambiental, estas no se presentan como las mejores alternativas para el caso chileno. Es importante mencionar que si bien las alternativas seleccionadas difieren en potenciales y costos de mitigación, todas estas materias poseen avances legislativos en el país. Estos son clave para entregar prospección en la factibilidad de las alternativas, por lo que mayores esfuerzos en estas áreas pueden potenciar aún más la viabilidad de estas medidas.

Las entrevistas realizadas permitieron en un principio tener nociones acerca de las alternativas de mitigación innovadoras con potencial en Chile y posteriormente respaldar las elecciones realizadas mediante AHP y bibliografía. Se concluye que las conversaciones con expertos son fundamentales a la hora de seleccionar nuevas alternativas de mitigación, dado que permiten sustentar las decisiones que puedan tomar las diferentes industrias y obtener nuevas visiones acerca de aspectos más técnicos de lo que significa la implementación y adaptación de medidas.

Con respecto a los ETS y Carbon Tax, estos instrumentos cobran especial importancia cuando los costos marginales de mitigación comienzan a ser altos y si bien en Chile aún existe margen para abaratar estos costos a través de nuevas tecnologías, la implementación oportuna de los instrumentos sugiere una gran ayuda con miras a futuro. No obstante, en la actualidad estos instrumentos funcionan como un gran incentivo al cambio en aquellas industrias que dependen fuertemente de los combustibles fósiles, por lo que su implementación a la brevedad es fundamental. La implementación de estos instrumentos trae consigo beneficios económicos para el país, siendo éste un incentivo aparte a la mitigación que pueden lograr.

En relación a los LCA, estos adquieren especial importancia de cara a un futuro con principios de economía circular, donde la circularidad en el uso de materiales y eliminación/revalorización de residuos son pilares fundamentales. Observando los avances de Chile en esta materia, la utilización de LCA como instrumento de mitigación se hace indispensable, más aún si se considera la implementación del ecodiseño o simbiosis en la industria. Este instrumento es sumamente útil en esta transición, ya sea para el diseño de productos, o bien para la comparación de equipos o servicios con el fin de identificar aquellas más sustentables. Tal como indican estudios extranjeros, la utilización de este instrumento en la industria del acero, puede lograr reducciones importantes en las emisiones.

Para la alternativa de ecodiseño, se recomienda en particular la implementación de programas de ecoetiquetado similares a los utilizados en la UE, que logren visibilizar los beneficios de los productos ecodiseñados, además de premiar a aquellos organismos que decidan incorporar estos productos, o bien la técnica misma, a su cadena productiva. Al igual que en los LCA, esta alternativa adquiere mayor importancia si se desea avanzar en la transición hacia una economía circular.

Con respecto a la alternativa de hidrógeno verde para DRI, dado que las principales barreras actuales son el costo y la factibilidad técnica, se hace necesaria la investigación y potenciación en la producción de este combustible, con el fin de abaratar costos y lograr el objetivo propuesto por

Chile de ser el productor de hidrógeno verde más barato del mundo. A partir del cumplimiento de este objetivo, otras alternativas de mitigación que utilicen este combustible se verán potenciadas.

Debido a sus bajos costos, las medidas de digitalización se presentan como una opción de mitigación interesante al corto plazo, existiendo ya sistemas digitales que pueden ser implementados en las empresas. Si bien esta alternativa posee un bajo potencial de mitigación, la transición hacia una digitalización total del estado y las empresas es esencial, ya que a partir de esta se pueden desarrollar alternativas que logren mayores reducciones a las consideradas en una gran cantidad de rubros. En este proceso en particular, tal como indican documentos internacionales, se debe dar especial apoyo a las Pymes de manera de que se adapten lo mejor posible a esta transición.

Es importante recalcar que las alternativas identificadas no deben ser miradas como opciones que funcionan por separado necesariamente, si no que pueden ser incorporadas y utilizadas de forma paralela con el fin de lograr una mayor mitigación en el sector. Tal como lo demuestra el panorama internacional, los instrumentos de Carbon Tax y ETS pueden funcionar de manera complementaria, logrando en conjunto reducciones considerables en las toneladas de CO₂ emitidas. Por otra parte, las alternativas de digitalización, como AI Management por ejemplo, pueden ser complementarias a la utilización de hidrógeno verde para DRI, funcionando como sistemas de optimización de procesos y combustible. A su vez, el uso de equipos ecodiseñados y alternativas de economía circular se complementan con la aplicación de LCA. Los casos anteriores sirven como base para justificar la potenciación de varias alternativas de mitigación de forma simultánea, en vez de solamente enfocarse en una particular.

Para la potenciación, ejecución y adaptación de las diferentes alternativas, cobran una gran importancia los esfuerzos económicos tanto del sector privado, como del sector público. El primero puede facilitar los procesos con inversión en estudios asociados a las medidas de mitigación, así como también a partir del desarrollo de programas piloto que permitan la caída de los costos y el desarrollo a gran escala de las alternativas. Por otra parte, el sector público puede contribuir a través de la otorgación de beneficios económicos para aquellas empresas o rubros que desarrollen o apliquen las diferentes alternativas de mitigación, considerando también la dificultad que esto puede significar para empresas pequeñas.

En temas políticos, la acción y esfuerzos del Estado son clave. Tal como se indicó en la sección de aprendizajes de esfuerzos de mitigación anteriores, la promulgación de leyes corresponde a uno de los factores fundamentales para el impulso de medidas y su aumento de potencial, por lo que propulsando leyes y estrategias que permitan la correcta ejecución y adaptación de las diferentes alternativas, se puede lograr la potenciación de éstas. Esta legislación debe ser lo suficientemente flexible, de manera que se dé facilidad a las empresas para implementar las medidas, pero que al mismo tiempo potencie y exija el uso de éstas para contribuir al objetivo de carbono neutralidad.

Son varias las alternativas de mitigación futuras que poseen potencial de mitigación, y el éxito en

su implementación depende del contexto del país o zona en donde se vaya a utilizar. En base a lo anterior, futuros estudios pueden confirmar la viabilidad de implementación de más alternativas que solamente las seleccionadas en este trabajo, adentrándose aún más en los distintos criterios y sus respectivos pesos relativos que afectan en la elección de las estrategias.

Como se dijo previamente, muchas de las alternativas e instrumentos estudiados pueden ser utilizadas de forma complementaria, lo cual puede llegar a fomentar su viabilidad y eficacia, por lo que no es necesario ver cada alternativa como una opción única, si no como parte de un grupo de medidas complementarias entre sí, que se logran potenciar entre ellas con el objetivo de alcanzar la carbono neutralidad.

8. Bibliografía

- Abriata B., Masut A. (2021). *Simbiosis industrial en empresas argentinas y su impacto en el empleo*. Organización Internacional del Trabajo https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---americas/---ro-lima/---ilo-buenos_aires/documents/publication/wcms_803622.pdf
- Abadía, F. (2022). *TRL (Technology Readiness Levels)* . Compra Pública de Innovación-Aragón.<https://cpi.aragon.es/trl-technology-readiness-levels/>
- ADEC ESG. (s.f). *What is an internal price of carbon?* <https://www.adecesg.com/resources/faq/what-is-an-internal-price-of-carbon/#:~:text=An%20internal%20carbon%20price%20is,their%20business%20decisions%20and%20investments>
- Agora Energiewende. (2020). *Breakthrough Strategies for Climate-Neutral Industry in Europe*. https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2020/2020_10_Clean_Industry_Package/A-EW_197_Strategies-Climate-Neutral-Industry-EU_Summary_WEB.pdf
- Albertí, J., Civancik-Uslu, D., Contessotto, D., Balaguera, A., & Fullana-i-Palmer, P. (2019). Does a life cycle assessment remain valid after 20 years? Scenario analysis with a bus stop study. *Resources, Conservation, and Recycling*, 144, 169–179. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.01.041>
- Al-karkhi, Z., & Fadhel, J. (2020). *Implementation of Industrial Symbiosis - How can a collaborative network improve waste management?*. [Tesis de Magister, Royal Institute of Technology] Diva Portal. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1458312/FULLTEXT01.pdf>
- Álvarez, C. (s.f). *¿Qué son los criterios ESG ('environmental, social and governance') y por qué son importantes para los inversores?* BBVA. <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/que-son-los-criterios-esg-environmental-social-and-governance-y-por-que-son-importantes-para-los-inversores/>
- Anthesis. (s.f). *A Guide to Internal Carbon Pricing*. <https://www.thesisgroup.com/internal-carbon-pricing/#why>
- Arndt, D. (2022). *Estrategia de la industria cementera para adaptación a exigencias tributarias de carbono neutralidad*. [Tesis de Magister, Universidad del Desarrollo] Repositorio Académico de la Universidad del Desarrollo. <https://repositorio.udd.cl/items/4b31ffeb->

[b94a-4e13-8c62-d88f9ecdb691](https://doi.org/10.1088/1755-1315/588/3/032023)

- Banco Interamericano de Desarrollo [BID]. (s.f)- *Análisis Costo Beneficio Efectividad*. <https://www.iadb.org/es/quienes-somos/midiendo-resultados/evaluacion-de-proyectos/analisis-costo-beneficio-efectividad>
- Balouktsi, M., Lützkendorf, T., Röck, M., Passer, A., Reisinger, T., Frischknecht, R. (2020). Survey results on acceptance and use of Life Cycle Assessment among designers in world regions: *IEA EBC Annex 72. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 588. 10.1088/1755-1315/588/3/032023.
- Barriga, J. (s. f). *CCUS challenges and opportunities in Chile*. Decarbonisationtechnology. <https://decarbonisationtechnology.com/article/25/ccus-challenges-and-opportunities-in-chile>
- Bayer, P., & Aklin, M. (2020). The European Union Emissions Trading System reduced CO 2 emissions despite low prices. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 117(16), 8804–8812. <https://doi.org/10.1073/pnas.1918128117>
- Benavides, C., Díaz, M., O’ Ryan, R., Gwinner, S., Sierra, E. (2021). Methodology to analyse the impact of an emissions trading system in Chile. *Climate Policy*, 21:8, 1099-1110. DOI: [10.1080/14693062.2021.1954869](https://doi.org/10.1080/14693062.2021.1954869)
- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile [BCN]. (2018). *Implementación del impuesto verde en Chile*. https://www.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/26723/1/BCN_Implementacion_de_Impuesto_Verde_en_Chile.pdf1
- Biblioteca del Congreso Nacional [BCN]. (2020). *Instrumentos para enfrentar el Cambio Climático*. Bcn.cl. https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/29115/1/BCN_Instrumentos_para_enfrentar_el_Cambio_Climatico.pdf
- Binet, F., Saunier, F., & Margni, M. (2021). Assessing the mitigation potential of environmental impacts from circular economy strategies on an industrial sector and its value chain: A case study on the steel value chain in Quebec. *Frontiers in Sustainability*, 2. <https://doi.org/10.3389/frsus.2021.738890>
- Reyes. V. (2020). *Gobierno presentó plan para descarbonizar la economía: proyecta creación de 100 mil empleos*. BioBioChile. <https://www.biobiochile.cl/noticias/economia/actualidad-economica/2020/11/03/gobierno-presento-plan-para-descarbonizar-la-economia-proyecta-creacion-de-100-mil-empleos.shtml>

- Blazsó, M. (2010). Pyrolysis for recycling waste composites. *En Management, Recycling and Reuse of Waste Composites* (pp. 102–121). Elsevier. <https://doi.org/10.1533/9781845697662.2.102>
- BMT. (s.f). *Direct Reduced Iron (DRI)*. CargoHandBook. [https://www.cargohandbook.com/Direct_Reduced_Iron_\(DRI\)](https://www.cargohandbook.com/Direct_Reduced_Iron_(DRI))
- Boix, M., Négnny, S., Montastruc, L., & Mousqué, F. (2023). Flexible networks to promote the development of industrial symbioses: A new optimization procedure. *Computers & Chemical Engineering*, 169(108082), 108082. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2022.108082>
- Boston Consulting Group [BCG]. (s.f). *AI in Mining and Process Industries*. <https://www.bcg.com/beyond-consulting/bcg-gamma/phosa-for-ai-in-mining-process-industries>
- Boston Consulting Group [BCG]. (2021). *Reduce Carbon and Costs with the Power of AI*. <https://www.bcg.com/publications/2021/ai-to-reduce-carbon-emissions>
- Calderon Cardona. (2022). *¿Qué es la tecnología de gemelos digitales?* <https://calderoncardona.com/tendencias/que-es-la-tecnologia-de-gemelos-digitales/>
- Carattini, S., Carvalho, M., & Fankhauser, S. (2017). *How to make carbon taxes more acceptable*. Lse.ac.uk. <https://www.lse.ac.uk/granthaminstitute/wp-content/uploads/2017/12/How-to-make-carbon-taxes-more-acceptable.pdf>
- Carbon Disclosure Project [CDP]. (s.f). *What is internal carbon pricing and how can it help achieve your net-zero goal?* https://cdn.cdp.net/cdp-production/cms/reports/documents/000/006/374/original/ICP_White_paper_Final_%281%29.pdf?1653572442
- Carpenter, S. M., & Long, H. A. (2023). Integration of Carbon Capture in IGCC Systems. *Revista de Energía Limpia*, 15(2), 123-137. DOI: 10.1234/abcd
- Cembureau. (2023). *CEMBUREAU key facts & figures*. <https://cembureau.eu/media/1fqjyve5/key-facts-figures-2021.pdf>
- Charlin, V., Cifuentes, A., & Alfaro, J. (2022) ESG ratings: an industry in need of a major overhaul. *Journal of Sustainable Finance & Investment*. <https://doi.org/10.1080/20430795.2022.2113358>

- Collins, D. (2022). *What are digital twins and how are they used in industrial manufacturing?* Motion Control Tips <https://www.motioncontroltips.com/what-are-digital-twins-how-are-they-used-in-industrial-manufacturing/>
- Collins, L. C., & Klevstrand, A. K. (2023). *Far from perfect. Hydrogen News and Intelligence.* Hydrogen Insight. <https://www.hydrogeninsight.com/policy/far-from-perfect-strict-rules-in-new-delegated-act-will-make-green-h2-projects-more-expensive-hydrogen-europe/2-1-1403241>
- Órdenes, X., Roberts, R., Roja, P. & Rojas, F. (2023). *Estrategia de Transformación digital Chile Digital 2035.* Comisión Económica para América Latina y el Caribe <https://hdl.handle.net/11362/49067>
- Cotrino, A., Sebastián, M. A., & González-Gaya, C. (2020). Industry 4.0 roadmap: Implementation for small and medium-sized enterprises. *Applied Sciences (Basel, Switzerland)*, 10(23), 8566. <https://doi.org/10.3390/app10238566>
- De, T. (2022). *A framework for building trustworthy and actionable AI.* Towards Data Science. <https://towardsdatascience.com/a-framework-for-building-trustworthy-and-actionable-ai-f740b093cc17>
- Decreto No. 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, Febrero 13, 2017, Diario Oficial [D.O]. Chile. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1103158>
- Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit [GIZ]. (2020). *Prospection in Energy Digitization in Chile* https://www.energypartnership.cl/fileadmin/user_upload/chile/media_elements/Studies/CHL_20201130_Prospection_in_Energy_Digitalization_in_Chile_01.pdf
- Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit [GIZ]. (2021). *Análisis de la captura de carbono para la producción de combustibles sintéticos en Chile.* https://www.energypartnership.cl/fileadmin/user_upload/chile/media_elements/Studies/20210818_Carbon_Capture_Full_Study.pdf
- Orellana, F. (2022). *Los avances de Chile en la cuarta revolución industrial.* Diario Financiero. https://www.df.cl/noticias/site/docs/20220428/20220428173559/suplemento_20220429.pdf

- Directorate-General for Environment. (2022). *Proposal for ecodesign for sustainable products Regulation*. European Commission.
https://environment.ec.europa.eu/publications/proposal-ecodesign-sustainable-products-regulation_en
- Donoso M. (2022). *Evaluación de escenarios de uso de hidrógeno en Chile mediante un modelo de planificación energética*. [Título profesional, Universidad de Chile] Repositorio Académico de la Universidad de Chile.
<https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/189188/Evaluacion-de-escenarios-de-uso-de-hidrogeno-en-Chile-mediante-un-modelo-de-planificacion-energetica.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Dussaux, D. (2020), "The joint effects of energy prices and carbon taxes on environmental and economic performance: Evidence from the French manufacturing sector", *OECD Environment Working Papers*, No. 154, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/b84b1b7d-en>.
- Ecodiseño. (s.f). *Ecodiseño*.
<https://www.ecodiseno.cl/>
- Ecofys. (2009). *Methodology for the free allocation of emission allowances in the EU ETS post 2012 Sector report for the cement industry*. European Commission.
https://climate.ec.europa.eu/system/files/2016-11/bm_study-cement_en.pdf
- Ellen MacArthur Foundation. (2019). *El diagrama de la mariposa: visualizando la economía circular* <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/es/el-diagrama-de-la-mariposa>
- Enel. (s.f). *Simbiosis industrial en central San Isidro*.
<https://www.enel.cl/es/sostenibilidad/economia-circular/proyectos/traslado-de-riles.html>
- Enercity S.A. (2023). *Energía solar para piscinas*. <https://enercitysa.com/blog/energia-solar-termica-para-piscinas/>
- Engler, A. (2023). *The EU and U.S. diverge on AI regulation: A transatlantic comparison and steps to alignment*. Brookings. <https://www.brookings.edu/articles/the-eu-and-us-diverge-on-ai-regulation-a-transatlantic-comparison-and-steps-to-alignment/>
- Equipo Técnico del IPPU MMA. (s.f). *Sector Procesos industriales y uso de productos*. Ministerio del Medio Ambiente <https://snichile.mma.gob.cl/sector-procesos-industriales-y-uso-de-productos/>
- Equipo Técnico del MINENERGIA. (s.f). *Sector Energía*. Ministerio del Medio Ambiente

<https://snichile.mma.gob.cl/sector-energia/>

Espinoza, C. (2023). *Los desafíos y oportunidades de la industria 4.0 en Chile*. Parrotfy.com. <https://blog.parrotfy.com/es/blog/los-desaf%C3%ADos-y-oportunidades-de-la-industria-4.0-en-chile>

Estel. (2019). *Las ventajas y los beneficios del sistema de cogeneración*. <https://esteling.com/noticias/sistema-de-cogeneracion/>

Estrategia de Cambio Climático Península de Yucatán. (s.f.). *Gases de Efecto Invernadero*. <http://www.ccpy.gob.mx/cambio-climatico/gases-efecto-invernadero.php>

European big data value forum. (2022). *Digital Twins and Standards*. <https://european-big-data-value-forum.eu/wp-content/uploads/2022/10/Digital-Twins-and-Standards-v-1-0.pdf>

European Commission. (s.f). *A legal framework for the safe geological storage of carbon dioxide*. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/carbon-capture-use-and-storage/legal-framework-safe-geological-storage-carbon-dioxide_en

European Commission. (s.f). *About the EU Ecolabel* https://environment.ec.europa.eu/topics/circular-economy/eu-ecolabel-home/about-eu-ecolabel_en

European Commission, Directorate-General for Energy. (2022). *Ecodesign impact accounting annual report 2021 – Overview and status report*. Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2833/38763>

European Commission. (2022). *Ecodesign and Energy Labelling Working Plan 2022-2024* [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52022XC0504\(01\)](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52022XC0504(01))

European Commission. (2023). *Regulatory framework proposal on artificial intelligence*. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/carbon-capture-use-and-storage/legal-framework-safe-geological-storage-carbon-dioxide_en

European Commission. (s.f). *Development of EU ETS (2005-2020)*. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/development-eu-ets-2005-2020_en

European Commission. (s. f). *European Platform on LCA EPLCA*. <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/>

European Environment Agency. (2023). *EU Emissions Trading System (ETS) data viewer* <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/dashboards/emissions-trading-viewer-1>

- European Steel Association [EUROFER]. (2022). *European Steel in Figures 2022*. <https://www.eurofer.eu/assets/publications/brochures-booklets-and-factsheets/european-steel-in-figures-2022/European-Steel-in-Figures-2022-v2.pdf>
- European Steel Association [EUROFER]. (2023). *About the European steel industry* <https://www.eurofer.eu/>
- FAO & PNUD (2019). *Guía de análisis costo beneficio, Aplicación para medidas de adaptación al cambio climático en el sector agropecuario en Uruguay*. Montevideo. 163 pp.
- Feller Rate. (2021). *INFORME DE CLASIFICACIÓN CEMENTO POLPAICO S.A* <https://www.cmfchile.cl/documentos/pueag/crcr/recr/2021080347710.pdf>
- FLSmidth. (2023). *Product datasheet Green Hydrogen Burner Kiln* https://www.flsmidth.com/-/media/brochures/brochures-products/pyro/2023/green-hydrogen-burner-kiln_datasheet.pdf
- Freshfields Bruckhaus Deringer. (2023). *Carbon Capture – The Current State of Play in the European Union October 2023*. <https://www.freshfields.com/4a7ccb/contentassets/b15d96d12bcb480899c3a32fe53ed36c/freshfields---briefing---ccs-and-ccu-in-the-eu.pdf>
- Fundación Chile. (2023). *UNA OPORTUNIDAD ESTRATÉGICA PARA CHILE: HIDRÓGENO VERDE* https://fch.cl/iniciativa/hidrogeno-verde/?gad=1&gclid=Cj0KCQjw7JOpBhCfARIsAL3bobe1tI9yQy3FEEGErdTyFQvMrqlhaw4gesz4Tb8CDEJFIG62pdSKgJYaAhyDEALw_wcB
- Gast, L., Cabrera Serrenho, A., & Allwood, J. M. (2022). What contribution could industrial symbiosis make to mitigating industrial greenhouse gas (GHG) emissions in bulk material production? *Environmental Science & Technology*, 56(14), 10269–10278. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c01753>
- Gerbelová, H., van der Spek, M., & Schakel, W. (2017). Feasibility assessment of CO2 capture retrofitted to an existing cement plant: Post-combustion vs. Oxy-fuel combustion technology. *Energy Procedia*, 114, 6141–6149. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1751>
- Gerlach, D. (2018). *Rotary kiln = rotary kiln ?*. LinkedIn. <https://www.linkedin.com/pulse/rotary-kiln-dirk-gerlach>
- Gestiona Energía MiPyMEs. (2023). *Sistemas de Gestión de Energía*.

<https://mipymes.gestionaenergia.cl/sistemas-de-gestion-de-energia>

Gobierno de España. (2023). *Qué es la Inteligencia Artificial*.
<https://planderecuperacion.gob.es/noticias/que-es-inteligencia-artificial-ia-prtr>

González, N. (2019). *AHP: un método para fortalecer la toma de decisiones en SST*. PrevenBlog
<https://prevencontrol.com/prevenblog/ahp-un-metodo-para-fortalecer-la-toma-de-decisiones-en-sst/>

Grandviewresearch. (s.f). *Solar water heaters market size, share & trends analysis report, by technology (ETC, FPC, UWC), by application (residential, commercial, industrial), by system, by region, and segment forecasts, 2018 - 2025*.
<https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/solar-water-heaters-market>

Granieri, M. (2022). *¿Qué es el ecodiseño y por qué deberíamos aplicarlo?*. OBS Business School.
<https://www.obsbusiness.school/blog/que-es-el-ecodiseno-y-por-que-deberiamos-aplicarlo>

Green, J. F. (2021). Does carbon pricing reduce emissions? A review of ex-post analyses. *Environmental research letters*, 16(4), 043004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abdae9>

H2Chile. (s/f). *Regulación*.
<https://h2chile.cl/regulacion/>

Hall, W., Millner, R., Rothberger, J., and Singh, A., Shah, C.K. (2021). *Green Steel through Hydrogen Direct Reduction: A study on the role of hydrogen in the Indian iron and steel sector*. New Delhi: The Energy and Resources Institute (TERI).
<https://www.teriin.org/sites/default/files/2021-08/policybrief-green-steel.pdf>

Herrera. L. (2018). *Estimación de curvas de costo de abatimiento de CO2 a partir de la modificación del tipo de luminarias utilizadas en el sector vivienda de Colombia*. [Título profesional, Universidad de los Andes] Repositorio Académico de la Universidad de los Andes .
<https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/455c8c2e-4136-4b33-bd71-f2e80cc352fc/content#:~:text=La%20curva%20de%20abatimiento%20brinda,a%20tener%20un%20mayor%20impacto>

HIF Global. (2019). *Acerca de*.
<https://hifglobal.com/es/about-us/>

Hoffmann, C., Van Hoey, M., & Zeumer, B. (2020). *Decarbonization challenge for steel*. McKinsey & Company. <https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/decarbonization-challenge-for-steel>

- Iberdrola. (s.f) *Qué es el machine learning*. <https://www.iberdrola.com/innovacion/machine-learning-aprendizaje-automatico>
- IFEU. (s.f). *Life Cycle Assessment (LCA) and material flow analyses* <https://www.ifeu.de/en/methods-tools/life-cycle-assessment-and-material-flow-analyses/>
- International Energy Agency [IEA]. (2020). *Iron and Steel Technology Roadmap*. <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap>
- International Energy Agency [IEA]. (2022). *Share of cumulative power capacity by technology, 2010-2027*. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/share-of-cumulative-power-capacity-by-technology-2010-2027>
- International Energy Agency [IEA]. (2023). *Clean energy investment is extending its lead over fossil fuels, boosted by energy security strengths* <https://www.iea.org/news/clean-energy-investment-is-extending-its-lead-over-fossil-fuels-boosted-by-energy-security-strengths>
- International Energy Agency [IEA]. (2023). *Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach*. <https://www.iea.org/reports/net-zero-roadmap-a-global-pathway-to-keep-the-15-0c-goal-in-reach>
- International Institute for Water and Environmental Engineering. (s.f). *Material Flow Analysis (MFA)*. [https://sswm.info/sswm-university-course/module-4-sustainable-water-supply/further-resources-water-sources-software/material-flow-analysis-%28mfa%29#:~:text=Material%20Flow%20Analysis%20\(MFA\)%20is,during%20a%20defined%20period.](https://sswm.info/sswm-university-course/module-4-sustainable-water-supply/further-resources-water-sources-software/material-flow-analysis-%28mfa%29#:~:text=Material%20Flow%20Analysis%20(MFA)%20is,during%20a%20defined%20period.)
- International Monetary Fund. Fiscal Affairs Dept. (2023). Chile: Technical Assistance report – an evaluation of improved Green Tax Options. *IMF Staff Country Reports, 2023(035)*. <https://doi.org/10.5089/9798400229381.002.A001>
- Kagan, J. (2010). *What is a learning curve? Formula, calculation, and example*. Investopedia. <https://www.investopedia.com/terms/l/learning-curve.asp>
- Kenton, W. (2011). *Feed-in tariff (FIT): Explanation, history and uses*. Investopedia. <https://www.investopedia.com/terms/f/feed-in-tariff.asp>
- Konidari, Popi & Mavrakis, Dimitrios. (2007). A multi-criteria evaluation method for climate change mitigation policy instruments. *Energy Policy*. 35. 6235-6257. 10.1016/j.enpol.2007.07.007.
- Kornbakk, M. (2021). *Valuable flexibility may be lost due to new ecodesign regulation*. THEME.

<https://thema.no/en/rapporter/valuable-flexibility-may-be-lost-due-to-new-ecodesign-regulation/>

Ley No 21.305, Eficiencia Energética. Febrero 8, 2021, Diario Oficial [D.O]. Chile
<https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1155887>

Ley No 21.455, Ley Marco de Cambio Climático, Mayo 30, 2022, Diario Oficial [D.O]. Chile
<https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1177286>

Li, F., Chu, M., Tang, J., Liu, Z., Zhao, Z., Liu, P., & Yan, R. (2022). Quantifying the energy saving potential and environmental benefit of hydrogen-based steelmaking process: Status and future prospect. *Applied Thermal Engineering*, 211(118489), 118489.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118489>

Libertad y Desarrollo. (2005). *Protocolo de Kyoto: Una oportunidad para Chile*.
<https://archivos.lyd.org/lyd/biblioteca/pdf/7000077-1.pdf>

Liberty Steel Group. (s.f) *A Direct Reduced Iron (DRI) plant*
https://libertysteelgroup.com/delivering_cn30/a-direct-reduced-iron-dri-plant/

Lluís, A. & Martínez, A. (2022). *Manual Simbiosis Industrial Implementación de un programa de economía circular para un desarrollo económico sostenible en México*.
https://www.eeas.europa.eu/sites/default/files/documents/2023/Sintesis%20del%20Manual_Simbiosis_Industrial.pdf

Lord, R. (2017). *TalkingPoints Internal Carbon Pricing: Stress Testing Business for Climate Change Risk*. S&P Dow Jones Indices.
<https://www.spglobal.com/spdji/en/documents/education/talking-points-internal-carbon-pricing-stress-testing-for-climate-risk.pdf>

Luo, L., & Tang, Q. (2023). The real effects of ESG reporting and GRI standards on carbon mitigation: International evidence. *Business Strategy and the Environment*, 32(6), 2985–3000. <https://doi.org/10.1002/bse.3281>

Manrubia, Díaz & Mínguez Vallejos, Ramón. (2020). *Acreditación institucional en Chile bajo la Ley N° 20.129: Repercusión en la mejora de la calidad de las áreas de gestión institucional y docencia de pregrado de la Universidad Finis Terrae (2006 –2016)*
https://www.researchgate.net/publication/344782287_Acreditacion_institucional_en_Chile_bajo_la_Ley_N_20129_Repercusion_en_la_mejora_de_la_calidad_de_las_areas_de_gestion_institucional_y_docencia_de_pregrado_de_la_Universidad_Finis_Terrae_2006_-_2016

- MasScience. (2023). *La captura de CO2 ya es una realidad* <https://www.masscience.com/la-captura-de-co2-ya-es-una-realidad/>
- Material Economics. (2019). *Industrial Transformation 2050 - Pathways to Net-Zero Emissions from EU Heavy Industry*.
<https://materialeconomics.com/s/s/s.com/s/s.com///s/s/s.com/s/s.com/s/s/s.com/s/s.com/s/s.com/s/s.com/latest-updates/industrial-transformation-2050>
- McKinsey&Company. (2009). *Pathways to a Low-Carbon Economy Version 2 of the Global Greenhouse Gas Abatement Cost Curve*
https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/dotcom/client_service/sustainability/cost%20curve%20pdfs/pathways_lowcarbon_economy_version2.ashx
- Mengden, A. (2023). *Carbon Taxes in Europe*. Tax Foundation.
<https://taxfoundation.org/data/all/eu/carbon-taxes-in-europe-2023/>
- Microsoft. (2024). *Industrial AI Net-Zero Suite – Canvass AI*.
<https://azuremarketplace.microsoft.com/en/marketplace/apps/canvassanalyticsinc1617115082696.canvass-ai-net-zero-suite?tab=Overview>
- Ministerio de Ciencia, tecnología, conocimiento e innovación. (2021). *Política Nacional de Inteligencia Artificial*.
https://www.minciencia.gob.cl/uploads/filer_public/bc/38/bc389daf-4514-4306-867c-760ae7686e2c/documento_politica_ia_digital_.pdf
- Ministerio de Energía. (2017). *Plan de Mitigación de Gases de Efecto Invernadero para el sector energía*.
https://biblioteca.digital.gob.cl/bitstream/handle/123456789/3822/11_informe_resumen_carbono_neutralidad_2019_v07.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Ministerio de Energía. (2019). *Carbono Neutralidad en el sector energía Proyección de consumo energético nacional 2020*.
https://biblioteca.digital.gob.cl/bitstream/handle/123456789/3822/11_informe_resumen_carbono_neutralidad_2019_v07.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Ministerio de Energía. (2020). *Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde*.
https://energia.gob.cl/sites/default/files/estrategia_nacional_de_hidrogeno_verde_-_chile.pdf
- Ministerio de Energía. (2022). *Política Energética Nacional*.
https://www.chileagenda2030.gob.cl/iniciativas/1985/documento/pen_2050_-_actualizado_marzo_2022_0.pdf

Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca [MGAP]. (2023). *Informe de análisis costo-beneficio y potencial de mitigación de medidas de mitigación prioritizadas*.

<https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/comunicacion/publicaciones/informe-analisis-costo-beneficio-potencial-mitigacion-medidas-mitigacion>

Ministerio de Hacienda. (2020). *¿Cuáles son las metas comprometidas en las NDC de Chile? ¿cuándo proyectan la carbono neutralidad?* <https://www.hacienda.cl/areas-de-trabajo/finanzas-internacionales/oficina-de-la-deuda-publica/preguntas-frecuentes/bonos-verdes/-cuales-son-las-metas-comprometidas-en-las-ndc-de-chile-cuando-proyectan-la>

Ministerio de Industria, comercio y turismo España. (s.f). NIVELES DE MADUREZ DE LA TECNOLOGÍA TECHNOLOGY READINESS LEVELS.TRLS. UNA INTRODUCCIÓN <https://www.mincotur.gob.es/publicaciones/publicacionesperiodicas/economiaindustrial/revistaeconomiaindustrial/393/notas.pdf>

Ministerio del Medio Ambiente [MMA]. (2020). *Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC) de Chile*. https://cambioclimatico.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2020/08/NDC_2020_Espanol_PDF_web.pdf

Ministerio del Medio Ambiente [MMA]. (2021). *Estrategia Climática de Largo Plazo de Chile*. <https://cambioclimatico.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2021/11/ECLP-LIVIANO.pdf>

Ministerio del Medio Ambiente [MMA]. (2021). *Ministerio del Medio Ambiente publica listado de establecimientos potencialmente afectos al pago de impuesto verde año 2022* <https://retc.mma.gob.cl/ministerio-del-medio-ambiente-publica-listado-de-establecimientos-potencialmente-afectos-al-pago-de-impuesto-verde-ano-2022/>

Ministerio del Medio Ambiente [MMA]. (2021). *Roadmap for a circular Chile by 2040*. <https://economiacircular.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2022/01/HOJA-DE-RUTA-PARA-UN-CHILE-CIRCULAR-AL-2040-EN.pdf>

Ministerio del Medio Ambiente [MMA]. (2022). *Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero y otros contaminantes climáticos 1990-2020*. https://snichile.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2023/04/2022_IIN_CL.pdf

Ministerio del Medio Ambiente [MMA]. (s.f.). *Huella de Carbono* <https://mma.gob.cl/cambio-climatico/cc-02-7-huella-de-carbono/>

Ministerio del Medio Ambiente [MMA]. (s.f.). *Ley marco 20.920 para la gestión de residuos*. <https://economiacircular.mma.gob.cl/ley-rep/#:~:text=La%20Ley%2020.920%20tiene%20como,sus%20productos%20en%20el%2>

[Opa% C3% ADs.](#)

Ministerio del Medio Ambiente [MMA]. (s.f). *Vinculación con otros instrumentos.*

<https://cambioclimatico.mma.gob.cl/estrategia-climatica-de-largo-plazo-2050/vinculacion-con-otros-instrumentos/>

Muhlheim, M. D., Ramuhalli, P., Huning, A., Guler Yigitoglu, A., Saxena, A., & Wood, R. T. (s.f). *Regulatory requirements, guidance, and review of digital twins.* Osti.gov.

<https://www.osti.gov/servlets/purl/1901641>

Naciones Unidas. (s.f.). *Cambio Climático.*

<https://www.un.org/es/global-issues/climate-change>

Nantes, E. (2019). El método Analytic Hierarchy Process para la toma de decisiones. Repaso de la metodología y aplicaciones. *Revista De La Escuela De Perfeccionamiento En Investigación Operativa*, 27(46).

<https://revistas.unc.edu.ar/index.php/epio/article/view/26474>

Nhuchhen, D. R., Sit, S. P., & Layzell, D. B. (2022). Decarbonization of cement production in a hydrogen economy. *Applied Energy*, 317(119180), 119180.

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119180>

Nibusinessinfo. (s.f). *Ecodesign in product and service development.*

<https://www.nibusinessinfo.co.uk/content/advantages-and-disadvantages-ecodesign>

Nordic Energy Research Conference. (2022). *Legal Framework for CCS and CCU Regulatory barriers and opportunitites.*

https://www.nordicenergy.org/wordpress/wp-content/uploads/2023/01/Sigrid_Ombudstvedt_Nordic-Energy-Research-Bergen-12.12.22.pdf

O'Connor, P., Jacobs, M., Yang, V., & Cleetus, R. (2016). *What is the learning curve—and what does it mean for solar power and for electric vehicles?* The Equation.

<https://blog.ucsusa.org/peter-oconnor/what-is-the-learning-curve/>

OECD. (2022). *Pricing Greenhouse Gas Emissions: Key findings for carbon pricing in Chile*

<https://www.oecd.org/tax/tax-policy/carbon-pricing-chile.pdf>

O’Ryan, R. (2011). IN539 Economía Ambiental.

Observatorio de Carbono Neutralidad. (2023). *Presentación.*

<https://observatoriocarbononeutral.cl/#/>

- Oettl, F., Eckart, L., & Schilp, J. (2023). Cost estimation approach of a digital twin implementation in industry. *Procedia CIRP*, 118, 318–323. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.06.055>
- Olmos, R. (2023). *Estudio afirma que adopción de inteligencia artificial en empresas en Chile aumentó en tres años*. Diario Financiero. <https://www.df.cl/df-lab/transformacion-digital/estudio-afirma-que-adopcion-de-inteligencia-artificial-en-empresas-en>
- Ometto, A. R., Ramos, P. A. R., & Lombardi, G. (2007). The benefits of a Brazilian agro-industrial symbiosis system and the strategies to make it happen. *Journal of Cleaner Production*, 15(13–14), 1253–1258. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.07.021>
- Organización Internacional de Normalización. (2006). *ISO 14040:2006 Gestión ambiental - Evaluación del ciclo de vida - Principios y marco de referencia*.
- Ovalle, A. (2018). *Propuesta de modelo de simbiosis industrial en Chile: Aplicación al parque industrial de La Reina*. [Título profesional, Universidad de Chile] Repositorio Académico de la Universidad de Chile. [https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/168363/Propuesta-de-modelo-de-simbiosis-industrial-en-Chile-Aplicaci% c3% b3n-al-Parque-Industrial-de-la-Reina.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/168363/Propuesta-de-modelo-de-simbiosis-industrial-en-Chile-Aplicaci%c3%b3n-al-Parque-Industrial-de-la-Reina.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Parlamento Europeo [EUROPARL]. (2023). *Economía circular: definición, importancia y beneficios*. <https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/economy/20151201STO05603/economia-circular-definicion-importancia-y-beneficios>
- Parlamento Europeo [EUROPARL]. (2023). *EU AI Act: first regulation on artificial intelligence*. <https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/society/20230601STO93804/eu-ai-act-first-regulation-on-artificial-intelligence>
- Parry, I. W. H., Black, S., & Zhunussova, K. (2022). Carbon taxes or emissions trading systems?: Instrument choice and design. *Staff Climate Notes*, 2022(006). <https://doi.org/10.5089/9798400212307.066.A001>
- Planet A GmbH. (2022). *Lowering emissions in the cement industry*. <https://planet-a.com/wp-content/uploads/2022/12/lca-report-carbonre.pdf>
- Polonsky, P. (2019). *The case for state solar feed-in-tariffs (FiTs) in the USA*. US Environmental Policy. Nicholas School of Environment. <https://blogs.nicholas.duke.edu/env212/the-case-for-state-solar-feed-in-tariffs-fits-in-the-usa/>
- Poratelli, F. (2022). *Life Cycle Assessment: advantages and limitations of the methodology*.

- Cikis.Studio. <https://www.cikis.studio/en/article/life-cycle-assessment-advantages-and-limitations-of-the-methodology>
- Programa de Gestión y Economía Ambiental [PROGEA]. (2007). *Consumo de Energía y Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en Chile 2007-2030 y Opciones de Mitigación*.
- Reilly, J. (2023). *A cost breakdown of artificial intelligence in 2023*. Akkio. <https://www.akkio.com/post/a-cost-breakdown-of-artificial-intelligence-in-2023>
- REN21. (2020). *Renewables 2020 Global Status Report*. https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2020_full_report_en.pdf
- Riedel, F., Gorbach, G., & Kost, C. (2021). Barriers to internal carbon pricing in German companies. *Energy Policy*, 159(112654), 112654. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112654>
- Riquelme, S. (2020). *Chile pionero en la aplicación de tecnologías de “Gemelo Digital” en minería*. *Guía Minera de Chile*. Guía minera. <https://www.guiaminera.cl/chile-pionero-en-la-aplicacion-de-tecnologias-de-gemelo-digital-en-mineria/>
- Roser, M. (s.f). Learning curves: *What does it mean for a technology to follow Wright’s Law?* Our World in Data. <https://ourworldindata.org/learning-curve>
- Rotar, A., Soilihi, A., & Plotka, M. B. (2023). *The state of EU and UK hydrogen regulations*. Morganlewis. <https://www.morganlewis.com/pubs/2023/06/the-state-of-eu-and-uk-hydrogen-regulations>
- Salvatierra, R. (2019). *Economía circular: Desafíos del modelo en Chile*. [Tesis de Magister, Universidad del Desarrollo] Repositorio Académico de la Universidad del Desarrollo. <https://repositorio.udd.cl/server/api/core/bitstreams/e4558a9c-ea25-404e-a58e-87f4ae6cf0ba/content>
- SAP Concur Team. (2021). *8 beneficios de la Industria 4.0*. Concur. <https://www.concur.cl/blog/article/beneficios-industria-4.0>
- Setac. (s.f). *Roadmap item: Supporting decision makers with life cycle assessment (LCA)*. Setac.org. <https://www.setac.org/static/0063bad9-46c4-4399-b3eb0f7a88bd3f03/LCA-Roadmap-Supporting-Decision-Makers.pdf>
- SGSCorp. (s.f). *Análisis del ciclo de vida*. <https://www.sgs.com/es-cl/services/analisis-del-ciclo-de-vida>
- Simms, D. (2023). *Solar panel efficiency over time (plus tips to improve it)*. EcoWatch.

<https://www.ecowatch.com/solar/solar-panel-efficiency-over-time>

Spoor, M.(2023). *Oxyfuel combustion ignites a pathway to zero emissions*. Chemical Processing. <https://www.chemicalprocessing.com/voices/energy-saver/article/33008227/oxyfuel-combustion-ignites-a-pathway-to-zero-emissions>

Statista. (2023). *Average share of clinker in cement mixes in the European Union (EU) from 2012 to 2020* <https://www.statista.com/statistics/1399491/clinker-to-cement-ratio-in-the-eu/>

Statista. (2023). *Tipo de cambio: media anual EUR/USD 1999-2022*. <https://es.statista.com/estadisticas/606660/media-anual-de-la-tasa-de-cambio-de-euro-a-dolar-estadounidense/>

The CEO Water Mandate. (s.f). *Life Cycle Assessment* <https://ceowatermandate.org/accounting/accounting-basics/origins/life-cycle-assessment/#:~:text=These%20external%20organizations%20typically%20charge,a%20comprehensive%20set%20of%20indicators.>

The World Bank. (s.f.). *What is Carbon Pricing?*. <https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/what-carbon-pricing#:~:text=Carbon%20pricing%20is%20an%20instrument,to%20their%20sources%20through%20a>

Titan. (2022). *TITAN Cement Group: H2CEM project is included in the “Hy2Use” Important Project of Common European Interest*. https://www.titan-cement.com/wp-content/uploads/2022/09/26_09_2022_TITAN_Groups_H2CEM_project_is_included_in_the_Hy2Use_EN.pdf

Trinks, A., Mulder, M., & Scholtens, B. (2022). External carbon costs and internal carbon pricing. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 168(112780), 112780. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112780>

Varela-Ruiz, M., Díaz-Bravo, L., & García-Durán, R. (2012). Descripción y usos del método Delphi en investigaciones del área de la salud. *Investigación en educación médica*, 1(2), 90–95. <https://www.elsevier.es/es-revista-investigacion-educacion-medica-343-articulo-descripcion-usos-del-metodo-delphi-X2007505712427047>

Wagner, U. J., Rehdanz, K., & Petrick, S. (2014). The impact of carbon trading on industry: Evidence from German manufacturing firms. *SSRN Electronic Journal*.

<https://doi.org/10.2139/ssrn.2389800>

Wich-Konrad, T. (2021). *Strategien zur Minderung der Treibhausgasemissionen Systemische Analyse am Beispiel der Stahl- und Chemieindustrie.*

World Bank. (2016). *Emissions Trading in Practice: A Handbook on Design and Implementation.* <http://hdl.handle.net/10986/23874>

World Bank. (2023). *State and Trends of Carbon Pricing 2023.* <http://hdl.handle.net/10986/39796>

World Economic Forum. (s.f). *Digital for Climate Scenarios* . <https://initiatives.weforum.org/digital-transformation/climate-scenarios>

World Steel Association. (2022). *Hydrogen (H₂)-based ironmaking.* <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Fact-sheet-Hydrogen-H2-based-ironmaking.pdf>

Yadav, S., & Mondal, S. S. (2022). A review on the progress and prospects of oxy-fuel carbon capture and sequestration (CCS) technology. *Fuel (London, England)*, 308(122057), 122057. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122057>

Your Europe. (2023). *Requisitos de diseño ecológico.* https://europa.eu/youreurope/business/product-requirements/compliance/ecodesign/index_es.htm

Yunis C. (2017). *Secuencia óptima de medidas de mitigación de Gases de Efecto Invernadero para el sector residencial de Chile.* [Título profesional, Universidad de Chile] Repositorio Académico de la Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/148364/Secuenciacion-optima-de-medidas-de-mitigacion-de-gases-de-efecto-invernadero-para-el-sector-residencial-de-Chile.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Zhao, Q., Li, J., Fediuk, R., Klyuev, S., & Nemova, D. (2021). Benefit evaluation model of prefabricated buildings in seasonally frozen regions. *Energies*, 14(21), 7119. <https://doi.org/10.3390/en14217119>

Zhou, Y., & Searle, S. (2022). *Cost of renewable hydrogen produced onsite at hydrogen refueling stations in Europe.* Theicct.org. <https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/02/fuels-eu-cost-renew-H-produced-onsite-H-refueling-stations-europe-feb22.pdf>

Anexos.

Anexo A: Obtención de mitigación y costos anualizados de medidas.

A.1 Ecodiseño.

En base a lo informado por la UE, la reducción para 2030 esperada para esta medida es de 30 M. Ton. de CO₂ equivalente (European Commission Directorate-General for Energy, 2022).

Por otra parte, para el cálculo del costo anualizado, se consideró la vida útil de los productos ecodiseñados indicada por el documento de referencia, además del costo de adquisición asociado a cada uno de estos productos según se muestra en la tabla A-1. A partir de lo anterior se calcula el costo anualizado de cada uno de los productos como la división entre el costo de adquisición y los años de vida útil y posteriormente el costo anualizado total de la medida como la suma de los costos de cada producto. Sabiendo que la reducción total de la medida corresponde a la suma de los potenciales de reducción de cada producto, se procede a calcular el costo de abatimiento referencial como la división entre el costo anualizado y la reducción total. A partir de lo anterior se obtiene un costo de abatimiento de 540,07 €/Ton. CO₂ eq.

Producto	Vida útil (años)	Costo de adquisición total (Billones de Euros)	Costo anualizado (Billones de Euros)	Potencial de reducción en M. Ton. CO ₂ eq.
Motores eléctricos	13,00	6,90	0,53	4,00
Neumáticos	4,00	58,00	14,50	8,00
Transformadores	33,00	7,10	0,22	0,10
Ventiladores	15,00	4,80	0,32	0,50
Bombas	10,00	5,90	0,59	2,40
Artículos de soldadura	13,00	0,60	0,05	15,00
		Total	16,20	30,00
		Costo de abatimiento (Euro/Ton. CO₂ eq.)	540,07	

Tabla A-1: Vida útil, costos y reducciones de productos ecodiseñados para la industria

A.2 Simbiosis industrial.

El documento estudiado indica que la reducción de CO₂ a partir de la simbiosis industrial para la industria global del aluminio, papel, acero y cemento es del 18%, considerando estrategias de reutilización y reciclaje, así como procesos de intercambio de calor a través de ciclo Rankine y generación eléctrica (Gast et al., 2023).

Considerando las emisiones indicadas por la European Environment Agency (2023), para el 2021 en la UE se obtuvo que:

- Las emisiones asociadas a la producción de aluminio fueron de 4,49 M. Ton. y 1,17 M. Ton. de CO₂ equivalente para aluminio primario y secundario respectivamente.
- Las emisiones asociadas a la producción de papel fueron de 19 M. Ton de CO₂ equivalente.
- Las emisiones asociadas a la producción de cemento fueron 110 M. Ton de CO₂ equivalente.
- Las emisiones asociadas a la producción de acero y hierro fueron de 113,11 M. de Ton. de CO₂ equivalente.

En total, las emisiones a abatir en una hipotética simbiosis industrial de las 4 industrias mencionadas serían de 247,77 MT de CO₂ equivalente. Aplicando el 7% a este total se obtiene que la reducción sería de 44,6 MT.

Debido a que el documento de referencia no indica un costo asociado a la implementación de simbiosis industrial en los distintos sectores, se utilizaron referencias de costos asociados a estrategias circulares para estimar el costo anualizado del proyecto. La información asociada a los costos de la simbiosis industrial es escasa, pero un estudio realizado por Material Economics (2019) indica que para 2050, el costo de abatimiento asociado a la aplicación de estrategias circulares para la industria estará entre 75-91 €/Ton. CO₂ eq.

A.3 Hidrógeno verde para acero Direct Reduced Iron (DRI)

La alternativa de mitigación a considerar en este trabajo considera la utilización de hidrógeno verde para la producción de DRI. En el documento estudiado se indica que la reducción total de emisiones de CO₂ equivalente en base a la utilización de esta medida para el año 2030 en la industria europea sería de 66 M. de Toneladas (Agora Energiewende, 2020). A su vez, en el mismo documento se indica un costo de abatimiento de 100 €/Ton. CO₂ eq.

A.4 Hidrógeno verde para industria del cemento.

El proyecto en el cual se basa esta alternativa indica que la reducción de CO₂ equivalente por tonelada de cemento al utilizar hidrógeno verde como combustible es del 8%. Sabiendo que la UE produjo 110 MT de toneladas de CO₂ en 2021 asociada a la producción de 183 MT de cemento (European Environment Agency, 2023), la reducción sería del 8,8 MT.

En el ámbito económico, el proyecto según lo indicado posee una inversión de \$60.000.000 USD. Para calcular el costo anualizado se divide el monto de la inversión en la vida útil estimada para el proyecto, que en este caso corresponde a cerca de 30 años en base a la tecnología utilizada para la combustión (Gerlach, 2018). A su vez, también se considera el costo operacional, que para proyectos con hidrógeno es cercano al 4% de la inversión (Zhou et al., 2022). Conociendo el potencial de reducción de la medida en base a lo indicado por la empresa (160.000 toneladas de CO₂ equivalente (Titan, 2022)), es posible calcular el costo de abatimiento como la división entre el costo anualizado y la reducción estimada. A partir de lo anterior se llegó a un costo de abatimiento 26,19 €/Ton. CO₂ eq.

A.5 AI Energy Management para la industria del acero.

La información indica que a través de esta medida se logran reducciones entre 5-10% en la industria del acero, por lo que tomando el caso más conservador de reducciones del 5%, y considerando que UE emitió 113,11 M. Ton. de CO₂ a partir de la producción de acero y hierro en 2021 (European Environment Agency, 2023), lo anterior se traduce reducciones desde 5,65 M. de toneladas de CO₂ equivalente para la industria europea.

El proyecto de referencia utilizado para la medida no indica costos anuales ni de inversión asociado. A pesar de lo anterior, otras fuentes indican que el costo asociado a la implementación de un software de AI posee un costo anualizado de 30.000 USD (Microsoft, 2024). Conociendo el potencial de reducción según la mitigación indicada por la empresa (230.000 Ton. de CO₂ por planta (BCG, 2021)), es posible calcular el costo de abatimiento como la división entre el costo anualizado y la reducción estimada. A partir de lo anterior se obtuvo un costo de abatimiento 0,12 €/Ton. CO₂ eq.

A.6 Digital Twin para industria del cemento.

El proyecto indica que en su planta piloto se han logrado reducciones de 30.4 kg CO₂-eq. /Ton. clinker (Planet A GmbH, 2022). Considerando un promedio de 78,1% de clinker en el cemento producido en la UE (Statista, 2023) una producción de 183 MT de cemento en 2022 (Cembureau, 2023), se logra una reducción de 4,34 M. Ton. CO₂ para la industria del cemento en Europa.

El proyecto de referencia utilizado para la medida no indica costos anuales ni de inversión asociado. A pesar de lo anterior, otras fuentes e investigaciones indican que el costo asociado a la implementación de un modelo de Digital Twin en la industria posee un costo anualizado de 200.000

€ (Oetl et al., 2023). Conociendo la reducción total que se puede lograr a partir de esta medida en la industria europea y sabiendo que esto requeriría la aplicación del proyecto en varias empresas, se multiplicó el costo anualizado estimado del proyecto por la cantidad de empresas en las que se debería aplicar el proyecto, la cual es cercana a 226 (Ecofys, 2009), con lo cual se obtiene un costo anualizado asociado a la implementación de la medida de 45.200.000,00 €. Finalmente, se calcula el costo de abatimiento como la división entre el costo anualizado y la reducción estimada. A partir de lo anterior se obtuvo un costo de abatimiento 10,41 €/Ton. CO₂ eq.

A.7 Oxyfuel CCS para industria del cemento.

La medida a considerar en este estudio corresponde a la implementación del método de combustión Oxyfuel junto con la captura y almacenamiento del carbono proveniente de este proceso en toda la industria cementera (Agora Energiewende, 2020). En el documento estudiado se indica que la reducción total de emisiones de CO₂ equivalente en base a la utilización de esta medida para el año 2030 sería de 9 M. de Toneladas. A su vez, en el mismo documento se indica un costo de abatimiento anual de 70 €/Ton. CO₂ eq.

A.8 CCU para la producción de acero y metanol.

Para el cálculo de las reducciones, en el documento de referencia se indica que la reducción asociada a la utilización de CCU es de 1,11 M. de Toneladas por cada tonelada de acero producida. Considerando que la UE produjo 152,6 MT de acero en 2021 (EUROFER, 2022), la reducción asociada es de 169,386 M. de toneladas de CO₂ equivalente para toda la industria Europea.

En el documento de referencia utilizado para la medida de mitigación no se indican costos asociados a la implementación del proyecto en específico, sin embargo, se ha identificado para proyectos de CCU en hornos de acero un costo de abatimiento de 230 €/Ton. CO₂ eq. (Agora Energiewende, 2020).

Anexo B: Herramientas para el apoyo de decisiones.

B.1 Curvas de abatimiento

Las curvas de abatimiento de CO₂ corresponden a gráficos que brindan información que ayuda a elección entre distintas alternativas de mitigación. Estas permiten cuantificar el beneficio y efectividad de cada una de estas alternativas a la hora de reducir las emisiones de CO₂, relacionando el costo que tendría por tonelada de CO₂ mitigado y el potencial anual de reducción (Herrera, 2018). Esta herramienta es ampliamente utilizada para la selección de medidas, siendo utilizada en distintos estudios chilenos e incluso en la NDC.

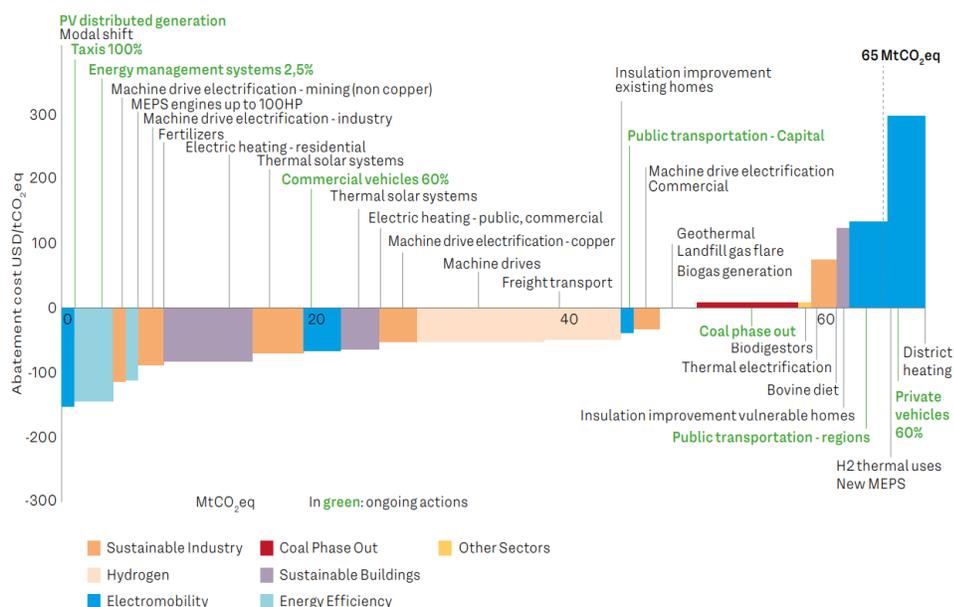


Figura B-1: Curva de abatimiento NDC Chile versión 2020 (MMA, 2020).

B.2 Nivel de Madurez Tecnológica (TRL)

El Technology Readiness Levels o TRL por sus siglas, es una metodología a través de la cual se mide el grado de madurez de una tecnología (Ministerio de Industria, comercio y turismo España, s.f). Esta metodología surge en la NASA, pero en la actualidad es utilizada para más proyectos y tecnologías que las aeronáuticas o espaciales. Se consideran 9 niveles que se extienden desde los principios básicos de la nueva tecnología hasta llegar a sus pruebas con éxito en un entorno real y los cuales corresponden a los que se ven en la imagen a continuación:

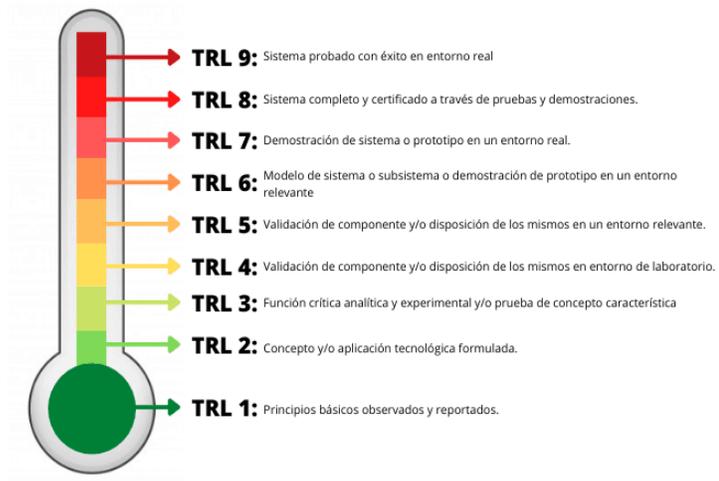


Figura B-2: Escala TRL (Compra Pública de Innovación-Aragón, 2022)

Anexo C: Evolución de PV a través de los años

En las siguientes gráficas, se muestra la evolución de la eficiencia y costos de los paneles fotovoltaicos a través de los años:

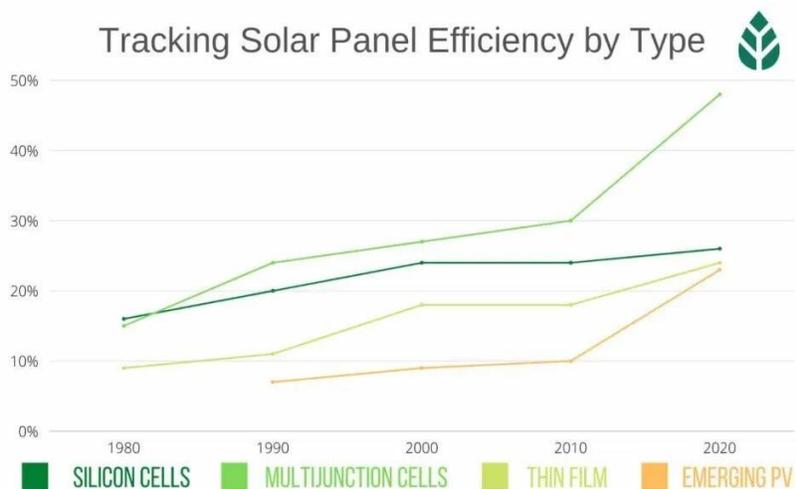


Figura C-1: Evolución de eficiencia de diferentes tipos de paneles solares (Simms, 2023)

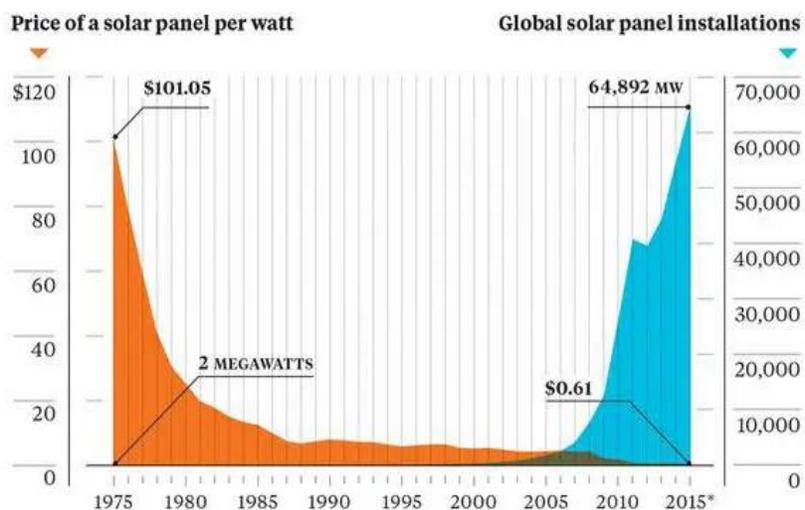


Figura C-2: Evolución de costos e instalaciones de paneles solares (O'Connor, et al., 2023)

Los factores anteriormente mencionados fueron claves en la potenciación de la tecnología fotovoltaica, que, como se indicó previamente, hace 15 años no era considerada una medida clave, y hoy en día abarca más del 12% de la matriz energética mundial, y se proyecta que para 2030 superen a la capacidad instalada de carbón tal como se aprecia en la siguiente gráfica (IEA, 2022):

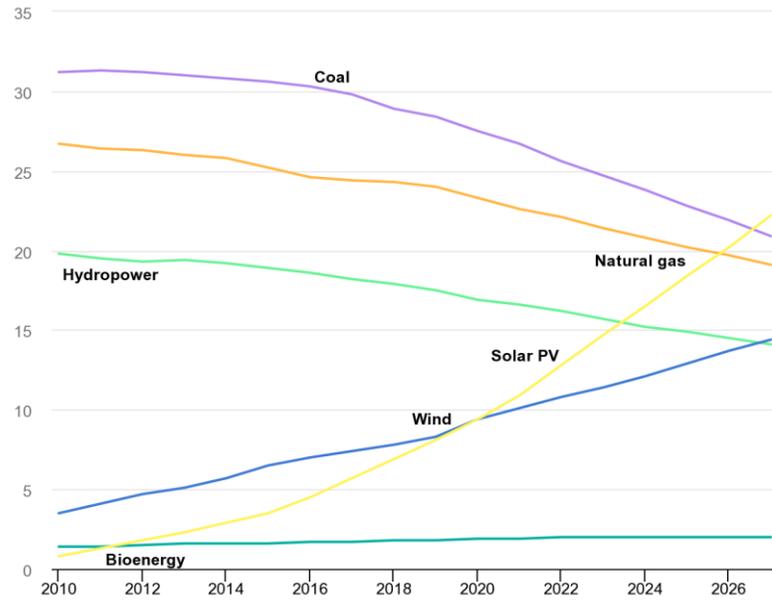


Figura C-3: Evolución y proyección de porcentaje de participación de fuentes energéticas en matriz energética mundial (IEA, 2022)

Anexo D: Matrices AHP

En la siguiente sección se detallan los antecedentes y justificación de la nota asignada para cada sub-criterio, junto con las matrices de decisión obtenidas.

D.1 Reducción de GEI

La matriz de decisión obtenida proviene de los órdenes de preferencia especificados en la tabla 5-1. A partir de estos órdenes es que posteriormente se realiza la comparación según la escala de Saaty.

Reducción de GEI								
	Ecodiseño	Simbiosis	Hidrógeno en acero	Hidrógeno en cemento	CCS para cemento	CCS para acero y metanol	ML y AI para cemento	AI management en acero
Ecodiseño	1	1/2	1/3	3	2	1/4	5	4
Simbiosis	2	1	1/2	4	3	1/3	6	5
Hidrógeno en acero	3	2	1	5	4	1/2	7	6
Hidrógeno en cemento	1/3	1/4	1/5	1	1/2	1/6	3	2
CCS para cemento	1/2	1/3	1/4	2	1	1/5	4	3
CCU para acero y metanol	4	3	2	6	5	1	8	7
Digital Twin para cemento	1/5	1/6	1/7	1/3	1/4	1/8	1	1/2
AI management en acero	1/4	1/5	1/6	1/2	1/3	1/7	2	1

Tabla D-1: Matriz de evaluación para reducción de GEI

D.2 Efectos ambientales indirectos

Ecodiseño: Desempeño medio-alto (4)

Los principales efectos ambientales indirectos asociados a la aplicación y utilización del ecodiseño

en la industria corresponden a los siguientes: la reducción de consumo energético (debido a su eficiencia energética), fomento de reciclaje en la producción, mayor utilización de partes y piezas después del fin de ciclo de vida, y una mayor vida útil de los productos (Nibusinessinfo, s.f). Es por lo anterior, que se evalúa con un desempeño medio-alto.

Simbiosis industrial: Desempeño alto (5)

La simbiosis industrial corresponde a una de las alternativas más amplias dentro de las propuestas, ya que la unión de dos o más empresas indica cambios en los procesos productivos, dentro de los que se encuentra la reutilización de residuos, disminución de consumo de agua, disminución de consumo eléctrico, disminución de energía térmica requerida, entre otros. Es por lo anterior, que se evalúa a esta alternativa con un desempeño alto en este criterio.

Hidrógeno para acero DRI: Desempeño medio (3)

En base a la revisión realizada, se determinó que el principal beneficio ambiental indirecto al utilizar esta alternativa corresponde a la disminución del consumo eléctrico (Li et al., 2022). Por lo anterior, y considerando que la alternativa no conlleva desventajas ambientales indirectas, se le evalúa con un desempeño medio.

Hidrógeno para cemento: Desempeño medio-bajo (2)

La revisión bibliográfica realizada arrojó que, si bien tiene beneficios ambientales, esta alternativa trae consigo más desventajas indirectas, como lo son el aumento de consumo térmico y eléctrico comparado con la forma tradicional de producción de cemento (Nhuchhen et al., 2022). A pesar del aumento de consumo eléctrico que implica su utilización, se debe considerar que la tendencia de emisiones asociadas a la generación eléctrica en Chile va a la baja, buscando tener 100% energías cero emisiones al 2050 y 80% energías renovables al 2030 (Ministerio de Energía, 2022). Es en base a lo anterior que se evalúa con un desempeño medio-bajo.

Digital Twin en industria del cemento: Desempeño medio (3)

En base a la revisión realizada, se determinó que el principal beneficio ambiental indirecto al utilizar esta alternativa corresponde a la disminución del consumo eléctrico y optimización de procesos, lo cual conlleva a menor generación de residuos. (Planet A GmbH, 2022). Considerando lo anterior, se le evalúa con un desempeño medio.

AI Management: Desempeño medio (3)

Al igual que en la alternativa de digitalización de Digital Twin, se determinó que el principal beneficio ambiental indirecto al utilizar esta alternativa corresponde a la disminución del consumo eléctrico y optimización de procesos (asociada a menor generación de residuos) (BCG, 2021). Por

lo anterior, se le evalúa con un desempeño medio.

Oxyfuel CCS cemento: Desempeño medio (3)

Para esta alternativa, se determinó que la principal ventaja asociada a la producción mediante Oxyfuel corresponde a la menor utilización de combustible (Speer, 2023). A pesar de que la incorporación de sistemas de captura de carbono aumenta el consumo eléctrico del sistema de manera no despreciable (Yadav y Mondal, 2022), la tendencia de emisiones asociadas a la generación eléctrica en Chile hacia el futuro hace que el aumento de este consumo no represente una gran desventaja ambiental, por lo que se le evalúa con un desempeño medio.

CCU acero: Desempeño medio (3)

En base a lo indicado por el proyecto de referencia, la producción de acero y metanol mediante esta alternativa utiliza una menor cantidad de combustible (Wich-Konrad, 2021). Al igual que en la alternativa anterior, el consumo de energía eléctrica aumenta (Yadav y Mondal, 2022), pero debido a la tendencia de emisiones asociada a la generación eléctrica en Chile, es que se decide evaluar con un desempeño medio.

Efectos ambientales indirectos								
	Ecodiseño	Simbiosis	Hidrógeno en acero	Hidrógeno en cemento	CCS para cemento	CCS para acero y metanol	ML y AI para cemento	AI management en acero
Ecodiseño	1	1/3	3	5	3	3	3	3
Simbiosis	3	1	5	7	5	5	5	5
Hidrógeno en acero	1/3	1/5	1	3	1	1	1	1
Hidrógeno en cemento	1/5	1/7	1/3	1	1/3	1/3	1/3	1/3
CCS para cemento	1/3	1/5	1	3	1	1	1	1
CCU para acero y metanol	1/3	1/5	1	3	1	1	1	1
Digital Twin para cemento	1/3	1/5	1	3	1	1	1	1
AI management en acero	1/3	1/5	1	3	1	1	1	1

Tabla D-2: Matriz de evaluación para efectos ambientales indirectos

D.3 Costo-eficacia

La matriz de decisión obtenida proviene de los órdenes de preferencia especificados en la tabla 5-2. A partir de estos órdenes es que posteriormente se realiza la comparación según la escala de Saaty.

Costo-eficacia								
	Ecodiseño	Simbiosis	Hidrógeno en acero	Hidrógeno en cemento	CCS para cemento	CCS para acero y metanol	ML y AI para cemento	AI management en acero
Ecodiseño	1	1/4	1/3	1/6	1/5	1/2	1/7	1/8
Simbiosis	4	1	2	1/3	1/2	3	1/4	1/5
Hidrógeno en acero	3	1/2	1	1/4	1/3	2	1/5	1/6
Hidrógeno en cemento	6	3	4	1	2	5	1/2	1/3
CCS para cemento	5	2	3	1/2	1	4	1/3	1/4
CCU para acero y metanol	2	1/3	1/2	1/5	1/4	1	1/6	1/7
Digital Twin para cemento	7	4	5	2	3	6	1	1/2
AI management en acero	8	5	6	3	4	7	2	1

Tabla D-3: Matriz de evaluación para costo-eficacia

D.4 Costo-eficacia dinámico:

Ecodiseño: Desempeño medio-alto (4)

Las principales medidas de mitigación impulsadas por la aplicación de ecodiseño corresponden a la implementación de diagnósticos tipo LCA para las fases de diseño de productos, y la impulsión de otras medidas asociadas a la economía circular, como lo son el reciclaje y la reutilización. Es por lo anterior, que se evalúa con un desempeño medio-alto.

Simbiosis industrial: Desempeño alto (5)

Al igual que en la alternativa anterior, la simbiosis industrial potencia especialmente a las medidas asociadas a la economía circular, pero de manera más amplia, ya que la simbiosis considera una mayor cantidad de procesos donde pueden ser aplicadas. A su vez, ésta potencia la utilización de tecnologías de recuperación de calor que permiten disminuir aún más las emisiones. Es por lo anterior, que se le evalúa con un desempeño alto.

Hidrógeno para acero DRI: Desempeño medio (3)

En base a la revisión realizada, se determinó que las principales alternativas potenciadas a través de la utilización de hidrógeno para DRI son las desarrolladas de otras alternativas de mitigación asociadas al hidrógeno (como lo puede ser hidrógeno para usos térmicos) y fomento del uso de mejores tecnologías para la producción de acero, como electric arc furnace (Agora Energiewende, 2020). Por lo anterior, se le evalúa con un desempeño medio.

Hidrógeno para cemento: Desempeño medio (3)

Al igual que en la alternativa anterior, la utilización de hidrógeno para la industria del cemento logra potenciar otras alternativas de mitigación asociadas al hidrógeno. Al mismo tiempo, esta medida en particular impulsa el uso de sistemas de captura de carbono en la producción de cemento, debido a que la combinación de estas alternativas logra reducir las emisiones considerablemente. Por lo anterior, se le evalúa con un desempeño medio.

Digital Twin en industria del cemento: Desempeño medio-alto (4)

La implementación de Digital Twin en la industria trae consigo la potenciación de medidas de la llamada industria 4.0, como lo son, por ejemplo, la digitalización de la información, el almacenamiento en la nube, la automatización de procesos, entre otras. Debido a la gran cantidad de alternativas de mitigación existentes en la industria 4.0, se evalúa a esta medida con un desempeño medio-alto en este subcriterio.

AI Management: Desempeño medio-alto (4)

Al igual que en la alternativa de Digital Twin, la implementación de esta medida potencia naturalmente las medidas asociadas a la industria 4.0 y digitalización. Es por esto, que el desempeño en este subcriterio es medio-alto.

Oxyfuel CCS cemento: Desempeño medio (3)

Las principales medidas impulsadas mediante la utilización de Oxyfuel CCS corresponden a la utilización de combustibles alternativos en el proceso de producción de cemento para disminuir

aún más las emisiones (como por ejemplo biomasa), y la potenciación de procesos de captura de carbono en industria en general (Agora Energiewende, 2020). Por lo anterior, se le evalúa con un desempeño medio.

CCU acero: Desempeño medio (3)

Al igual que en la medida anterior, las principales alternativas de mitigación impulsadas por el CCU corresponden a la utilización de combustibles alternativos en los procesos productivos (como por ejemplo hidrógeno) (Wich-Konrad, 2021), y la potenciación de procesos de captura de carbono en industria en general. Por lo anterior, se le evalúa con un desempeño medio.

Costo eficacia dinámico								
	Ecodiseño	Simbiosis	Hidrógeno en acero	Hidrógeno en cemento	CCS para cemento	CCS para acero y metanol	ML y AI para cemento	AI management en acero
Ecodiseño	1	1/3	3	3	3	3	1	1
Simbiosis	3	1	5	5	5	5	3	3
Hidrógeno en acero	1/3	1/5	1	1	1	1	1/3	1/3
Hidrógeno en cemento	1/3	1/5	1	1	1	1	1/3	1/3
CCS para cemento	1/3	1/5	1	1	1	1	1/3	1/3
CCU para acero y metanol	1/3	1/5	1	1	1	1	1/3	1/3
Digital Twin para cemento	1	1/3	3	3	3	3	1	1
AI management en acero	1	1/3	3	3	3	3	1	1

Tabla D-4: Matriz de evaluación para costo-eficacia dinámico

D.5 Flexibilidad

Ecodiseño: Desempeño medio (3)

Actualmente, el ecodiseño no se encuentra completamente regulado en Chile. Sin embargo, se espera que la ley REP sea uno de los principales instrumentos impulsores de esta medida, incentivando la mayor regularización de esta técnica, como en el caso de la UE donde los productos ecodiseñados poseen requisitos mínimos, existe una directiva de ecodiseño, y son certificados mediante el ecoetiquetado (Your Europe, 2023). Las regulaciones de ecodiseño en Europa suelen

ser bastante estrictas, por lo que de adoptar un enfoque similar, la flexibilidad de este instrumento no sería alta (Kornbakk, 2021). Por lo anterior se le evalúa en este aspecto con un desempeño medio.

Simbiosis industrial: Desempeño medio-alto (4)

La medida de simbiosis industrial actualmente no se encuentra regulada por leyes chilenas y solamente se encuentra referenciada como una medida a seguir en la hoja de ruta de economía circular, sin tener algún plan de acción definido. Observando casos internacionales, en Europa esta medida es fomentada a través de manuales de simbiosis industrial (Lluís y Martínez, 2022), pero no existe regulación específica asociada. Aun así, han surgido propuestas para la regulación flexible de esta medida (Boix et al., 2023), con el fin de incentivar el desarrollo de esta. Por lo anterior, se le evalúa con un desempeño medio-alto, ya que hoy en día existe bastante flexibilidad en su implementación.

Hidrógeno para acero DRI: Desempeño medio (3)

Actualmente en Chile, la ley de eficiencia energética declara al hidrógeno como combustible, lo cual permite que el ministerio de Energía regule su uso (Chile, 2021). A su vez, el plan de acción de hidrógeno verde 2023-2030 indica que se buscará regular la producción y el uso de este mismo. Además, considerando la prospección de Chile durante los últimos años hacia una economía donde el hidrógeno verde es un pilar fundamental, se espera una mayor cantidad de regulaciones poco flexibles como las existentes en Europa (Collins y Klevstrand, 2023). Así, se generarían organismos que guíen y faciliten la implementación y utilización de hidrógeno en distintos sectores, como el European Hydrogen Bank o la European Clean Hydrogen Alliance (Rotar, et al., 2023). Considerando la prospección hacia regulaciones más estrictas como las nombradas anteriormente, y que en Chile actualmente el reglamento de almacenamiento de sustancias peligrosas aplica sobre el hidrógeno (H2Chile, s.f), la flexibilidad de esta medida se evalúa con desempeño medio.

Hidrógeno para cemento: Desempeño medio (3)

Al igual que en la alternativa previa, Chile ya posee regulación con respecto a esta alternativa, y se encuentra encaminado hacia una legislación más estricta como la de Europa, con leyes y organismos que regulen la aplicación e implementación de este tipo de medidas. Debido a esto, se evalúa con desempeño medio.

Digital Twin en industria del cemento: Desempeño medio-alto (4)

Si bien Chile no hay actualmente leyes que regulen IA y medidas asociadas a la digitalización, si existen esfuerzos en relación con la regulación y transformación digital del país. En primer lugar se encuentra la estrategia de transformación digital del Estado, la cual busca establecer la agenda y principios para la modernización digital del mismo (Ministerio Secretaria General de la

Presidencia, 2019). Por otra parte se encuentra la política de inteligencia artificial emitida en 2021, donde se menciona el desarrollo y adopción de tecnologías asociadas a IA, pero no se hace referencia en particular a la adopción de Digital Twin (Ministerio de Ciencia, tecnología, conocimiento e innovación, 2021). En el panorama internacional, también ha surgido un aumento de la regulación con respecto a medidas de digitalización, como en EE. UU., donde el departamento de Energía ya ha implementado una serie de regulaciones asociadas a Digital Twins en específico (Muhlheim et al., s.f) y en Europa, donde se han definido estándares para la aplicación de estos sistemas (European big data value forum, 2022). Es en base a lo anterior la prospección con respecto a la flexibilidad de esta alternativa aún es elevada, ya que, si bien existen esfuerzos, aun en Chile se ve lejana una regulación específica y estricta para esta medida en particular. Por ende, se le evalúa con un desempeño medio-alto.

AI Management: Desempeño medio (3)

Para esta alternativa, a diferencia de Digital Twin, aplica directamente la política de inteligencia artificial chilena (Ministerio de Ciencia, tecnología, conocimiento e innovación, 2021). A su vez, en el panorama internacional existe una prospección hacia la regulación estricta de esta tecnología, además de ya encontrarse regulada en Europa desde 2023 a partir de la primera ley de Inteligencia Artificial (EUROPARL, 2023). Esta última considera que en el futuro se debiese entregar mayor flexibilidad a la implementación de sistemas de IA para obtener mejores resultados (Engler, 2023). A pesar de lo anterior, la flexibilidad de esta medida proyecta ser baja, considerando la prospección hacia regulaciones aún más estrictas y detalladas en torno a este tema (De, 2022). Por lo anterior, se evalúa con un desempeño medio.

Oxyfuel CCS cemento: Desempeño medio (3)

En Chile actualmente no existen leyes que regulen los sistemas de captura de carbono, mientras que en Europa existe regulación asociada a los CCS y CCU (European Commission, s.f), así como diversas directivas internacionales que regulan y guían los procesos (Nordic Energy Research Conference, 2022). Esta regulación actualmente es considerada estricta en algunos países como Alemania y Austria, aunque tiene prospección a ser más flexible (Freshfields Bruckhaus Deringer, 2023). Por lo anterior, se le evalúa con un desempeño medio.

CCU acero: Desempeño medio (3)

Al igual que en la alternativa anterior, la regulación de los CCS y CCU en los casos internacionales es mayor que la chilena, pero con un enfoque estricto que disminuye la flexibilidad en la aplicación de la medida. De la misma forma que en la medida anterior, se le evalúa con un desempeño medio.

Flexibilidad								
	Ecodiseño	Simbiosis	Hidrógeno en acero	Hidrógeno en cemento	CCS para cemento	CCS para acero y metanol	ML y AI para cemento	AI management en acero
Ecodiseño	1	1/3	1	1	1	1	1/3	1
Simbiosis	3	1	3	3	3	3	1	3
Hidrógeno en acero	1	1/3	1	1	1	1	1/3	1
Hidrógeno en cemento	1	1/3	1	1	1	1	1/3	1
CCS para cemento	1	1/3	1	1	1	1	1/3	1
CCU para acero y metanol	1	1/3	1	1	1	1	1/3	1
Digital Twin para cemento	3	1	3	3	3	3	1	3
AI management en acero	1	1/3	1	1	1	1	1/3	1

Tabla D-5: Matriz de evaluación para flexibilidad

D.6 Factibilidad técnica

Ecodiseño: Desempeño medio-alto (4)

Con relación a la factibilidad técnica, Chile posee iniciativas asociadas a economía circular y a ecodiseño en específico (Ecodiseño, s.f). A pesar de lo anterior, se necesita mayor innovación, investigación y desarrollo en estos temas. Sin embargo, considerando la potenciación que entregará a esta medida la ley REP y la prospección hacía una mayor regulación como los casos internacionales según lo indicado por la hoja de ruta hacia una economía circular (MMA, 2021), es que se evalúa con desempeño medio-alto.

Simbiosis industrial: Desempeño medio-bajo (2)

Según lo indicado por el Ministerio de Medio Ambiente de Chile (2015), encontrar formas de reutilizar los subproductos y residuos y hacer uso eficiente de los recursos, requiere soluciones tecnológicas y de gestión. Si bien muchos de los subproductos se pueden utilizar, las soluciones innovadoras para hacer frente a algunos residuos no están totalmente disponibles. Lo anterior requiere la creación de un área de investigación y desarrollo que en ocasiones no pueden ser soportadas por las empresas, por sus altos requerimientos (Ministerio del Medio Ambiente, 2015, como citado en Ovalle, 2018). La simbiosis industrial requiere de estudios adecuados para ser aplicada debido a su complejidad y a pesar de que existen casos de éxito de simbiosis en Chile

(Enel, s.f), la propuesta considerada en este trabajo posee una mayor dificultad debido a que considera 4 grandes sectores productivos. Por lo anterior, se le evalúa con un desempeño medio-bajo.

Hidrógeno para acero DRI: Desempeño medio (3)

Si bien Chile tiene programada la producción y uso de hidrógeno en su hoja de ruta asociada al hidrógeno verde, la producción de DRI implica dificultades técnicas no menores (BMT, s.f). A su vez, debido a que se trata de una técnica relativamente nueva, se requiere una mayor cantidad de estudios para ser aplicada a gran escala. Es en base a esto que se le evalúa con un desempeño medio.

Hidrógeno para cemento: Desempeño medio (3)

Nuevamente, a pesar de los planes de uso y producción de hidrógeno verde en Chile a gran escala, esta medida implica dificultades técnicas, específicamente en el uso de Rotary Kiln que funcionan a base de hidrógeno, al tratarse de una tecnología reciente. Es por lo anterior que se necesita una mayor cantidad de estudios para lograr la aplicación de esta medida en gran escala, y por lo que se le evalúa con un desempeño medio.

Digital Twin en industria del cemento: Desempeño medio-alto (4)

Una de las principales dificultades para la implementación de las medidas de digitalización es que actualmente el país se encuentra en las primeras etapas de la industria 4.0, lo cual dificulta la aplicación de forma masiva de medidas asociadas a la digitalización (Espinoza, 2023). No obstante, para los próximos años se proyecta la implementación de estas tecnologías en Chile. Finalmente, a pesar de que la implementación de Digital Twin no es sencilla, ésta ya ha sido aplicado en Chile en el sector minero (Riquelme, 2020), por lo que se evalúa con factibilidad técnica media-alta.

AI Management: Desempeño medio (3)

Al igual que en la medida de Digital Twin, la principal barrera de esta alternativa es el estado actual de la industria 4.0 en Chile. De igual forma, la presencia de Inteligencia Artificial en el país ha ido en aumento (Olmos, 2023), y se espera que la política de Inteligencia Artificial ayude a facilitar la implementación de estos sistemas, por lo que se evalúa con desempeño medio en este subcriterio.

Oxyfuel CCS cemento: Desempeño medio-bajo (2)

Las principales dificultades para llevar a cabo esta medida radican en la novedad del proceso de oxidación, y su complejidad técnica, como señala Gerbelová y colaboradores (2017). Además, la escasa adopción actual de CCS en Chile dificulta aún más la implementación. A pesar de que la captura de carbono es una técnica respaldada por numerosos estudios, su introducción en Chile se

ve afectada por estas barreras, resultando en una evaluación de desempeño medio-bajo.

CCU acero: Desempeño medio (3)

A diferencia de la medida de captura anterior, esta alternativa presenta menos dificultades debido a que no integra un proceso productivo moderno a la mitigación (oxi combustión). A pesar de lo anterior, y de tratarse de una técnica ya estudiada y conocida (Wich-Konrad, 2021), la captura y utilización de carbono para la producción de combustibles es poco aplicada en Chile. Por lo anterior, se le evalúa con un desempeño medio.

Factibilidad técnica								
	Ecodiseño	Simbiosis	Hidrógeno en acero	Hidrógeno en cemento	CCS para cemento	CCS para acero y metanol	ML y AI para cemento	AI management en acero
Ecodiseño	1	5	3	3	5	3	1	3
Simbiosis	1/5	1	1/3	1/3	1	1/3	1/5	1/3
Hidrógeno en acero	1/3	3	1	1	3	1	1/3	1
Hidrógeno en cemento	1/3	3	1	1	3	1	1/3	1
CCS para cemento	1/5	1	1/3	1/3	1	1/3	1/5	1/3
CCU para acero y metanol	1/3	3	1	1	3	1	1/3	1
Digital Twin para cemento	1	5	3	3	5	3	1	3
AI management en acero	1/3	3	1	1	3	1	1/3	1

Tabla D-6: Matriz de evaluación para factibilidad técnica

D.7 Factibilidad administrativa

Ecodiseño: Desempeño medio-alto (4)

La factibilidad administrativa del ecodiseño se ve incrementada con la potenciación de la técnica a través de la ley REP y la ley 21.074 de fortalecimiento de la Regionalización del País (MMA, 2021). Considerando la posible inspiración del marco regulatorio extranjero para su implementación, como por ejemplo en ecoetiquetado y la nueva Regulación de Ecodiseño para Productos Sostenibles (ESPR) propuesta por la Comisión Europea (Directorate-General for Environment, 2022), es que se evalúa con un desempeño medio-alto.

Simbiosis industrial: Desempeño medio-bajo (2)

Según lo indicado por el Ministerio de Medio Ambiente, en el contexto de las regulaciones que se desarrollan para tratar de inducir el buen comportamiento y cumplimiento en la industria, se pueden generar ambientes de confrontación que presentan un desafío a la cooperación, especialmente para las pequeñas y medianas empresas. Se prevé a mayor regulación de las definiciones de residuos y residuos peligrosos puede desalentar a las empresas a reutilizar los subproductos y generar alternativas asociadas a la simbiosis (Ministerio del Medio Ambiente, 2015, como citado en Ovalle, 2018). Además, considerando las pocas regulaciones internacionales asociadas a la alternativa, se tiene poca prospección nacional con respecto a la factibilidad administrativa de esta, por lo que se le evalúa con un desempeño medio-bajo.

Hidrógeno para acero DRI: Desempeño medio-alto (4)

Actualmente, el hidrógeno se encuentra regulado principalmente por la Ley de eficiencia energética y el Reglamento de almacenamiento de sustancias peligrosas (H2Chile, s.f). Considerando el auge en regulación internacional de esta alternativa durante los últimos años y los lineamientos indicados por La Estrategia Nacional del Hidrógeno Verde (Ministerio de Energía, 2020), es que se le evalúa con un desempeño medio-alto.

Hidrógeno para cemento: Desempeño medio-alto (4)

Al igual que en la alternativa anterior, la regulación actual presente, sumado a los lineamientos de la estrategia nacional de hidrógeno verde y la regulación internacional en el tema, es que se le evalúa con un desempeño medio-alto.

Digital Twin en industria del cemento: Desempeño medio (3)

A pesar de que actualmente no exista regulación en base a Digital Twins, Chile se encuentra en camino hacia una completa industria 4.0, presentando avances no menores en temas de digitalización (Orellana, 2022). Considerando además el aumento de regulación y estandarización

internacional en este tema, se proyecta que en Chile ocurra lo mismo. Considerando que la legislación internacional para este tipo de sistemas se está iniciando, se evalúa con un desempeño medio.

AI Management: Desempeño medio (3)

Al igual que en la alternativa de Digital Twin, los avances de Chile en digitalización, junto con la regulación internacional de Inteligencia Artificial y en este caso particular, la promulgación de la política de Inteligencia artificial es que se mira con prospección la factibilidad administrativa de esta alternativa. Sin embargo, debido a que la legislación internacional es reciente y existen muchos requerimientos y requisitos a aclarar para este tipo de sistemas (De, 2022), es que se evalúa con un desempeño medio.

Oxyfuel CCS cemento: Desempeño medio-bajo (2)

Considerando que Chile tiene preferencia a sistemas de captura de carbono naturales (Barriga, s.f.), y que a pesar de ser una técnica conocida hace años, aún no existe regulación clara en el país en relación a esta alternativa, es que no existe gran prospección hacia la factibilidad administrativa de la captura de carbono en el país, a pesar de que internacionalmente sea más relevante. Por lo anterior, se le evalúa con un desempeño medio-bajo.

CCU acero: Desempeño medio-bajo (2)

Al igual que en la medida anterior, la poca regulación a lo largo de los años junto con la preferencia de Chile hacía sistemas de captura de carbono naturales son las principales barreras en temas de factibilidad administrativa de la medida, por lo que se le evalúa con un desempeño medio-bajo.

Factibilidad administrativa								
	Ecodiseño	Simbiosis	Hidrógeno en acero	Hidrógeno en cemento	CCS para cemento	CCS para acero y metanol	ML y AI para cemento	AI management en acero
Ecodiseño	1	5	1	1	5	5	3	3
Simbiosis	1/5	1	1/5	1/5	1	1	1/3	1/3
Hidrógeno en acero	1	5	1	1	5	5	3	3
Hidrógeno en cemento	1	5	1	1	5	5	3	3
CCS para cemento	1/5	1	1/5	1/5	1	1	1/3	1/3
CCU para	1/5	1	1/5	1/5	1	1	1/3	1/3

acero y metanol								
Digital Twin para cemento	1/3	3	1/3	1/3	3	3	1	1
AI management en acero	1/3	3	1/3	1/3	3	3	1	1

Tabla D-7: Matriz de evaluación para factibilidad administrativa

D.8 Factibilidad económica

Ecodiseño: Desempeño medio-bajo (2)

A pesar de los indicios de la transición de Chile hacia una economía circular, a la fecha, es posible ver que los costos de adquisición de productos ecodiseñados son bastante altos. Por lo tanto, mientras no exista una regulación o incentivo económico claro para las empresas, la factibilidad económica de esta medida es bastante baja, a pesar de los beneficios económicos que puedan traer a largo plazo la utilización de este tipo de productos (Salvatierra, 2019). Por lo anterior, se evalúa con un desempeño medio-bajo.

Simbiosis industrial: Desempeño medio (3)

En base a lo indicado por el Ministerio del Medio Ambiente, la competencia entre las empresas y el deseo de maximizar los rendimientos de las inversiones representa un obstáculo importante para la aplicación de la ecología industrial, dado que la industria percibe que la gestión de los residuos en pro del cuidado ambiental es costosa, a pesar de que hay evidencias de que la prevención de la contaminación ahorra dinero. A su vez, la inseguridad de los mercados y los cambios en las actividades empresariales pueden crear condiciones que limitan el interés en las innovaciones para la sostenibilidad (Ministerio del Medio Ambiente, 2015, como citado en Ovalle, 2018). A pesar de lo costosa que puede ser esta medida, los inversores están cada vez más dispuestos a invertir, siempre y cuando se dé claridad acerca de los costos y beneficios económicos asociados (los cuales son altos en la mayoría de las ocasiones) (Al-karkhi y Fadhel, 2020). Según todo lo anterior, es que se le evalúa con un desempeño medio.

Hidrógeno para acero DRI: Desempeño medio-alto (4)

Considerando que Chile apunta a ser el productor más bajo costo de hidrógeno en el futuro y el alto apoyo económico a iniciativas de hidrógeno en el país en los últimos años, es que la factibilidad económica de esta medida es alta. A la fecha, la tecnología para la producción de DRI es costosa, pero considerando que Chile busca ser el productor de hidrógeno más barato para 2030, este método de fabricación sería menos costoso que la producción de manera tradicional (Hoffmann, et al., 2020). Es por lo anterior que se le evalúa con un desempeño medio-alto.

Hidrógeno para cemento: Desempeño medio-alto (4)

Al igual que en la alternativa anterior, los principales impulsores en la viabilidad económica son: el objetivo de Chile de ser el productor más barato de hidrógeno, junto con el apoyo a este tipo de iniciativas durante los últimos años. Actualmente la tecnología asociada a esta medida es más cara que la tradicional al tratarse de hornos especiales que funcionan con hidrógeno como principal combustible. A pesar de esto, con el desarrollo de esta tecnología junto con los incentivos económicos a la producción y utilización de hidrógeno, se espera que termine siendo más rentable que la producción tradicional. Por lo anterior se le evalúa con un desempeño medio-alto.

Digital Twin: Desempeño medio-alto (4)

En base al análisis realizado, se determinó que las alternativas asociadas a la digitalización presentan costos más bajos que la mayoría de las presentadas en este trabajo. Sin embargo, considerando la reciente entrada de Chile en el camino hacia la industria 4.0, es que se espera que estos costos sean mayores, teniendo en cuenta que para muchas empresas la implementación de medidas de este tipo es algo sin precedentes y que uno de los principales desafíos identificados en este contexto es la inversión (Espinoza, 2023). Es en base a estas barreras, que no es posible evaluar la alternativa con un desempeño alto, pero considerando los bajos costos identificados y los beneficios económicos que trae consigo la implementación de este tipo de medidas (SAP Concur Team, 2021), es que se evalúa con un desempeño medio-alto.

AI Management: Desempeño medio-alto (4)

Al igual que en la medida anterior, a pesar de las barreras de inversión e implementación “desde cero”, los bajos costos junto con los beneficios económicos que trae consigo la implementación de este tipo de medidas es que se evalúa con un desempeño medio-alto en este criterio.

Oxyfuel CCS cemento: Desempeño medio-bajo (2)

Actualmente la implementación de estas tecnologías conlleva una gran inversión económica por parte de las empresas. Considerando que Chile posee mayores costos en captura de carbono que en países europeos, y la preferencia a la inversión en sistemas de captura de carbono naturales, es que se evalúa con un desempeño medio-bajo.

CCU acero: Desempeño medio-bajo (2)

Al igual que antes, los costos económicos asociados, sumado al poco interés de inversión en este tipo de tecnologías se asoman como grandes barreras económicas. Junto con lo anterior, se identifica que en este caso los combustibles sintetizados no podrán ser certificados como renovables debido a que son elaborados a partir de CO₂ proveniente de la siderurgia (GIZ, 2020),

lo cual también obstaculiza la factibilidad económica. Los argumentos anteriores conllevan a que el desempeño de esta alternativa en este criterio sea medio-bajo.

Factibilidad económica								
	Ecodiseño	Simbiosis	Hidrógeno en acero	Hidrógeno en cemento	CCS para cemento	CCS para acero y metanol	ML y AI para cemento	AI management en acero
Ecodiseño	1	1/3	1/5	1/5	1	1	1/5	1/5
Simbiosis	3	1	1/3	1/3	3	3	1/3	1/3
Hidrógeno en acero	5	3	1	1	5	5	1	1
Hidrógeno en cemento	5	3	1	1	5	5	1	1
CCS para cemento	1	1/3	1/5	1/5	1	1	1/5	1/5
CCU para acero y metanol	1	1/3	1/5	1/5	1	1	1/5	1/5
Digital Twin para cemento	5	3	1	1	5	5	1	1
AI management en acero	5	3	1	1	5	5	1	1

Tabla D-8: Matriz de evaluación para factibilidad económica

Subcriterio	CR	CI
Reducciones directas de GEI	0,041	2,84%
Efectos ambientales indirectos	0,01	1,10%
Costo-eficacia	0,041	2,84%
Costo eficacia dinámico	0,009	0,646%
Flexibilidad	0	0,00%
Factibilidad técnica	0,012	0,857%
Factibilidad administrativa	0,014	0,962%
Factibilidad económica	0,009	0,646%

Tabla D-9: CR y CI según subcriterios

Efectividad ambiental			
	Reducciones directas de GEI	Efectos ambientales indirectos	Score
Ecodiseño	11%	20%	12%
Simbiosis	16%	38%	20%
Hidrógeno en acero	23%	8%	20%
Hidrógeno en cemento	5%	3%	4%
CCS para cemento	7%	8%	7%
CCU para acero y metanol	33%	8%	29%
Digital Twin para cemento	2%	8%	3%
AI management en acero	3%	8%	4%

Tabla D-10: Pesos relativos de alternativas en efectividad ambiental

Aceptabilidad política				
	Costo-eficacia	Costo eficacia dinámico	Flexibilidad	Score
Ecodiseño	2%	15%	8%	5%
Simbiosis	7%	34%	25%	14%

Hidrógeno en acero	5%	5%	8%	5%
Hidrógeno en cemento	16%	5%	8%	13%
CCS para cemento	11%	5%	8%	9%
CCU para acero y metanol	3%	5%	8%	4%
Digital Twin para cemento	23%	15%	25%	22%
AI management en acero	33%	15%	8%	28%

Tabla D-11: Pesos relativos de alternativas en aceptabilidad política

Factibilidad de implementación				
	Factibilidad Técnica	Factibilidad administrativa	Factibilidad económica	Score
Ecodiseño	26%	23%	4%	22%
Simbiosis	4%	4%	9%	4%
Hidrógeno en acero	10%	23%	20%	19%
Hidrógeno en cemento	10%	23%	20%	19%
CCS para cemento	4%	4%	4%	4%
CCU para acero y metanol	10%	4%	4%	6%
Digital Twin para cemento	26%	10%	20%	16%
AI management en acero	10%	10%	20%	11%

Tabla D-12: Pesos relativos de alternativas en factibilidad de implementación

Anexo E: Descripción de medidas seleccionadas para el contexto chileno.

E.1 Digital Twin para la industria del cemento

La medida de Digital Twin propuesta considera la utilización de Machine Learning e Inteligencia Artificial para su construcción, donde Machine Learning se refiere a una técnica que, a través de algoritmos, entrega a los sistemas la capacidad de identificar patrones en datos masivos y elaborar análisis predictivo, lo cual permite a los computadores realizar tareas específicas de forma autónoma (Iberdrola, s.f).

En el documento, la empresa calcula los resultados utilizando un LCA, a través del cual se identifican las actividades involucradas en la producción, junto con las emisiones estimadas y combustible utilizado en cada una de ellas. El modelo de Digital Twin trabaja específicamente en la combustión de combustibles en los hornos, influyendo en la cantidad y tipo de combustible quemado, lo que a su vez afecta la cantidad de emisiones de GEI. A partir de este modelo se determina la combinación óptima de combustibles a utilizar, junto con las reducciones asociadas.

A continuación, se muestra el esquema de funcionamiento del modelo estudiado, donde los cuadros anaranjados indican los procesos en donde este se aplica, y los grises donde no:

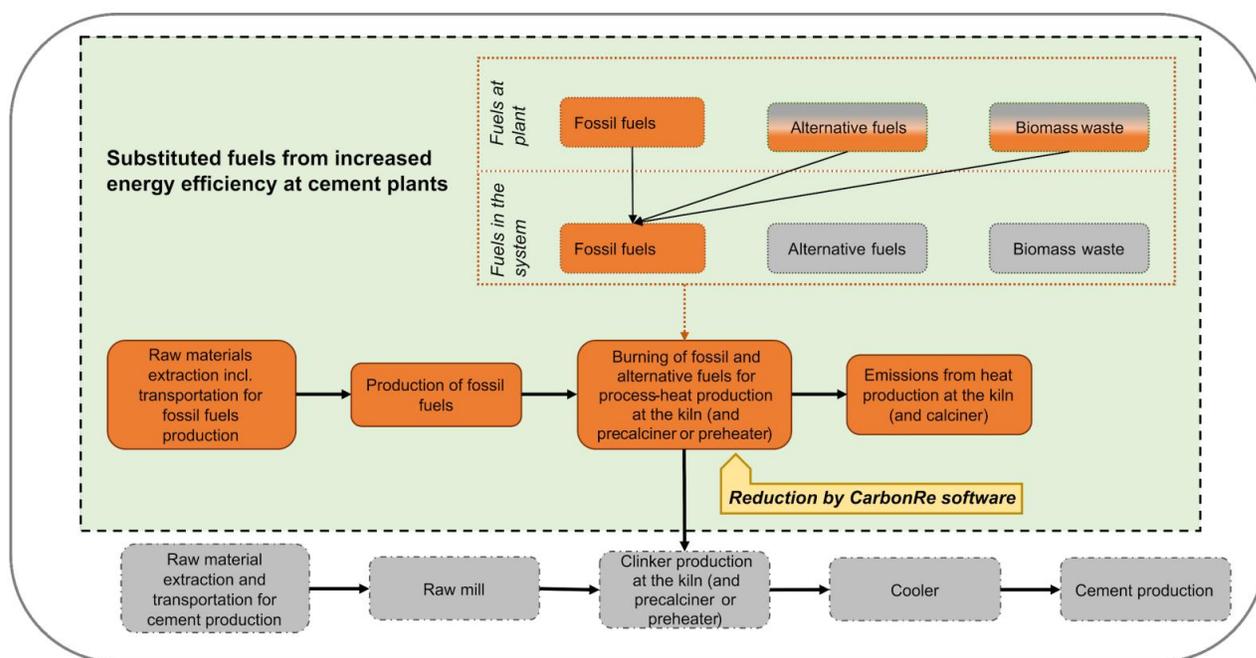


Figura E-1: Esquema de funcionamiento de modelo de Digital Twin (Planet A GmbH, 2022).

En el estudio se analizan varios combustibles utilizados en la industria del cemento, dentro de los que se encuentran combustibles fósiles como el carbón y el coque de petróleo, combustibles

alternativos como residuos industriales, biomasa, gas natural, entre otros. El documento no entrega información acerca de la mezcla de combustibles óptima para la disminución de emisiones, ya que menciona que esta elección depende de la disponibilidad y los precios de los combustibles, así como de las características de los combustibles fósiles y alternativos.

E.2 AI Management para la industria del acero

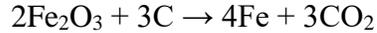
La medida de AI Management propuesta funciona a través de 3 pasos generales (BCG, 2021):

- 1. Monitoreo de Emisiones:** Se emplea IA para rastrear automáticamente las emisiones en toda su cadena de valor, recopilando datos de diversas fuentes, como operaciones, transporte, proveedores, entre otras. La IA puede incluso utilizar datos de nuevas fuentes como satélites y estimar datos faltantes.
- 2. Predicción de Emisiones:** La IA pronostica futuras emisiones en base a la información de emisiones actual, metas de reducción, nuevas tecnologías y la demanda futura, permitiendo establecer objetivos de reducción más precisos.
- 3. Reducción de Emisiones:** La IA ofrece una visión detallada de la cadena de valor, mejorando y optimizando los procesos productivos y otras actividades asociadas como transporte, con el fin de reducir las emisiones y disminuir costos.

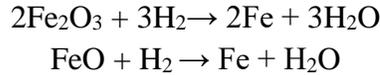
En particular, para la implementación de esta medida, en la empresa piloto se instalaron sensores que recolectan información de consumo de los distintos puntos de la cadena de valor (BCG, 2021). Esta información alimenta el sistema de control que funciona a base de algoritmos y es a través de este sistema que se logra calcular y predecir la demanda energética, así como rastrear y reducir las fuentes de residuos. Además de las reducciones de GEI, la empresa logró ahorros cercanos a los \$40.000.000 USD (BCG, s.f). Esta medida es bastante versátil, ya que puede ser utilizada en una gran cantidad de rubros, como cemento y minería. En este último rubro, la misma empresa que desarrolló el sistema de AI Management para acero, presenta también un sistema de AI Management enfocado en la gran minería.

E.3 Hidrógeno verde para acero Direct Reduced Iron (DRI)

Como se explicó previamente, la medida de hidrógeno verde para DRI consiste en la utilización de hidrógeno para la producción de acero a través del proceso de reducción directa. La reducción directa de hierro es el proceso químico que elimina el oxígeno del mineral de hierro en su forma sólida (World Steel Association, 2022). El hierro utilizado en la producción de acero se reduce químicamente a partir de mineral de hierro mediante el uso de recursos fósiles, como gas natural o carbón. Este proceso se conoce como reducción directa de hierro o DRI por sus siglas en inglés. El carbono se combina con el oxígeno en el mineral de hierro, produciendo hierro metálico y un gas de proceso rico en carbono, según la siguiente reacción química simplificada (World Steel Association, 2022):



Utilizando hidrógeno en vez de carbón para la reacción, el gas de desecho producido es agua, como se muestra en las siguientes reacciones (World Steel Association, 2022):



La utilización de esta técnica, en conjunto con el uso de hidrógeno como agente reductor, puede reducir significativamente las emisiones en la fabricación de acero, hasta en un 97% en comparación con el método convencional de alto horno (Agora Energiewende, 2020). En Europa, empresas siderúrgicas en Suecia, Alemania, Rumanía e Italia planean o están operando plantas piloto y de prueba de DRI. Cabe destacar que el método de reducción directa puede ser realizado utilizando gas natural. A partir de este proceso, se logran reducciones considerables con respecto a la forma de producción tradicional, pero sin llegar a ser tantas como con la utilización de hidrógeno verde.

E.4 Ecodiseño.

La medida de ecodiseño consiste en el recambio de los productos especificados en la sección 2 y Anexo A, por productos ecodiseñados. Estos productos fueron diseñados bajo legislación europea de manera de asegurar que durante su uso:

- Generen ahorros de combustible.
- Generen ahorros de electricidad.
- Consuman menor cantidad de agua.

Los productos ecodiseñados buscan utilizar una menor cantidad de material durante su producción y uso, al mismo tiempo que buscan que la mayor parte de los materiales utilizados pueda ser reutilizado posterior al fin de su vida útil. La alternativa de ecodiseño analizada considera el recambio de productos en el sector industrial, pero tal como señala el documento de referencia, los productos ecodiseñados abarcan las áreas de producción de energía, limpieza, ventilación, calefacción, entre otras. Según indica el documento, estos productos poseen un costo de adquisición mayor, pero entregan ventajas económicas a la larga, reduciendo los costos de operación y aumentando las ganancias de las empresas.

En este caso, la reducción asociada al contexto chileno es difícil cuantificar, debido a que gran parte de las reducciones de GEI que logran estos productos están asociadas a emisiones indirectas, por lo que se necesita un estudio aparte para calcular este total. Sin embargo, observando las reducciones que se proyectan en la UE mediante esta alternativa y comparándolas con las reducciones de otras medidas aplicadas al sector industrial, se podría estimar un potencial medio-

alto de reducción en el contexto chileno, considerando además que el impacto actual de productos ecodiseñados en el país es bajo. Con respecto al costo económico asociado, comparando el costo-eficacia que posee esta alternativa en relación a las otras analizadas, se le asocia un costo de abatimiento alto.

E.5 LCA.

La alternativa estudiada utiliza un modelo combina las metodologías de Análisis de Flujo de Materiales (MFA, por sus siglas en inglés) y Análisis de Ciclo de Vida (LCA, por sus siglas en inglés). Los MFA consisten en análisis de los diversos flujos de materias y sustancias (como lo pueden ser agua, calor, carbón, entre otros), que poseen todas las actividades del sistema productivo a estudiar (International Institute for Water and Environmental Engineering, s.f). Los MFA pueden ser utilizados como una estrategia individual, o una estrategia dentro del mismo LCA (IFEU, s.f).

El modelo descrito en el documento permite evaluar los flujos de materiales e impactos ambientales de un producto (en este caso acero) a nivel regional. Este logro se materializa al integrar los resultados del Análisis de Ciclo de Vida en el Análisis de Flujo de Materiales, utilizando datos de inventario del ciclo de vida desde la extracción de materias primas hasta la salida del producto del sistema, para rellenar los distintos flujos de las diversas actividades consideradas en el MFA. A partir de la identificación de las distintas actividades productivas identificadas por el MFA y junto con la información de emisiones asociadas entregada por el LCA, es que se logra determinar cuáles alternativas de mitigación de economía circular son las que tendrían mayor potencial, a través de un enfoque matricial en que se combinan las alternativas de mitigación, con la información de emisiones asociada por actividad. Con lo anterior, se identifica la mitigación asociada a cada medida en cada una de las diferentes actividades y se encuentra la mejor combinación posible para toda la cadena de valor.

La aplicación de este diagnóstico se puede resumir en un proceso iterativo de 7 pasos:

1. Definir los límites del sistema: Determinar el alcance del análisis definiendo los límites del Análisis de Flujo de Materiales (MFA) para la región específica.
2. Identificar puntos críticos: Realizar un análisis para identificar las actividades con los mayores flujos de materiales, conocidas como puntos críticos.
3. Identificación de alternativas de mitigación: Identificar las alternativas de mitigación a evaluar basándose en las actividades identificadas.
4. Adaptar el alcance del análisis: Utilizar un flujo de trabajo iterativo para adaptar el alcance y las actividades consideradas en el análisis basándose en las estrategias seleccionadas.
5. Informar actividades con datos del ciclo de vida: Proporcionar datos obtenidos en el LCA a cada actividad identificada.
6. Construir el modelo base: Completar las matrices de medidas e impacto ambiental con los

datos del LCA para crear el modelo base.

7. Implementación de estrategias y determinación de beneficios: Integrar estrategias de mitigación en el modelo base y evaluar los beneficios potenciales de estas en la producción del material y la región bajo estudio, analizando la variación de flujos de materiales e impactos.

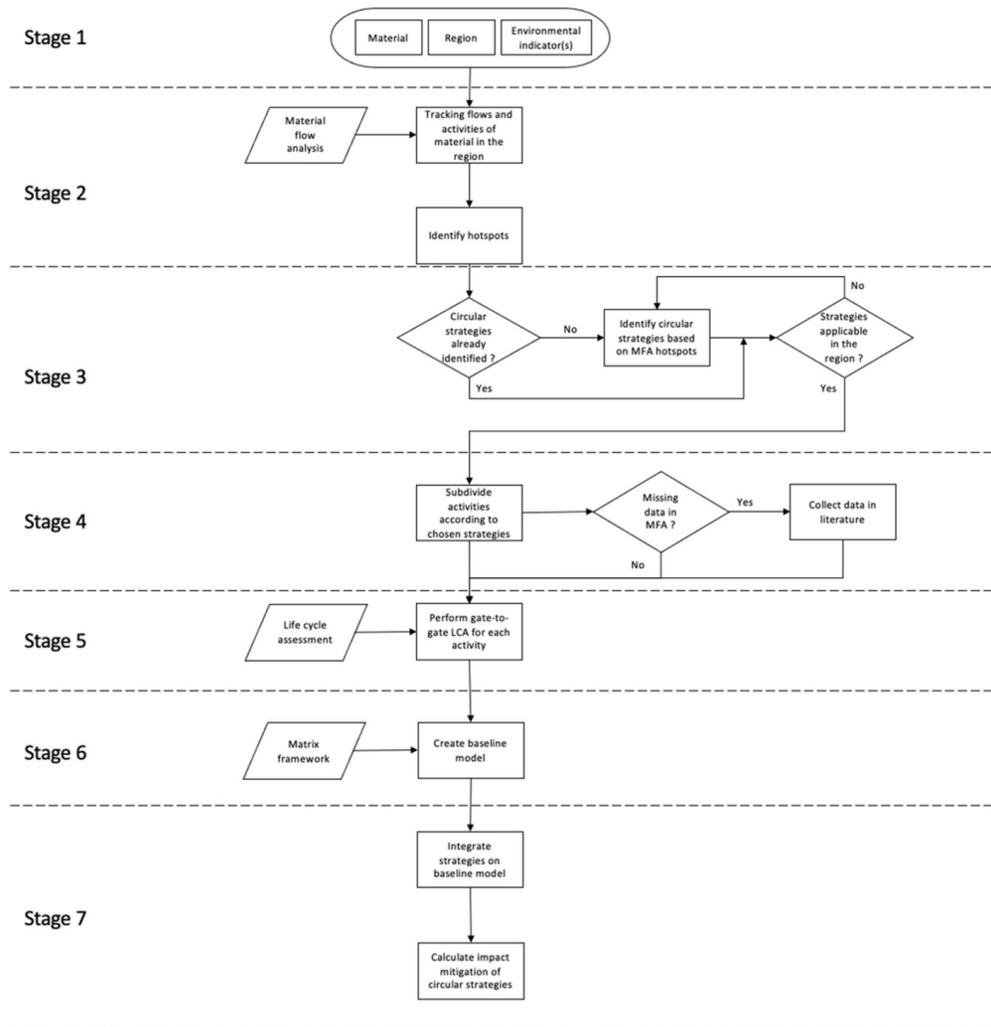


Figura E-2: Esquema iterativo para aplicación de modelo LCA (Smith y Johnson, 2023)

La metodología de LCA presentada en el documento se enfoca en específico en la cadena de valor del acero en la ciudad de Quebec en Canadá, pero esta puede ser aplicada en otros tipos de materiales y regiones dadas, siempre y cuando se tengan datos claros de los flujos y de las emisiones de cada proceso. A partir de la aplicación de esta metodología, en el documento se identifican seis estrategias circulares relevantes para mitigar las emisiones de GEI en la cadena de valor del hierro y el acero, las cuales son:

1. Fabricación de acero con hidrógeno (DRI): Esta estrategia reduce las emisiones directas en la etapa de producción de acero, utilizando hidrógeno para su fabricación.

2. Ligereza de vehículos: Esta estrategia busca reducir la cantidad de acero presente en vehículos. Esto reduce su peso, y a partir de esto se logra que emitan menor cantidad de GEI durante su uso.
3. Reciclaje: Esta estrategia busca fomentar el reciclaje y reutilización de acero en los distintos procesos productivos asociados, lo que resulta en una reducción de las emisiones en la etapa de producción y en la etapa de extracción/tratamiento.
4. Compartir automóviles: Esta estrategia fomenta el compartir vehículos para traslados de personas y/o material, lo cual provoca una menor cantidad de automóviles en circulación y por ende, una reducción de las emisiones en la etapa de uso del acero.
5. Sobre-especificación de edificaciones: Esta estrategia busca disminuir la cantidad de acero utilizado en edificaciones, debido a que estas estiman aproximadamente un 35-40% más del acero necesario. Esta disminución en la cantidad de acero necesaria implicaría una menor producción de acero y por lo tanto, la reducción de emisiones en la etapa productiva.
6. Extensión de la vida útil: Esta estrategia busca incrementar la vida útil del acero producido para edificaciones y autos, disminuyendo así las emisiones asociadas tanto en uso, como en producción y extracción.

A continuación, se muestra el gráfico con la disminución de cada medida en las diferentes actividades o procesos de la cadena de valor del acero:

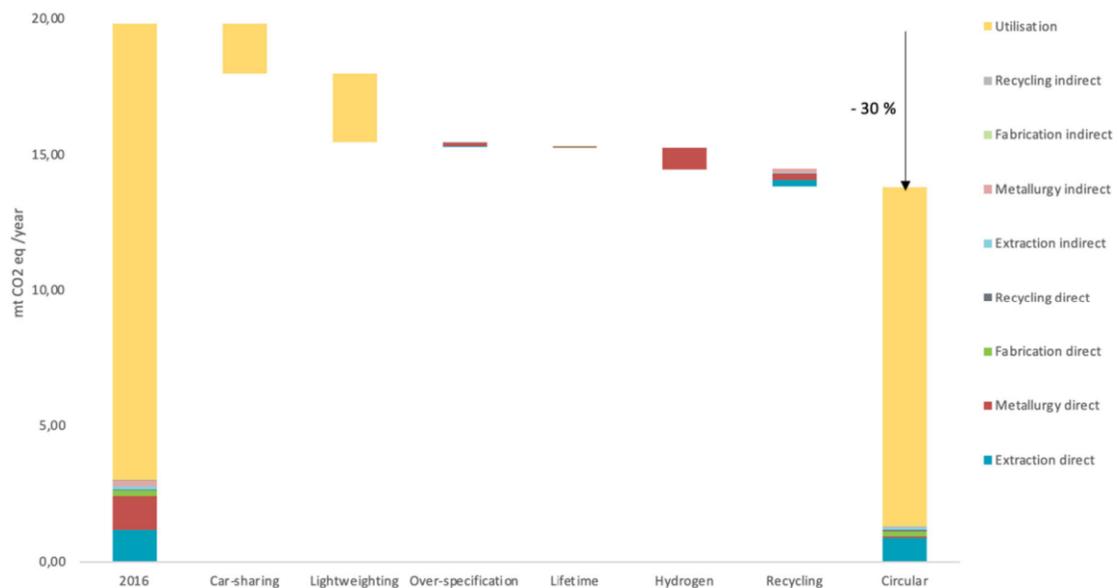


Figura E-3: Reducciones obtenidas por medidas identificadas en modelo LCA según fase (Smith y Johnson, 2023).

Es posible ver cómo asociadas a la producción, se encuentran las alternativas de fabricación con hidrógeno, reciclaje, sobre-especificación de edificaciones y extensión de vida útil, siendo las dos primeras las más relevantes en términos de mitigación para la fase productiva. Si se consideran las reducciones asociadas a los procesos de utilización y transporte, las reducciones para esta industria podrían llegar a un 30%.

Anexo F: Implementación de tecnologías digitales en PYMES

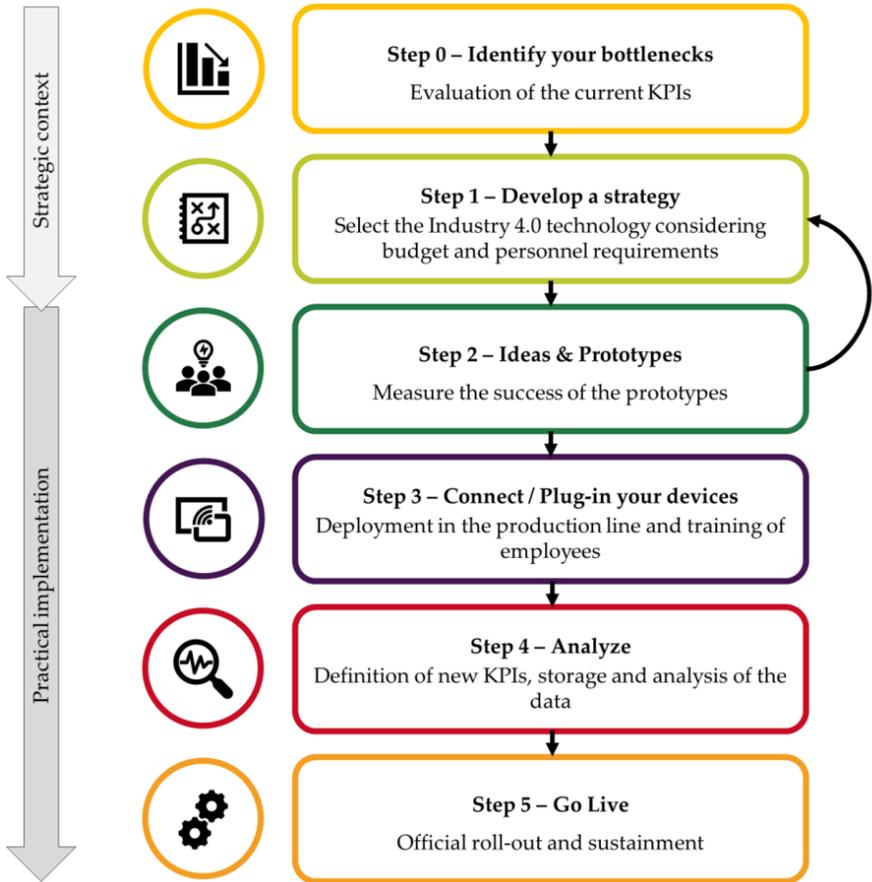


Figura F-1: Roadmap para aplicación de medidas de digitalización en pequeñas y medianas empresas (Cotrino, et al., 2020)

Anexo G: Roadmap para diseño de ETS en países en vías de desarrollo.

CUADRO S.2 Lista de comprobación para los 10 pasos del diseño de un SCE		
<p>Paso 1: Definir el ámbito de aplicación</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Decidir qué sectores regular ✓ Decidir qué gases regular ✓ Elegir los puntos de regulación ✓ Elegir las entidades a regular y decidir si se van a establecer umbrales 	<p>Paso 5: Decidir sobre la flexibilidad temporal</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Establecer reglas para acumular derechos de emisión ✓ Establecer reglas para préstamos de derechos de emisión y asignación temprana ✓ Establecer la duración de los períodos de reporte y cumplimiento 	<p>Paso 8: Involucrar a las partes interesadas, comunicar y fortalecer capacidades</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Mapear a las partes interesadas con sus respectivas posiciones, intereses e inquietudes ✓ Coordinar un proceso transparente de toma de decisiones en los departamentos gubernamentales relevantes para evitar la desalineación de políticas ✓ Diseñar una estrategia de participación para la consulta de los grupos interesados que especifique el formato, cronograma y objetivos ✓ Diseñar una estrategia de comunicación que refleje las preocupaciones públicas locales e inmediatas ✓ Identificar y resolver las necesidades de fortalecimiento de capacidad del SCE
<p>Paso 2: Establecer el límite de emisiones</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Crear una base sólida de datos para determinar el límite ✓ Determinar el nivel y tipo de límite ✓ Elegir los períodos de tiempo para el establecimiento del límite y proporcionar una trayectoria del límite a largo plazo 	<p>Paso 6: Considerar la previsibilidad de precios y evaluar mecanismos de contención de costos</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Establecer la justificación para la intervención en el mercado y los riesgos asociados con dicha intervención ✓ Decidir si precios considerados demasiado bajos, demasiado altos, o ambos casos justifican una intervención en el mercado ✓ Elegir el instrumento adecuado para una intervención en el mercado ✓ Decidir sobre el marco de regulación 	<p>Paso 9: Considerar la vinculación con otros SCE</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Determinar los objetivos y la estrategia de la vinculación ✓ Identificar a los socios de vinculación ✓ Determinar el tipo de vínculo ✓ Alinear las características de diseño claves del programa ✓ Formar y regular el vínculo
<p>Paso 3: Asignar derechos de emisión</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Complementar los métodos de asignación con los objetivos de las políticas públicas ✓ Definir la elegibilidad y el método de asignación gratuita y equilibrar con subastas a través del tiempo ✓ Definir el tratamiento de los operadores nuevos, los cierres y las remociones 	<p>Paso 7: Garantizar el cumplimiento y la vigilancia</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Identificar las entidades reguladas ✓ Gestionar los reportes de emisiones por parte de las entidades reguladas ✓ Aprobar y administrar el desempeño de los verificadores ✓ Establecer y supervisar el registro del SCE ✓ Diseñar e implementar el enfoque de sanción y aplicabilidad ✓ Regular y vigilar el mercado para unidades de emisiones de SCE 	<p>Paso 10: Implementar, evaluar y mejorar</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Decidir sobre el tiempo y el proceso de la implementación del SCE ✓ Decidir sobre el proceso y el ámbito de aplicación para las revisiones ✓ Evaluar el SCE para apoyar la revisión
<p>Paso 4: Considerar el uso de compensaciones</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Decidir si se aceptarán compensaciones de fuentes y sectores no regulados por el límite dentro y/o fuera de la jurisdicción ✓ Definir los sectores, gases y actividades elegibles ✓ Sopesar los costos de establecer un programa de compensación propio versus hacer uso de un programa existente ✓ Definir los límites en el uso de compensaciones ✓ Establecer un sistema de monitoreo, reporte, verificación y regulación. 		

Figura G-1: Roadmap de aplicación de ETS (World Bank, 2016).

Anexo H: Cuadro resumen de entrevistas con expertos

Experto	Área	Principales comentarios
David Vargas	Metodologías de selección de alternativas	<ul style="list-style-type: none"> La metodología TRL es utilizada para definir mejores opciones de mitigación y corresponde a una buena alternativa cuando se trata de comparar tecnologías o medidas en la industria.
Carlos Benavides	Aprendizajes de esfuerzos de mitigación anteriores.	<ul style="list-style-type: none"> Los instrumentos regulatorios potencian la innovación y la mitigación en los rubros, como el caso de la ley de EE y los SGE. Existe prospección para SST con plantas CSP.
Carlos Alvear	Hidrógeno Verde	<ul style="list-style-type: none"> Falta regulación específica para la potenciación de hidrógeno verde en Chile. Actualmente, este combustible es utilizado en usos motrices y aplicaciones difíciles de electrificar.
Aldo Cerda	Instrumentos de mitigación	<ul style="list-style-type: none"> Los ESG por sí mismo no poseen un gran potencial de mitigación. La fijación de precio interno del carbono en empresas corresponde a un instrumento innovador en Chile y con gran potencial de mitigación. Los sistemas de captura de carbono poseen mayor potencial en Europa debido a que allá son más baratos.
Alejandro Chacón	Ecodiseño y economía circular	<ul style="list-style-type: none"> El levantamiento de datos corresponde a una estrategia innovadora para la mitigación. El ecodiseño permite reducir costos y emisiones. En Chile actualmente no se piden Eco-Indicadores para los productos. La ley REP beneficiará a las empresas que aplique el ecodiseño.
Raul O'Ryan	Instrumentos de mitigación	<ul style="list-style-type: none"> Los ETS y Carbon Tax son buenas medidas en general, con los permisos transables teniendo mayor aceptación en las empresas. Una buena opción es enfocar/aplicar los instrumentos de mitigación en minería particularmente.
Sebastian Tolvett	Digitalización	<ul style="list-style-type: none"> La industria chilena va encaminada hacia la digitalización. La implementación de sistemas de digital Twin no es trivial.
Luis Gonzales	Instrumentos de mitigación	<ul style="list-style-type: none"> Los carbon Tax y ETS son buenas medidas cuando los costos marginales comienzan a ser altos. Es difícil cuantificar cuanto logran mitigar los ETS. Los ESG no son una buena medida de mitigación debido a que son poco confiables, son más formas de financiamiento que alternativas de mitigación.
Carlos Finat	Aprendizajes de esfuerzos de mitigación anteriores	<ul style="list-style-type: none"> FIT fueron grandes potenciadores de tecnología fotovoltaica. La disminución de costos, mejoras en eficiencia y economías de escala permitieron también potenciación de estos sistemas.

Tabla H-1: Cuadro resumen de entrevistas y nombres de expertos.