



Informe Final

Desarrollo bajo en carbono para la industria chilena de la siderurgia

Julio de 2020

RESUMEN EJECUTIVO

Introducción

El estudio *“Desarrollo bajo en carbono para la industria chilena de la siderurgia”* fue financiado por fondos GEF canalizados a través del BID, administrado por la Fundación Bariloche y sus beneficiarios son el Ministerio de Energía y la GIZ. El propósito del estudio es contribuir al **establecimiento de una hoja de ruta tecnológica** que oriente al sector de la siderurgia chilena hacia una transición baja en carbono.

El estudio fue enfocado en las necesidades del proceso **integrado** de fabricación de acero.

Metodología

La metodología que se ha seguido para llevar a cabo el proyecto ha sido la siguiente:

- **Establecimiento de las metas y diseño de la trayectoria de reducción de emisiones de GEI**
- **Priorización de opciones tecnológicas** que posibilitasen la mitigación de GEI y **desarrollo de un plan de inversión** para la implementación de las nuevas tecnologías
- **Identificación de barreras y marcos facilitadores** para la implementación
- **Marcos institucionales, regulatorios y de fomento que faciliten la adopción de tecnologías de mitigación de GEI**
- **Establecimiento de una hoja de ruta** para orientar a la industria hacia la transferencia tecnológica e indicadores de impacto

A continuación, se muestran la metodología y principales conclusiones de cada apartado:

a) Estudio de las metas y trayectoria de reducción de emisiones de GEI

En esta primera parte del estudio, se calculó el **presupuesto de carbono** correspondiente al sector siderúrgico de Chile, a partir de un presupuesto global de carbono alineado con los objetivos del Acuerdo de París.

Para calcular el presupuesto de carbono, se toma como referencia que el sector tiene un presupuesto total de 112 Gt-CO₂ entre los años 2011 y 2050, a **nivel global**¹ para alcanzar los 2°C. Bajo esta premisa, se consideró la participación del mercado de producción de acero de Chile como la fracción de emisiones

correspondientes para el sector. La trayectoria de reducción de emisiones será representada mediante una curva basada en la intensidad de emisiones del sector, es decir, toneladas de CO₂ emitidas normalizado por las toneladas de acero producidas (tCO₂ / t acero). De esta manera, se permite desacoplar el crecimiento productivo de las emisiones de GEI de la industria.

A partir de esta base, **se determinaron tanto el objetivo de reducción de emisiones del sector como la trayectoria de emisiones que debería de seguir hasta llegar a tal objetivo, marcando un área de carbono menor o igual a la determinada en primer caso.**^{2, 3}

La trayectoria de reducción de emisiones se construyó en base a la métrica de intensidad de emisiones anuales:

$$\frac{t. CO_2 \text{ eq emitidas (consumo eléctrico + emisiones directas)}}{t. de acero crudo producido}$$

Se presenta a continuación (**figura 1**) la trayectoria de reducción de emisiones trazada incluyendo el desglose de los aportes por consumo eléctrico (alcance 2) y emisiones directas (alcance 1).

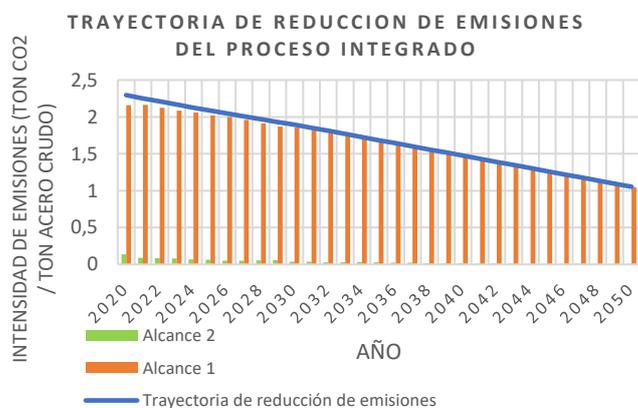


Figura 1: Trayectoria de reducción de emisiones del proceso integrado entre los años 2020 y 2050, incluyendo participación

En la trayectoria, se identificó que las emisiones de alcance 1 son el grueso de la contribución a la intensidad de emisiones. Por lo mismo, el cumplimiento de esta trayectoria depende principalmente de las acciones de mitigación directamente al consumo de carbono y combustibles fósiles de la industria.

¹ Science Based Targets, 2019. Science-Based Target Setting Manual Version 4.0, April 2019. Disponible en: <https://sciencebasedtargets.org/wp-content/uploads/2017/04/SBTi-manual.pdf>. [Consultado el: 28 de agosto de 2019].

² Chile es miembro suscriptor del Acuerdo de París, firmado por 197 países acordando limitar el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de 2 °C con respecto a los niveles preindustriales y proseguir los esfuerzos para limitar ese aumento de la temperatura a 1,5 °C.

³ Las trayectorias de reducción de emisiones han sido construidas en concordancia con la ciencia, en particular basándose en la información de la Agencia Internacional de la Energía (IEA) y la iniciativa Science Based Targets (SBT).

b) Priorización de opciones tecnológicas que posibilitasen la mitigación de GEI y desarrollo de un plan de inversión para la implementación de las nuevas tecnologías

Es recomendable revisar y actualizar las metas y trayectorias de descarbonización **por lo menos cada 5 años**, tomando también en cuenta la actualización de los diversos supuestos utilizados en la construcción de las curvas, entre ellos:

- La descarbonización de la matriz energética
- El crecimiento de producción de acero (constante para CAP)
- El aumento en consumo eléctrico equivalente al aumento en producción.

Esta revisión permitirá ir ajustando las trayectorias de descarbonización a (1) la tasa efectiva de retiro de centrales de generación a carbón en Chile, (2) el crecimiento real del sector en cuanto a su producción, (3) la incorporación de medidas de eficiencia energética que se tomen en el transcurso de los años.

Una vez determinados los objetivos reducción de emisiones para el sector, se definió un plan de inversión que incorpora recomendaciones de financiamiento y mecanismos de inversión para asegurar esta transición. El plan de inversión fue realizado en base a un análisis de las principales opciones tecnológicas que posibilitarían la contribución hacia una transición baja en carbono de la industria. Estas tecnologías se jerarquizaron de acuerdo a su costo y su efectividad para abatir emisiones y se desarrolló una priorización en base a un análisis multicriterio (AMC) en el cual se propició la participación del sector. Este análisis se hizo mediante la construcción de Curvas de Costos Marginales de Abatimiento (MACC) que permitió identificar qué proyectos tecnológicos eran los más rentables por unidad de CO₂eq abatidos y cuales ofrecían el mayor potencial de reducción. Posteriormente se incorporaron criterios adicionales relacionados con aspectos medioambientales (magnitud la reducción de GEI, cantidad de energía eléctrica requerida), de implementabilidad (infraestructura habilitante, horizonte temporal adecuado, madurez de la tecnología) y económicos (capital inicial requerido, retorno de la inversión, productividad). Las tecnologías finalmente seleccionadas para el plan de inversión se clasificaron en varios grupos en función de sus respectivos tiempos de recuperación de inversión y capital inicial requerido, dando lugar a los grupos A, B y C con el fin de entregar recomendaciones de financiamiento más detalladas de cada una de ellas.

Las recomendaciones de financiamiento para cada grupo de propuestas tecnológicas son las siguientes:

Grupo A: Los proyectos poseen las características para ser implementados a través de deuda tradicional o incluso capital propio. Los tiempos de recuperación son rápidos, y requeriría una inversión de 6 MMUSD para implementar ambos proyectos, lo que reduciría 160.000 ton de CO₂eq al año.

Grupo B: Los proyectos tienen tiempos de recuperación de capital superiores a un año, pero no exceden los 4 años. Adicionalmente, uno de esos proyectos es altamente intensivo en términos de capital (PCI, el cual requiere una inversión de 20 MMUSD). Una forma de financiamiento sería a través de deuda

Solo 1/3 del mercado nacional se abastece de producción local y los otros 2/3 provienen de importaciones. Por lo tanto, cualquier adopción tecnológica que no fuese neutral en términos de su impacto sobre los costos marginales de producción implicaría restarle competitividad a la industria local frente a la industria extranjera, la que en general posee un proceso de producción bastante intensivo en emisiones. Así, se haría un efecto de exclusión de producción local, lo cual finalizaría con una reasignación de rentas desde las firmas locales a las extranjeras sin impacto en las emisiones contenidas en los bienes producidos.

blanda, otorgada por mecanismos públicos o provenientes de banca multilateral. Mecanismos adicionales de financiamiento se desarrollarán en el apartado a continuación.

Grupo C: Este grupo posee no solo tiempos de recuperación muy elevados, sino también VAN bajo las condiciones actuales. Para promover iniciativas como esta, la única forma financieramente factible sería obteniendo subsidios estatales o de organismos internacionales, o la incorporación de estímulos al mercado que viabilicen estas iniciativas (por ejemplo, un impuesto específico al carbono, o una cuota mínima para la adquisición de “acero verde”).

A continuación, se estudiaron los posibles mecanismos de financiamiento para la implementación de los proyectos tecnológicos según su grado de aplicabilidad:

- **Fondo Verde para el Clima (GCF):** aplicabilidad baja [La clasificación de Ayuda Oficial al Desarrollo (AOD) de Chile puede dificultar el acceso a este instrumento]
- **Bono Verde Privado:** aplicabilidad alta [Considerando la clasificación de riesgo de la industria, es factible la emisión de un bono]
- **BID Invest:** aplicabilidad alta [Los lineamientos del proyecto son coherentes con este banco multilateral de desarrollo]
- **The Global Innovation Lab for Climate Finance:** aplicabilidad baja [Las características de estas tecnologías podrían no calzar con este instrumento]
- **Clean Technology Fund:** aplicabilidad alta [En la medida que se desarrolle una iniciativa público-privada]

c) Identificación de barreras y marcos facilitadores para la implementación

Es de gran relevancia en el estudio la Identificación de las barreras que existen para la implementación del Plan de Inversión, así como la identificación de los marcos facilitadores requeridos para la superación de las barreras identificadas.

Las conclusiones del **taller participativo de barreras con la industria** fueron las siguientes: la importancia de la amenaza que el acero chino representa para la subsistencia de la industria local. La disminución de precio internacional afecta

directamente el ingreso de los productores locales. Se concluyó, por lo tanto, que las barreras más significativas para la transición baja en carbono del acero en Chile son las barreras que suponen la caída de precios y la baja demanda del producto a causa de la significativa competencia internacional.

Las principales barreras estudiadas fueron:

- Márgenes acotados de la industria vs costos de las tecnologías
- Falta de una deuda adaptable al proyecto y de garantías que faciliten la obtención de la deuda.
- Incertidumbre de la industria por estar inserta en un mercado global altamente competitivo.
- Capacidades habilitantes: Infraestructura, capital humano, equipamiento.
- Bajo nivel de inversión en I+D+i e Inmadurez tecnológica.
- Falta de instrumento de financiamiento que apoye la adopción de tecnologías/transferencia tecnológica.

Aunque se hayan realizado esfuerzos para minimizar la dependencia en combustibles externos al proceso de fabricación, cualquier esfuerzo incremental hacia el abatimiento de sus emisiones, implica un riesgo adicional a la sustentabilidad de la industria debido a la baja competitividad del producto. Dadas las barreras identificadas, y en concordancia con el Plan de Inversión que resultó del AMC, se desprende que resultaría complejo cualquier plan de inversión que implique:

- Capital inicial elevado
- Período de retorno superior a un año
- Aumento en el costo de producción que signifique un incremento del precio del producto dado el actual contexto global de la industria

d) Marcos institucionales, regulatorios y de fomento que faciliten la adopción de tecnologías de mitigación de GEI

Este capítulo consistió en identificar medidas preliminares para superar cada una de las barreras priorizadas en la fase anterior, junto con la proposición de un marco institucional y regulatorio que se acople a las medidas que se implementarán para promover la adopción de tecnologías que mitiguen la emisión de gases de efecto invernadero en la industria del acero.

Para identificar y formular las propuestas de medidas de política pública, se analizó en primer lugar la experiencia comparada en otros países del mundo sobre los mecanismos de incentivos empleados para promover recambios tecnológicos en estas industrias. Asimismo, se revisó la bibliografía existente y la experiencia de Chile en la regulación y/o promoción de otros mercados similares que hayan implicado un marco de incentivos para el progreso tecnológico hacia métodos menos intensivos en carbono. Se consideró como un aspecto clave, la implementación de políticas de precio al carbono.

Parte del análisis incluye la modelación de futuros escenarios político-regulatorios que favorecerían a la implementación del

plan de inversión identificado. En primer lugar, se analizaron diferentes **escenarios futuros sobre el precio al carbono** en base a la evidencia técnica resultante de las fases anteriores incluyendo la trayectoria de reducción de emisiones. Esto incluye el potencial acceso a beneficios para el sector en términos de permisos de emisiones transables que se le pueda asignar por un período de transición, así como otros beneficios de política climática.

Seguidamente, se exploró la **posibilidad de descomoditizar⁴ este metal utilizando como factor diferenciador la intensidad de CO₂ utilizada para su producción**, con el fin de agregar valor a la producción y capturar rentas de innovación en un mercado no perfectamente competitivo. En este segundo estudio se valoró un escenario con un **premio al acero “verde”**.

Además, se hicieron en este capítulo varias recomendaciones y propuestas de política pública. Las propuestas analizadas son:

- Diferenciación y desarrollo de mercado de acero verde.
- Desarrollo de mercados de carbono líquidos y profundos.
- Desarrollo de políticas comparadas, considerando los modelos adoptados en la Unión Europea, en particular en torno al New Green Deal.

A través de estos análisis y un taller con los stakeholders más importantes, se llegó a las siguientes medidas preliminares y propuestas públicas para la solución de barreras:

- I. Márgenes acotados de la industria vs costos tecnologías
 - a. **Establecer regulaciones que permitan controlar la entrada de acero intensivo en emisiones proveniente del extranjero, en particular de países como China y México.**
 - b. **Promover el acero con Atributo verde en infraestructura pública y vivienda (Cuotas de Acero verde).**
 - c. **Establecer un mercado de Carbono (compensaciones)**
 - d. **Establecer formas de financiamiento a través de los Instrumentos existentes: Créditos blandos o emisión de bonos verdes**
- II. Falta de una deuda adaptable al proyecto y de garantías que faciliten la obtención de la deuda
 - a. **Crear instrumentos y garantías que faciliten la obtención de la deuda tales como subsidios o créditos blandos CORFO o bonos verde del Ministerio de Hacienda.**
 - b. **Establecer formas de financiamiento a través de los Instrumentos existentes: Créditos blandos o emisión de bonos verdes**
- III. Incertidumbre de la industria por estar inserta en un mercado global altamente competitivo

⁴ Con “descomoditizar” se refiere a diferenciar comercialmente el acero bajo en emisiones de GEI como un producto por el cual se podría pagar un precio más alto.

- a. **Identificación de nichos estratégicos de demanda para Acero verde y su certificación**
 - b. **Generar mercados de acero verde locales (valorización de productos largos)**
 - Ej: Promover el acero con Atributo verde en infraestructura pública y vivienda (Cuotas de Acero verde).
- IV. Capacidades habilitantes: Infraestructura, capital humano, equipamiento
- a. **Establecer estrategias a largo plazo de Cambio Climático (LTS)**
 - b. **Establecer periodicidad de evaluación de estrategia de CC**
- V. Bajo nivel de inversión en I+D+i e Inmadurez tecnológica
- a. **Programas de Fomento en innovación asociada a la industria siderúrgica**
- VI. Falta de instrumento de financiamiento que apoye la adopción de tecnologías/transferencia tecnológica
- a. **Establecer programas de Subsidios para inversión en tecnologías limpias.**
 - b. **Crear estrategias para transferencia tecnológica. En particular la incorporación de la industria en la estrategia de transferencia para Cambio Climático.**
- VI. Ausencia de trazabilidad ambiental del producto
- a. **Crear atributos de sustentabilidad**
- e) **Establecimiento de una hoja de ruta para orientar a la industria hacia la transferencia tecnológica e indicadores de impacto**

Con todo lo anterior, se procedió al establecimiento de una hoja de ruta para orientar a la industria a una transición baja en carbono. Enfrentar el desafío de crear una transición baja en carbono requiere de unas instituciones coordinadas y conscientes del nivel de vulnerabilidad sectorial que sufre la industria siderúrgica, que habilite políticas domésticas coherentes con los acuerdos comerciales vigentes para potenciar la demanda de acero bajo en carbono a través de un atributo “verde”. Se requiere una instancia participativa, en que los actores involucrados puedan validar y asumir las medidas propuestas, definir plazos y actualizar esfuerzo. Adicionalmente, resulta imprescindible la voluntad política del sector público como condicionante para el cumplimiento de gran parte de las medidas.

A continuación, se presenta una **hoja de ruta que permite proponer y proyectar las distintas medidas de acción que podrían desarrollarse como parte de la política de descarbonización del sector**. Para cada una de ellas se indican los plazos de implementación propuestos, así como sus responsables, presupuesto estudiado y fuentes de financiamiento. Además, con el objetivo de establecer un

mecanismo que nos permitieran monitorear y evaluar la evolución de las medidas propuestas en la Hoja de Ruta a partir de su implementación, se definieron diferentes indicadores de impacto vinculados a las variables claves de estas medidas de acción:

Creación de un comité multilateral de recambio tecnológico para impulsar la descarbonización de los sectores industriales del país

Crear una instancia que se reúna cada seis meses, en la cual se vayan levantando las necesidades y responsabilidades de la industria hacia un desarrollo bajo en carbono del país, y dando seguimiento a los compromisos asumidos.

Plazo de Implementación: Al término de este estudio

Responsables primarios: Ministerio de Medio Ambiente y/o Energía: establecimiento de contrapartes públicas en el marco de la Estrategia de Cambio Climático de Largo Plazo (ECLP) y trabajar para integrar esto en la Ley de Cambio Climático (hoy en tramitación)

Responsables secundarios:

ICHA y Gremios sectoriales industriales (Consolidación de necesidades de la industria), Ministerio de Hacienda, Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación.

Presupuesto esperado: -

Fuente de financiamiento: -

Indicadores de impacto:

1) Validación de soluciones tecnológicas: definir una cantidad de tecnologías que deben ser analizadas y validadas en un plazo determinado = N° soluciones validadas/año.

2) Implementación de soluciones tecnológicas: definir una cantidad de tecnologías a ser implementadas en la industria en un plazo determinado = N° soluciones implementadas/año.

Modelación y actualización del rol de la siderurgia en la Estrategia Nacional de cambio climático de largo plazo y la NDC

Para poder involucrar al sector en el cumplimiento de la NDC de Chile, y dimensionar el nivel de reducción de emisiones esperados en este sector. Puede ser evaluada en el marco de un plan más amplio.

Plazo de Implementación: Segundo semestre 2021 - Cada 5 años

Responsables primarios: Ministerio de Medio Ambiente

Responsables secundarios: Ministerio de Energía y comité multilateral ya establecido

Presupuesto esperado: 150.000 USD

Fuente de financiamiento: Cofinanciamiento entre agencia de desarrollo y recursos públicos

Indicadores de impacto:

1) Reducción de emisiones por periodo: de acuerdo a las acciones definidas se determina una cantidad de emisiones por periodo de tiempo = kg CO₂e/año.

Estrategia de cambio climático para una empresa de la siderurgia (perspectiva sector privado)

Confirmar hipótesis anteriores, reevaluar escenarios de emisiones de GEI, necesidades tecnológicas, catastro de opciones tecnológicas y nivel de madurez, re-chequear costos y factibilidad de implementación de tecnologías, y actualizar plan de inversión

Plazo de Implementación: 2022 - Cada 2 años
Responsables primarios: Industria
Responsables secundarios: -
Presupuesto esperado: 100.000 USD
Fuente de financiamiento: Financiamiento privado

Indicadores de impacto:

- 1) Reducción de emisiones por plazo establecido: kg CO₂e/año;
- 2) Establecer metas de costos por reducción de emisiones: \$/kg CO₂e.

Programa para fomentar la innovación colaborativa entre la industria siderúrgica y otras industrias asociadas a esta

Necesario para facilitar la adopción de tecnologías bajas en carbono y poder apoyar la creación de consorcios tecnológicos multisectoriales, para acelerar la transición nacional hacia una economía baja en carbono y poder escalar tecnologías de mitigación de manera más costo-efectiva. Por ejemplo, para facilitar adopción de soluciones de economía circular y de tecnologías más avanzadas como la captura, uso y almacenamiento de carbono.

Plazo de Implementación: marzo 2022
Responsables primarios: CORFO para colaborar en establecer las oportunidades tecnológicas asociativas más relevantes; Industria del acero; Industrias y gremios en la cadena de valor del acero
Responsables secundarios: Centros académicos de investigación y universitarios.
Presupuesto esperado: 80.000 USD
Fuente de financiamiento: Financiamiento estatal

Indicadores de impacto:

- 1) Establecer un número de procesos de innovación colaborativa por periodos definidos = N° colaboraciones/año.
- 2) Definir una meta de reducción de emisiones por innovación abierta al año: kg CO₂e/año.

Diseño o ajustes a Instrumentos y garantías públicas que faciliten la obtención de la deuda para sectores con riesgo de transición climática.

Necesario para el financiamiento en inversión inicial, dados los altos costos de capital asociados a las tecnologías de mitigación, y la realidad financiera del sector (margen acotado).

Plazo de Implementación: Comenzar discusiones en segundo semestre 2021
Responsables primarios: Gerencia de Inversión y Financiamiento de CORFO
Responsables secundarios: Gremios sectoriales industriales
Presupuesto esperado: -
Fuente de financiamiento: Financiamiento estatal

Indicadores de impacto:

- 1) Establecer cantidad mínima de recursos monetarios disponibles por periodo de tiempo: \$/año.
- 2) Definir una meta de reducción por recursos entregados por periodo de tiempo: kg CO₂e/\$/año.

Preparar postulación para acceder a financiamiento del fondo verde del clima para el financiamiento de tecnologías de mitigación

Necesario para financiar tecnologías de mitigación más transformacionales con elevados potenciales de reducción de emisiones.

Plazo de Implementación: Comenzar evaluación de la postulación en el segundo semestre de 2021
Responsables primarios: Industria
Responsables secundarios: -
Presupuesto esperado: -
Fuente de financiamiento: Fondos no reembolsables del Fondo Verde del Clima

Indicadores de impacto:

- 1) Definición de una cantidad mínima de tecnologías a ser analizadas para financiamiento del fondo por periodo definido: N° tecnologías/tiempo.

Diseño de mecanismos de certificación para garantizar el atributo de sustentabilidad y darles trazabilidad a las bajas emisiones del acero.

A realizarse en coherencia con los lineamientos de Responsible Steel. Necesario para estandarizar los niveles de emisiones de GEI asociados a los productos de acero, y habilitar el mercado de acero verde.

Plazo de Implementación: Comenzar diseño en segundo semestre del 2021
Responsables primarios: ICHA; MMA
Responsables secundarios: Industria; Agencia de Sostenibilidad
Presupuesto esperado: 80.000 USD
Fuente de financiamiento: Financiamiento mixto entre industria y financiamiento estatal

Indicadores de impacto:

- 1) Definir cantidad mínima de reducción de emisiones que puedan ser trazadas por periodo de tiempo: kg CO₂e verificadas /año.

Creación de una plataforma de inteligencia de mercado, que permita identificar nichos de mercado estratégicos que demanden acero verde y otros productos estratégicos que se fabriquen en Chile, dentro de una estrategia nacional de oferta de productos bajos en emisiones

Necesario para posicionar a Chile como productor verde, y orientar el destino de la producción industrial del país en torno a futuras necesidades de desarrollo global bajo en carbono e identificar los consumidores dispuestos a pagar por la diferenciación de productos con sello verde en su cadena de valor.

Plazo de Implementación: Comenzar análisis y desarrollo a principios de 2022
Responsables primarios: Ministerio de Economía
Responsables secundarios: ICHA y se requerirá del involucramiento de gremios industriales relevantes (minería del cobre, acero, cemento, construcción, etc.)
Presupuesto esperado: 120.000 USD
Fuente de financiamiento: Financiamiento mixto entre industria y financiamiento estatal

Indicadores de impacto:

- 1) Identificación de cantidad mínima de nichos de mercado en un plazo determinado = N° de nichos/tiempo.
- 2) Definir una cantidad mínima de venta de acero verde: Toneladas acero verde vendida/año.

Desarrollo de programa de fomento para el uso de acero verde en construcción de infraestructura pública y viviendas, mediante certificaciones de construcción baja en emisiones

Incrementa los mercados diferenciados, y que permiten incorporar los costos del recambio tecnológico al precio del acero mediante el cumplimiento de metas y estándares constructivos bajos en carbono.

Plazo de Implementación: Comenzar discusiones en segundo semestre del 2021

Responsables primarios: ICHA; Ministerio del Medio Ambiente; Ministerio de Obras Públicas; Ministerio de Vivienda y Urbanismo

Responsables secundarios: Mesa de construcción sustentable (MINVU, Instituto de la construcción, DGOP, Secretaría de Medio Ambiente y Territorio); Mesa de trabajo de cambio climático del MOP; Industria

Presupuesto esperado: 100.000 USD

Fuente de financiamiento: Financiamiento mixto entre industria y financiamiento estatal

Indicadores de impacto:

1) Definir una cantidad mínima de venta de acero verde: Toneladas acero verde vendidas/año.

Levantamiento de capital en el mercado privado para financiamiento de tecnologías de mitigación

Es una estrategia necesaria para apalancar la inversión inicial, a través del financiamiento de inversionistas con la intención de financiar proyectos de acción climática.

Plazo de Implementación: En la medida que se necesite levantar financiamiento

Responsables primarios: Industria

Responsables secundarios: -

Presupuesto esperado: -

Fuente de financiamiento: Emisión de Bono Verde proveniente de la Industria o deuda privada

Indicadores de impacto:

1) Definir una cantidad de reducción emitida debido al financiamiento de esta fuente = $\text{KgCO}_2\text{e}/\text{\$}$

Establecer regulaciones que permitan controlar la entrada de acero intensivo en emisiones proveniente del extranjero (incluyendo emisiones vinculadas al transporte), en particular de países como China y México.

Necesario para controlar las fugas de carbono y conservar continuidad operativa de la industria nacional

Plazo de Implementación: Comenzar discusiones en segundo semestre 2021

Responsables primarios: SUBREI

Responsables secundarios: MMA, ICHA

Presupuesto esperado: -

Fuente de financiamiento: Financiamiento estatal

Desarrollo de estrategias de transferencia tecnológica para la siderurgia, en el marco de la Estrategia Desarrollo y Transferencia Tecnológica para el Cambio Climático (EDTTCC)

Necesario para traer las mejores prácticas internacionales en producción de acero baja en carbono, adaptadas a la realidad nacional, e incorporar a la industria en la estrategia de transferencia tecnológica para cambio climático.

Plazo de Implementación: Según el desarrollo de la ley de transferencia tecnológica, con inicio el 2020, que planifica actualizarse cada 5 años.

Responsables primarios: Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación.

Responsables secundarios: Vinculación de centros académicos con la Industria

Presupuesto esperado: -

Fuente de financiamiento: Co-financiamiento entre agencia de desarrollo y recursos públicos (Incluidos dentro del desarrollo de la EDTTCC)

Indicadores de impacto:

1) Definición de una cantidad mínima de mejores prácticas que sean implementadas en un periodo de tiempo = N° mejores prácticas /año

Desarrollo de un mercado de carbono local

Necesidad de mantener la competitividad de la industria y poder reflejar los mayores costos de producción por inversión en tecnologías limpias en la posibilidad de venta de offsets, condicionado a reglamento disponible de MMA.

Plazo de Implementación: Según el desarrollo de la Ley Marco de Cambio Climático y reglamento de offsets que emane de la Modernización Tributaria

Responsables primarios: MMA, ICHA

Responsables secundarios: Ministerio de Hacienda, Ministerio de Energía

Presupuesto esperado: -

Fuente de financiamiento: Co-financiamiento entre agencia de desarrollo y recursos públicos (Incluido dentro del costo de desarrollo de la Ley Marco de Cambio Climático y reglamentación de la reforma tributaria)

Indicadores de impacto:

1) Definir una relación entre el aumento en costos de producción y la venta de offsets que permita mantener competitividad = $\text{\$/Costos} / \text{\$/offsets}$

Programa para fomentar la innovación colaborativa entre la industria siderúrgica y la industria de cemento

La escoria que se genera en el proceso de Alto Horno es usada para producción de cemento, disminuyendo las emisiones de la fabricación del Clinker. Esto promueve el desarrollo de la economía circular en estas industrias

Plazo de Implementación: Segundo semestre 2022

Responsables primarios: Gremios del acero del cemento

Responsables secundarios: Ministerio de Medio Ambiente

Presupuesto esperado: -

Fuente de financiamiento: Privado- Estatal

Indicadores de impacto:

1) Definir cantidad de cemento producido por escoria proveniente de la industria del acero = $\text{\$/Ton} / \text{año}$

2) Cantidad de CO2 evitada por esta colaboración = $\text{Ton CO}_2\text{e/año}$

ÍNDICE

RESUMEN EJECUTIVO.....	I
Introducción.....	I
Metodología.....	I
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. PROCESO SIDERÚRGICO INTEGRADO, EMISIONES DE GEI, E IDENTIFICACIÓN DE OPCIONES TECNOLÓGICAS PARA LA DESCARBONIZACIÓN.....	5
2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO SIDERURGICO INTEGRADO.....	5
2.2. SIDERÚRGICA INTEGRADA EN CHILE.....	7
2.3. EMISIONES ASOCIADAS A LA PRODUCCIÓN DE ACERO.....	9
2.3.1. Iniciativas para la reducción de emisiones a escala global.....	10
2.3.2. Opciones Tecnológicas del Proceso Integrado.....	11
3. IDENTIFICACIÓN DE META DE REDUCCIÓN DE EMISIONES.....	19
3.1 CONTEXTO DE METAS DE REDUCCIÓN NACIONALES Y PARTICIPACIÓN DEL SECTOR EN EMISIONES GLOBALES.....	19
3.2 METODOLOGÍA DE CÁLCULO DE METAS Y TRAYECTORIA DE REDUCCIÓN DE EMISIONES.....	22
3.2.1 Fuentes de información para el cálculo de trayectoria.....	23
3.2.2 Resumen metodológico.....	26
3.2.3 Trayectoria de reducción de emisiones para el proceso integrado.....	26
3.2.4 Análisis de sensibilidad de la trayectoria de reducción de emisiones en torno a posibilidades de suministro energético mediante fuentes de energía renovable.....	31
3.2.5 Reflexiones en torno a las trayectorias de reducción de emisiones construidas.....	32
4. PLAN DE INVERSIÓN Y MODELOS DE NEGOCIOS.....	33
4.1. Confección de las Curvas MACC.....	33
4.1.1. Definiciones y precisiones.....	33
4.2 Priorización de Tecnologías en base al Análisis Multicriterio.....	35
4.2.1. Pasos del Análisis Multicriterio (AMC).....	36
4.3 Plan de inversión.....	37
4.3.1 Evaluación de proyectos.....	37

4.3.1.2	Metodología	y	supuestos	37
4.3.1.3	Resultados	y	caracterización de grupos de proyectos	38
4.3.2	Financiamiento para iniciativas priorizadas			39
4.3.2.1	Elementos de un esquema de financiamiento			39
4.4	Mecanismos de financiamiento seleccionados			42
5.	CONSOLIDACIÓN DE STAKEHOLDERS			46
5.1	Mapeo y análisis de stakeholders			46
5.2	Mapeo de stakeholders			46
5.2.1	Análisis de relaciones			47
5.1	Metodologías de trabajo con los grupos de interés			51
6	Análisis económico y definición de barreras para la adopción de tecnologías limpias en la siderurgia			54
6.1	Diagnóstico económico del mercado en condiciones actuales			54
6.1.1	Perspectiva macro del mercado del acero mundial			54
6.1.2	Análisis de equilibrio parcial del mercado de productos terminados de acero en Chile			55
6.1.3	Barreras a la adopción de tecnologías en el contexto global actual			59
6.2	Análisis de Barreras con la participación de Stakeholders			62
6.2.1	Taller participativo			62
6.2.2	Resultados			64
6.3	Entrevistas			66
6.4	Principales resultados del capítulo			68
7	Marcos institucionales, regulatorios y de fomento que faciliten la adopción de tecnologías de mitigación de GEI			69
7.1	Escenarios de políticas de instrumentos de precio al carbono			70
7.1.1	Estado del Arte			70
7.1.2	Simulación de Escenarios			72
7.1.3	Resultados (modelación de 4 escenarios)			74

7.2	Escenario de 'descomoditización' del acero	78
7.2.1	Premio al acero “verde”	78
7.3	Análisis de Marcos facilitadores con la participación de Stakeholders	83
7.4	Recomendaciones y propuestas de política pública	85
8.	Hoja de Ruta para la transferencia y adopción tecnológica	94
9.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Esquema de producción de acero en siderurgia nacional con proceso integrado	8
Figura 2	Evolución de consumo específico de reductores (principalmente coque y carbón pulverizado) en los altos hornos de la Comunidad Europea, de 1950 a 2015	11
Figura 3	Costo de captura en AUD 2008 por t de CO ₂ evitada, para las distintas unidades de proceso de las rutas integrada y semi integrada.	19
Figura 4	Proyecciones de calentamiento global hacia el 2100 bajo distintos escenarios	20
Figura 5	Objetivos de reducción de emisiones de empresas del sector acero en relación a las ambiciones del Acuerdo de París y objetivos de 2°C y muy bajo los 2°C.....	21
Figura 6	Desglose de las trayectorias de descarbonización que debe seguir cada sector en coherencia con una temperatura de 2°C para fines de siglo	24
Figura 7	Proyección del factor de emisión del SEN hacia el 2050	25
Figura 8	Trayectoria de reducción de emisiones del proceso integrado entre los años 2020 y 2050, incluyendo participación de cada alcance	30
Figura 9	Trayectoria de reducción de emisiones del proceso integrado entre los años 2020 y 2050, incluyendo trayectoria Business As Usual.....	31
Figura 10	Ejemplo Curva de Costo Marginal de Abatimiento (MACC)	34
Figura 11	Stakeholders relevantes identificados para la transición baja en carbono de la industria siderúrgica	47
Figura 12	Análisis de influencia e interés de los actores involucrados	48
Figura 13	. Matriz para análisis de Barreras a la oferta y la demanda	52
Figura 14	Participación de Chile en el Mercado del Acero	55
Figura 15	Equilibrio parcial mercado de productos de acero terminados, Chile 2017.....	56

Figura 16 Equilibrio mercado del acero 2010 v/s 2017	58
Figura 17 Precio del acero HRD en los mercados de USA, China, WEU y mundial (2002-2017) 59	
Figura 18 Simulación de un cambio tecnológico que incrementa el OPEX.	60
Figura 19 Costo de producción total por tonelada de acero crudo.....	61
Figura 20 Escenario 1 para proceso integrado.....	74
Figura 21 Escenario 2 para proceso integrado.....	75
Figura 22 Escenario 3 para proceso integrado.....	76
Figura 23 Escenario 4 para proceso integrado.....	77
Figura 24 Equilibrio mercado de acero tradicional vs mercado de acero verde.	81

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Procesos involucrados en plantas siderúrgicas integradas.....	6
Tabla 2. Producción de Acero por proceso en Chile al año 2018	7
Tabla 3. Evolución de las emisiones de CO2 y el consumo de energía por tonelada de acero líquido, 2003-2018	9
Tabla 4. Procesos más intensivos en emisiones en la siderurgia. Ruta integrada vs semi integrada	9
Tabla 5. Presupuesto de carbono asociado al proceso integrado	27
Tabla 6. Parámetros de entrada para cálculo de trayectoria de reducción de emisiones del proceso integrado	27
Tabla 7. Restricciones en trayectoria de reducción de emisiones para el proceso integrado. ..	29
Tabla 8 Grupos de proyectos para iniciativas seleccionadas.....	39
Tabla 9 Resumen de riesgos para el inversionista.	40
Tabla 10 Resumen de mecanismos de financiamiento	44
Tabla 11 Descripción de grupos de interés relevantes	48
Tabla 12 Barreras a la demanda y oferta de tecnologías identificadas para su priorización	63
Tabla 13 Barreras más significativas para la demanda de tecnologías identificada a partir de la participación de Stakeholders.....	64
Tabla 14. Barreras más significativas para la oferta de tecnologías.....	65

Tabla 15 Resumen de entrevistas con stakeholders.....	66
Tabla 16 Escenarios de simulaciones regulatorias.....	73
Tabla 17 Proyecciones de escasez de derechos de CO ₂ gratuitos.	79
Tabla 18 Medidas y actores para superar barreras a la demanda.....	84
Tabla 19 Medidas y actores para superar barreras a la oferta.....	84
Tabla 20 Resumen de propuestas de política pública	92
Tabla 21 Hoja de ruta, medidas de acción que podrían desarrollarte como parte de la política de descarbonización.....	94
Tabla 22 Indicadores de impacto.....	102

1. INTRODUCCIÓN

El principal objetivo de este trabajo es elaborar un análisis de necesidades tecnológicas para el desarrollo bajo en emisiones de la industria chilena de la siderurgia, con objetivos cuantificables y realistas acordados entre las principales partes interesadas, por lo que por medio de su publicación se espera contribuir en acelerar la transformación tecnológica necesaria. Éste pretende complementar los esfuerzos del sector y aportar con una base de trabajo conjunta entre el sector público y privado. Por tanto, la hoja de ruta que proporciona este estudio corresponde a un ejercicio vivo y dinámico, que irá evolucionando en el tiempo en función del contexto de la industria nacional que se ve influida por múltiples factores endógenos y exógenos.

La industria siderúrgica es uno de los mayores emisores industriales de CO₂, representando alrededor de 21% del uso global de energía industrial -segundo después de la industria química-, y alrededor del 24% de emisiones industriales de CO₂ en el mundo, lo cual representa entre el 4 y el 7% de las emisiones totales globales de dicho contaminante-. (Global Efficiency Intelligence, 2019). (SETIS, 2019)

El mercado global del acero es altamente competitivo, siendo China el principal productor y exportador (51,3% de la producción mundial en 2018). Se estima que **en 2018 la sobre capacidad instalada a nivel mundial fue de 560 millones de toneladas**, donde China es responsable del 50% (280 millones de toneladas), lo cual equivale a 4,1 veces el consumo de acero en América Latina (ALACERO, 2018). Uno de los principales destinos de exportación del acero chino es Chile⁵, representando las importaciones de productos de acero desde China un 61,2% del total de las importaciones en el mismo período (International Trade Administration, 2019).

Al ser un sector competitivo y muy intensivo en emisiones, este sector es altamente vulnerable a eventuales Instrumentos de Precio al Carbono (IPC). En Chile, un estudio recientemente desarrollado en el marco del Proyecto “Global Carbon Market”⁶ identificó a **la industria del acero⁷ como una de las más vulnerables ante futuros IPC**, dado que la aplicación de este tipo de instrumentos podría afectar fuertemente su competitividad. Adicionalmente, lo anterior implica una vulnerabilidad a nivel global en miras al cumplimiento de los compromisos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), ya que en este escenario se propiciaría una mayor penetración al mercado de acero proveniente desde países no regulados -China principalmente-, dando así lugar a fugas de carbono⁸ (IPCC, 2018).

⁵ En 2018 fue el 10° país de destino de las exportaciones de acero chino.

⁶ En el marco de la cooperación intergubernamental entre Chile y Alemania se encuentra en desarrollo el proyecto “Global Carbon Market (GCM)” de la GIZ (Sociedad Alemana para la Cooperación Internacional, o Deutsche Gesellschaft fuer Internationale Zusammenarbeit) que busca apoyar y complementar los esfuerzos del Gobierno de Chile en el desarrollo de instrumentos de precio al carbono y la exploración en financiamiento climático para contribuir con el cumplimiento de las metas de mitigación de gases de efecto invernadero comprometidas por el país en el marco del Acuerdo de París sobre Cambio Climático. Como parte del mismo, en el año 2018 ImplementaSur ejecutó el Estudio “Análisis de antecedentes para determinar las brechas tecnológicas existentes para la implementación de tecnologías limpias, en los sectores industriales expuestos al riesgo de una transición baja en carbono.” Disponible en: http://4echile.cl/4echile/wp-content/uploads/2018/08/Informe-Sectores-con-riesgo-de-transicio%CC%81n-clim%C3%A1tica_31.07.2018-version-FINAL_GIZ.pdf

⁷ En conjunto con la industria del cemento y de refinería de combustibles.

⁸ Este fenómeno se define como el efecto de que una regulación orientada hacia acciones nacionales de mitigación genere aumento de las emisiones de CO₂ en otra jurisdicción.

La implementación de IPC con miras a satisfacer las metas de reducción del Acuerdo de París por parte del gobierno chileno⁹, se estudia actualmente en el marco de la iniciativa *Partnership for Market Readiness* (PMR) del Banco Mundial¹⁰. Los resultados de dicha iniciativa remarcan la necesidad de preparar a sectores que se identifican como vulnerables, destacando por un lado el fortalecimiento del estudio de las necesidades tecnológicas de descarbonización, y por otro el establecimiento de un marco regulatorio que favorezca dicha transición (World Bank, 2017).

En el contexto mencionado, el presente estudio apunta al establecimiento de las necesidades de recambio tecnológico, de las capacidades del sector de la siderurgia en Chile, y los marcos facilitadores requeridos, para transitar hacia una economía baja en carbono en línea con las metas de reducción acordadas a nivel global, con particular atención en mantener la competitividad del sector.

Específicamente, se busca que las recomendaciones del estudio puedan traducirse en (i) acciones concretas de política pública, (ii) involucrar al sector privado en la implementación de estas acciones y, por último, en (iii) la creación de un ecosistema habilitante para la movilización y realización de las inversiones necesarias en la transformación tecnológica del sector.

El Estudio consideró en una primera instancia, el estudio de los procesos para la producción de acero, con énfasis en el análisis del origen de las emisiones de CO₂ emitidas en cada etapa. Con esta base, se llevó adelante un análisis de benchmark de las opciones tecnológicas disponibles para la mitigación de GEI, sistematizando la información disponible respecto del CAPEX, OPEX, potencial de abatimiento, ahorros que genera, reducción en el uso de la energía, y nivel de madurez.

Por otra parte, se determinaron las metas de reducción del sector a nivel nacional, y la trayectoria de reducción requeridas para el logro de los objetivos del acuerdo de París¹¹, tomando como base para el establecimiento de objetivos las ambiciones que establece la ciencia, en particular la iniciativa global conocida como Science Based Targets (SBT), y considerando escenarios de descarbonización de la matriz energética.

Con toda esta información, se construyeron Curvas de Costos Marginales de Abatimiento (MACC por sus siglas en inglés), que asignan un orden de mérito a las tecnologías en función de su costo efectividad, incluyéndose en el plan las tecnologías necesarias para lograr cumplir la trayectoria con horizonte 2050.

Con la etapa anterior se levantó la situación global y local de la industria del acero en relación a sus emisiones de CO₂, para evaluar los escenarios de descarbonización, y las medidas

⁹ En febrero de 2017, durante la vigésimo primera reunión de la conferencia de las partes de la convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático, Chile ratificó dicho acuerdo. Soporte en línea <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=1103158>

¹¹ El año 2015, 193 países -entre ellos Chile- firmaron el Acuerdo de París acordando limitar el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de 2 °C con respecto a los niveles preindustriales y proseguir los esfuerzos para limitar ese aumento de la temperatura a 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales, reconociendo que esto reduciría considerablemente los riesgos y los efectos del cambio climático.

tecnológicas necesarias y técnicamente factibles, para el cumplimiento de las metas de descarbonización, en un escenario teórico.

Ahora bien, la implementación del Plan de Inversión para el cumplimiento de las metas de reducción depende de las condiciones particulares de la industria, de su situación en relación a los mercados internacionales, y requiere por otra parte, de un contexto normativo, político y económico que fomenten la inversión, principalmente considerando la sensibilidad de los precios del acero y la vulnerabilidad de la industria, dada la configuración del mercado global.

En este sentido, para la definición de la hoja de ruta se consideró, por un lado, el análisis de contexto internacional de mercado, y por otro la identificación e involucramiento de actores claves relevantes. Se entiende de esta forma, que para el éxito en la implementación del Plan, se requerirá un estrecho vínculo de colaboración y del establecimiento de metas, acciones y esfuerzos compartidos, entre actores del sector público y privado (SDSN, 2019), (J. Rockström, O. Gaffney, M. Meinshausen, N. Nakicenovi, H. Schellnhuber, 2017). Cabe mencionar que para el involucramiento de actores relevantes se aplicaron diversas metodologías, en función del tipo de información a levantar, y del nivel de involucramiento e influencia del actor.

Finalmente, y como resultado de esta fase, se presenta una hoja de ruta para la transición baja en carbono, en que se resumen las medidas a seguir en función de las barreras y marcos facilitadores identificados en forma participativa en conjunto con los actores relevantes, especificando en cada caso el plazo, responsable, recursos, KPI y medio de verificación.

Es relevante mencionar respecto del alcance del estudio que, durante su desarrollo, en la primera fase se concluyó que las emisiones asociadas al proceso semi integrado se asocian principalmente al consumo eléctrico, en contraste con el proceso integrado, donde las emisiones son inherentes a la fabricación del acero, y se producen principalmente como resultado de una reacción química. Como consecuencia de la descarbonización proyectada de la matriz eléctrica nacional, que irá disminuyendo el factor de emisión del Sistema Eléctrico Nacional de manera sustantiva¹², se espera una reducción análoga en las emisiones del proceso semi integrado. En este sentido, los esfuerzos del gobierno para facilitar la descarbonización de la matriz eléctrica son relevantes para esa ruta productiva. En especial el rol del Ministerio de Energía en la promoción e impulso de la salida de centrales a carbón del sistema eléctrico, y además establecer un papel activo en la NDC para las emisiones provenientes del sector industrial¹³.

Por otra parte, las brechas de necesidades tecnológicas a las cuales se ve expuesto el proceso integrado han demostrado ser considerablemente más complejas y urgentes, lo cual deja a estas siderúrgicas mucho más expuestas a los costos asociados a la aplicación de instrumentos de precio al Carbono (IPC) u otras intervenciones de políticas climáticas que a las siderúrgicas que

¹² Para el año 2019 el factor de emisión de la red eléctrica correspondía a 0,36 toneladas de CO₂-equivalente por MWh, mientras que las proyecciones del factor de emisión a 2025 y 2040 corresponden a 0,13 y 0,03 toneladas de CO₂-equivalente por MWh respectivamente, según las proyecciones realizadas por el Ministerio de Energía a agosto del 2019.

¹³ En este sentido, la meta de mayor nivel de ambición de la NDC (o condicionada al financiamiento internacional) podría integrar los esfuerzos de mitigación de emisiones para el proceso integrado.



producen mediante el proceso semi integrado (IIGCC, 2019). En este contexto, y en conjunto con la contraparte, se determinó continuar las siguientes fases del Estudio enfocados en el proceso productivo Integrado.

2. PROCESO SIDERÚRGICO INTEGRADO, EMISIONES DE GEI, E IDENTIFICACIÓN DE OPCIONES TECNOLÓGICAS PARA LA DESCARBONIZACIÓN

Existen principalmente dos rutas productivas para la fabricación de acero: el proceso integrado basado en la producción primaria de hierro desde el mineral, y el semi integrado basado en el uso de chatarra como fuente principal de acero¹⁴ (World Steel Association, 2019). La ruta integrada consume alrededor de 80% más de energía que el proceso semi integrado, y representa cerca del 70% de la producción global, proporción que se mantiene a nivel local. (IPCC, 2006)

Dado lo anterior, el primer paso para el establecimiento de una hoja de ruta que oriente a la siderurgia integrada a transitar a la economía baja en carbono es conocer el proceso productivo, para así comprender el origen de las emisiones, y orientar la búsqueda de opciones tecnológicas y medidas de abatimiento concretas y precisas.

A continuación, se presenta la ruta productiva, en términos genéricos, se profundiza sobre las emisiones asociadas a cada paso de la ruta, y se exponen las principales tecnologías identificadas para su mitigación, las cuales fueron consideradas posteriormente para el Plan de Inversión (Ver capítulo 4).

2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO SIDERURGICO INTEGRADO

Conocida también como ruta primaria, se basa en la obtención del acero desde el mineral de hierro. Representa la mayor parte del CO₂ emitido por la industria siderúrgica, principalmente debido al uso del carbono para convertir el mineral de hierro en hierro metálico. Esta ruta se caracteriza por incluir dentro del proceso, dos hornos, el alto horno (AH) y el convertidor al oxígeno (BOF por sus siglas en inglés), que operan secuencialmente.

El carbono se suministra al AH junto a las pellas, las granzas y el sínter de mineral de hierro, principalmente bajo la forma de **coque** producido a partir de mezclas de carbones coquizables. El carbono cumple varias funciones en el proceso de fabricación del arrabio: es el agente reductor para convertir los óxidos de hierro en hierro, proporciona calor, al reaccionar con el oxígeno en forma exotérmica, y sostiene la carga en el alto horno. El mineral de hierro es reducido, eliminando el O₂ -generando como consecuencia CO₂-, obteniendo arrabio, que contiene un 95% de hierro.

La **producción de acero en los BOF** comienza por la carga del convertidor con un 70–90 % de arrabio y un 10–30 % de chatarra de acero. El oxígeno de gran pureza se combina luego con el

¹⁴ Existe otra vía de producción de acero que representa un 0,4% de la producción mundial, denominada Siemens Martin, pero no se analiza dicha ruta por no existir actualmente en la siderurgia nacional.

carbono contenido en el arrabio para desatar una reacción exotérmica que funde la carga, al tiempo que el contenido de carbono disminuye. El arrabio contiene cerca del 4 % de carbono, el cual debe ser reducido a cerca de 0,1%. Una vez obtenido el acero, es afinado en instalaciones ad-hoc, colado en instalaciones de colada continua y conformado en laminadores

Alrededor del 89% del aporte energético de un sistema integrado (AH-BOF) proviene del carbón y sus derivados, 7% de electricidad, 3% de gas natural y 1% de otros gases y fuentes. Hasta el 75% del contenido de energía del carbón en una instalación integrada se consume en el alto horno.

A continuación, se presenta un resumen de los procesos involucrados en la ruta integrada.

Tabla 1. Procesos involucrados en plantas siderúrgicas integradas

PROCESOS INVOLUCRADOS EN SIDERÚRGICA INTEGRADA
(1) Producción de coque
(2) Producción de sinter
(3) Producción de arrabio
(4) Producción de acero crudo
(5) Metalurgia de cuchara
(6) Colada continua
(7) Laminación en caliente y en frío
(8) Preparación de productos terminados
La ruta integrada ocupa como insumos el mineral de hierro ¹⁵ , coque, caliza, chatarra y oxígeno para la fabricación de acero. El mineral de hierro en forma de pellas, granzas y sinter ingresa en conjunto con el coque y la caliza al alto horno, donde es sometido a una reacción de reducción y fusión a altas temperaturas. El resultado de este primer proceso es el arrabio líquido, que luego ingresa a la acería (BOF), donde en conjunto con chatarra y oxígeno pasa a formar acero líquido, que posteriormente será afinado, solidificado y laminado en caliente.

Fuente: Elaboración propia 2019, en base a United States Environmental Protection Agency, 2012.

¹⁵ El mineral de hierro utilizado corresponde a menas del hierro, es decir, rocas que contienen porcentajes variables de concentración de hierro.

2.2. SIDERÚRGICA INTEGRADA EN CHILE

La producción de acero por proceso en Chile al año 2018¹⁶ se muestra en la **Tabla 2** siendo la ruta integrada la que alcanza el mayor porcentaje.

Tabla 2. Producción de Acero por proceso en Chile al año 2018

MILLONES DE TONELADAS	RUTA INTEGRADA%	RUTA SEMI INTEGRADO%
1,1	68,9	31,1

Fuente: Elaboración propia 2019, en base a World Steel in Figures, 2019.

La producción anual promedio que resulta de la ruta integrada es de 758.000 t acero líquido / año.

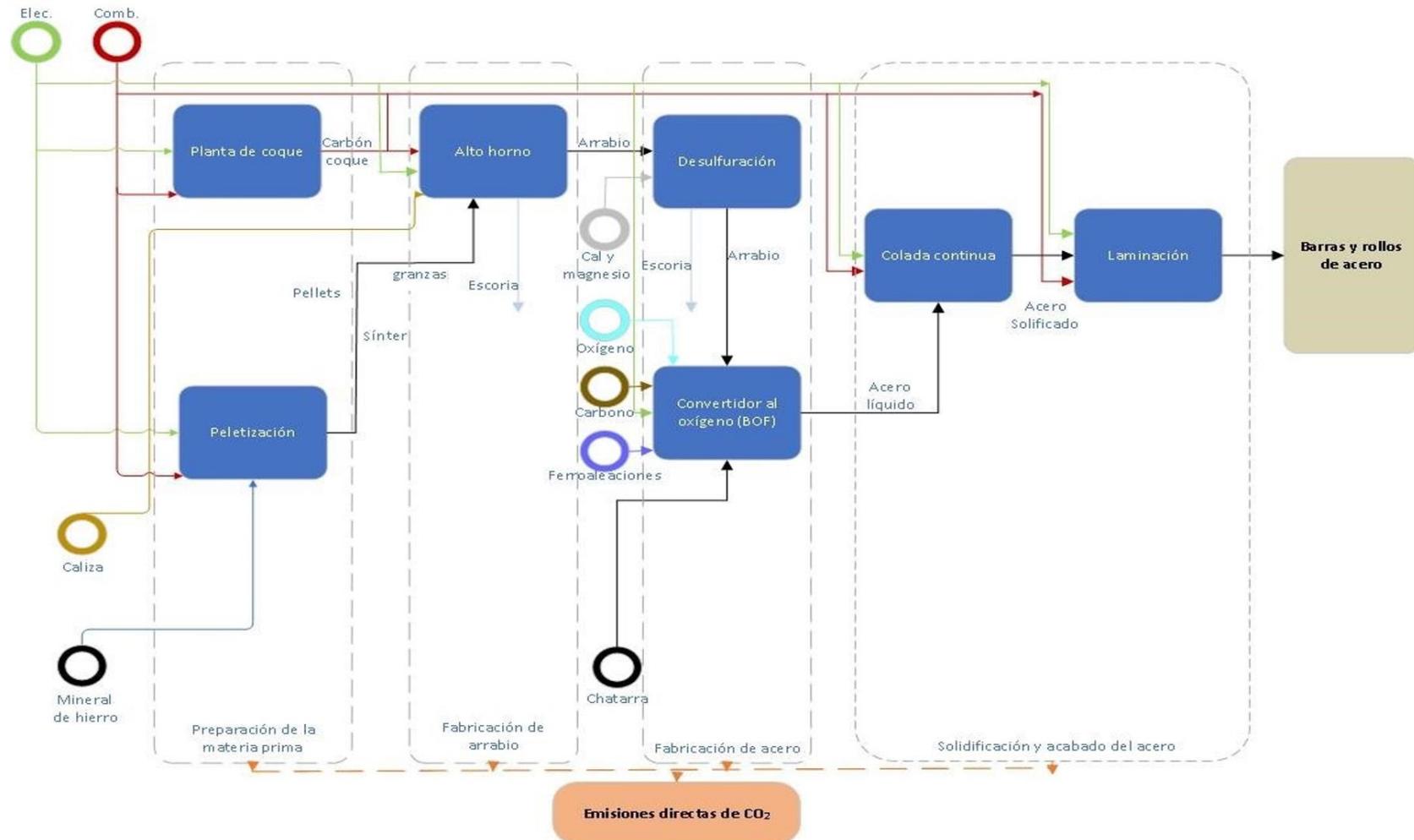
A partir de este acero, se laminan **exclusivamente productos largos** como barras para la producción de barras y bolas para molienda¹⁷, alambión, barras para refuerzo de hormigón y alambión y barras de aceros especiales, **con foco en clientes locales**.

A continuación, se presenta un esquema que representa el proceso integrado de la industria.

¹⁶ World Steel in Figures 2019. Disponible en <https://www.worldsteel.org/steel-by-topic/statistics/steel-statistical-yearbook/World-Steel-in-Figures.html>

¹⁷ Las barras y bolas de molienda para la minería, requieren para su fabricación de un acero de mejor calidad. Y mayor contenido de carbono, que en general solo se puede obtener de procesos integrados o basados en materias primas de alta calidad.

Figura 1 Esquema de producción de acero en siderurgia nacional con proceso integrado



Fuente: Elaboración propia en base a IEA Technology Roadmap, 2019.

2.3. EMISIONES ASOCIADAS A LA PRODUCCIÓN DE ACERO

Las emisiones específicas de CO₂ de la siderúrgica han aumentado en lo que va de este siglo, debido a la irrupción de China como primer productor, siguiendo preferentemente la ruta alto horno – acería al oxígeno, por la escasez de chatarra¹⁸ y de energía eléctrica. Las emisiones totales también crecieron, siguiendo el ritmo del aumento de la producción de acero (ver siguiente tabla).

Tabla 3. Evolución de las emisiones de CO₂ y el consumo de energía por tonelada de acero líquido, 2003-2018

	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
tCO ₂ /t de acero crudo	1,6	1,7	1,7	1,7	1,8	1,8	1,8	1,8	1,7	1,8	1,8	1,9	1,9	1,9	1,8	1,8
GJ/t de acero crudo	19,0	19,1	20,0	20,6	20,8	20,8	20,1	20,7	19,6	20,0	20,1	20,2	20,3	19,9	19,9	19,8

Fuente: Informes de sustentabilidad de Worldsteel Association, 2003-2018¹⁹.

Cabe destacar que tanto la intensidad como el origen de las emisiones de CO₂ son diferentes para el proceso integrado y semi integrado, el presente informe se enfoca en la ruta integrada. A continuación, la tabla 4 resume los procesos más intensivos en emisiones de ambas rutas.

Tabla 4. Procesos más intensivos en emisiones en la siderurgia. Ruta integrada vs semi integrada

PROCESOS MÁS INTENSIVOS EN EMISIONES DE GEI	EMISIONES DIRECTAS TOTALES DE CO ₂ (TCO ₂ /Tacero)	
	Proceso Integrado	Proceso Semi integrado
Planta de coque (Coquería)	0,824	
Alto Horno	1,279	
Convertidor al oxígeno (BOF)	0,202	
Horno eléctrico de arco (EAF)		0,240
Laminación	0,09	0,09
TOTAL	2,395	0,33

Fuente: Adaptado de (Pardo, Moya, & Vatopoulos, 2012)

Lo determinante en la ruta integrada es la necesidad de utilizar coque y carbón en el alto horno para reducir el óxido de hierro a hierro metálico, independientemente de la unidad de proceso

¹⁸ Se considera que el reciclaje de chatarra podría disminuir las emisiones, pero esto sería así solo en el caso de que esta chatarra reciclada sea utilizada por una industria local de fabricación de acero. En caso contrario, la chatarra se exporta, lo que aumentaría la huella de carbono.

¹⁹ Soporte en línea <https://www.worldsteel.org/steel-by-topic/sustainability/sustainability-indicators.html>.

en que se produzcan las emisiones. En las diversas unidades de proceso, se consumen gases de alto horno, coquería, y eventualmente acería, que generan emisiones. Así sucede en la coquería, las estufas para el calentamiento del aire para el soplo en el alto horno, la central térmica, los hornos de laminación en caliente y otros procesos que requieren combustión. Pero independientemente de dónde se emita el CO₂, lo central son las medidas tendientes a disminuir el consumo de coque como agente reductor.

2.3.1. Iniciativas para la reducción de emisiones a escala global

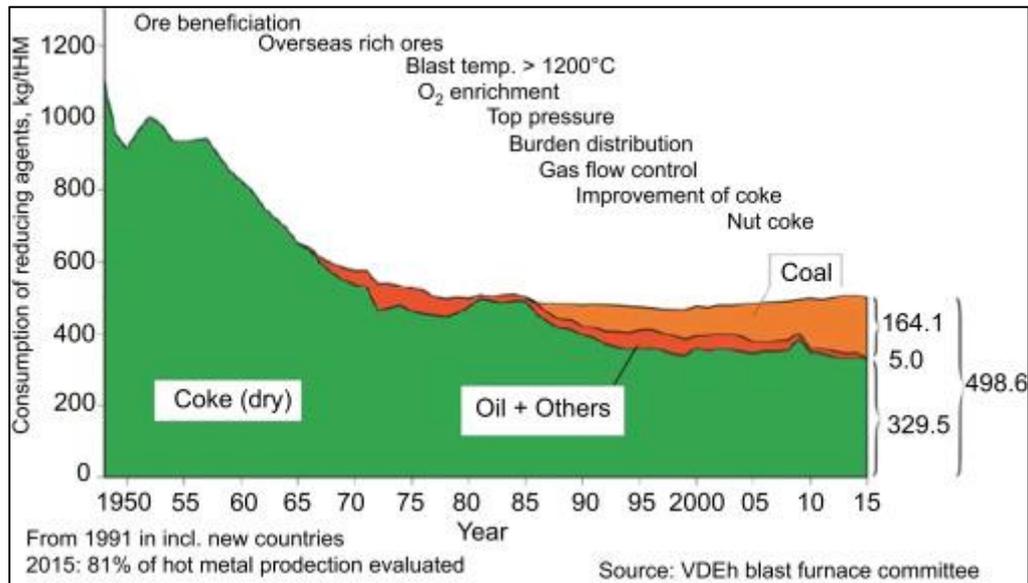
Una de las prioridades de la *Worldsteel Association*, ha sido incentivar a las empresas a aumentar su sostenibilidad y mitigar las emisiones de los procesos productivos. Para lo anterior, las alianzas de gobiernos y la industria del acero han sido crucial en el desarrollo de nuevas tecnologías que permitan avanzar hacia la reducción de CO₂ en la industria del acero. La estrategia europea financiada en parte por el programa de investigación y desarrollo Horizon2020 y gobiernos europeos, ha financiado, en conjunto con las grandes empresas, iniciativas para desarrollar tecnologías que permitan disminuir las emisiones de CO₂ en ambas rutas de producción con énfasis en los procesos más intensivos en emisiones.

A título de ejemplo, la Comunidad Europea organizó el programa ULCOS (Ultra Low CO₂ Steelmaking), de tipo público-privado, que lanzó varias iniciativas, algunas de las cuales continúan vigentes bajo otros programas y otras han sido permanente o transitoriamente discontinuadas.

De manera similar, el Japón lanzó en 2007 la iniciativa COURSE 50 (CO₂ Ultimate Reduction in Steelmaking Process by Innovative Technology for Cool Earth 50) para desarrollar tecnologías para reducir las emisiones de CO₂ en un 30% hacia el año 2030, con diversas tecnologías que implican mejoras en la preparación de las materias primas y en la operación de los altos hornos, incluyendo la captura del CO₂ del gas de tope. Este programa continúa en la actualidad según lo planeado inicialmente, con participación de empresas siderúrgicas e investigadores de universidades relacionadas.

La siderurgia de Europa y Japón ha logrado avances muy significativos en la reducción de consumo de coque (Figura 2), pero a medida que el consumo se acerca al mínimo técnico es necesario introducir cambios más sustanciales.

Figura 2 Evolución de consumo específico de reductores (principalmente coque y carbón pulverizado) en los altos hornos de la Comunidad Europea, de 1950 a 2015



Fuente: Madias J., 2017.

2.3.2. Opciones Tecnológicas del Proceso Integrado

Las opciones tecnológicas se pueden dividir en dos categorías principales: tecnologías de mitigación de carácter incremental (corresponden a mejoras incrementales en base a las soluciones de producción de acero vigentes, como por ejemplo derivadas de la eficiencia energética); y las tecnologías de mitigación basadas en una solución alternativa para la producción de acero (innovaciones de gran escala que pueden implicar inversiones en nueva capacidad productiva o nuevas etapas para el proceso de producción de acero). Las primeras son más conocidas por la industria, y generalmente están dependientes a la actual operación de producción de acero (serán llamadas “**tecnologías de mejora incremental**”), mientras que las últimas son más disruptivas al proceso, pueden estar en una etapa pre-comercial y serán llamadas “**tecnologías transformacionales**”.

Opciones tecnológicas incrementales (basadas en la optimización del alto horno)

Inyección de combustibles sólidos, líquidos o gaseosos por las toberas, para disminuir el consumo específico de coque.

La inyección de carbón pulverizado es el camino que han seguido la gran mayoría de los altos hornos. Una marcha típica de los altos hornos de mejor performance en este aspecto es con 300 kg de coque y 200 kg de carbón pulverizado/ t arrabio. La introducción de esta tecnología implica generalmente las instalaciones para la recepción del carbón, molienda, silos de carbón molido, transporte por cañería, dispensador para inyección, y lanza para la inyección por las toberas. El

menor consumo de coque implica la necesidad de un coque con mejores propiedades a alta temperatura que el utilizado convencionalmente²⁰.

La inyección de fuel oil, popular hace algunas décadas, se ha ido abandonando en favor de la inyección de carbón, la inyección de gas natural y de propano en los altos hornos, particularmente luego de las crisis del petróleo.

En noviembre de 2019 ha comenzado en ThyssenKrupp Duisburg una prueba de inyección de hidrógeno a través de una tobera, en el alto horno 9. Esto se espera extender a las 28 toberas, en el marco de un programa de 14 meses, de 2,7 MM EUR, solventado parcialmente por el gobierno de la región de Nordrhein Westfalia. Se espera inyectar 11,4 kg de hidrógeno por t de arrabio (TKS, 2019). El hidrógeno es provisto por Air Liquide, que estaría empleando el proceso de adsorción por oscilación de presión (PSA, por sus iniciales en inglés), a partir de metano.

También hay experiencias industriales en la inyección de materiales carbonosos neutros, en particular de desechos plásticos o de biomasa. Los altos hornos que utilizan plásticos de descarte en Alemania, Austria y Japón, consumen de 40 a 70 kg/t (Madias, 2013). La inyección de finos de carbón vegetal por las toberas es practicada por diversas plantas brasileñas que operan altos hornos a carbón vegetal, debido a que este reductor genera muchos finos en su manipulación desde el horno de carbonización de la madera hasta el alto horno. Algunas son siderúrgicas integradas y otras son productores de arrabio que se comercializa para acerías eléctricas (Madias, 2014). La inyección de estos desechos plásticos además aporta el desarrollo de la economía circular de la industria.

Mini altos hornos a carbón vegetal.

El uso de carbón vegetal en lugar de carbón como materia prima para las plantas BF-BOF es una tecnología madura, que se ha aplicado en Brasil en una escala significativa. Sin embargo, el potencial total para esto en todo el mundo está severamente limitado por el suministro de biomasa. Esta fue la forma en que se desarrolló inicialmente la producción de arrabio en altos hornos en Europa Occidental, hasta que el coque reemplazó al carbón vegetal, en el siglo XVIII. En la actualidad esta tecnología se mantiene exclusivamente en Brasil. Ha sido adoptada por plantas integradas con acería al oxígeno (Gerdau Barão de Cocais, Aperam, Aço Verde Brasil), con horno EAF (Gerdau Divinópolis) y por acerías eléctricas (Vallourec Jeceaba, SINOBRAS, ArcelorMittal Juiz de Fora, GV do Brasil Cariacica) y por decenas de productores de arrabio para la venta a acerías eléctricas de Brasil y Estados Unidos (“guseiros”) (Madias, 2014).

Este reductor es considerado neutro en carbono, debido a la absorción de CO₂ por los árboles. Sin embargo, hay emisiones indirectas, que han sido abordadas en Brasil mediante acciones para sustituir madera de selva nativa por plantaciones forestales y controlar las emisiones de metano en el proceso de carbonización (Ministerio del Medio Ambiente de Brasil, 2010)

²⁰ Se estima que 11,4 kg de carbón reemplazan 10 kg de coque (Geerdes, 2015). El costo de inversión de la instalación necesaria está en el orden de 22 a 30 USD/t arrabio, para una instalación de hasta 150 kg/t arrabio.

Las limitaciones de los altos hornos a carbón vegetal son el abastecimiento de carbón vegetal, y que debido a su baja resistencia, la altura del horno y por ende su capacidad de producción, está restringida. Típicamente se emplean mini altos hornos, de hasta 500 m³ de volumen útil.

La producción de aglomerados auto-reductores.

Esta tecnología es aplicada en plantas japonesas, y el potencial de abatimiento de emisiones de GEI deriva del menor consumo de coque. Se ha informado un resultado industrial en el alto horno No. 6 de Oita (Nippon Steel & Sumitomo Metals Corporation) de un descenso en el consumo de coque de 14 kg/t arrabio para el uso de 2,1 % de aglomerado en la carga. Es importante señalar que esta no es en principio una tecnología en oferta, sino que requeriría de un desarrollo en la planta de TMS International y el alto horno, con los recursos humanos y económicos necesarios, y con una duración de uno a tres años.

La turbina de recuperación de gas de tope (TRT, por su sigla en inglés).

Esta opción tecnológica permite utilizar la presión del gas de tope de los altos hornos para producir electricidad, lo cual ha sido llevado a cabo en 28 plantas de la Unión Europea (Pardo, Moya, & Vatopoulos, 2012).

Reciclado del gas de tope, previa separación del CO₂.

La presente opción tecnológica consiste en recuperar el gas de tope del alto horno para luego separar el CO₂, y utilizar el oxígeno disponible en este gas en lugar de aire para el soplo. En el marco del proyecto ULCOS se experimentó exitosamente en el alto horno piloto de LKAB, separando el CO₂ en una planta VPSA e inyectando por toberas y cuba el gas reductor remanente (Madias, 2017).

Los planes para la aplicación a nivel industrial en ArcelorMittal Florange, que incluían el almacenamiento del CO₂ en una napa salina, fueron suspendidos por el cierre de esta planta en la crisis de 2008; tampoco se concretó en ArcelorMittal Eisenhüttenstadt, donde no se iba a hacer almacenamiento (*J.P. Birat, comunicación privada, noviembre 2019*). En Japón prosigue el desarrollo a escala piloto, bajo el programa COURSE50 ya mencionado²¹.

²¹ El costo de inversión de la captura de CO₂ mediante una planta VPSA para un alto horno con reciclado del gas de tope se ha estimado en 50 EUR/t/año para una planta VPSA (Carpenter, 2012). El potencial de abatimiento se estimó inicialmente en al menos 50% (A. Hirsch, 2012).

Automatización de estufas.

Corresponden a construcciones en material refractarios en las que se calienta el aire de soplo para los altos hornos, mediante el intercambio de calor con los refractarios mencionados calentados previamente mediante la combustión de un gas (gas de alto horno, gas de coquería, gas natural, etc.). Existen diversos diseños: combustión externa, combustión interna, combustión central, combustión por el tope (tipo Kalugin).

Las iniciativas de automatización del control se pueden subdividir en a) mejora continua del control existente; b) desarrollo propio de un sistema nuevo; c) adquisición de un sistema nuevo propuesto por un proveedor.

Apagado en seco del coque (CDQ, por su sigla en inglés).

En lugar del apagado convencional, consistente en el derrame de un gran volumen de agua en una torre de apagado, se utiliza una cámara de enfriamiento revestida con refractarios por la que se circula nitrógeno para eliminar la combustión del coque al rojo. El calor del nitrógeno luego del uso se emplea para generar vapor y con el vapor se genera electricidad. Luego de enfriado, el nitrógeno se vuelve a emplear en la cámara de apagado (Madias, 2014).

Opciones tecnológicas transformacionales.

Las siguientes medidas implican el reemplazo del alto horno y BOF (reducción directa a hidrógeno + EAF, electrólisis + EAF) o del alto horno solamente (fusión reductora). A continuación, se incluye una descripción breve del estado de desarrollo de cada una.

Reducción directa a hidrógeno y fusión en horno de arco eléctrico.

La cinética de reducción con hidrógeno es cuatro veces más rápida que con monóxido de carbono (proceso actual), y se ve favorecida por temperaturas más elevadas. La limitación está en la disponibilidad y precio del aprovisionamiento de hidrógeno. Hoy se producen unos 50 millones de t/año de hidrógeno, por diversos procesos y para varias aplicaciones (Argenta, 2019)²².

Esta tecnología no opera como un sustituto del alto horno, sino que compite con la chatarra premium en el suministro de metálicos para hornos eléctricos de arco. Esta tecnología presenta el atractivo de que su implementación industrial no parece lejana, teniendo en cuenta ensayos en escala piloto en Monterrey (México), y el éxito de la reducción directa a gas natural²³.

La viabilidad económica de esta tecnología depende altamente de la disponibilidad de energía eléctrica limpia de bajo costo²⁴, o de altos precios para las emisiones de carbono. El potencial de

²² Para la producción masiva y a bajo costo de hidrógeno requerida por la reducción directa está la alternativa de electrólisis del agua a temperatura ambiente, que ya se está aplicando industrialmente, y la electrólisis a alta temperatura, para disminuir el consumo de energía.

²³ La reducción directa a hidrógeno basada en gas natural ha alcanzado ya una producción anual de 100 Mt y es un proceso establecido, que funciona en países con baja disponibilidad de chatarra y disponibilidad de gas natural y electricidad.

²⁴ Según la referencia "Decarbonization of Industrial sectors: The next frontier" de McKinsey & Company, para plantas existentes de proceso integrado, la opción de mitigar vía reducción mediante hidrógeno verde se vuelve más competitiva que la captura y almacenamiento de carbono, con precios bajo los 50 USD/MWh. Otras referencias indican un costo de inversión de 574 EUR/t/año, donde el costo de la planta de electrólisis es de 180 EUR/t/año, el de la reducción directa a gas natural es de 184 EUR/t/año, y el del

abatimiento puede llegar hasta el 95%. Aquí el límite es la necesidad de cierto contenido de carbono en el hierro esponja, para acelerar la fusión en el horno eléctrico mediante el aporte de energía química, y para la formación de escoria

espumosa, que permite aplicar la máxima potencia eléctrica.

Aún quedan desafíos para la reducción utilizando hidrógeno. Estos están relacionados con la integración de procesos, las cualidades del producto final, el escalamiento de la infraestructura de hidrógeno (producción y almacenamiento) y la integración de energía renovable variable como fuente para la producción de hidrógeno verde para una acería. A la fecha están en desarrollo varios proyectos de investigación aplicada y de innovación, que busca abordar algunos de estos desafíos:

- Proyecto Hybrit (Vattenfall + SSAB + LKAB). Este consorcio está construyendo, con ingeniería de Tenova (hoy Energiron, originalmente HyL), una planta piloto de reducción directa a hidrógeno en la planta siderúrgica de SSAB en Lulea, Suecia, con una capacidad de 1 -2 t/hora de hierro esponja, operando con pellas de LKAB. El costo del proyecto está estimado en 130 MM EUR, de los cuales la tercera parte es aportada por la Agencia Sueca de la Energía y el resto por las tres empresas del consorcio. Esta planta estaría disponible en 2021, y operaría hasta 2024. De 2025 a 2030 se entraría en la fase de planta de demostración. En 2025 se reemplazaría el alto horno y la acería al oxígeno de SSAB Oxelösund por un horno eléctrico de arco y en 2030 - 2040 los altos hornos restantes en Lulea y Raha (Finlandia) por la reducción directa a hidrógeno más horno eléctrico, llegando la empresa a ser libre de combustibles fósiles para 2045²⁵.
- El proyecto de ArcelorMittal: Este grupo, el de mayor producción de acero en el mundo, ha establecido el objetivo de ser neutral en carbono para el año 2050. Para esto explora los caminos de la electrólisis, la captura y aplicación del CO₂ y la reducción directa a hidrógeno. Para esta última, se está construyendo una planta de demostración de 100.000 t/año de hierro esponja, con ingeniería de Midrex Technologies, en ArcelorMittal Hamburgo, la única siderúrgica con reducción directa a gas natural existente en Europa. El costo del proyecto se estimó en 65 M EUR. El hidrógeno provendrá inicialmente del gas emitido por la planta de reducción directa existente (hidrógeno gris). La Universidad de Freiberg aportará estudios básicos.
- La siderúrgica alemana Salzgitter también ha optado por la reducción directa bajo hidrógeno con producción de hierro esponja y fusión en horno eléctrico, en el marco del proyecto SALCOS. A su vez, con otros socios, investiga la producción de hidrógeno en el marco del proyecto GrInHy.

horno eléctrico de 230 EUR/t/año, un 30% mayor que para una planta integrada (Wörtler, 2013). El costo operativo se ha calculado entre 361 a 640 EUR/t, para precios de electricidad de 20 a 100 EUR/MWh. Es más alto que para la ruta integrada, pero deviene competitivo a un costo de electricidad muy bajo (20 EUR/MWh).

²⁵ Cabe mencionar que investigadores de la Universidad de Lund analizaron la prefactibilidad y estudian los costos de inversión y operación del proceso, e investigadores del Instituto Real de Tecnología analizan la posibilidad de utilizar una caverna de roca revestida, ya usada para gas natural, como depósito de hidrógeno para la planta. Hay en preparación entretanto un depósito de hidrógeno a 25-35 m por debajo de la superficie en tierras de LKAB en Svartöberget, cerca de la planta piloto. No se han encontrado menciones explícitas al origen del hidrógeno para la operación de la planta piloto. La pequeña capacidad inicial (1-2 t/h) hace suponer que podría ser hidrógeno adquirido a un proveedor de gases.

- Voestalpine en Austria está instalando una planta piloto de reducción directa a hidrógeno con tecnología de Primetals Technologies. Se diferencia de los anteriores en que se parte de finos de mineral de hierro en lugar de pellas, utilizando experiencias de procesos previos de reducción directa en lecho fluido, como Finmet y Finex. Además, Voestalpine y otros socios investigan la producción de hidrógeno verde en el marco del programa H2FUTURE

Obtención directa de acero por vía electrolítica

Tanto en Europa como en Estados Unidos se está estudiando la obtención directa de acero por vía electrolítica. Estos procesos están todavía en una etapa muy temprana de desarrollo como para poder prever qué espacio van a ocupar en la futura producción masiva de acero, destacando la iniciativa Siderwin de la comunidad europea, en la cual se desarrolla un proceso electroquímico a temperatura ambiente para transformar el óxido de hierro en placas metálicas de acero. Actualmente se está instalando una planta piloto, basada en experiencias previas a menor escala. Boston Metals, una empresa desprendida del MIT (Massachusetts Institute of Technology), está desarrollando la electrólisis de óxidos fundidos (MOE, por sus iniciales en inglés). Este proceso se realiza a temperaturas elevadas, procurando disminuir el consumo de energía.

Procesos de fusión reductora

En cuanto a los procesos de fusión reductora para la producción de arrabio que ya están en operación en diversas plantas, tales como el COREX, FINEX y Hismelt, cabe mencionar que, si bien presentan la ventaja de un menor costo de inversión y operativo que el alto horno, sus emisiones son mayores. Todos se basan en carbón (y coque, en el caso del COREX). También es importante notar que se han implantado en contextos muy específicos, donde hay utilidades para el alto volumen de gas generado (COREX, FINEX) y que han sido relocalizados en algunos casos, por falta de interés de sus propietarios originales (COREX de Corea a India; Hismelt de Australia a China). Otros procesos de fusión reductora en desarrollo, como el Hisarna, están en la etapa de planta piloto y su desarrollo depende de inversiones significativas. Este proyecto contempla además la integración de captura de carbono y reemplazo parcial de carbón por otros combustibles.

Tomando al proceso COREX como representativo de los procesos de fusión reductora que han llegado a la escala industrial, cabe señalar que el potencial de abatimiento es bajo, en el orden de 1%, comparado con el alto horno (Carpenter, 2012)²⁶.

Captura y almacenamiento o aplicación del CO₂ (CCS)

Ya se ha mencionado, específicamente para el alto horno, la captura y almacenamiento de CO₂ acompañando a la separación del gas de tope. Pero la captura y almacenamiento o aplicación del CO₂ podría aplicarse eventualmente a todas las unidades de proceso que emiten gases de escape con cierto contenido de CO₂, tanto en la ruta integrada como semi-integrada (sin cambios significativos en estos procesos).

²⁶ El costo de inversión para COREX + BOF se ha establecido en 394 EUR/t/año, inferior al de alto horno - BOF y a reducción directa - EAF, en tanto que el costo operativo se ha estimado en 440 EUR/t acero líquido/año (Wörtler, 2013).

Con respecto a la captura, existen diversas tecnologías, que podrían dividirse en general en las de absorción química, absorción física, y mixtas. En general, las tecnologías de absorción química se aplican cuando el tenor de CO₂ del gas a tratar es bajo y las de absorción física cuando es alto. En la siderurgia se ha aplicado la absorción química por aminas en algunas plantas de reducción directa del tipo Energiron. El proyecto japonés COURSE 50 mencionado más arriba, incluye una investigación para aumentar la eficiencia y disminuir el costo de la absorción por aminas con vistas a su aplicación a los gases de alto horno.

La absorción física se ha aplicado en el alto horno piloto de LKAB, mediante la aplicación de una planta VPSA, como se menciona más arriba.

Un proyecto de investigación en el que participan los productores de acero SSAB y Tata, bajo la denominación STEPWISE, incluye el desarrollo de una tecnología de absorción mixta, con la construcción de una planta piloto.

Una desventaja puntual de la opción CCS es que un sitio industrial alberga una serie de fuentes de CO₂ con concentraciones y volúmenes variables (lo que puede requerir ciertos desafíos tecnológicos que no se presentan con una sola fuente de emisiones como podría ser una termoeléctrica). En particular, no existen estimaciones de costos confiables para capturar más del 90% de las emisiones. Por otro lado, la captura en si no parecería tener otra barrera que el costo, en cambio el almacenamiento presenta muchas más complejidades. Entre estos desafíos destacan los siguientes:

- La capacidad de almacenamiento es bastante desconocida, especialmente en lo que hace a acuíferos salinos profundos, que deberían ser las principales soluciones si la captura y almacenamiento fuera un camino significativo para bajar las emisiones.
- Obtener los permisos consume tiempo, y su duración no es clara.
- El almacenamiento necesita de la aprobación de las partes interesadas, un área donde no hay mayor experiencia, particularmente de los expertos pertinentes (sociólogos, no ingenieros).

Al momento de preparar este informe, el único proyecto de captura y almacenamiento en desarrollo en el ámbito de la siderurgia conocido por los autores es el denominado Athos, de Tata Steel Europa, junto a dos empresas de gas y el Puerto de Amsterdam, que se encuentra todavía en una etapa de factibilidad. Se apunta a la utilización de yacimientos de gas abandonados en el mar del Norte. (Anon, 2019)

Las mencionadas limitaciones para el almacenamiento del CO₂ han hecho que en este campo las miradas de la siderurgia se hayan vuelto hacia la aplicación. Las mayores experiencias se han desarrollado en las plantas de reducción directa Energiron, en que por razones de proceso es fácil implantar la captura del CO₂, en este caso por absorción en aminas. Se mencionan los siguientes casos: (Duarte, 2018)

- Ternium Monterrey, México: desde fines de la década de 1990 el CO₂ en bruto se vende a Praxair (hy Linde), que después de una limpieza lo distribuye a industrias de la alimentación y la bebida carbonatada

- Ternium Puebla, México: separa y limpia el CO₂ y lo vende al Grupo Infra para uso en industrias de bebidas carbonatadas
- Emirates Steel Abu Dhabi, Emiratos: en sociedad Masdar y Adnoc está implementado una planta de captura de CO₂ común a sus dos módulos de reducción directa, para la aplicación en la recuperación mejorada de petróleo (EOR, por sus iniciales en inglés)
- Nucor Steel Luisiana, Estados Unidos: tiene un sistema de desulfuración del CO₂, obteniendo CO₂ puro en vías de comercialización

La gama de tecnologías innovadoras, que incluyen la recirculación de gases y el proceso Hisarna, reducen la demanda de la coquería y aumentan el porcentaje de CO₂ en los gases de escape, lo que reduce los costos de captura de carbono. Estos enfoques tecnológicos implican cambios significativos en las plantas existentes y todavía están en la etapa de piloto.

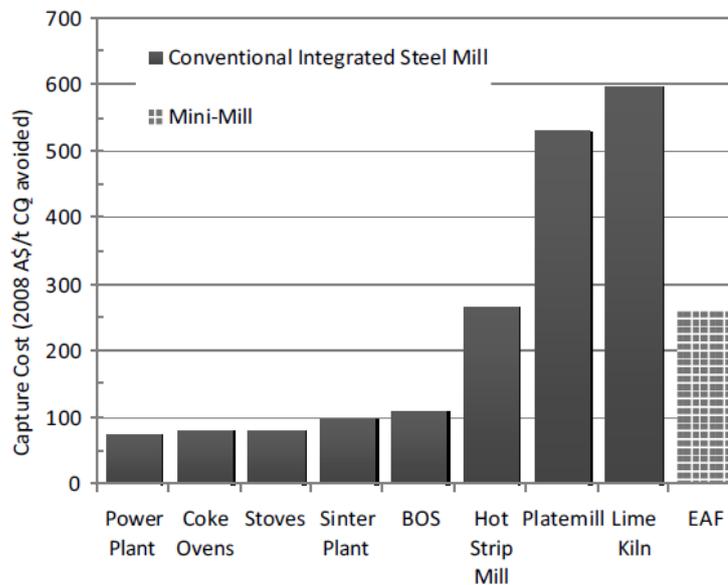
Otra experiencia pionera en el campo de la aplicación de CO₂ es la de BaoSteel (hoy BaoWu), la mayor empresa siderúrgica de China, que con tecnología de la neozelandesa LanzaTech, puso en marcha en 2014 una planta de demostración para la conversión en etanol de gases de una de sus plantas siderúrgicas. La tecnología de LanzaTech se basa en la fermentación con microbios, para la conversión de los gases industriales en etanol (Anon, 2019).

ArcelorMittal le sigue los pasos a BaoWu, tomando en 2018 la decisión de instalar una planta de demostración en su siderúrgica de Gante, Bélgica, con la tecnología de LanzaTech y construcción y montaje de Primetals Technologie (Anon, 2018). Este proyecto está financiado parcialmente por la Comunidad Europea, bajo la denominación STEELANOL.

ArcelorMittal con otros socios desarrolla también una planta piloto en pequeña escala para transformar los gases industriales en productos intermedios para la posterior obtención de poliuretano. Este proyecto está financiado por la Comunidad Europea bajo el programa Carbon4PUR. Tata Steel y SSAB, por su parte, estudian la conversión de los gases de planta en metanol, con financiación del programa europeo FResMe.

Un rango de costo estimado para la captura de CO₂ en la industria del cemento, mediante diversas técnicas, es de 42 a 68 euros/t CO₂ (Gardarsdottir, 2019). Otra fuente, con foco en la industria del acero, ha estimado un costo de inversión de 60 a 90 EUR/t/año para un alto horno convencional, para técnicas basadas en la absorción química. Un estudio australiano evalúa los costos de captura para las distintas fuentes de la siderurgia integrada y semi-integrada (figura 6). Se observa que la captura sería más viable para la central térmica, la coquería, las estufas del alto horno, la planta de sinter y la acería al oxígeno que para los laminadores, la planta de calcinación o el horno eléctrico de arco, donde el costo por t de CO₂ evitado es varias veces mayor.

Figura 3 Costo de captura en AUD 2008 por t de CO₂ evitada, para las distintas unidades de proceso de las rutas integrada y semi integrada.



Fuente: Wiley (2011)

3. IDENTIFICACIÓN DE META DE REDUCCIÓN DE EMISIONES

Paralelo a la identificación de alternativas tecnológicas para su eventual implementación en el escenario de un recambio, es importante conocer las metas a las que debe apuntar la industria, en relación con los compromisos del Acuerdo de París suscritos por Chile, y definir con ambos insumos el Plan de Inversión.

A continuación, se presentan los cálculos realizados para determinar la meta de reducción:

3.1 CONTEXTO DE METAS DE REDUCCIÓN NACIONALES Y PARTICIPACIÓN DEL SECTOR EN EMISIONES GLOBALES

Para la identificación de una meta de reducción de emisiones es necesario determinar los objetivos que debe cumplir la trayectoria, en coherencia con las ambiciones que establece la ciencia. El año 2015, 195 países firmaron el Acuerdo de París acordando limitar el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de 2 °C con respecto a los niveles preindustriales²⁷ y proseguir los esfuerzos para limitar ese aumento de la temperatura a 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales, reconociendo que esto reduciría considerablemente los riesgos y los efectos del cambio climático.

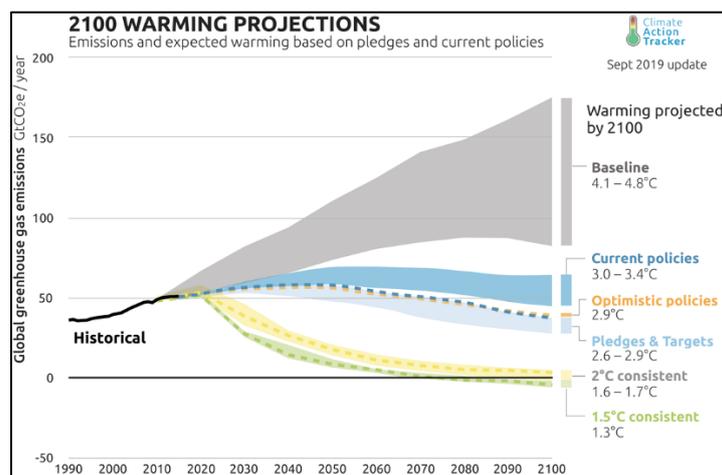
El Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) a fines del año 2018 ha indicado que los efectos en el planeta que se esperarían de un calentamiento de 2°C son sustancialmente más

²⁷ Independiente de este acuerdo, las acciones que han declarado los distintos países aún son insuficientes para cumplir cualquiera de las dos metas: 2°C o 1,5 °C.

críticos a aquellos bajo un aumento de 1,5°C, por lo que los esfuerzos adicionales requeridos para apuntar hacia esta meta deben ser perseguidos. Una de las grandes condicionantes para esta meta es alcanzar el peak global de emisiones antes del 2030, para luego ir disminuyendo y alcanzar el carbono neutralidad al año 2050²⁸.

A continuación, se presentan algunas proyecciones de aumento de temperatura hacia el 2100 bajo distintos escenarios, incluyendo aquellas más ambiciosas que apuntan hacia 2°C y 1,5°C para fines de siglo.

Figura 4 Proyecciones de calentamiento global hacia el 2100 bajo distintos escenarios



Fuente: Climate Action Tracker, 2019²⁹.

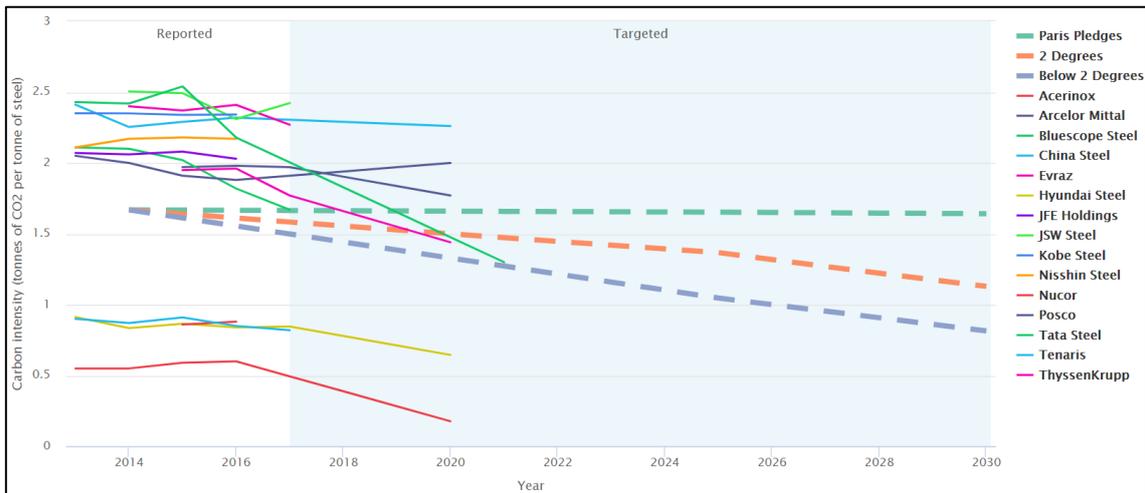
En gris se ven los escenarios proyectados si las emisiones siguieran la tendencia histórica de calentamiento (correspondiente a la línea base). Bajo esa curva, existen diferentes escenarios que se alcanzarían bajo las políticas actuales. Por último, las curvas amarilla y verde corresponden a trayectorias de reducción de emisiones consistentes con 2°C y 1,5°C respectivamente, donde se puede distinguir claramente la fuerte caída en emisiones que se tiene hasta el 2050, para luego ir tendiendo hacia el carbono neutralidad.

De la imagen anterior se puede identificar que se requieren esfuerzos considerables para reducir la brecha entre las trayectorias descritas por las políticas actuales y la ambición climática que éstas conllevan. Los distintos sectores de la economía deberán tomar responsabilidad según su participación en las emisiones globales. Referencialmente, a continuación, se presentan las trayectorias de algunas empresas del sector acero que han reportado sus objetivos de reducción de emisiones, en términos de su intensidad de emisiones (toneladas de CO₂ por tonelada de acero).

²⁸ La meta de carbono neutralidad está concebida como emisiones netas, es decir, que las emisiones globales se compensen con las capturas de emisiones.

²⁹ Climate Action Tracker, 2019. Temperatures. Disponible en: <https://climateactiontracker.org/global/temperatures/>. [Consultado el: 26 de octubre de 2019]

Figura 5 Objetivos de reducción de emisiones de empresas del sector acero en relación a las ambiciones del Acuerdo de París y objetivos de 2°C y muy bajo los 2°C



Fuente: Transition Pathway Initiative, 2019. Carbon Steel Performance³⁰.

Para diseñar una trayectoria de reducción de emisiones para el sector en Chile, lo primero es determinar el presupuesto de carbono que tiene el sector, el cual se define como la cantidad de emisiones que dicho sector tiene disponible como tope para acoplarse a los objetivos globales de no superar los 2°C para fines de siglo y hacer los esfuerzos para lograr los 1,5°C, en comparación con los niveles pre-industriales de temperatura (de ahora en adelante, trayectorias de desarrollo sostenible). Se apuntará a construir una trayectoria en concordancia con los 1,5°C, y en caso de que no se encontrara información disponible, se utilizarán parámetros relacionados con los 2°C.

Para calcular el presupuesto de carbono, se toma como referencia que el sector tiene un total de 112 Gt-CO₂ entre los años 2011 y 2050, **a nivel global**³¹ para alcanzar los 2°C. Bajo esta premisa, se consideró la participación del mercado de producción de acero de Chile como la fracción de emisiones correspondientes para el sector. Al año 2011, Chile concentraba el 0,105%³² de la producción mundial³³ (hoy concentra cerca del 0,06%), de modo que su presupuesto de carbono podría considerarse como proporcional al valor total:

$$\text{Presupuesto de Carbono sectorial}_{2^{\circ}\text{C},2011-2050} = 0,105\% * 112 \text{ GtCO}_2 = 117,6 \text{ MtCO}_2$$

³⁰ Transition Pathway Initiative, 2019. Carbon Steel Performance. Disponible en: <http://www.lse.ac.uk/GranthamInstitute/tpi/the-toolkit/>. [Consultado el 12 de noviembre de 2019].

³¹ Science Based Targets, 2019. Science-Based Target Setting Manual Version 4.0, April 2019. Disponible en: <https://sciencebasedtargets.org/wp-content/uploads/2017/04/SBTi-manual.pdf>. [Consultado el: 28 de agosto de 2019].

³² Se tomó el valor referencial para el año 2011, debido a que el presupuesto de carbono comienza a partir de ese año. De todos modos, a lo largo de la última década, la participación en el mercado mundial del acero de Chile no sobrepasa el 0,1%.

³³ Worldsteel Association, 2017. Total Production of Crude Steel – World total 2017. Disponible en: https://www.worldsteel.org/internet-2017/steel-by-topic/statistics/steel-data-viewer/P1_crude_steel_total/CHL. [Consultado el: 24 de octubre de 2019].

A partir del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INGEI) de Chile (2018)³⁴ se obtendrán las emisiones del sector entre los años 2011 y 2016³⁵, para restarle las emisiones ocurridas durante esos años. Para estimar las emisiones de los años 2017, 2018 y 2019, se consideró como supuesto que las de estos años correspondieron a las del año 2016. Las emisiones entre los años mencionados equivalieron a 17,11 Mt, dejando un **presupuesto de carbono disponible de 100,49 Mt CO₂ para el sector en Chile entre los años 2020 y 2050**.

Ahora bien, teniendo los órdenes de magnitud de las emisiones totales máximas que puede emitir el sector, se deben diferenciar las emisiones y objetivos de reducción de emisiones para cada una de las rutas productivas. En particular, se tendrán en consideración los siguientes aspectos para prospectar las características del mercado hacia el 2050³⁶:

1. Para poder distinguir las trayectorias de reducción de emisiones de cada una de las rutas productivas, se tomará como simplificación que el acero producido en el proceso integrado participa, en gran medida, de un segmento de mercado distinto de aquel fabricado mediante el proceso semi-integrado. De esta manera, no se esperaría una competencia entre ambos tipos de producción que derivara en la repartición de un tamaño de mercado entre los distintos actores. Es decir, no se esperaría que, debido a un aumento de capacidad de producción en un tipo de proceso, el otro viera reducido su tamaño de mercado.
2. Por lo anterior, se considerará el total del acero producido el año 2018 y el crecimiento promedio de la industria en la región como indicadores para cada uno de los procesos productivos, de modo de proyectar la producción futura de cada ruta productiva del acero en Chile.

En concordancia con lo anterior, la trayectoria de reducción de emisiones será representada mediante una curva basada en la **intensidad de emisiones** del sector, es decir, toneladas de CO₂ emitidas normalizado por las toneladas de acero producidas (tCO₂ / t acero). De esta manera, se permite desacoplar el crecimiento productivo de las emisiones de GEI de la industria.

3.2 METODOLOGÍA DE CÁLCULO DE METAS Y TRAYECTORIA DE REDUCCIÓN DE EMISIONES

Para alinearse con el desarrollo de una trayectoria de reducción de emisiones sostenible para la descarbonización del sector, se han utilizado las fuentes de información que se detallan en este capítulo.

Se precisa que las emisiones a considerar en la trayectoria de reducción de emisiones corresponden a aquellas provenientes de operaciones directas del sector (alcance 1) y aquellas

³⁴ Gobierno de Chile, 2018. Tercer Informe Bienal de Actualización de Chile Sobre Cambio Climático 2018. Disponible en: <https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2018/12/3rd-BUR-Chile-SPanish.pdf>. [Consultado el: 24 de octubre de 2019].

³⁵ Corresponde a los ítems 1.A.2.a Energía – hierro y acero y 2.C.1 Producción de hierro y acero. Se puede consultar directamente en: <http://snichile.mma.gob.cl/consulta/>

³⁶ Respecto de la expectativa de crecimiento de la demanda de acero algunas fuentes estiman que, en determinado momento de un futuro no lejano, la producción de acero a nivel mundial va a comenzar a disminuir (J.Madías). En esto juegan un papel importante la competencia con el aluminio en la industria automotriz, debido a la demanda de autos más livianos; el desarrollo de los autos eléctricos, necesitados a su vez de estructuras livianas para aumentar su alcance, y la posible irrupción de nuevas formas de utilizar los autos. Otras fuentes prospectan un aumento en la demanda motivado por una mayor urbanización de India y países africanos. No obstante, estos aspectos en principio no afectarían a la producción chilena de acero, enfocada en productos largos para la industria de la construcción civil y bolas de molinera para la minería.

originadas por el consumo eléctrico asociado a sus procesos (alcance 2). No se consideran emisiones indirectas asociadas a la cadena de proveedores y mercado de destino del sector (alcance 3)³⁷.

3.2.1 Fuentes de información para el cálculo de trayectoria

A. Agencia Internacional de la Energía (IEA), 2019³⁸

La IEA ha construido diversos escenarios futuros, dentro de los cuales destaca el Escenario de Desarrollo Sostenible³⁹ (SDS, por su sigla en inglés) que se acopla a la meta de alcanzar un 1,5°C de aumento de temperatura para el año 2100⁴⁰. Ha sido construido en relación a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) asociados a la temática de energía⁴¹ establecidos por las Naciones Unidas y acordados por 193 países en 2015.

El período cubierto por el modelo actualmente es hasta el 2040, donde se han desarrollado metas específicas sectoriales⁴² que deben ser alcanzadas de modo de lograr los objetivos del modelo. La meta condicionante para que el sector del acero se alinee al objetivo global de alcanzar el *peak* de emisiones antes del 2030⁴³, se resume en el siguiente cuadro:

Para el sector acero se presenta la necesidad de una **reducción en la intensidad de emisiones de un 1,9% anual entre 2017 y 2030.**

B. Objetivos Basados en la Ciencia (SBT), 2016⁴⁴

La iniciativa global conocida como Science Based Targets (SBT) ha desarrollado diversas metodologías⁴⁵ para el cálculo de las trayectorias de reducción de emisiones que debe seguir una compañía o sector basado en los objetivos de la ciencia de acoplarse a diversos escenarios futuros de calentamiento global. En particular, se ha determinado que el enfoque más adecuado

³⁷ Si bien no se considera el alcance 3 dentro de los objetivos de descarbonización, para aquellas compañías cuyos alcances 3 son mayores al 40% de sus inventarios esto debería considerarse según lo delineado por Science Based Targets..

³⁸ International Energy Agency (2019). Iron and steel – Tracking Green Energy Process. Disponible en: <https://www.iea.org/tcep/industry/steel/>

³⁹ International Energy Agency (2019). Sustainable Development Scenario. Disponible en: <https://www.iea.org/weo/weomodel/sds/>

⁴⁰ La trayectoria de las emisiones del SDS se encuentra en el extremo inferior de otros escenarios de descarbonización que proyectan un aumento medio de la temperatura en 2100 de alrededor de 1,7 °C a 1,8 °C. También se inscribe en el marco de las hipótesis que prevén un aumento de la temperatura por debajo de 1,5 °C, según la evaluación del Informe Especial del IPCC (diciembre del 2018) sobre el 1,5°C. En definitiva, es un modelo cuyo objetivo apunta hacia los 1,5°C pero su cumplimiento está sujeto a ciertos niveles de confianza.

⁴¹ Lograr el acceso universal a la energía (ODS 7), reducir los graves efectos de la contaminación atmosférica en la salud (ODS 3) y hacer frente al cambio climático (ODS 13). El SDS de la IEA establece una visión pragmática de cómo puede evolucionar el sector energético mundial para lograr los ODS relacionados con la energía.

⁴² Dentro de los sectores considerados, se encuentran Transporte, Hierro y Acero, Energía Nuclear, Gas Natural, Carbón, Petróleo, Energías Renovables, entre otros.

⁴³ Esta corresponde a una de las premisas del SDS.

⁴⁴ Science Based Targets (2019). Approaches & Methods. Disponible en: <https://sciencebasedtargets.org/methods/> [Consultado el: 24 de octubre del 2019].

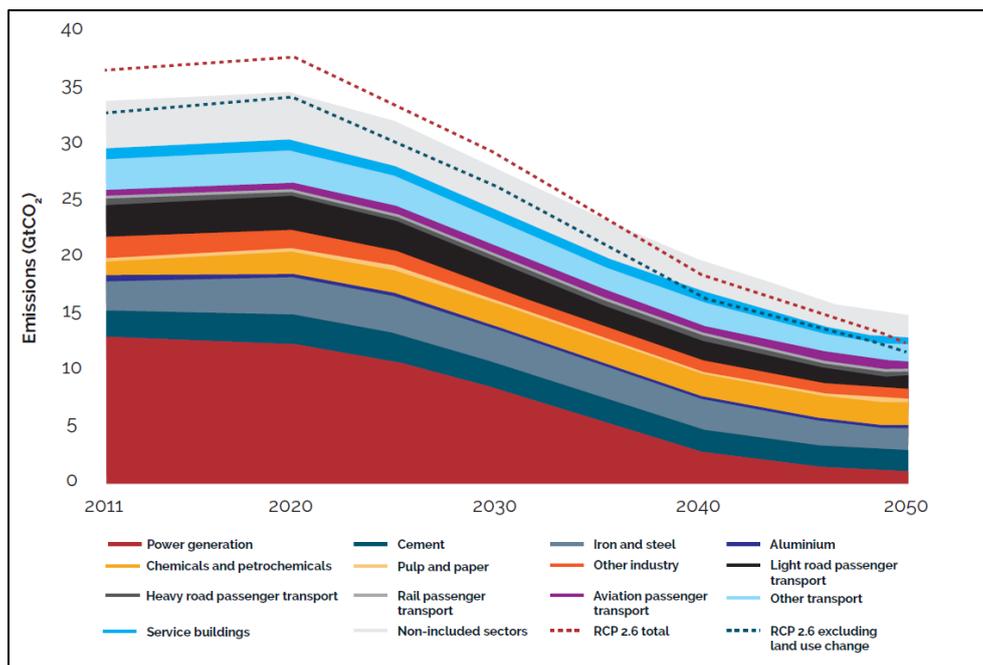
⁴⁵ Estos enfoques corresponden a los siguientes:

- **Enfoque sectorial:** Se divide el presupuesto global de carbono por sectores y las reducciones de emisiones se asignan a empresas individuales sobre la base del presupuesto de su sector. Este es el enfoque que se ha utilizado.
- **Enfoque de base absoluta:** El porcentaje de reducción de emisiones absolutas requerido para un escenario dado (por ejemplo, escenario de 1,5°C) se aplica a todas las empresas por igual.
- **Enfoque económico:** Un presupuesto de carbono se equipara al PIB global y la participación de una empresa en las emisiones viene determinada por su beneficio bruto, ya que la suma de los beneficios brutos de todas las empresas de todo el mundo equivale al PIB global.

a utilizar para este estudio es el Enfoque Sectorial de Descarbonización (SDA)⁴⁶, que se describe a continuación.

El enfoque SDA⁴⁷ se basa en el escenario de 2°C (2DS) desarrollado por la IEA como parte de su publicación *Energy Technology Perspectives (ETP)* del año 2014 (IEA, 2014). En resumidas cuentas, divide el presupuesto global de carbono por sectores en coherencia con una trayectoria de 2°C, donde las reducciones de emisiones se asignan a empresas individuales sobre la base del presupuesto de su sector según su nivel de producción⁴⁸. Su versión más reciente al momento de realización de este estudio corresponde a la V 8.1 que utiliza los datos del 2DS de la actualización del ETP publicada el año 2016. A continuación, se muestra una figura que representa la participación de los distintos sectores:

Figura 6 Desglose de las trayectorias de descarbonización que debe seguir cada sector en coherencia con una temperatura de 2°C para fines de siglo



Fuente: Science Based Targets.

Esta herramienta se utilizó de forma complementaria a lo descrito por la IEA (2019), puesto que las trayectorias descritas en el SDS de la IEA están delimitadas hasta el año 2040, y los objetivos específicos de reducción de emisiones para el sector de acero se presentan solamente hasta el año 2030. Sin embargo, se estimó que lo descrito por IEA (2019) está más actualizado y tiene mayores ambiciones climáticas para el año 2030. **Por lo mismo, en el primer tramo de la**

⁴⁶ Dentro de las metodologías de SBT, se determina que cuando se encuentra disponible la información sectorial este ajuste es más preciso en comparación con los enfoques de base absoluta y económica descritos en el pie de página anterior.

⁴⁷ Science Based Targets (2019). Sectoral Decarbonization Approach. (SDA). Disponible en <https://sciencebasedtargets.org/sda-tool/>. [Consultado el: 28 de agosto del 2019].

⁴⁸ Fue desarrollado por Carbon Disclosure Project (CDP), World Reporting Initiative (WRI) y World Wildlife Fund (WWF) con el apoyo técnico de Navigant (antes Ecofys) como socio consultor. La metodología se creó con el objetivo de proporcionar a las empresas un método específico para cada sector y respaldado por la investigación para establecer sus objetivos de emisiones.

trayectoria de reducción de emisiones se considera lo propuesto en el SDS⁴⁹ y hacia el 2050 se complementa con el enfoque SDA.

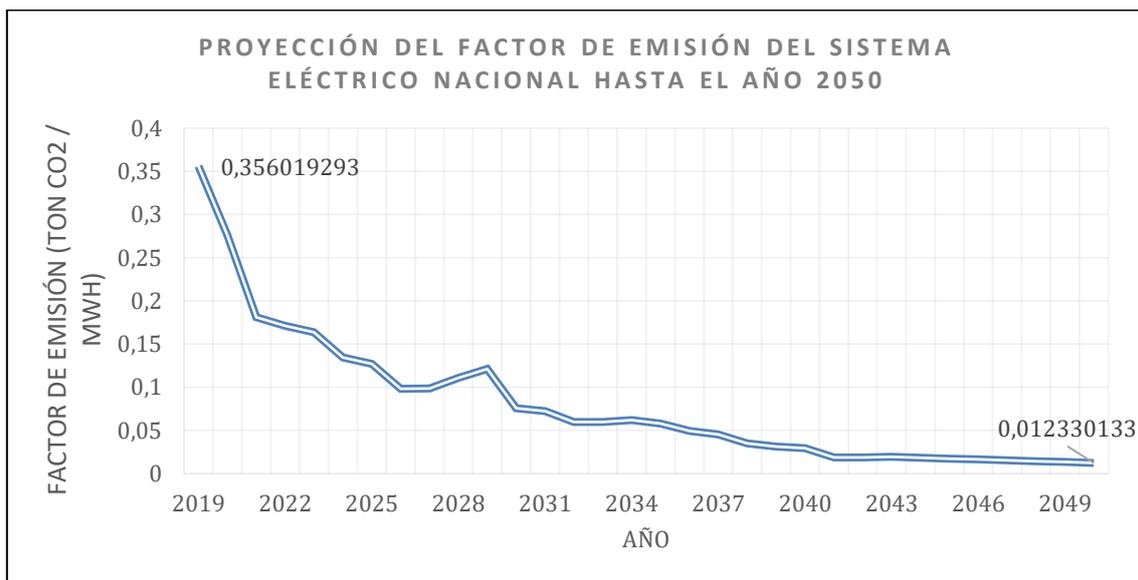
Finalmente, los objetivos encuadrados a continuación son las condiciones según el SDA para garantizar una descarbonización del sector acoplada con una trayectoria de desarrollo bajo en carbono (orientado a 1,5°C y apuntando a muy bajo los 2°C):

Para 2050, las emisiones totales tendrán que disminuir en un 31% y la intensidad de carbono en un 55% en comparación con los niveles del 2010.

C. Proyección de variación en el factor de emisión del Sistema Eléctrico Nacional (SEN)

Es necesario considerar el proceso de descarbonización que naturalmente va a sufrir la matriz eléctrica chilena, con lo cual se contribuye a la reducción emisiones asociadas al alcance 2 del sector. Para esto, se ha tomado como insumo la proyección realizada por el Ministerio de Energía sobre el factor de emisión del Sistema Eléctrico Nacional⁵⁰ en función de la capacidad instalada de generación de electricidad mediante energías renovables que se proyecta hacia el año 2050. A continuación, se presenta la proyección del factor de emisión del SEN.

Figura 7 Proyección del factor de emisión del SEN hacia el 2050



Fuente: Elaboración propia en base a Ministerio de Energía (2019).

De la **Figura 7** se puede extraer la magnitud del impacto de la descarbonización de la matriz. Por ejemplo, al año 2019, por cada 1.000 MWh consumido se emiten 356 toneladas de CO₂, en

⁴⁹ Adicionalmente, en coherencia con lo propuesto por la ciencia, se deben realizar los mayores esfuerzos de reducción de emisiones posibles antes del 2030 para poder lograr el *peak* de emisiones globales antes de este año. De otro modo, el escenario de 1,5°C tiene escasas probabilidades de ser logrado.

⁵⁰ El factor de emisión corresponde a una medida cuantitativa de cuántas toneladas de CO₂ se emiten por cada MWh consumido de la red eléctrica.

cambio para el año 2050 bajo este mismo nivel de consumo se esperarían solamente 12 toneladas de CO₂.

3.2.2 Resumen metodológico

Según lo descrito en el capítulo 3.2.1, las trayectorias de reducción de emisiones a construir deben cumplir con los siguientes criterios:

1. No superar el presupuesto de carbono asociado al sector,
2. Cumplir con las metas de reducción de intensidad de emisiones hasta el 2030 según lo planteado por la IEA, 2019 (1,9% de reducción anual hasta el 2030),
3. Cumplir con la meta de intensidad de emisiones al 2050 de SBT (reducción en un 55% respecto al 2010),
4. Cumplir con la meta de emisiones totales al 2050 de SBT (reducción en un 31% respecto a los niveles del 2010),
5. Incorporar la descarbonización de la matriz energética chilena asociada a una mayor capacidad instalada de energías renovables.

Como ya se mencionó, por la distinta naturaleza de ambas rutas productivas, el proceso integrado se vería sujeto a grandes necesidades de reducción de emisiones (debido a ser mucho más intensivo en emisiones), mientras que las metas para el proceso semi-integrado serían considerablemente menos ambiciosas. Considerando lo anterior, se decidió realizar ambas trayectorias por separado para fijar metas suficientemente ambiciosas para cada proceso productivo⁵¹. A continuación, se describe el detalle de la obtención de las trayectorias para el proceso Integrado.

3.2.3 Trayectoria de reducción de emisiones para el proceso integrado

Como bien se ha mencionado, la trayectoria de reducción de emisiones se construye en base a la métrica de intensidad de emisiones anuales (toneladas de CO₂ emitidas / toneladas de acero crudo producido). Se considera la intensidad de emisiones del proceso como la suma de la intensidad de emisiones asociada al alcance 2 (consumo eléctrico) y al alcance 1 (emisiones directas). A continuación, se describe paso a paso la metodología de cálculo de trayectoria.

Paso 1: Presupuesto de carbono

El primer paso fue determinar el presupuesto de carbono asociado al proceso integrado en Chile. Para esto, se tomó en consideración el presupuesto total mencionado en la sección 3.1 de este documento, y la participación de mercado en la producción nacional de acero:

⁵¹ Adicionalmente, las opciones tecnológicas que se propondrán de mitigación de GEI estarán dadas según cada uno de los procesos productivos, así como el plan de inversión en estas tecnologías. De este modo, es coherente desarrollar ambas trayectorias de manera independiente.

Tabla 5. Presupuesto de carbono asociado al proceso integrado

PARÁMETRO	VALOR	FUENTE
Presupuesto de carbono mundial [Gt CO ₂]	112	Science Based Targets, 2019. Science-Based Target Setting Manual Version 4.0, April 2019.
Presupuesto de carbono chileno (2011-2050) [Mt CO ₂]	117,6	Worldsteel Association, 2017. Total Production of Crude Steel – World total 2017.
Emisiones asociadas al sector (2011-2019) [Mt CO ₂]	17,11	Gobierno de Chile, 2018. Tercer Informe Bienal de Actualización de Chile Sobre Cambio Climático 2018.
Presupuesto de carbono del sector en Chile (2020-2050) [Mt CO ₂]	100,49	Combinación de las tres fuentes anteriores.
Presupuesto correspondiente al proceso integrado ⁵² (%)	68,9%	Producción mundial desglosada por países. Worldsteel Association, 2019. World Steel in Figures 2019.
Presupuesto de carbono del proceso integrado (2018-2050) ⁵³ [Mt CO ₂]	69,24	Combinación de las fuentes anteriores.

Fuente: Elaboración propia.

Paso 2: Identificación de parámetros de entrada del modelo, en relación con la realidad productiva de la industria

Una vez teniendo el presupuesto de carbono del sector, se tomaron en consideración los valores de entrada para el año base que se presentan a continuación.

Tabla 6. Parámetros de entrada para cálculo de trayectoria de reducción de emisiones del proceso integrado

PARÁMETRO	VALOR	FUENTE
Acero crudo producido en acería en Chile durante el 2018 [t acero crudo]	789.011	Worldsteel Association, 2019. World Steel in Figures 2019.
Intensidad de emisiones año 2018 [t CO ₂ / t acero crudo]	2,39	Promedio global de producción. Pardo, Moya & Vatopoulos ⁵⁴
Intensidad de emisiones de alcance 1, 2018 [t CO ₂ alcance 1 / t acero crudo]	2,18	Calculado en función de juicio experto en relación con la proporción de la intensidad de emisiones que corresponden a consumo de combustibles fósiles (en base a Pardo, Moya & Vatopoulos)
Intensidad de emisiones de alcance 2, 2018 [t CO ₂ alcance 2 / t acero crudo]	0,21	Calculado en función de juicio experto en relación con la proporción de la intensidad de emisiones que corresponden a consumo de

⁵² Correspondiente a la fracción de la producción nacional fabricada en el proceso integrado. Para el año 2018, se tiene un valor de 68,9% vía esta ruta, y un 29,3% en el semi-integrado.

⁵³ No se considera el año 2017 en el presupuesto de carbono de la trayectoria, como se ha mencionado anteriormente.

⁵⁴ Prospective Scenarios on Energy Efficiency and CO₂ Emissions in the EU. Pardo, Moya & Vatopoulos, 2012. Disponible en: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC74811/Id1a25543enn.pdf>

PARÁMETRO	VALOR	FUENTE
		electricidad (en base a Pardo, Moya & Vatopoulos).

Fuente: *Elaboración propia.*

Vale decir que, si bien los datos del año 2018 sirven como parámetros de entrada para la construcción de la curva, las emisiones de este año no se consideran dentro del presupuesto del carbono del sector puesto que lo equivalente a ese año ya ha sido restado del presupuesto.

Paso 3: Proyección de crecimiento del sector hacia el año 2050

Teniendo estos valores, el siguiente paso corresponde a la proyección de la producción de acero en el tiempo. Para el caso de la ruta semi-integrada se utilizó el valor de crecimiento promedio para la región de América Latina proyectado hacia fines del 2018 por Alacero⁵⁵ (1,4% anual), y para el caso de la ruta integrada, se decidió mantener constante la producción de acero hasta el 2050 tomando como referencia la producción del año 2018.

Paso 4: Proyección de emisiones e intensidad de emisiones de alcance 2

Teniendo una proyección hacia el 2050 de la evolución del consumo eléctrico, y la proyección del factor de emisión (FE) del SEN (toneladas de CO₂ emitidas por MWh consumido) fue posible obtener las emisiones absolutas (EA) de CO₂ proyectadas hasta el año 2050 por consumo eléctrico (CE).

$$EA_{Alcance2} = FE_{SEN} \cdot CE \quad [t \text{ CO}_2], \quad \text{para cada año hasta 2050}$$

Luego, con las emisiones de alcance 2 proyectadas hacia fines del año 2050 y la producción esperada ($Prod_{acero}$) para cada año, se pudo obtener la intensidad de emisiones (IE) asociada al alcance 2 para cada año:

$$IE_{Alcance2} = \frac{EA_{Alcance2}}{Prod_{acero}} \quad \left[\frac{t \text{ CO}_2}{t \text{ acero crudo}} \right], \quad \text{para cada año hasta 2050}$$

Paso 5: Determinación de trayectoria de emisiones hacia el año 2030

El primer objetivo que debe cumplir la curva de reducción de emisiones es una disminución en la intensidad año a año de un 1,9% hasta el 2030, según lo descrito por la IEA (2019). Se tomó como año base la intensidad de emisiones del año 2018 (2,3 t CO₂/ t acero crudo), y contrarrestado con la intensidad de emisiones de alcance 2 esperada según la descarbonización de la matriz energética, se obtuvo la intensidad de emisiones de alcance 1 objetivo para cada año, hasta el 2030.

$$IE_{Alcance1, \text{año } i} = IE_{\text{objetivo (IEA), año } i} - IE_{Alcance2, \text{año } i} \quad \text{para los años 2019 – 2030}$$

⁵⁵ Asociación Latinoamericana de Acero, 2018. América Latina en Cifras, 2018. Disponible en: [https://www.alacero.org/sites/default/files/publicacion/america latina en cifras 2018 es-en.pdf](https://www.alacero.org/sites/default/files/publicacion/america%20latina%20en%20cifras%202018%20es-en.pdf).

Con la intensidad de emisiones de alcance 1, se pueden obtener las emisiones absolutas asociadas a este alcance, considerando la producción de acero crudo de ese año:

$$EA_{\text{alcance1 año } i} = IE_{\text{Alcance1 año } i} \cdot Prod_{\text{acero año } i} \quad \text{para los años 2019 – 2030}$$

Paso 6: Determinación de trayectoria de emisiones desde al año 2031 hasta 2050

Con los pasos anteriores, ya se ha construido la trayectoria hasta el año 2030. Desde este año en adelante, se establecen las **tres restricciones que debe cumplir la trayectoria** hacia el resto del periodo de evaluación, correspondientes a las siguientes:

- (1) La suma de las emisiones absolutas de todos los años (alcance 1 y alcance 2), deben ser inferiores al presupuesto total de carbono de la ruta productiva:

$$\sum_{i=2020}^{i=2050} EA_{\text{Alcance}_1} + EA_{\text{Alcance}_2} \leq 69,24 \quad [\text{Mt CO}_2]$$

- (2) Para el año 2050, las emisiones absolutas deben haber disminuido en un 31% con respecto a las emisiones tomando como año base el año 2010:

$$EA_{\text{Alcance}_1,2050} + EA_{\text{Alcance}_2,2050} \leq (1 - 31\%) \cdot EA_{2010}$$

El año 2010

Acero no contaba con una medición de Gases de Efecto Invernadero, a pesar de haberse adscrito a *Worldsteel Association* el año 2009. De este modo, se ha mantenido el valor del 2018 como el año base de reducción de emisiones absolutas, obteniendo lo siguiente:

$$EA_{\text{Alcance}_1,2050} + EA_{\text{Alcance}_2,2050} \leq (1 - 31\%) \cdot 1.882.172$$

$$EA_{\text{Alcance}_1,2050} + EA_{\text{Alcance}_2,2050} \leq 1.298.699 \quad [\text{ton CO}_2]$$

- (3) La intensidad de emisiones del año 2050 debe ser un 55% menor a la intensidad de emisiones del año 2010:

$$IE_{2050} \leq (1 - 55\%) \cdot IE_{2010}$$

Para cumplir las tres condiciones simultáneamente se determinó que la restricción limitante para la reducción de emisiones del proceso integrado corresponde a la intensidad de emisiones al año 2050. De este modo, la trayectoria entre los años 2031 y 2050 se construyó imponiendo como condición llegar a la meta de intensidad para el último año de la trayectoria. Bajo esta consigna, se presentan los resultados finales del cálculo de la trayectoria, demostrando que ésta cumple con todas las condiciones:

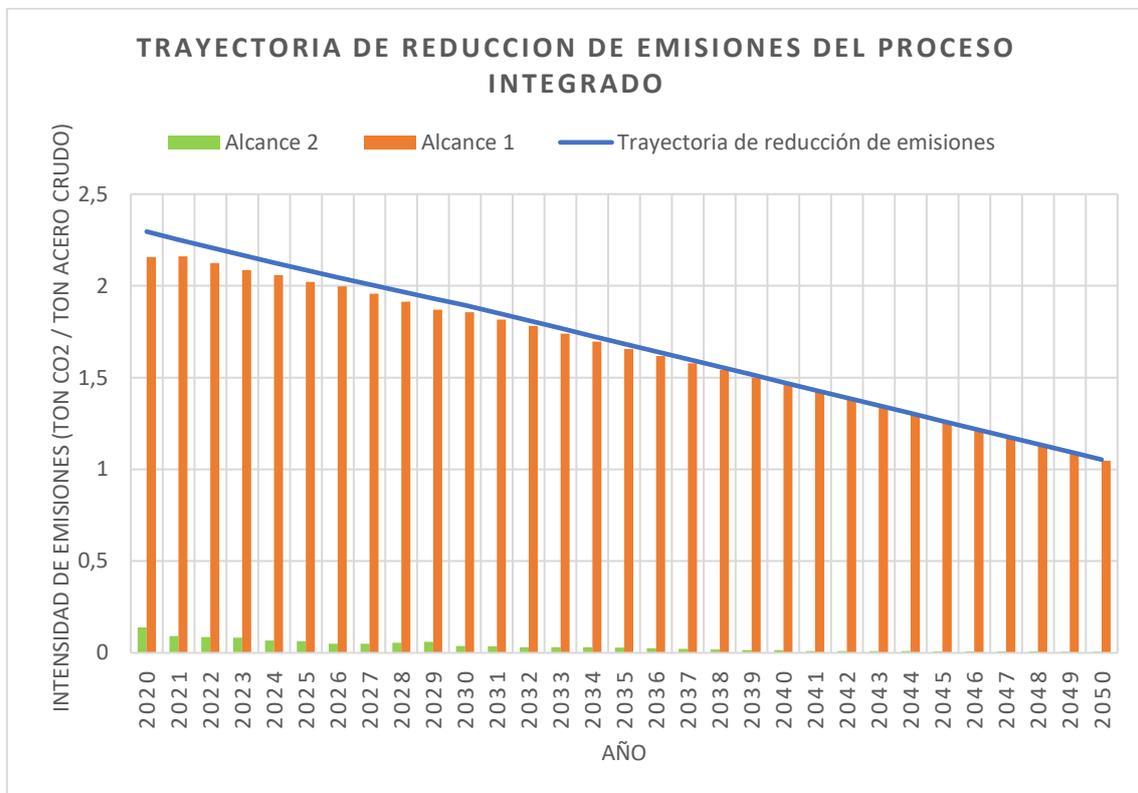
Tabla 7. Restricciones en trayectoria de reducción de emisiones para el proceso integrado.

RESTRICCIONES EN TRAYECTORIA DE REDUCCIÓN DE EMISIONES (Según SDA)			
Restricción	Valor logrado	Condición	Celda objetivo
(1) Emisiones absolutas (2020 - 2050) [Mt CO ₂]	39,12	Menor o igual a	69,24
(2) Emisiones del año 2050 [t CO ₂]	830.828,56	Menor o igual a	1.298.698
(3) Intensidad de emisiones al 2050 [t CO ₂ / t acero crudo]	1,053	Menor o igual a	1,053

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se presenta a continuación la trayectoria de reducción de emisiones asociada a la presente ruta productiva, incluyendo el desglose de los aportes por alcance 1 y 2.

Figura 8 Trayectoria de reducción de emisiones del proceso integrado entre los años 2020 y 2050, incluyendo participación de cada alcance



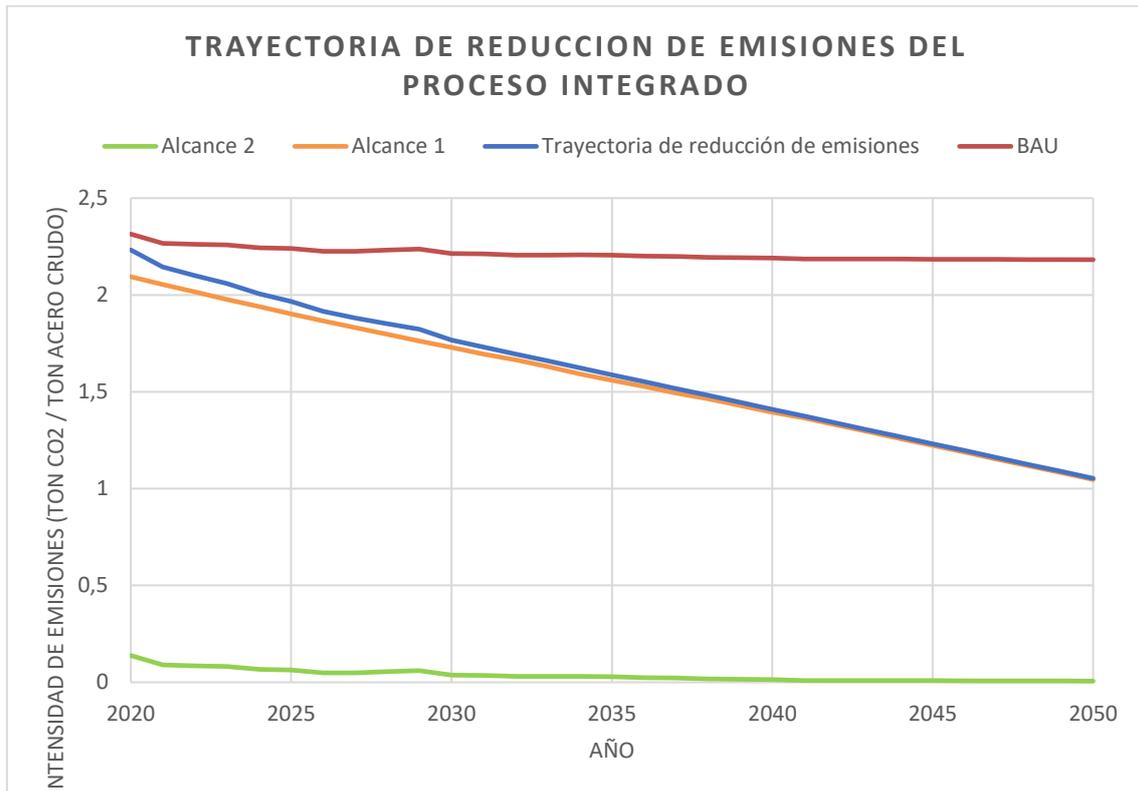
Fuente: Elaboración propia.

En la trayectoria se puede identificar que las emisiones de alcance 1 son el grueso de la contribución a la intensidad de emisiones del proceso integrado, donde hacia fines de la trayectoria el alcance 2 de las emisiones prácticamente no contribuye a la construcción de la curva. Por lo mismo, el cumplimiento de esta trayectoria depende principalmente de las acciones de mitigación directamente ligadas a las operaciones de la industria integrada.

Adicionalmente, se presenta la trayectoria BAU (representando “Business as Usual” por sus siglas en inglés) que correspondería a la trayectoria de emisiones que seguiría esta ruta productiva si no realizara esfuerzos de reducción de emisiones⁵⁶. En la figura a continuación se presentan las trayectorias de reducción de emisiones, su desglose en alcance 1 y 2, y la trayectoria BAU.

⁵⁶ Se mantuvo la intensidad de emisiones del alcance 1 fija y el alcance 2 variable en función solo de la descarbonización.

Figura 9 Trayectoria de reducción de emisiones del proceso integrado entre los años 2020 y 2050, incluyendo trayectoria Business As Usual



Fuente: Elaboración Propia

3.2.4 Análisis de sensibilidad de la trayectoria de reducción de emisiones en torno a posibilidades de suministro energético mediante fuentes de energía renovable

Las curvas que delimitan la trayectoria de reducción de emisiones, tanto para el proceso integrado como el semi-integrado, se ven nutridas de la descarbonización de la matriz energética. Si bien en el caso del proceso semi-integrado esta relación es más evidente debido a la alta participación del alcance 2 en las emisiones totales del proceso, en ambas rutas productivas es de interés relevar la posibilidad de que las empresas adquirieran contratos de suministro mediante energías renovables⁵⁷ dentro del corto-mediano plazo.

El suministro mediante energías renovables se asume con un factor de emisión de 0 toneladas de CO₂ por MWh consumido⁵⁸, de modo que contar con un suministro de esta índole le puede dar a las compañías un poco más de holgura en la cantidad de emisiones que pueden provenir de las operaciones directas de los procesos siderúrgicos (alcance 1). Además, cuanto antes se contrajera un contrato de estas características, permitiría extender los plazos de inversión en tecnologías de mitigación de Gases de Efecto Invernadero para alcanzar los objetivos de reducción de emisiones de las trayectorias de reducción construidas.

⁵⁷ Siempre y cuando estos contratos contaran con los certificados de rigor que validen esta reducción de emisiones, según las recomendaciones del Greenhouse Gas Protocol para el Alcance 2, según lo disponible en: https://ghgprotocol.org/sites/default/files/ghgp/standards/Scope%20%20Guidance_Final_0.pdf

⁵⁸ Asumiendo que incluyen certificados de reducción de emisiones.

Cabe mencionar que, si bien el alcance de este estudio corresponde a la identificación y priorización de tecnologías de necesidades de cambio climático para el sector de acero, y aunque la instalación de sistemas de auto-consumo o la contratación de acuerdos de suministro de renovables escapen de esta dimensión, se estima que es una posibilidad viable dentro del corto plazo para el sector. Por lo mismo, se realizará una sensibilidad para las trayectorias de reducción de emisiones considerando tres escenarios posibles⁵⁹:

- (1) El contrato de suministro mediante renovables comienza el año 2020,
- (2) El contrato de suministro mediante renovables comienza el año 2025,
- (3) El contrato de suministro mediante renovables comienza el año 2030.

En definitiva, desde el año en el que comience a regir la nueva fuente de suministro, las emisiones de alcance 2 serán cero toneladas de CO₂. Frente a esta situación se diseñarán las nuevas trayectorias y se entregarán conclusiones al respecto para el proceso integrado.

3.2.5 Reflexiones en torno a las trayectorias de reducción de emisiones construidas

Las trayectorias de reducción de emisiones han sido construidas en concordancia con la ciencia, en particular basándose en la información de la Agencia Internacional de la Energía (IEA) y la iniciativa Science Based Targets (SBT).

Estas metodologías para establecer metas de reducción de emisiones se basan en las publicaciones del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) y en el escenario de 2°C (2DS) de la publicación *Energy Technology Perspectives* (ETP) de la IEA. Estas fuentes secundarias son actualizadas de manera regular, en particular el IPCC ha publicado nuevos informes de evaluación de forma regular (cada cinco a seis años). La IEA, por su lado, tiene previsto publicar actualizaciones periódicas de los datos subyacentes de los 2DS cada dos años. De este modo, los autores de la metodología de descarbonización sectorial (SDA) de SBT utilizada a lo largo de esta sección planifican actualizar este método de acuerdo con las actualizaciones del IPCC aproximadamente cada cinco años.

Teniendo en consideración lo anterior, es recomendable revisar y actualizar las metas y trayectorias de descarbonización **por lo menos cada 5 años**, tomando también en cuenta la actualización de los diversos supuestos utilizados en la construcción de las curvas, entre ellos:

- (a) La descarbonización de la matriz energética
- (b) El crecimiento de producción de acero del sector
- (c) El aumento en consumo eléctrico equivalente al aumento en producción

Esta revisión permitirá ir ajustando las trayectorias de descarbonización a (a) la tasa efectiva de retiro de centrales de generación a carbón en Chile, (b) el crecimiento real del sector en cuanto a su producción, (c) la incorporación de medidas de eficiencia energética que se tomen en el transcurso de los años.

⁵⁹ Debido a la rápida descarbonización de la matriz, no se consideran como escenarios la adopción de ERNC después del 2030, ya que es precisamente hasta este año donde se producen las mayores emisiones por consumo eléctrico. El factor de emisión del SEN para el 2030 ya va a haber alcanzado un valor de 0,08 (t CO₂ / MWh).

4. PLAN DE INVERSIÓN Y MODELOS DE NEGOCIOS

El Plan de Inversión se constituye como un elemento medular del estudio, ya que define los esfuerzos económicos -inversiones- que se requieren asumir en diferentes momentos, para la implementación del recambio tecnológico y por ende para la transición de la industria a una producción baja en carbono, en línea con las metas y trayectorias de reducción definidas. Adicionalmente, de la definición del Plan de Inversión y el análisis de la situación actual del sector, se desprenden una serie de barreras y marcos facilitadores asociados, cuyos plazos estarán en estrecha relación. En síntesis, en conjunto, las actividades y plazos establecidos en el Plan de Inversión y los marcos facilitadores, se constituyen como la Hoja de Ruta del proyecto, y de su correcta definición depende en gran medida el éxito del proyecto.

En el Capítulo 2 se presentó Benchmark de las opciones tecnológicas disponibles para la mitigación de emisiones, y en el Capítulo 3 se determinaron las metas de reducción del sector a nivel nacional, y la trayectoria de reducción requeridas para el logro de los objetivos del Acuerdo de París. En este apartado se presenta la metodología de priorización de tecnologías según su costo efectividad para el abatimiento de CO₂ a través de la metodología de Costo Marginal de Abatimiento (MACC por sus siglas en inglés), y la definición de un Plan de Inversión basado en el análisis anterior (\$/ton CO₂ abatidas), pero incorporando criterios adicionales mediante un Análisis Multicriterio (AMC) que permitió considerar otros aspectos de relevancia para la toma de decisiones en proyectos inversión de esta naturaleza por parte de la industria, los cuales se encuentran estrechamente relacionados con su realidad operativa y financiera.

Finalmente, considerando el Plan de Inversión, se realizó el análisis de necesidades de financiamiento y modelo de negocio de sus medidas más fundamentales.

4.1. Confección de las Curvas MACC

4.1.1. Definiciones y precisiones

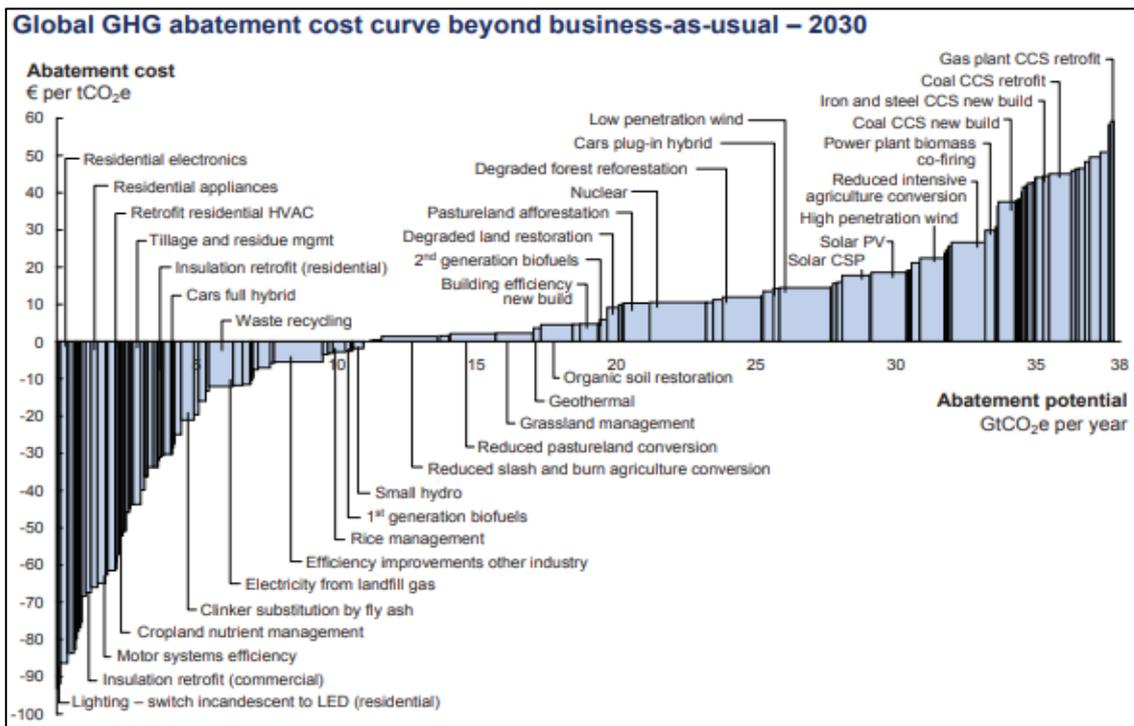
Para lograr adecuadamente el compromiso de reducción de emisiones de GEI, se debe determinar una estrategia de mitigación que le permita al sector seguir su trayectoria de reducción de emisiones sin perjudicar su crecimiento económico.

Una herramienta que es utilizada en este contexto de costo beneficio (o costo efectividad) es la curva de costos marginales de abatimiento (en adelante MACC), la que permite comparar los costos y potencial de reducción de emisiones de distintas medidas de mitigación (Banco Interamericano de Desarrollo, 2013).

La MACC es de ayuda para la toma de decisiones ya que proporciona una manera simple de identificar qué proyectos son los más rentables por unidad de CO₂e abatidos y qué opciones ofrecen el mayor potencial de reducción. Es una representación visual, de un grupo de proyectos de reducción de GEI enumerados, desde el más rentable por tonelada de carbono hasta el de menor rentabilidad (WALGA, 2014).

A continuación, se muestra un ejemplo de MACC:

Figura 10 Ejemplo Curva de Costo Marginal de Abatimiento (MACC)



Fuente: Curva Abatimiento Global McKinsey (McKinsey & Company, 2009)

Como muestra la Figura, en el eje vertical se identifica el costo de abatimiento que representan las medidas técnicas disponibles (en EUR/ton CO₂) y su potencial de reducción de emisiones anual en el eje horizontal (Gt CO₂ anuales). Este impacto relativo corresponde al potencial de reducción del volumen de emisiones de gases de efecto invernadero de cada medida. La reducción se mide de manera contrafactual (se compara la medida al caso BAU, “business-as-usual” o caso de referencia).

Para generar una MACC, se requiere la siguiente información:

- Potencial de reducción
- Costos de reducción

Cálculo de potencial de reducción

Definido como la diferencia de volumen entre la línea base de emisiones y las emisiones después de que se haya aplicado el cambio de tecnología. La línea base de emisiones se calcula a partir de varios factores, como la intensidad de carbono de un combustible fósil específico, el volumen de producción de un material básico o combustible consumido de un vehículo. Cada cambio tecnológico de reducción posee valores específicos del proveedor, cuya cuantificación está determinada por la literatura y las discusiones de expertos.

Debido a la lógica de orden de mérito de las tecnologías que se adhieren al principio de "primero el menor costo", la tecnología con el siguiente mayor costo se aplica en una nueva línea de base después de las reducciones de todas las tecnologías anteriores. Cada tecnología de reducción es evaluada de forma independiente. (McKinsey & Company, 2009)

Cálculo de costo de reducción

El costo de reducción o de abatimiento, se define como el costo incremental de una tecnología de bajas emisiones en comparación con el caso de referencia, medido en este caso como USD por t CO₂e de emisiones disminuidas. Los costos de reducción incluyen reembolsos anuales por gastos de capital (CAPEX) y gastos operativos (OPEX). Por lo tanto, el costo representa el "costo del proyecto" puro para instalar y operar la tecnología de bajas emisiones. La disponibilidad de capital no se considera una restricción.

El costo de reducción se calcula de acuerdo con la fórmula que se muestra a continuación. El costo total de una alternativa eficiente de CO₂e incorpora el costo de inversión (calculado como el reembolso anual de un préstamo durante la vida útil del activo), costos de operación (incluidos costos de personal y materiales) y posibles ahorros de costos generados por el uso de la alternativa (especialmente ahorros de energía). El costo total no incluye el costo de transacción, el costo de comunicación / información, los subsidios o el costo explícito de CO₂, los impuestos o el impacto consecuente en la economía (por ejemplo, las ventajas del liderazgo tecnológico). (McKinsey & Company, 2009).

$$\text{Costo de abatimiento} = \frac{[\text{Costo total de CO}_2\text{e alternativa eficiente}] - [\text{Costo total de solución de referencia}]}{[\text{Emisiones de CO}_2\text{e solución de referencia}] - [\text{Emisiones de CO}_2\text{e alternativa}]}$$

Cabe mencionar, que la "solución de referencia" indica la situación habitual (*business-as-usual*), por lo tanto, no implica un costo para la compañía.

Criterio general

En general, las opciones tecnológicas se pueden dividir en dos categorías principales: tecnologías de mitigación de carácter incremental (corresponden a mejoras incrementales en base a las soluciones de producción de acero vigentes, como por ejemplo derivadas de la eficiencia energética); y las tecnologías de mitigación basadas en una solución alternativa para la producción de acero (innovaciones de gran escala que pueden implicar inversiones en nueva capacidad productiva o nuevas etapas para el proceso de producción de acero). Las primeras son más conocidas por la industria, y generalmente están dependientes a la actual operación de producción de acero (serán llamadas "**tecnologías de mejora incremental**"), mientras que las últimas son más disruptivas al proceso, pueden estar en una etapa pre-comercial y serán llamadas "**tecnologías transformacionales**". Como resultado del trabajo descrito, se obtuvieron las curvas MACC de las diferentes tecnologías consideradas, lo que resultó en una jerarquización de estas en base a su costo efectividad. Luego, estas se someten a un Análisis Multicriterio - descrito a continuación-, lo que permite desarrollar finalmente un Plan de Inversión.

4.2 Priorización de Tecnologías en base al Análisis Multicriterio

Como ya se mencionó, el objetivo del análisis multicriterio es priorizar opciones tecnológicas para el Plan de inversión, incorporando criterios adicionales al potencial de abatimiento y costos. Se destaca la necesidad del involucramiento de la industria al momento de evaluar alternativas

de inversión, con el fin de que estas sean capaces de satisfacer las demandas de descarbonización (meta y trayectoria) definidas, con un análisis base que sea adecuado, considerando la realidad y percepción de la empresa dadas sus limitaciones y prioridades al momento de tomar decisiones de inversión.

Para el análisis multicriterio se utilizó la metodología de Análisis Jerárquico, desarrollada por Thomas L. Saaty, la cual contempla la utilización de una Matriz que permite combinar el uso de criterios cualitativos y cuantitativos.

Los tipos de Comparaciones pareadas que se pueden realizar utilizando la matriz de Saaty son:

- (1) Importancia: Apropiado cuando se comparan criterios entre sí.
- (2) Preferencia: Apropiado cuando se comparan alternativas de proyectos.
- (3) Más probable: Usado cuando se compara la probabilidad de los resultados, ya sea con criterios o alternativas (Pacheco, F; Contreras E., 2008).

En relación a lo anterior, en el presente estudio se comparó la importancia de un criterio por sobre otro. Por ejemplo: ¿Qué es más importante para seleccionar una determinada tecnología: la magnitud de reducción de emisiones o el capital inicial requerido?

Adicionalmente se utilizó Juicio experto para la evaluación de cada tecnología en base a cada criterio, obteniéndose una nota en cada punto a evaluar. La síntesis del análisis considera la corrección del puntaje obtenido por evaluación de juicio experto de las tecnologías de acuerdo a la ponderación de los criterios.

4.2.1. Pasos del Análisis Multicriterio (AMC)

4.2.1.1 Definición de criterios y ponderación

De acuerdo a indicaciones del método, se definieron una serie de criterios para evaluar las tecnologías. Este trabajo se hizo en conjunto con partes interesadas, a través de entrevistas en las cuales se presentaron una serie de criterios para ser validados y evaluados en función de su prioridad. En esta etapa era factible incorporar nuevos criterios, para lo cual debía eliminar criterios presentados -y mantener constante el número total de criterios. En otras palabras, el entrevistado realizó un juicio de valor y un ejercicio de *trade off*. Los criterios finales que fueron ponderados luego de esta actividad corresponden a aspectos medioambientales (*magnitud la reducción de GEI, uso de energía eléctrica requerido*), de implementabilidad (*Infraestructura habilitante, horizonte temporal adecuado, madurez de la tecnología*) y económicos (*costo eficiencia, capital inicial requerido, retorno de la inversión, productividad*).

Utilizando la Matriz de Saaty, los criterios fueron priorizados según la relevancia asignada a través de la comparación pareada. De esta forma, se obtuvo un factor de corrección del criterio, bajo el cual fueron ajustados los puntajes asignados mediante juicio experto para cada criterio a las tecnologías de mitigación evaluadas.

4.2.1.2 Aplicación de Escala de Juicio

Cada una de las alternativas tecnológicas se evaluó en función de los criterios precedentes mediante una escala jerárquica donde 1 es la peor calificación y 5 la mejor. Lo anterior se realizó a base del juicio experto, en función de los antecedentes recopilados en las etapas anteriores.

4.2.1.3 Síntesis de los resultados obtenidos

Finalmente, cada tecnología obtuvo una puntuación total que resulta de la evaluación de tecnología según los criterios definidos y la aplicación de la ponderación.

Del análisis del ejercicio de definición y priorización de criterios realizado en conjunto con la contraparte y actores de la industria, se evidencia que los criterios más relevantes para la toma de decisiones relacionadas con proyectos de inversión, son de carácter financiero, o incluyen variables económicas como son la relación costo-efectividad, o la magnitud de intensidad del uso de la energía eléctrica. Lo anterior se encuentra fuertemente relacionado con las barreras identificadas, tanto en el análisis del mercado internacional, como de los talleres participativos, lo cual se verá en el siguiente apartado.

Como principal resultado de esta sección, a partir de la elaboración de la curvas MACC y luego con el desarrollo del AMC, tenemos un cambio en el orden de mérito de las tecnologías, siendo los criterios económicos y financieros los que mayor peso tienen en la toma de decisiones para la industria -en particular la inversión inicial requerida y el período de retorno-.

4.3 Plan de inversión

Durante esta sección se presenta una evaluación económica y financiera general para las medidas destacadas del plan de inversión por el AMC. Se incluye también, las opciones de modelos de negocio, los esquemas de incentivos financieros aplicables y algunas recomendaciones para su postulación.

4.3.1 Evaluación de proyectos

A continuación, se presentan los proyectos priorizados y sus respectivos análisis económicos para la recomendación de mecanismos de financiamiento.

4.3.1.2 Metodología y supuestos

A partir del ejercicio del análisis de costo efectividad y análisis multicriterio detallados previamente se priorizaron un grupo de tecnologías para ser parte de la trayectoria de reducción de emisiones,

para cada tecnología se consideraron sus costos de operación, costos de inversión y potencial de reducción de emisiones a partir del levantamiento realizado⁶⁰. A partir de esta información se calcularon los flujos de caja del proyecto reflejando la inversión inicial y los ahorros acumulados en un horizonte de 30 años.

A partir de estos flujos se calculó el VAN usando una tasa de descuento del 10% (tasa genérica utilizada para este tipo de mercado antes de establecer una estructura de financiamiento), lo que permite calcular cuáles serán las ganancias del proyecto al final del año 30. Un VAN positivo indica que el proyecto al final de su vida útil genera utilidades, un VAN negativo indica que el proyecto, luego de cumplir su vida útil, no genera utilidades.

El cálculo de VAN Social considera un ingreso adicional a los flujos anuales asociado al CO₂ que mitiga el proyecto. Este ingreso adicional se valora a 32,5 USD/tCO₂e⁶¹, descontado a un 6% anual, lo que permite reflejar las utilidades que genera el proyecto considerando otras externalidades.

Adicional a esto, se calcula el tiempo de recuperación de la inversión simple (sin considerar descuentos anuales). Este valor se calcula dividiendo el capital inicial a invertir en los ahorros anuales esperados. Este ejercicio nos permite visualizar el año en el que se paga la inversión inicial y se comenzaría a percibir excedentes por el proyecto.

Finalmente se calcula el costo de abatimiento de la medida, lo que se traduce en el costo de mitigar 1 tonelada de CO₂ al año implementando esta tecnología. Este valor es negativo si es que la medida reporta ingresos al final de su vida útil, y positivo si es que no reporta ingresos, por lo que consiste en una inversión que se traduce en flujos negativos con tal de mitigar las emisiones de CO₂ del proceso. El valor se calcula a partir del VAN del proyecto dividido en la cantidad de CO₂ equivalente a mitigar en la vida útil total del proyecto.

4.3.1.3 Resultados y caracterización de grupos de proyectos

A modo de entregar recomendaciones de financiamiento más detalladas, se ha decidido agrupar las tecnologías analizadas en función de sus respectivos tiempos de recuperación, dando lugar a los grupos A, B y C, como se presenta en la siguiente tabla:

⁶⁰ Available and Emerging Technologies for Reducing Greenhouse Gas Emissions from the Iron and Steel Industry, EPA, 2012.

⁶¹ Estimación del Precio Social del CO₂, División de Evaluación Social de Inversiones Subsecretaría de Evaluación Social Sistema Nacional de Inversiones, 2017.

Tabla 8 Grupos de proyectos para iniciativas seleccionadas

GRUPO A	GRUPO B	GRUPO C
<ul style="list-style-type: none"> • Se pagan en menos de un año • Bajos costos de capital • Se pueden financiar con capital propio o deuda tradicional. • Juntas tienen un potencial de abatimiento de 160 kTon CO₂/año. 	<ul style="list-style-type: none"> • Opciones con costos y períodos de recuperación intermedios entre 2 y 5 años. • Estas son financiadas a través de deuda blanda, otorgada por mecanismos públicos o provenientes de banca multilateral. • Tienen un potencial conjunto de mitigación de 45 kTon CO₂/año. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tecnologías con altísimos costos de capital (20 MM USD) y períodos de retorno sobre los 20 años. • Para viabilizar estas inversiones, se requieren de subsidios estatales o internacionales, o estímulos de mercado. • Juntas tienen un potencial de abatimiento de 22 kTon CO₂/año.

Fuente: Elaboración Propia

El grupo A se caracteriza por poseer tiempos de recuperación de capital menor al año, con inversiones relativamente bajas en comparación al grupo y un potencial de abatimiento medio-alto.

El grupo B se ve representado por tecnologías con tiempos de recuperación mayores al año pero menores a los 5 años. Finalmente, el grupo C se caracteriza por poseer altos valores de inversión inicial, tiempos de recuperación por encima de los 20 años, y bajo potencial de mitigación de CO₂.

De esta forma, se ha constituido una clasificación de tres grupos de tecnologías en base a sus CAPEX y flujos futuros, y de esta forma proponer modelos de negocio orientados a cada grupo.

4.3.2 Financiamiento para iniciativas priorizadas

4.3.2.1 Elementos de un esquema de financiamiento

Para la ejecución de un proyecto como los evaluados anteriormente es necesario levantar el capital necesario para la implementación y sostenibilidad en el tiempo, teniendo en consideración las restricciones tanto técnicas como económicas que podrían existir. Tomando como referencia el Global Green Growth Institute⁶², se categorizan e identifican principales riesgos asociados a la implementación de cualquiera de estos proyectos bajo un esquema de financiamiento climático. A continuación, y a modo de ejemplo, se presentan los criterios de clasificación del GGGI desde el punto de vista de un inversionista:

⁶² Mind the Gap: Bridging the Climate Financing gap with Innovative Financial Mechanisms

Tabla 9 Resumen de riesgos para el inversionista.

Tipo de Riesgo	Ejemplos
Riesgos Políticos	<ul style="list-style-type: none"> • Inestabilidad política • Seguridad pública y estado de derecho • Cambios en apoyo de gobiernos de turno a proyectos climáticos
Riesgos Regulatorios	<ul style="list-style-type: none"> • Políticas públicas procombustibles fósiles o contaminantes • Falta o insuficiencia de políticas públicas habilitantes para el desarrollo de inversiones Cleantech • Marco legal débil o no aplicación de las regulaciones • Cambios regulatorios que impactan la inversión en proyectos de largo plazo • Inestabilidad generada por cambios frecuentes en la regulación
Riesgos Tecnológicos	<ul style="list-style-type: none"> • Tecnología inmadura o de bajo rendimiento • Falta de experiencia local en desarrollo y operación de proyectos climáticos y/o tecnológicos • Inadecuada infraestructura de apoyo
Riesgos de Crédito	<ul style="list-style-type: none"> • Capacidad crediticia de las contrapartes, con riesgo de default o no pago • Baja experiencia de las contrapartes, especialmente las involucradas en la evaluación financiera del proyecto • Escasa o limitada experiencia local en Project Management
Riesgos Comerciales y de Mercado	<ul style="list-style-type: none"> • Mercado financiero local inmaduro o poco profundo • Liquidez limitada del mercado • Volatilidad cambiaria y depreciación • Altos costos de transacción

Fuente: Elaboración propia (adaptado de GGGI)

En el contexto del estudio realizado se consideraron las siguientes barreras al momento de evaluar y clasificar las iniciativas estudiadas.

- **Riesgo Político:** *Potencial rechazo de comunidades para la implementación de proyectos o cambios de tecnologías.*
- **Riesgo Regulatorio:** *No existen exigencias ni marcos regulatorios habilitantes que fomenten la inversión a tecnologías menos contaminantes.*
- **Riesgo Tecnológico:** *Iniciativas poco desarrolladas o en etapa temprana de desarrollo (por lo tanto, altos costos de implementación).*
- **Riesgo de Crédito:** *al ser el mercado del acero una industria tan atomizada, es difícil que pueda obtener recursos estatales para el financiamiento de sus proyectos, por lo que la*

mejor alternativa sería buscar apoyo en fondos internacionales dedicados a la industria siderúrgica.

- **Riesgo comercial y de mercado:** *Mercado del acero verde no desarrollado. Adicional a esto se considera mercado del acero como un mercado de bajos márgenes y alta competitividad.*

El segundo punto relevante es identificar las fuentes de financiamiento que se usarán para el levantamiento del proyecto, y el cómo éstas se articularán entre ellas en orden de poder disminuir los riesgos intrínsecos del proyecto. Las fuentes de financiamiento pueden ser internas o externas, en donde las fuentes internas corresponden a las utilidades retenidas de la empresa que promueve el proyecto, o a partir de provisiones para futuros desembolsos.

Por otro lado, las fuentes externas pueden aparecer como aportes de capital de los socios, o en forma de deuda, las cuales se clasifican por su prelación de pago desde la deuda senior y garantizada a la junior y subordinada.

Los posibles instrumentos financieros se presentan a continuación:

Patrimonio: capital proveniente de aquellos actores que se responsabilizan por el riesgo base de cada proyecto y quienes son propietarios del proyecto.

- Aportes de capital, proveniente de socios mayoritarios o minoritarios. Se clasifican como inversión de impacto con énfasis en lo financiero (finance first), el impacto (impact first) o una mezcla de ambos.
- Utilidades retenidas de ejercicios pasados.
- Subsidios, los cuales pueden surgir como fondos concesionales para el desarrollo de asistencia técnica (uso predefinido) o como un desembolso en dinero sin condiciones de restitución o reembolso a quién lo entrega.
- Aportes de capital filantrópicos, consideradas como donaciones provenientes de inversionistas privados, con o sin restitución de los fondos.

Deuda: en la forma de créditos o títulos representativos de deuda (préstamos, líneas de crédito, pagarés, efectos de comercio, bonos, leasing, factoring, etc.) es aquel financiamiento que busca una tasa fija o indexada a un índice (variable) de rentabilidad y la devolución del capital al vencimiento de un plazo determinado.

Derivados de cobertura: estos permiten la participación de inversionistas estableciendo ciertas condiciones futuras del proyecto desde el comienzo.

Seguros: instrumentos que apuntan a proteger a los inversionistas en situaciones inesperadas y de impacto relevante, como puede ser la materialización de algún riesgo político específico, efectos cambiarios adversos, desempeño tecnológico insatisfactorio, entre otros.

Garantías: son aquellos instrumentos que tienen por finalidad reducir el riesgo de contraparte logrando una mejora de su perfil de riesgo crediticio. Un ejemplo de este tipo de instrumento es una Garantía Parcial de Crédito, sea esta de primera pérdida o pari passu.

Incentivos Tributarios: instrumentos asociados al menor pago de impuestos, ya sea por créditos fiscales como por aumento del gasto, con el fin de propiciar el desarrollo y la implementación de nuevas tecnologías.

El desafío para este análisis es lograr generar una combinación innovativa para poder viabilizar los proyectos y minimizar los riesgos asociados a estos.

4.4 Mecanismos de financiamiento seleccionados

En primer lugar, se entregan recomendaciones del tipo de financiamiento adecuado, según sus características particulares, para cada uno de los grupos identificados en el capítulo precedente. Específicamente, se considera el monto de inversión y el periodo de retorno de inversión. Luego, se identifican una serie de instrumentos o mecanismos de financiamiento que pueden ser utilizados para el desarrollo de estas iniciativas.

a) Recomendaciones de financiamiento

Grupo A

Los proyectos acá mencionados poseen las características para ser implementados a través de deuda tradicional o incluso capital propio. Los tiempos de recuperación son rápidos, y requeriría una inversión de 6 MMUSD para implementar ambos proyectos, lo que reduciría 160.000 ton de CO₂ al año.

Grupo B

Los proyectos considerados en este grupo tienen la característica de poseer tiempos de recuperación de capital por sobre el año, pero que no exceden los 4 años. Adicionalmente uno de esos proyectos es altamente intensivo en términos de capital (PCI, el cual requiere una inversión de 20 MMUSD).

Una forma de financiar estos proyectos sería a través de deuda blanda, otorgada por mecanismos públicos o provenientes de banca multilateral.

Mecanismos adicionales de financiamiento se desarrollarán en el apartado a continuación.

Grupo C

Este grupo posee no solo tiempos de recuperación muy elevados, sino que también VAN negativo. Para promover iniciativas como esta, la única forma sería obteniendo subsidios estatales o de organismos internacionales, o la incorporación de estímulos al mercado que viabilicen estas iniciativas (por ejemplo, precio al carbono como impuesto específico al carbono, o una cuota mínima para la adquisición de “acero verde”).

b) Mecanismos de inversión

Para entender el desarrollo de diferentes instrumentos o mecanismos de inversión que se puedan aplicar a estos proyectos, es importante revisar las distintas iniciativas que se han

generado en el último tiempo y que han propiciado un escenario favorable para la existencia de estos. Estas iniciativas son parte de estrategias, tanto locales como internacionales, que buscan definir ejes y medidas que orientan los esfuerzos en materia de financiamiento climático para alcanzar una economía baja en carbono.

Estas son algunas de las fuentes que serían aplicables para la realidad nacional, sin perjuicio de que existen otras fuentes de financiamiento que aplican para otros continentes (como por ejemplo para Europa aplica el fondo Low GHG Steel Estas iniciativas son el resultado del trabajo y coordinación conjunta entre entidades públicas y privadas (nacionales e internacionales) que permiten canalizar flujos de capital públicos y privados hacia un desarrollo sostenible de la industria, principalmente en la generación de instrumentos financieros.

En este contexto, en esta sección se revisó, por un lado, las distintas iniciativas y medidas mencionadas y, por otro lado, los diferentes instrumentos o mecanismos de inversión que podrían aplicar a los proyectos considerados. Es importante aclarar que no se encontraron instrumentos vigentes orientados específicamente a la industria del acero en América Latina. Sin embargo, ha existido experiencia reciente de apoyo financiero al sector en la Región y otras partes del mundo principalmente de Bancos de Desarrollo. Fue el caso del Banco Interamericano de Desarrollo que el año 2015 aprobó un préstamo de 37 MMUSD a la empresa Adelca de Ecuador⁶³, y a comienzos del 2019 la empresa Aperam S.A recibió 100 MMEUR por parte del Banco Europeo de Inversiones⁶⁴.

A continuación, se presenta en primer lugar una tabla resumen de los Mecanismos de Inversión y luego, se explican en mayor detalle estos Mecanismos y las Iniciativas y medidas analizadas.

⁶³ <https://www.iadb.org/es/noticias/bid-apoya-financiamiento-de-siderurgica-en-ecuador>

⁶⁴ <https://www.eib.org/en/press/all/2019-057-eib-provides-eur-100-million-in-financing-for-advanced-stainless-steel-manufacturing>

Tabla 10 Resumen de mecanismos de financiamiento

Nombre de Mecanismo	Descripción	Grado de aplicabilidad
Fondo Verde para el Clima (GCF) ⁶⁵	Este fondo financia programas de mitigación y/o adaptación al cambio climático, impulsados tanto a nivel público como privado en sectores prioritarios.	Baja – La clasificación AOD ⁶⁶ de Chile puede dificultar el acceso a este instrumento
Bono Verde Privado ⁶⁷	Título de crédito que permite el ingreso de recursos para el financiamiento de proyectos con fines ambientales, por parte de inversionistas los cuales obtienen una rentabilidad luego del periodo establecido.	Alta – Considerando la clasificación de riesgo de la industria, es factible la emisión de un bono
BID Invest ⁶⁸	Brazo privado del BID que financia a empresas y proyectos sostenibles a través de diferentes soluciones financieras: Financiamiento mixto, Garantías, Emisión de bonos y préstamos.	Alta – Los lineamientos del proyecto son coherentes con este instrumento
The Global Innovation Lab for Climate Finance ⁶⁹	A través de un proceso de selección de proyectos con objetivos sostenibles, este Laboratorio moviliza recursos de inversión a través de una asociación pública-privada.	Baja – Las características de estas tecnologías podrían no calzar con este instrumento

⁶⁵ Los criterios de inversión del GCF son:

- Potencial **impacto en términos de reducción de emisiones** y mayor resiliencia.
- Cambio de paradigma (replicabilidad y escalabilidad).
- Potencial de **desarrollo sustentable** (externalidades positivas).
- Justificar vulnerabilidad y necesidades financieras del país receptor.
- Alineamiento con las políticas y prioridades nacionales.
- Viabilidad económica y financiera del programa (efectividad del diseño de instrumento) y eficiencia (mínimo nivel de aporte para hacer la propuesta viable).

Hasta el momento el GCF ha aprobado cuatro proyectos en Chile, tres privados y uno público. La inversión total alcanza los US\$ 1,4 mil millones y permitido la reducción de 51,1 toneladas de CO2 equivalente. <https://www.greenclimate.fund/>

⁶⁶ [ODA: Ayuda Oficial al Desarrollo, clasificación que otorga el Comité de Ayuda al Desarrollo de la OCDE. Chile debido al nivel de renta per cápita dejó de ser considerado como país receptor de esta ayuda.](#)

⁶⁷ Un instrumento que ha destacado para el financiamiento de diferentes proyectos orientados al desarrollo sustentable y la reducción de emisiones de GEI, son los bonos verdes privados.

El año 2017 se emitió el primer bono verde por parte de una empresa chilena del sector forestal, por un valor de US\$ 500 millones.

En 2018, se emitieron dos bonos verdes en los sectores forestal y servicios sanitarios por un total de US\$ 97,7 millones, y en 2019 se emitieron ocho bonos de este tipo por parte del sector privado por un total de US\$ 892 millones, en los siguientes sectores:

- Forestal, por un monto de US\$ 100 millones.
- Banca, por US\$ 50 millones y US\$ 48 millones.
- Servicios Sanitarios, por US\$ 83 millones y US\$ 61 millones.
- Industrial, por US\$ 100 millones.
- Energía, por US\$ 508,1 millones.

⁶⁸ <https://idbinvest.org/es>

⁶⁹ <https://www.climatefinancelab.org/>

Nombre de Mecanismo	Descripción	Grado de aplicabilidad
Clean Technology Fund ⁷⁰	El CTF utiliza una combinación de instrumentos financieros, incluidas subvenciones, préstamos en condiciones favorables y garantías para que la inversión en tecnologías bajas en carbono sea más atractiva para los inversores del sector público y privado en los países en desarrollo.	Alta – En la medida que se desarrolle una iniciativa público-privada

Fuente: Elaboración Propia

⁷⁰ <https://climatefundsupdate.org/the-funds/clean-technology-fund/>

5. CONSOLIDACIÓN DE STAKEHOLDERS

En las fases previas del estudio fueron identificadas las metas y trayectorias de reducción de CO₂ que debe seguir la industria local, para cumplir con el presupuesto de carbono que le corresponde a la industria, según un objetivo de desarrollo sectorial alineado con el Acuerdo de París. Esta etapa busca establecer en forma pragmática y en función del escenario local, la mejor estrategia para el logro de esta meta, lo cual implica por un lado la definición de un Plan de Inversión en Tecnologías -cuál, cuándo, bajo qué modelo de negocio-, y por otro, el establecimiento del marco habilitante deseado para la implementación del Plan -contexto político, normativo, financiero-, y la definición de medidas requeridas -qué, quién, cuándo-, plasmado en una hoja de ruta.

Dado lo anterior, resulta fundamental conocer quiénes son los principales involucrados en el foco del proyecto, que es el recambio tecnológico en miras a la descarbonización del sector, cuál es su relación de dependencia, nivel de influencia e interacciones con otros actores en esta materia.

Considerando la relevancia de una correcta definición e involucramiento de actores claves en la definición de la hoja de ruta, a continuación, se presenta el proceso a través del cual se realizó el mapeo, y las metodologías específicas que fueron aplicadas para el levantamiento de información primaria.

5.1 Mapeo y análisis de stakeholders

El análisis de stakeholders es un proceso de recolección y análisis de información cualitativa que sirve para determinar los actores a considerar al desarrollar o implementar una política o programa (Schmeer, 1999), proceso fundamental para la construcción de marcos facilitadores para la adopción de tecnologías para la descarbonización de la industria. Dado que los grupos de interés cuentan con capacidad organizativa **Fuente especificada no válida.**, es a partir de la identificación de los actores y sus posibilidades de participar en tomas de decisiones de política pública que sirva para superar las barreras del sector, que se logra una base de información para formular la hoja de ruta para la transferencia y la adopción tecnológica.

Considerando lo anterior, en primer lugar, se procedió a realizar un levantamiento general de todos los eventuales involucrados, para luego definir a los grupos de interés, en base al análisis de la relación y la posición de cada actor, respecto a la implementación del Plan.

5.2 Mapeo de stakeholders

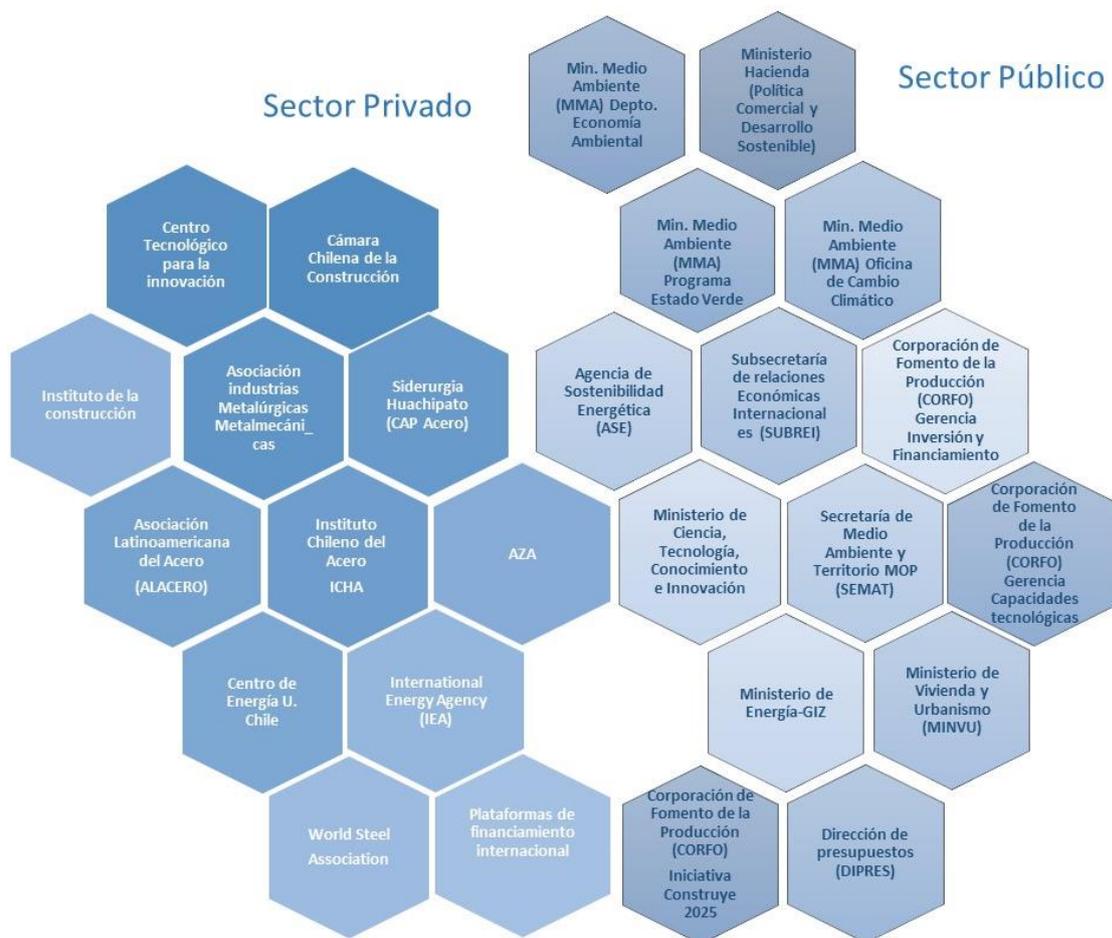
En primer lugar, se realizó un levantamiento general de los stakeholders pertenecientes tanto al sector público como privado, que podrían tener relación con la adopción de tecnologías bajas en carbono, por parte del sector de la siderurgia en Chile.

Considerando el enfoque aplicado del presente estudio, el involucramiento de la industria resulta una condición sumamente relevante, y en cierto punto habilitante, y por ende, actores claves a involucrar.

Respecto del sector público, se realizó una revisión bibliográfica de las políticas públicas, páginas web de los ministerios y unidades, presentaciones disponibles en internet, organigramas, entre otras, que permitieron entender a organismos públicos como stakeholders con competencia en alguna de las materias relacionadas: descarbonización, cambio climático, transferencias tecnológicas, innovación, fomento, financiamiento. El foco para la búsqueda se puso en la identificación y comprensión de las razones o barreras que actualmente limitan la adopción de tecnologías bajas en carbono, y la falta de inversiones significativas por parte del sector público y privado, en función de su capacidad de influencia e interés en relación con la descarbonización de la industria siderúrgica.

A continuación, se presentan los stakeholders identificados en forma preliminar.

Figura 11 Stakeholders relevantes identificados para la transición baja en carbono de la industria siderúrgica



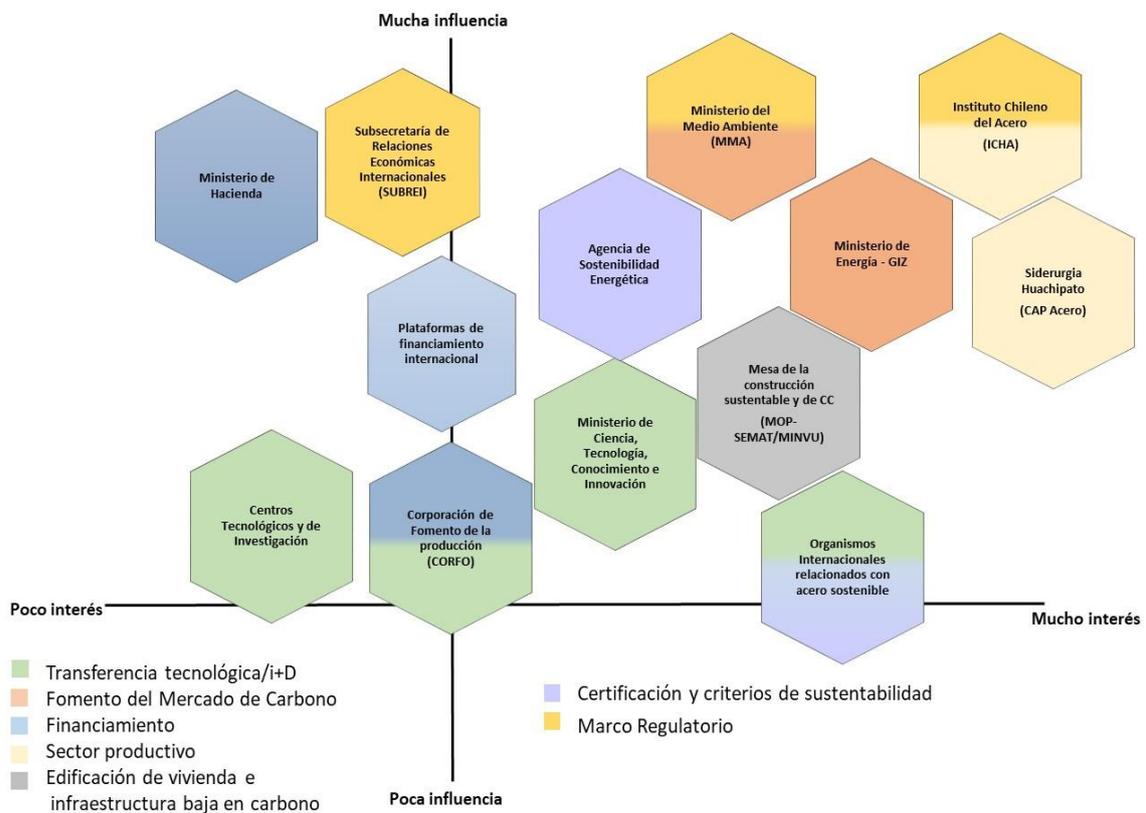
Fuente: Elaboración propia

5.2.1 Análisis de relaciones

Los stakeholders mapeados preliminarmente y recién expuestos, fueron analizados en términos de su influencia e interés en la implementación del plan, dado su ámbito de acción para favorecer el recambio tecnológico en la industria local, y la relación de dependencia para con

dicho proceso. De los diferentes actores, cobran mayor relevancia aquellos que se han planteado objetivos en relación a la sostenibilidad y la descarbonización (es decir, tienen interés afín) y además, tienen influencia en decisiones que pueden aportar en el establecimiento de marcos facilitadores. El resultado de este análisis se muestra a continuación

Figura 12 Análisis de influencia e interés de los actores involucrados



Fuente: Elaboración propia en base a metodología expuesta en (Fundación presencia, 2013)

Del esquema presentado, es posible señalar que aquellos actores ubicados en el cuadrante superior derecho son los de mayor relevancia.

En la tabla a continuación, se describen los grupos de interés que deben ser considerados para efectos del estudio, en base al esquema antes expuesto.

Tabla 11 Descripción de grupos de interés relevantes

Ámbito de acción	Grupos de interés	Relación con proceso de recambio tecnológico para la descarbonización de la industria (interés)
	CAP /AZA	El sector productivo es uno de los principales actores en el proceso, y en general en el estudio, principalmente porque es quien toma las decisiones sobre inversiones en descarbonización. Son responsables por el proceso productivo, y por ende de las emisiones, pero a su vez

Ámbito de acción	Grupos de interés	Relación con proceso de recambio tecnológico para la descarbonización de la industria (interés)
Sector productivo del acero		deben velar por el bienestar financiero de la compañía en un escenario económico complejo.
	Instituto Chileno del Acero (ICHA) y Asociación Latinoamericana del Acero (ALACERO)	El ICHA, dentro de su quehacer contempla la promoción y fomento de tecnologías que apoyen a la descarbonización del sector. En la misma línea está el rol de ALACERO, que también apoya la promoción y fomento de la industria y sus intereses comerciales a nivel latinoamericano.
Marco Regulatorio	Ministerio del Medio Ambiente (MMA)	Entre las responsabilidades específicas del MMA que emanan de la Ley 19.300 de Bases del Medio Ambiente, está el diseño de instrumentos económicos para la gestión ambiental. En conjunto con la Oficina de Cambio Climático, es el Departamento de Economía Ambiental el que se involucra en etapas de diagnóstico, desarrollo y diseño de instrumentos y políticas climáticas, así como en su lógica reglamentaria en conversación con otras carteras involucradas. Cabe destacar que el diseño de instrumentos depende tanto de las condiciones habilitantes y las ventanas políticas que lo permitan.
	La Subsecretaría de Relaciones Económicas Internacionales (SUBREI, ex DIRECON)	La SUBREI ejecuta la política de gobierno en materia de relaciones económicas internacionales por lo cual podría ser un actor relevante en materia de regulaciones frente a la importación de acero extranjero a bajo precio e intensivo en emisiones.
Mercado de Carbono	Ministerio de Energía- GIZ/ MMA	El Ministerio de Energía por su parte, gracias a la cooperación internacional a través de GIZ y el PMR, desarrolla iniciativas que permitan cumplir metas propuestas en el marco de la NDC. El MMA también cumple un rol en las decisiones para fijar un precio al carbono para Chile, habiendo influido en las modificaciones al impuesto verde como parte de la Modernización Tributaria y en la propuesta de instrumentos de gestión del carbono en el PdL de Cambio Climático. En un futuro estará a cargo de la elaboración del reglamento para un esquema de offsets domésticos y en la definición de políticas para el uso del Artículo 6 del Acuerdo de París, desde su División de Economía Ambiental y Oficina de Cambio Climático.
Financiamiento	Gerencia de inversión y financiamiento y Gerencia de capacidades tecnológicas de la Corporación de Fomento de la	En cuanto a CORFO y las posibilidades de financiamiento que otorga, cabe destacar, que un aspecto limitante para la industria con respecto a ser beneficiario de líneas de concurso específicas para el sector, tiene relación con lo concentrado del mercado (pocos actores). No obstante lo anterior, es posible que se puedan recibir recursos desde convocatorias abiertas a diversas industrias, de programas

Ámbito de acción	Grupos de interés	Relación con proceso de recambio tecnológico para la descarbonización de la industria (interés)
	Producción (CORFO)	tecnológicos asociados al hidrógeno verde y de la Ley de I+D.
	Ministerio de Hacienda Plataformas internacionales de financiamiento	El Ministerio de Hacienda es otro actor para considerar en cuanto a poder articular financiamiento intermediado por la banca multilateral de desarrollo. Estos apoyos pueden ir dirigidos al sector público (a través del Banco Mundial o el BID, por ejemplo, pero cuya viabilidad dependerá de la capacidad de endeudamiento del gobierno) o préstamos directos al sector privado (IFC o BID Invest). El Fondo Verde del Clima puede ser también una instancia de fondeo económico y de mayor tolerancia al riesgo, que puede apoyar tanto iniciativas públicas como privadas.
Transferencia tecnológica	Min. Ciencia, centros tecnológicos, industria. Corfo - Gerencia de Capacidades Tecnológicas	El Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación es un actor que podría apoyar la transferencia tecnológica mediante la consideración de la industria siderúrgica en la estrategia de transferencia para Cambio Climático, por ejemplo, tomar el TNA de siderurgia para un Plan de Acción para la transferencia tecnológica (PAT). Junto a esto, centros de investigación como el Centro tecnológico para la innovación o el Centro de Energía de la Universidad de Chile, por dar algunos ejemplos, pueden desarrollar líneas de trabajo que favorezcan la formación de capital humano y transferencia tecnológica, junto a la industria. Finalmente, la Gerencia de Capacidades Tecnológicas de CORFO articula, a través de programas colaborativos, capacidades de desarrollo y transferencia tecnológica.
Lineamientos globales para descarbonización de la industria	Organismos internacionales relacionados con Acero Sostenible.	Lineamientos globales en materia de descarbonización y promoción del desarrollo de tecnologías para la transición baja en carbono del sector. Es importante señalar a nivel global que World Steel y la International Energy Agency (IEA) tienen iniciativas relevantes para el objetivo de la producción de acero sostenible. Por un lado, World Steel, establece a través de la iniciativa Sustainable Steel, ocho indicadores para reportar sustentabilidad ⁷¹ , mientras que IEA, través de la iniciativa de Technology Roadmap para el sector del Hierro y Acero, explora las alternativas tecnológicas y oportunidades para que sea posible implementarlas. A nivel latinoamericano, la Asociación Latinoamericana del Acero (ALACERO) es un actor que colabora con las empresas socias, en difundir información sobre tecnologías, mercado del acero y buenas prácticas.

⁷¹ El año 2019, 85 compañías productoras de Acero contribuyeron con datos sobre los criterios establecidos por esta iniciativa. Información de esta iniciativa disponible en el link <https://www.worldsteel.org/steel-by-topic/sustainability/sustainability-indicators.html>

Ámbito de acción	Grupos de interés	Relación con proceso de recambio tecnológico para la descarbonización de la industria (interés)
		Finalmente, destaca la iniciativa “Responsible Steel” quienes corresponden a una red global de actores de la industria del acero que buscan establecer estándares y certificaciones para un acero con bajos pasivos ambientales y sociales.
Edificación de vivienda e infraestructura baja en carbono	MOP (Secretaría de Medio Ambiente y Territorio - SEMAT) MINVU	La Secretaría de Medio Ambiente y Territorio de la Dirección General de Obras Públicas del Ministerio de Obras Públicas (MOP) es un actor que aglutina a otros actores a partir de la implementación de la Mesa de construcción sustentable (con el Ministerio de Vivienda y Urbanismo -MINVU- y el Instituto de la Construcción, entre otros actores) y la mesa de trabajo de Cambio Climático (Huella en Obras públicas).
Certificación y criterios de sustentabilidad	Agencia de Sostenibilidad Energética / CORFO 2025 y MMA (Programa Estado Verde)	La Agencia de Sostenibilidad Energética (ASE), que lleva a cabo la Certificación de Ahorros de Proyectos Energéticos (CAPE), mecanismo reconocido por el Ministerio del Medio Ambiente y la iniciativa CORFO Construye 2025, que tiene una línea de trabajo de Desarrollo y actualización de normativa y certificación sustentables, podrían ser actores que a futuro consideren explícitamente al sector siderúrgico y pudiesen apoyar iniciativas de certificación de atributo verde junto con el Ministerio del Medio Ambiente que también es un actor relevante para el diseño e implementación de instrumentos de precio al carbono y criterios de sustentabilidad.

Fuente: Elaboración Propia

5.1 Metodologías de trabajo con los grupos de interés

Dependiendo de la relación de cada actor con el propósito del estudio, será el tipo de información que se demande de su parte, y la forma en que se lleve adelante este levantamiento. Así, el trabajo para involucrar a los grupos de interés se abordó mediante diferentes metodologías, las cuales se enuncian a continuación.

1. *Metodología de Análisis Jerárquico desarrollada por Thomas L. Saaty*: Esta metodología fue implementada para involucrar al sector privado en la definición del Plan de Inversión, considerando la realidad y percepción de la empresa dadas sus limitaciones y prioridades al momento de tomar decisiones de inversión.

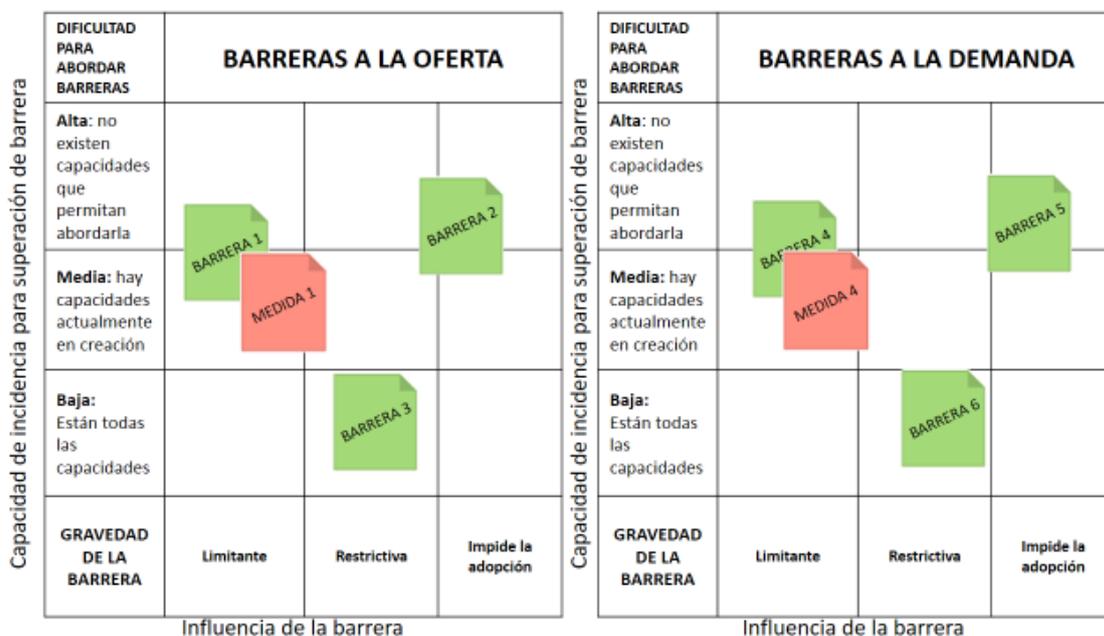
De acuerdo con indicaciones del método, se coordinaron sesiones de trabajo con diferentes grupos de interés, en las cuales se indicó el contexto del ejercicio, su relevancia, se explicaron los lineamientos generales y se solicitó tener presente cierta información relacionada con la operación y los criterios de inversión de la industria. Durante el ejercicio, el equipo consultor **presentó al entrevistado una serie** de criterios de inversión de carácter social, ambiental y económico, y se solicitó evaluar en función

de su prioridad los criterios presentados, e incluso incorporar nuevos criterios, para lo cual se debían eliminar criterios presentados -y mantener constante el número total de criterios. En otras palabras, el entrevistado realizó un juicio de valor y un ejercicio de *trade off*, para definir y priorizar los criterios que son considerados para la toma de decisiones.

2. *Metodologías de trabajo grupal*: Para la corroboración del rol de los diferentes stakeholders, la identificación de barreras que enfrenta el sector siderúrgico y la definición de marcos facilitadores que pueden apoyar la adopción de tecnologías que reduzcan las emisiones en el sector, se llevó a cabo un Taller, al cual fueron convocados diversos actores del sector público y privados previamente descritos.

El taller comenzó con la contextualización a los participantes respecto del estudio y sus principales motivaciones, las que se relacionan con riesgos y oportunidades para la industria. Posteriormente, y con el apoyo de una matriz de significancia, y en función de lo antes expuesto, se solicitó a los participantes identificar las principales barreras a la oferta y la demanda, y ponderar resultados según se muestra en figura a continuación.

Figura 13 . Matriz para análisis de Barreras a la oferta y la demanda



Fuente: Elaboración propia

3. *Entrevistas Semi estructuradas*: A partir del trabajo de investigación y el taller, fueron identificándose nuevos actores que se incluyeron en el proceso de trabajo con grupos de interés mediante entrevistas posteriores al taller. A continuación, se detalla la lista de entidades del sector público y privado con las que se mantuvo entrevistas semi estructuradas, tanto presenciales como virtuales:

- ✓ Departamento de Economía Ambiental del Ministerio del Medio Ambiente
- ✓ Secretaría de Medio Ambiente y Territorio (SEMAT) de la Dirección General de Obras Públicas
- ✓ Gerencia de redes y competitividad de CORFO y dentro del sector privado

- ✓ Instituto Chileno del Acero (ICHA) y la Asociación Latinoamericana del Acero (ALACERO)

6 Análisis económico y definición de barreras para la adopción de tecnologías limpias en la siderurgia

Esta sección aborda las barreras que se vislumbran como amenazas a la implementación del plan de inversión, tanto desde la oferta como de la demanda de tecnologías, dada la coyuntura internacional del mercado del acero, y considerando las condiciones político-regulatorias, y la realidad de la industria a nivel local. Posteriormente, en función de lo anterior, se presentan los marcos facilitadores que se requieren para superarlas.

Cabe destacar que para esta fase se tuvo en consideración las experiencias y opiniones de los principales grupos de interés, públicos y privados.

En primera instancia, se presenta el diagnóstico del mercado internacional del acero, destacando la relación que esto tiene sobre los productores locales en términos de precio, lo cual afecta directamente su capacidad de inversión. Posteriormente, se analizan las barreras relevadas directamente desde los actores del sector público y tomador de decisiones que forman parte del grupo de interés, a través de entrevistas y talleres.

6.1 Diagnóstico económico del mercado en condiciones actuales

6.1.1 Perspectiva macro del mercado del acero mundial

El acero, a diferencia de otros metales base, no ha alcanzado el nivel de madurez para convertirse en un mercado *commodity* puro (Cobre, 2017), por lo tanto, cuando se pretende estudiar el comportamiento del mercado del acero es sumamente relevante identificar qué mercado específicamente se está estudiando.

Es importante identificar que el mercado del acero se divide en dos grandes mercados, y que dentro de estos se pueden luego identificar mercados específicos a estudiar. Estos dos corresponden al mercado del acero crudo y el mercado de los productos terminados de acero. Análogamente, ambos mercados pueden subdividirse, ya sea acorde a la tecnología empleada para la producción del acero crudo⁷², o bien, por el tipo de productos terminados producidos.

Para fines del presente estudio, donde el objetivo es comprender de mejor forma la participación y desempeño de la industria siderúrgica chilena en un contexto globalizado, se considerarán como mercados de estudio el mercado del acero crudo y el de productos terminados.

El mercado del acero crudo está dominado por China, país que representa más del 50% de la producción mundial, con un total de 981.174.000 TM producidas durante el último año⁷³. Mientras que Chile representa menos del 0,06% de la producción mundial, con un total de 1.158.000 TM producidas durante el mismo periodo, tal como lo refleja la **Figura 14**. Por su parte, el mercado de productos terminados de acero presenta una composición similar al

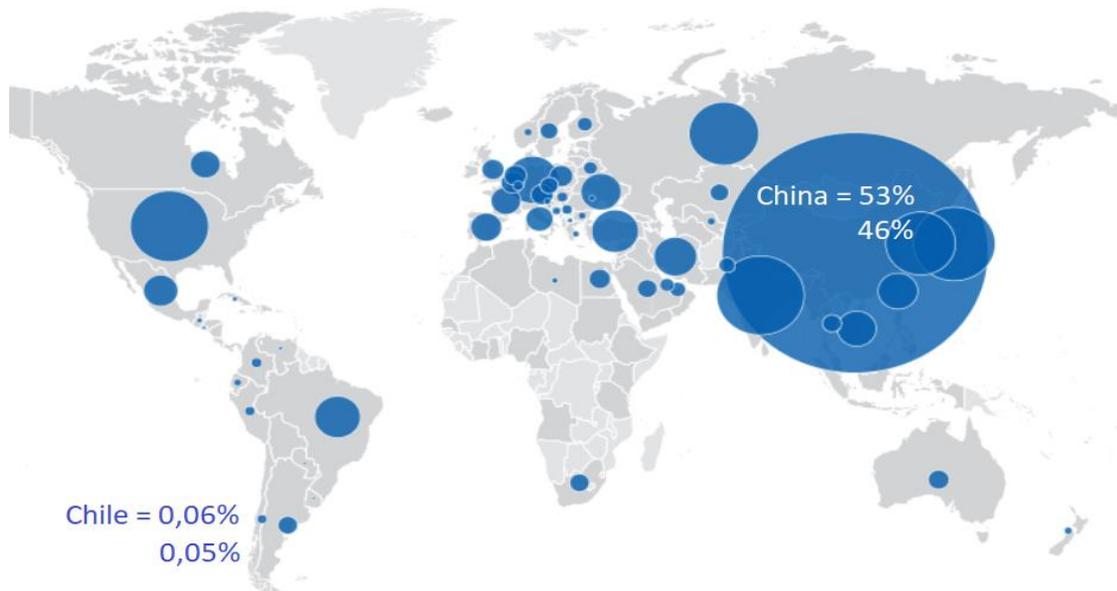
⁷² Proceso integrado o semi-integrado.

⁷³ Agosto 2018 – Agosto 2019.

mercado del acero crudo para estos dos países, representando China el 46% de la producción y Chile el 0,05%, tal como se ilustra también en la figura a continuación.

A partir de esta información se desprende **que Chile es un país precio aceptante** sin injerencia sobre el mercado mundial, lo cual nos permitirá modelar el mercado de acero nacional a partir de un **modelo de equilibrio parcial bajo apertura comercial, donde se enfrenta una oferta perfectamente elástica.**

Figura 14 Participación de⁷⁴ Chile en el Mercado del Acero



Fuente: www. Worldsteel.org

Establecido el contexto macro, resulta fundamental conocer la composición del mercado nacional⁷⁵, tanto por el lado de la oferta como de la demanda, con el objetivo de realizar recomendaciones de políticas que se enfoquen específicamente en las variables del mercado que podrían ser gatillantes de un desarrollo bajo en carbono y competitivo de la industria.

6.1.2 Análisis de equilibrio parcial del mercado de productos terminados de acero en Chile

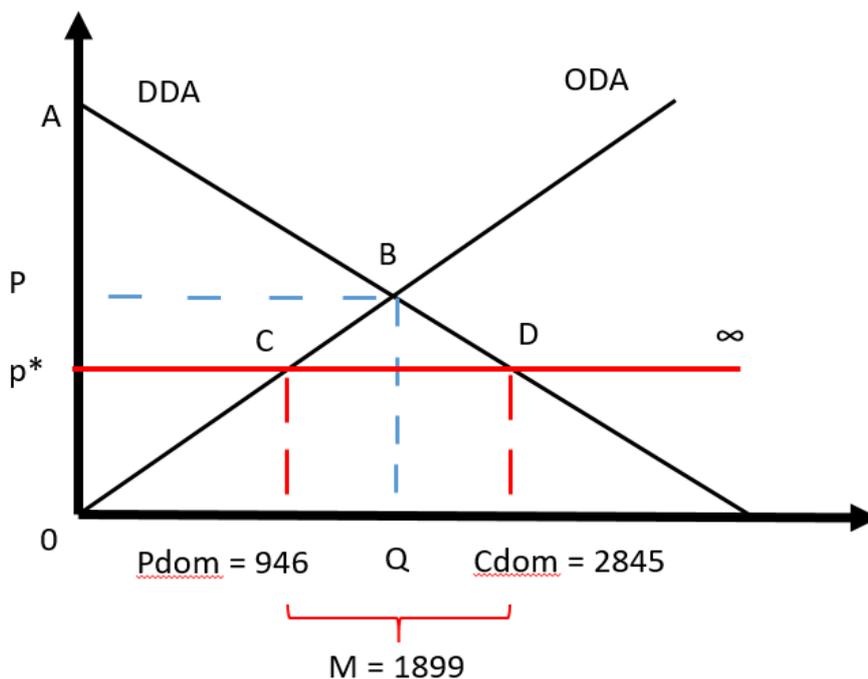
Esta subsección modela el mercado de productos terminados de acero en Chile mediante un análisis de equilibrio parcial, donde se reflejan la oferta, la demanda, las importaciones, las exportaciones y el consumo aparente⁷⁶ nacional. Posteriormente, se computa el equilibrio parcial del año 2010 con el objetivo de contrastarlo con la actualidad y así ilustrar la evolución del mercado del acero en la presente década.

⁷⁴ Acero crudo y productos terminados

⁷⁶ El consumo aparente es la estimación de consumo local que se realiza a partir de la producción local y los intercambios a través del comercio internacional. De esta forma, si se desconoce el consumo, pero se sabe cuál es la producción local, las exportaciones y las importaciones, se estima que el consumo aparente es igual a lo producido, más lo importado, menos lo exportado.

Según la World Steel Association (WSA) Chile produjo 1.062.000 TM de productos terminados de acero durante el año 2017, exportando 116.000 TM, un 11% de la producción, e importando 1.899.000 TM. Por lo tanto, el consumo aparente de productos terminados de acero asciende a 2.845.000 TM. Estas estadísticas, sumado a la organización industrial mundial del mercado, nos permiten poder modelar estáticamente la dinámica del mercado local del acero, tal como se muestra en la figura a continuación.

Figura 15 Equilibrio parcial mercado de productos de acero terminados, Chile 2017.



Fuente: Elaboración propia partir de los datos de World Steel Association. Donde (P,Q) es el equilibrio bajo autarquía, p^ es el precio internacional y por ende la oferta internacional a partir del punto C, el cual define la participación de los productores locales en este mercado. El punto D determina el consumo local de acero, el cual está dado por el equilibrio del mercado abierto. Por lo tanto, C_{dom} es el consumo local y P_{dom} la producción local, y consiguientemente, su resta determina la cantidad importada de acero.*

Así, la oferta nacional por productos de acero terminados está dada por la curva $0C_{\infty}$, la cual se compone de producción local e importaciones, mientras que la demanda local está dada por la función DDA.

Cabe señalar que **la forma de la función de oferta está dada por la calidad de país importador neto y precio aceptante. Así, el país enfrenta una oferta mundial perfectamente elástica al nivel del precio internacional, lo cual implica que participan del mercado solo aquellos productores locales que son al menos tan eficientes como los productores extranjeros, es decir, solo quienes pueden producir a un costo marginal igual o menor al precio internacional del producto.** En Chile, los oferentes locales que participan de este mercado son solo dos: CAP y AZA, quienes se reparten la producción doméstica en la proporción 70% - 30% respectivamente.

De esta forma, el equilibrio de mercado está dado por una demanda (consumo aparente) de productos de acero terminados igual a 2.845.000 TM, la cual se satisface a través de 946.000 TM

de producción local y 1.899.000 TM de importaciones. Por ende, la composición de la oferta nacional está dada por: 1/3 de producción local y 2/3 de producción extranjera.

Es importante señalar que el total de la producción nacional durante el año 2017 se concentró exclusivamente en los Hot Rolled Long Products⁷⁷, que representan entorno al 50% de los Hot Rolled Products y un 35% del total de productos de acero terminados.

Finalmente, existe una fracción de la producción local, 116.000 TM, que es exportada. Esto implica que existe un 11% de la producción local que logra ser competitiva a nivel internacional, es decir, que presenta costos, incluyendo los costos de transacción y logística, menores al precio internacional y que suministra **productos específicos a determinadas industrias**.

Luego, **Figura 15** por sí sola representa un retrato del mercado de productos terminados de acero en un momento del tiempo, año 2017, pero no permite ver cómo ha evolucionado dicho mercado. Por lo tanto, con el fin de mostrar cómo ha cambiado el mercado en cuestión se computó también el equilibrio de mercado para el año 2010, para luego graficar conjuntamente ambos equilibrios y así intentar ilustrar la dinámica acontecida durante estos siete años, lo cual se ilustra en la **Figura 16**

De esta forma, la **Figura 16** muestra en color verde el comportamiento⁷⁸ del mercado registrado el año 2010, mientras que en color rojo se aprecia el comportamiento del mercado durante el año 2017. Esta representación permite modelar económicamente las variaciones registradas en la producción doméstica, el consumo local y las cantidades transadas a través del comercio internacional.

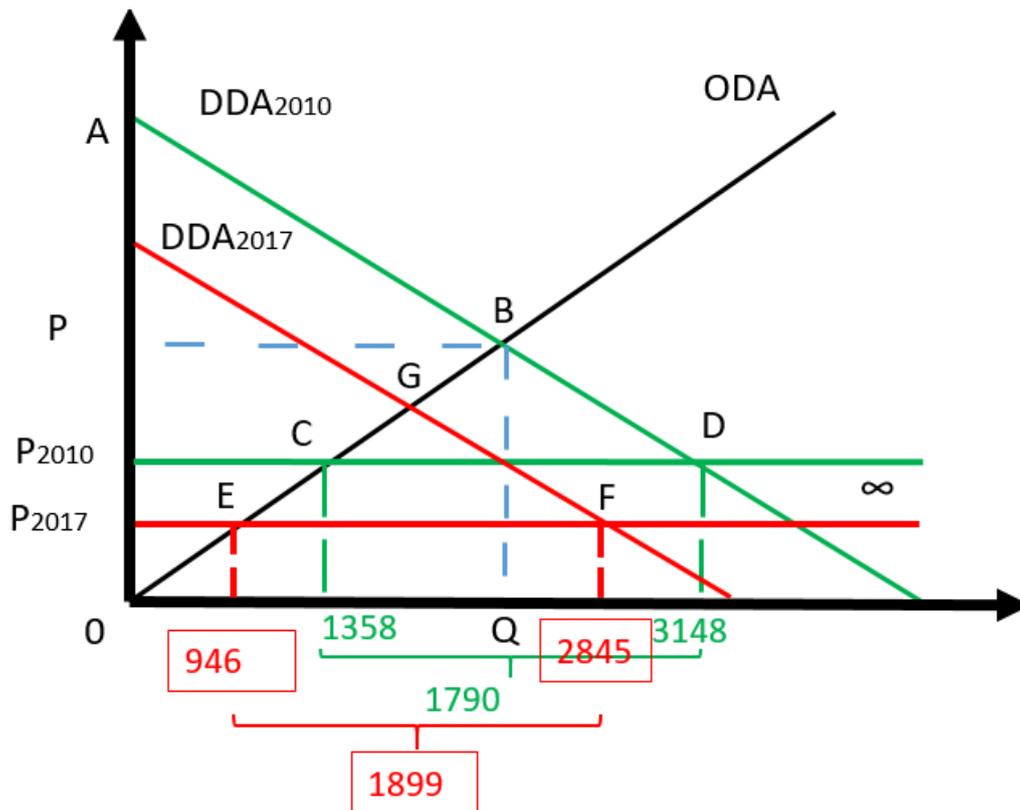
Así, se evidencia que la producción doméstica de productos terminados de acero disminuyó en un 30% entre los años 2010-2017, mientras que la cantidad demandada lo hizo en torno a un 10%. Por su parte, las importaciones aumentaron en un 6% y las exportaciones no registraron variación significativa en el periodo.

Dos cambios implícitos a partir de esta modelación **son la contracción de la demanda local por acero y la disminución del precio internacional del acero**. Si bien, estas variaciones no se fundan en la modificación de parámetros dentro del modelo, ambos cambios están acorde a lo acontecido durante estos años y a lo que sugiere la literatura. Así, la evidencia empírica sugiere una alta elasticidad ingreso de la demanda por metales y una baja elasticidad precio, esto quiere decir que en periodos de desaceleración económica mundial se reduce fuertemente la demanda por metales y esto hace caer el precio. Luego, si miramos la evolución del precio del acero durante los últimos años, su comportamiento es consistente con la dinámica de demanda expuesta (a lo cual se suma el shock de oferta que implicó el aumento de la capacidad instalada de China), lo cual se aprecia en **Figura 16**

⁷⁷ Steel Statistical Yearbook 2018 of World Steel Association.

⁷⁸ Demanda local, producción local, consumo aparente, importaciones y precio internacional.

Figura 16 Equilibrio mercado del acero 2010 v/s 2017



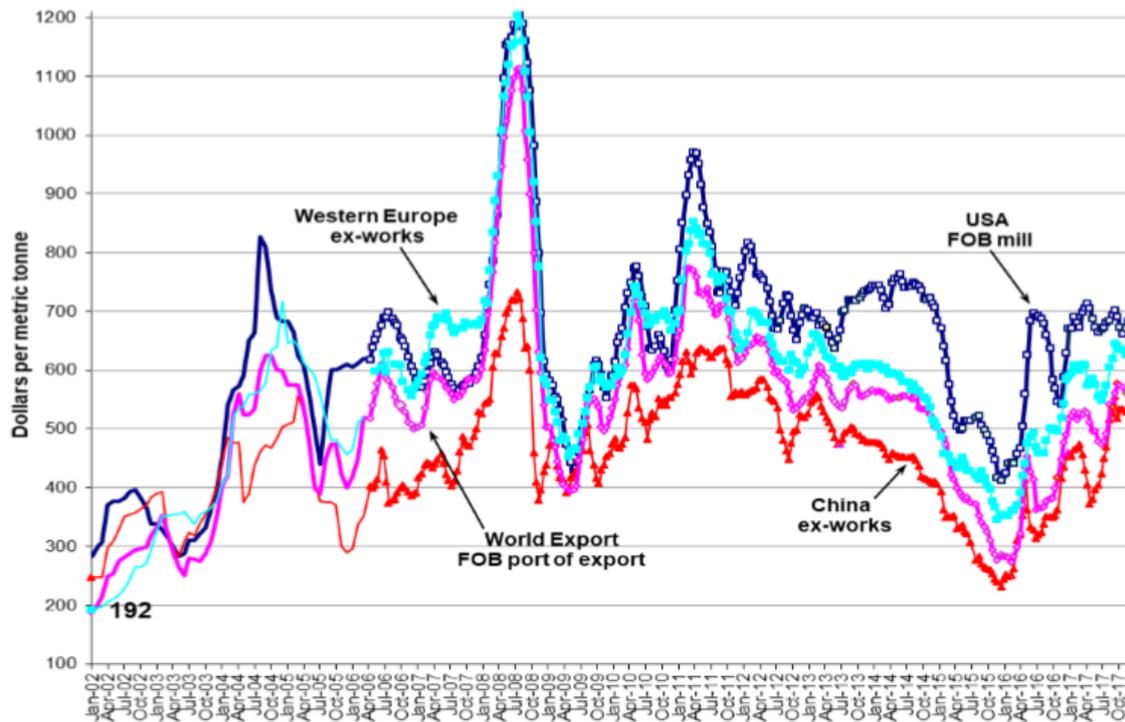
Fuente: Elaboración propia partir de los datos de World Steel Association. Donde E y C determinan la participación de oferentes locales a partir de los precios internacionales 2010 y 2017. Análogamente, los puntos F y D determinan el nivel de consumo de acero de Chile. Las diferencias entre consumo y producción local determinan las cantidades importadas para cada año.

Adicionalmente, cuando se desagrega la producción de productos terminados de acero es posible apreciar que el año 2010 Chile producía 8 tipo de productos, mientras que el año 2017 solo produce uno, *Hot Rolled Products*. Más interesante aún, es constatar que este es el mismo patrón que ha seguido China, lo cual a primera vista parecería una estrategia errada por parte de las siderúrgicas chilenas, no obstante, según fuentes de la industria, esta especialización se debe a que este sub mercado presenta mayores márgenes.

Si bien, no existe un precio único para el acero, dado que no es un *commodity* puro, existen ciertas categorías y mercados que funcionan como referentes del mercado mundial, a continuación, la figura a continuación muestra la evolución del precio del acero HRC⁷⁹ en los mercados de Estados Unidos (azul), China (rojo), Europa Occidental (celeste) y el agregado mundial (lila).

⁷⁹ Hot rolled coil

Figura 17 Precio del acero HRD en los mercados de USA, China, WEU y mundial (2002-2017)



Fuente: Price History, Tables and Charts, Steel Benchmarker (2019).

Así, a partir de esta simple modelación es posible realizar ciertas conjeturas:

- **La cantidad demandada, consumo aparente, disminuyó durante el periodo en estudio, al igual que el precio del metal.** Esto, al igual que en otros metales, evidencia la baja elasticidad precio de la demanda del acero y la mayor preponderancia de la elasticidad ingreso de la demanda por minerales.
- Si bien, la demanda por acero se contrajo, disminuyendo la cantidad consumida, **las importaciones aumentaron en un 6%, lo cual implica que toda la contracción del mercado fue absorbida por los productores locales (efecto ingreso) y que adicionalmente, ante la disminución del precio internacional, otro grupo de oferentes locales salió del mercado como consecuencia de una menor competitividad en relación con las firmas internacionales (efecto sustitución).**
- Chile ha ido concentrando su oferta de bienes terminados de acero, al punto de producir exclusivamente *Hot Rolled Products* (63% del mercado total), tendencia que también siguió China.
- Existe un porcentaje menor de la producción, en torno al 10% de exportaciones de bienes terminados y semi terminados, que mantuvo constante su competitividad pese a los cambios en el mercado y siguió exportando.

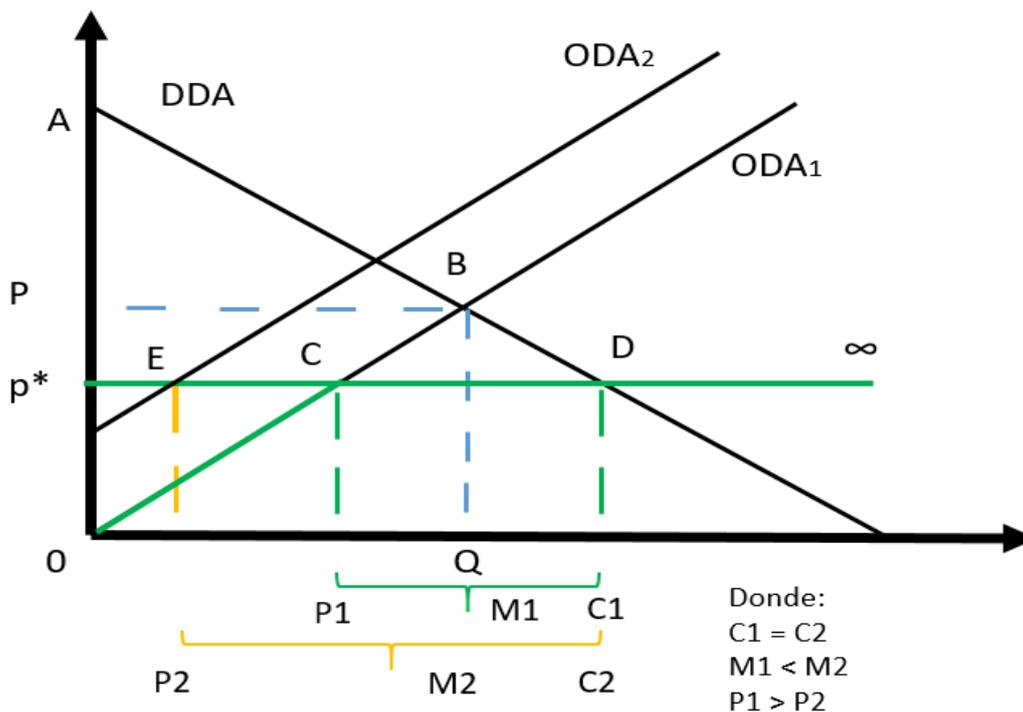
6.1.3 Barreras a la adopción de tecnologías en el contexto global actual

En vista del contexto global del mercado del acero, de la estructura y evolución del mercado nacional y del Plan de Inversión presentado en la sección anterior, se discutirá la factibilidad de mantener la competitividad de la industria local ante la adopción de tecnologías que permitan avanzar hacia una industria siderúrgica baja en carbono.

Lo anterior, significa identificar inversiones en tecnologías que, sin subir⁸⁰ los costos marginales de producción, permitan una reconversión tecnológica hacia procesos menos intensivos en emisiones de CO₂. **Este punto es clave, pues solo 1/3 del mercado nacional se abastece de producción local y los otros 2/3 provienen de importaciones, por lo tanto, cualquier adopción tecnológica que no fuese neutral en términos de su impacto sobre los costos marginales de producción implicaría restarle competitividad a la industria local vis a vis a la industria extranjera, y así, hacer un *crowding out* de producción local, lo cual sería básicamente una reasignación de rentas desde las firmas locales a las extranjeras sin impacto en las emisiones contenidas en los bienes producidos^{81, 89}**

La dinámica anteriormente descrita se aprecia más claramente en **Figura 18**, donde se simula el efecto de un cambio tecnológico que tiene como efectos un aumento de los costos marginales de producción.

Figura 18 Simulación de un cambio tecnológico que incrementa el OPEX.



Fuente: Elaboración propia. Donde B es el equilibrio en autarquía, C determina el punto hasta el cual los oferentes locales entran al mercado, D es el equilibrio de mercado abierto que determina el consumo del país local, la diferencia entre el consumo local y la producción local son las importaciones (M) y p^ es el precio de equilibrio internacional que determina la oferta a partir del punto C.*

Si consideramos que Chile es un país precio aceptante y que, bajo las condiciones globales del mercado, poder de mercado de China y capacidad productiva ociosa, la competitividad de las empresas nacionales ha caído considerablemente, es razonable plantear que una condición

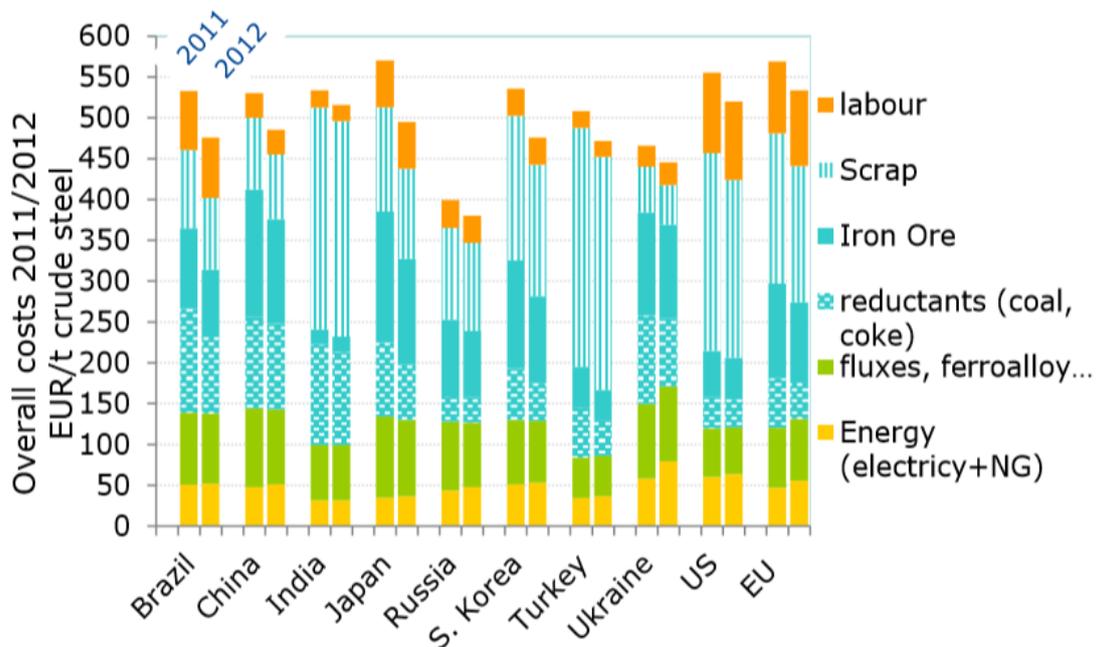
⁸⁰ Este supuesto se puede relajar a aumentos del costo marginal de hasta un X% dependiendo el cuartil de costos en el que se ubiquen las empresas

⁸¹ Esto bajo el supuesto que la tecnología empleada por las firmas extranjeras es igualmente intensiva en emisiones de CO₂ y que el crowding out es completo.

necesaria para la adopción de una nueva tecnología baja en carbono es **que los costos marginales de producción (OPEX) al menos se mantengan constantes.**

El escaso margen que existe en esta industria para el incremento de costos, o equivalentemente, el alto grado de competencia que se evidencia en esta industria, se aprecia en la **Figura 19**, la cual ilustra la posición relativa de competitividad de los principales productores de acero a nivel mundial.

Figura 19 Costo de producción total por tonelada de acero crudo.



Fuente: Production costs from energy-intensive industries in the EU and third countries (2016)

Si bien, Chile no aparece en esta lista debido a su baja participación en el mercado, es posible tomar la competitividad de Brasil como una variable proxy de la competitividad de Chile. Específicamente, se asumirá que Chile posee un 2% menos de competitividad que Brasil, dadas las economías de escala que posee este país con respecto a Chile.

De esta forma, el costo total por tonelada de acero crudo se habría situado en torno a los 480 euros el año 2012, lo cual sitúa a Chile en un nivel de competitividad levemente inferior a China, mejor que Estados Unidos, Europa y Japón, pero peor que el resto de los países en desarrollo productores de acero, los cuales⁸² presentan costos en el rango 450 – 470 euros por tonelada. **Por lo tanto, en un escenario de superávit de la industria, cualquier aumento en costos total de producción implicaría sacar producción local del mercado y reemplazarla por acero proveniente de países emergentes.**

⁸² Se excluye a Rusia considerado un outlier por sus costos sustancialmente más bajos y a India por poseer costos superiores a países desarrollados como Japón.

En este sentido, la condición de suficiencia para evaluar la factibilidad de una inversión en una nueva tecnología está dada porque el VAN sea igual o mayor a cero, es decir, que la tecnología no solo no aumente los costos marginales de producción, sino que también aumente la productividad de la industria de tal forma de hacer rentable la inversión inicial (CAPEX) a través de mayores márgenes de explotación.

Si bien, como se planteó anteriormente, la industria chilena no está en condiciones de perder competitividad producto de mayores costos de producción, las medidas que aumentan los costos resultan ser, en el caso del proceso integrado, las que contribuirían en mayor medida a converger hacia la trayectoria de emisiones requerida.

Considerando los diferentes instrumentos de precio del carbono que existen en Chile, sumado a los nuevos esfuerzos que Chile está considerando para su Contribución Nacionalmente Determinada, una alternativa a explorar podría ser cómo mezclar diferentes instrumentos financieros para viabilizar medidas que representan altas inversiones para la industria. Esto en el entendido que la industria siderúrgica es una industria que influye en varias otras industrias aguas arriba y aguas abajo y que, por ende, juega un rol estratégico en la descarbonización de estas también. Un análisis más detallado sobre propuestas de políticas públicas se realiza más adelante.

6.2 Análisis de Barreras con la participación de Stakeholders

El establecimiento de una hoja de ruta para la transición baja en carbono a través de la implementación del Plan de Inversión -recambio tecnológico-, implica la identificación de los marcos regulatorios y normativos que generen el contexto habilitante requeridos, dada la realidad de la industria en su contexto local y global.

En este sentido, se consideró de suma relevancia la participación y opinión de actores claves del sector público y privado, para validar desde su perspectiva y experiencia, las barreras identificadas por el equipo consultor a partir del análisis de mercado global,

En este apartado se presentan los resultados de los procesos participativos desarrollados -taller y entrevistas, a través de los cuales se vinculó a los actores claves identificados en el Capítulo 5.

6.2.1 Taller participativo

Se identificaron barreras tanto a la Oferta como a la Demanda por tecnologías de mitigación, donde las *Barreras para la Demanda* de tecnologías, corresponden a aquellas que han impedido que la industria siderúrgica decida invertir en ellas, y las *Barreras para la Oferta* de tecnologías, a aquellas que han impedido que se genere una oferta de estas tecnologías, capaz de cubrir las necesidades de descarbonización del sector de la siderurgia.

A continuación, se presenta un resumen de las barreras a la Oferta y la Demanda presentadas para su validación, en el Taller.

Tabla 12 Barreras a la demanda y oferta de tecnologías identificadas para su priorización

BARRERAS A LA DEMANDA		BARRERAS A LA OFERTA	
D1	Márgenes acotados de la industria versus costos tecnológicos	O1	Tramitación excesiva para la implementación de mejoras tecnológicas/cambios en los procesos
D2	Falta de una deuda adaptable al proyecto y de garantías que faciliten la obtención de la deuda.	O2	Disponibilidad de insumos requeridos para ciertas opciones tecnológicas puede no estar disponible en el país o tener un alto costo.
D3	Poca información disponible para evaluar económicamente las opciones tecnológicas	O3	La infraestructura habilitante para ciertas tecnologías representa inversiones relevantes que se suman al de la tecnología en si.
D4	Incertidumbre de la industria por estar inserta en un mercado global altamente competitivo	O4	Los proyectos que existen son pequeños o iniciativas atomizadas
D5	Inmadurez de tecnologías, existiendo pocas opciones viables a corto plazo	O5	Falta de competencias tecnológicas para reducir el costo de transferencia y adopción de tecnología
D6	Conjugación de horizonte temporal dada la vida útil de la infraestructura existente		
D7	Ausencia de trazabilidad ambiental del producto		
D8	Ausencia de definiciones claras sobre la competencia de los mercados chino y mexicano		

Fuente: Adaptada en base a informe Análisis de Antecedentes para determinar las brechas tecnológicas existentes para la implementación de tecnologías limpias en los sectores industriales expuestos al riesgo de una transición baja en carbono y hallazgos del estudio.

Durante el taller, estas barreras fueron sometidas a un proceso de *screening* con el fin de analizar su significancia, e incorporar otras barreras que surgieran en la discusión. Para lo anterior se utilizó una matriz que cruzaba dos elementos en el análisis:

- i) **Influencia:** Influencia de la barrera en la adopción de tecnologías (limitante, restrictiva, impide)
- ii) **Incidencia:** Asociada a la dificultad para abordar las barreras (baja, media o alta, en relación a las capacidades para superar la barrera).

A cada barrera se asignó un valor dentro de una escala de 1 a 3 para los atributos de incidencia e influencia descritos. Posteriormente se obtuvo el cociente entre ambos atributos, para obtener un puntaje final por barrera.

6.2.2 Resultados

A continuación, se presenta el resultado de la aplicación de la matriz de Influencia vs Dependencia, que permite evaluar la significancia de las barreras en función de su criticidad en términos de la adopción de tecnologías.

En la siguiente tabla se presentan los resultados correspondientes a la priorización de las barreras a la demanda.

Tabla 13 Barreras más significativas para la demanda de tecnologías identificada a partir de la participación de Stakeholders

Demanda			
Barrera	Incidencia	Influencia	Significancia
Normas de emisión o impuestos sobre emisiones sólo castigan emisiones nacionales y no a las de productos importados	3	2	6
Falta de deuda adaptable al proyecto, y de garantías que faciliten la obtención de la deuda	3	3	9
Márgenes acotados	3	3	9
Incertidumbre de la industria	3	3	9
Falta de involucramiento de los altos cargos en opciones innovadoras de tecnologías o de financiamiento	2	3	6
Mercados internacionales castigan a las industrias por tener emisiones de GEI. Aumento de regulaciones y normas de emisiones	3	2	6
El Cambio climático no es una prioridad corporativa	2	1	2

Fuente: Elaboración propia en base a Taller de análisis de barreras y construcción de marcos facilitadores.

Se asignó valor 3 a la calificación más negativa y valor 1 a la calificación más positiva en ambos ámbitos, obteniendo mediante la multiplicación de ambas, el puntaje por categoría, siendo 9 el puntaje más elevado el que representa las barreras que fueron catalogadas como barreras de **Incidencia Alta** y que **Impiden la Adopción**.

En el caso de las barreras a la demanda, las barreras más significativas son:

- **Falta de deuda adaptable al proyecto, y de garantías que faciliten la obtención de la deuda.** Las grandes inversiones de las instalaciones y la vida útil de las plantas (entre 25 a 50 años con adecuado mantenimiento), tienen relación con la dificultad de obtener deudas que se adapten a estas inversiones.

- **Márgenes acotados.** Esta es una de las barreras que se ha expuesto a nivel global, dado que las empresas difícilmente pueden traspasar costos relativos a implementación de tecnologías limpias sin perder cuota de mercado. No ha existido un mercado para el acero verde y las posibilidades de no perder cuota de mercado están dadas por el establecimiento de nichos estratégicos creados especialmente para la industria (Bataille, 2019).
- **Incertidumbre de la industria,** la cual está inserta en un mercado global altamente competitivo.

En la siguiente tabla se presentan los resultados correspondientes a la priorización de las barreras a la oferta.

Tabla 14. Barreras más significativas para la oferta de tecnologías

Oferta			
Barrera	Influencia	Incidencia	Significancia
Falta de algún modelo de negocio que valore las iniciativas bajas en carbono para consumidor, instituciones financieras, etc.	1	3	3
Normas en interoperabilidad de tecnologías	1	3	3
Tramitación excesiva	2	2	4
	2	1	2
Falta de una estrategia transversal que permita adopción de tecnologías por varias industrias.	2	2	4
Capacidades habilitantes: Infraestructura, equipamiento, capital humano.	3	2	6
Bajo nivel de inversión en I+D+i	3	2	6
Falta de instrumentos de financiamiento que apoyen la adopción de tecnologías/transferencia tecnológica.	2	3	6
Inmadurez tecnológica.	2	3	6

Fuente: Elaboración propia en base a Taller de análisis de barreras y construcción de marcos facilitadores.

Del análisis de los resultados se evidencia que las barreras más significativas para el caso de la oferta son:

- **Capacidades habilitantes:** Infraestructura, equipamiento, capital humano
- **Bajo nivel de inversión en I+D+i**
- **Falta de instrumentos de financiamiento** que apoyen la adopción de tecnologías/transferencia tecnológica

- Inmadurez tecnológica

6.3 Entrevistas

A continuación, se presentan los resultados de las diferentes entrevistas sostenidas en el contexto del Estudio, para la validación de brechas y propuesta de marcos facilitadores. A cada uno, se preguntó por su nivel de involucramiento

Tabla 15 Resumen de entrevistas con stakeholders

Actor Entrevistado	Involucramiento en marcos facilitadores/Observaciones relevantes	Actores Claves visualizados	Plazos /Obstáculos
Departamento de Economía Ambiental Ministerio del Medio Ambiente	Involucramiento en diseño, operatividad y bajadas de reglamento de instrumentos de gestión ambiental. Dentro de los instrumentos habilitantes considerar la modernización tributaria y la Ley de Cambio Climático (crea un pseudo mercado a través de compensaciones de reducción)	- MMA (Política e instrumentos) - Ministerio de Economía - MOP - Programa de consumo y producción sustentable (qué mecanismos articulan criterios sustentables en la industria) - DIPRES (lógicas de compras, incentivo, criterios de evaluación)	Plazos para diseño e implementación de instrumentos dependen de las condiciones habilitantes y las ventanas políticas
Secretaría de Medio Ambiente y Territorio (SEMAT) Dirección General de Obras (DGOP)	Involucramiento posible por uso de acero bajo en carbono en edificaciones de infraestructura y vivienda. Mesas de trabajo construcción sustentable y de cambio climático (huella en obras públicas). Pregunta; ¿Qué tipo de infraestructura MOP podría ser consumidora de Acero Verde? La respuesta la otorga el director de ICHA. - En cuanto a aspectos legales, se encuentra en toma de razón la modificación a un anexo Ambiental de la resolución 258 de la DGOP pero la abogada dijo que no tenía grandes cambios e hizo notar que el tiempo en que se modificó fue un lapso de varios años. -En el marco NDC existen metas para la construcción en edificación y vivienda e infraestructura baja en carbono.	- Mesa de trabajo de Cambio Climático (Huella en Obras públicas) - Mesa de construcción sustentable /Estrategia de construcción sustentable que se actualiza a través del Plan de Construcción sustentable en que se busca medir la huella en edificaciones de infraestructura. En esta mesa participan otros actores como MINVU, Instituto de la construcción (el colegiado) - Ministerio de Energía - Ministerio de Hacienda - Ministerio de Medio Ambiente (estrategia a largo plazo de CC) - Ministerio de Hacienda - Construye 2025 de CORFO - Ministerio de Desarrollo social	Considerar plazo NDC metas para la construcción en edificación y vivienda e infraestructura baja en carbono. Entre los obstáculos podemos mencionar el financiamiento, la evaluación social de proyectos y cómo se considera el “Valor social del Carbono” en las evaluaciones.
Gerencia de redes y competitividad de CORFO	CORFO considera entre sus ejes estratégicos la carbono neutralidad y en particular el hidrógeno verde. No obstante lo anterior, es difícil que se focalicen sus programas en la industria siderúrgica por lo concentrado del	- Gerencia de capacidades tecnológicas - Gerencia de inversión y financiamiento. - CORFO 2025	La concentración del mercado resulta una limitante clave para que CORFO se focalice en la industria siderúrgica. No

Actor Entrevistado	Involucramiento en marcos facilitadores/Observaciones relevantes	Actores Claves visualizados	Plazos /Obstáculos
	<p>mercado. De todas formas hay posibilidades de financiamiento de I+ D y por medio de créditos.</p> <p>La iniciativa Construye 2025 de CORFO a pesar de tener relación tiene otros focos de acción y difícilmente se podrá focalizar en la siderurgia.</p>		<p>obstante lo anterior, se podría analizar la posibilidad de que CORFO genere o adapte instrumentos para sectores con riesgos de fuga de carbono o vulnerables a IPCs.</p> <p>A corto plazo (2020-2021), no habría presupuesto para cofinanciamiento de proyectos.</p>
Asociación Latinoamericana del Acero (ALACERO)	<p>Promueve buenas prácticas en la industria del acero en Latinoamérica compartiendo información sobre experiencias y novedades tecnológicas, además de información de mercado.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Worldsteel (programa Step up) - Bancos en Europa (Sustainable finance). - BID 	<p>Como asociación latinoamericana ellos no participan en temas de regulación en los distintos países. Eso le corresponde en este caso a ICHA.</p>
Instituto Chileno del Acero (ICHA)	<p>ICHA cuenta con experiencia para proponer marcos regulatorios nuevos o actualizar marcos existentes. En ambas dimensiones ICHA puede desarrollar iniciativas. Ante la pregunta ¿Qué tipo de infraestructura MOP podría ser consumidora del Acero Verde que se fabrica en Chile por el tipo de producto que generan?, se señala a la dirección de vialidad como potencial consumidor del tipo de producto que se fabrica en Chile por CAP.</p> <p><i>“Es importante identificar el segmento de mercado sobre el cual estaría operando cualquier tipo de marco regulatorio. Por ejemplo, del acero estructural el 0% se produce en Chile. Únicos productos que hace la siderurgia chilena (50% del consumo total de acero en Chile) son Aceros largos - Barras de refuerzo, Alambrón – planos de bajo espesor, Barras de molienda...Todo lo que pueda ser políticas apuntando a la reducción de GEI estaría impactando exclusivamente a la siderurgia de los aceros largos, carretera, edificios, puentes, infraestructura en general”</i> (Director ejecutivo ICHA, Marzo 2020).</p>	<ul style="list-style-type: none"> -World Steel (referencia en cuanto a criterios de sustentabilidad) - Ministerios que han sido parte de experiencia de certificación en edificación sustentable. 	<p>Como la industria nacional tiene muy pocos actores es difícil tener políticas que favorezcan directamente a alguno, puesto que Chile tiene una política comercial muy abierta.</p>

Fuente Elaboración Propia

6.4 Principales resultados del capítulo

Del análisis del mercado internacional, y la discusión en la jornada de trabajo, se puede concluir que ***las barreras más significativas fueron las barreras a la demanda, siendo la barrera más relevante desde el punto de vista de la Oferta, la inmadurez tecnológica.***

La industria chilena de la siderurgia enfrenta una significativa competencia internacional, lo que la ha llevado a un contexto de precariedad financiera que ha debilitado su capacidad de adoptar nuevas opciones de mitigación de GEI. Los protagonistas de esta industria han realizado esfuerzos para minimizar la dependencia en combustibles externos al proceso, pero cualquier esfuerzo incremental hacia el abatimiento de sus emisiones, implica un riesgo adicional a la sustentabilidad de la industria.

Dadas las barreras identificadas, y en concordancia con el Plan de Inversión que resultó del AMC, se desprende que resultaría complejo cualquier plan de inversión que implique:

- 1) Capital inicial elevado
- 2) Bajo período de retorno
- 3) Aumento de precio del producto dado el actual contexto global de la industria

En el capítulo que sigue, se abordan los marcos facilitadores que deberán implementarse, para la superación de las barreras propuestas.

7 Marcos institucionales, regulatorios y de fomento que faciliten la adopción de tecnologías de mitigación de GEI

La migración hacia tecnologías y procesos limpios implica la realización de nuevas inversiones, adaptaciones y, en muchos casos, cambios estructurales por parte del sector privado, que pueden significar riesgos críticos a la competitividad si no existe una política coherente por parte del gobierno. Como se evidenció en el capítulo anterior, la competitividad del sector de siderurgia es vulnerable al riesgo de un desarrollo bajo en carbono, ya que es un sector con alta exposición al comercio internacional y una alta intensidad de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), respecto al valor de su producto. Por ejemplo, para la industria del acero (bajo un contexto de tensión comercial en escalada entre China y Estados Unidos), el mercado nacional podría ser refugio para la sobre-oferta global, lo que dificultaría aún más la transición hacia una economía baja en carbono para esta industria.

El desafío de una transición baja en carbono requiere de una institucionalidad coordinada y consciente del nivel de “vulnerabilidad” sectorial, que habilite políticas domésticas coherentes con los acuerdos comerciales vigentes para potenciar la demanda por *commodities* con un atributo “verde”. Del mismo modo, un plan de descarbonización para la industria de la siderurgia en Chile, requiere de detectar los modelos de comercialización, los instrumentos de fomento y los vehículos financieros que adelanten esta transferencia y la adopción de nuevas tecnologías limpias bajas en carbono, sin impactar en la competitividad del sector.

El propósito de este capítulo consiste en identificar medidas preliminares para superar cada una de las barreras priorizadas en la fase anterior, junto con la proposición de un marco institucional y regulatorio que se acople a las medidas que se implementarán para promover la adopción de tecnologías que mitiguen la emisión de gases de efecto invernadero en la industria del acero. Para identificar y formular las propuestas de medidas de política pública que respondan a las barreras prioritarias, se analizó en primer lugar la experiencia comparada en otros países del mundo sobre los mecanismos de incentivos empleados para promover recambios tecnológicos en estas industrias. Asimismo, se revisó la bibliografía existente y la experiencia de Chile en la regulación y/o promoción de otros mercados similares que hayan implicado un marco de incentivos para el progreso tecnológico hacia métodos menos intensivos en carbono.

Para la propuesta de marcos facilitadores para la transferencia y difusión de las tecnologías de mitigación en el sector de siderurgia, se consideró como un aspecto clave, la implementación de políticas de precio al carbono, que en Chile se encuentran en evolución en el marco del proyecto PMR (Partnership for Market Readiness) liderado por el Ministerio de Energía. Parte del análisis incluye la modelación de futuros escenarios de precio al carbono en base a la evidencia técnica resultante de las fases anteriores, incluyendo la trayectoria de reducción de emisiones. Esto incluye el potencial acceso a beneficios para el sector en términos de permisos de emisiones transables que se le pueda asignar por un período de transición, así como otros beneficios de política climática.

A continuación, se presenta el análisis de escenarios político-regulatorios que favorecerían la superación de las barreras identificadas. Posteriormente, se presentan las medidas para la superación de brechas institucionales, que fueron validadas durante el taller participativo.

Por último, y considerando todo lo anterior, se presenta una propuesta de políticas públicas que favorezcan la adopción de tecnologías.

7.1 Escenarios de políticas de instrumentos de precio al carbono

7.1.1 Estado del Arte

Los instrumentos de precios del carbono (IPC) se dividen en dos grandes categorías: **impuestos** y **sistemas de permisos de emisión transables (ETS)**, los cuales se utilizan de manera independiente o conjuntamente.

Los impuestos al carbono son gravámenes que directa, o indirectamente, afectan la emisión de CO₂, ya sea aguas arriba o aguas abajo⁸³.

Por su parte, los sistemas de permisos de emisiones transables, siendo el “Cap and Trade” de la unión europea el más antiguo y robusto, son esquemas bajos los cuales se asignan permisos de emisiones a las distintas empresas, los cuales están acotados a una cuota por industria que se va reduciendo en el tiempo. Así, las empresas que optimizan sus emisiones generan menos emisiones que las asignadas y por lo tanto pueden vender el excedente de permisos a aquellas empresas que hayan emitido más que su cuota. La interacción entre oferta y demanda de permisos transables son los que determinan el precio del carbono bajo estos esquemas.

Chile incorporó por primera vez instrumentos al precio del carbono el año 2014⁸⁴ a través de la Ley 20.780. Específicamente, la reforma tributaria promulgada en septiembre de 2014 incorporó un paquete de impuestos verdes. El primero, consistió en un impuesto de US\$5 por tonelada de CO₂ aplicable a todas aquellas fuentes fijas de emisión, compuestas por turbinas o calderas, que tuvieran una capacidad instalada por sobre 50 MWt. Dicho impuesto, también gravó a los contaminantes locales emitidos por las fuentes anteriormente mencionadas. El segundo, fue la aplicación de un impuesto a la primera venta de vehículos particulares sin fines productivos⁸⁵. Otras medidas que se han tomado para disminuir las emisiones -que aún no son

⁸³ Aguas arriba se refiere al impuesto al carbono se coloca directamente a los combustibles fósiles, el cual se distribuye a través de las distintas industrias según el consumo de combustible de estas. Mientras que el impuesto aguas abajo se refiere a los impuestos que se colocan en sobre las fuentes de emisión, de manera uniforme y en forma específica.

⁸⁴ A la fecha no existe una evaluación integral del impacto de este impuesto, siendo la única métrica utilizada hasta el momento su capacidad recaudatoria en relación a lo proyectado a inicios del año 2014. En este sentido, la recaudación de los impuestos verdes el año 2018 ascendió a US\$188,3 millones, monto que es superior en 0,9% a la recaudación en régimen proyectada en el informe financiero del Ministerio de Hacienda del año 2014.

⁸⁵ Este se determina a partir de un algoritmo que incorpora la eficiencia energética del vehículo de manera inversa, es decir, se grava en mayor medida aquellos vehículos de peor rendimiento en términos de consumo de combustible por kilómetro recorrido, lo cual se relaciona directamente con las emisiones que el vehículo generará en su vida útil.

consideradas en Chile- se relacionan al establecimiento de un límite a las emisiones de GEI, límite que va disminuyendo a lo largo del tiempo. Dentro de este límite, las empresas reciben o compran derechos de emisión. Este régimen de comercio de derechos de emisión, constituye un hito de la política europea en su lucha contra el cambio climático.

El pasado 24 de febrero, se publicó en el Diario Oficial⁸⁶ la modificación del impuesto verde a fuentes fijas, cambiando los criterios de afectación que determinan si una empresa queda sujeta al régimen e incorporando también la **posibilidad de compensar emisiones a través de la creación de un mercado de offsets**⁸⁷.

Específicamente, los principales cambios en esta materia aprobados por la Ley son:

- Serán sujetos de este impuesto todos los establecimientos conformados por **fuentes emisoras** que emitan, individual o conjuntamente, 100 o más toneladas anuales de material particulado (MP), **o 25.000 o más toneladas anuales de dióxido de carbono (CO₂)**, independiente de la naturaleza de la fuente de emisión.
- Una fuente emisora se define como una **fente fija** cuyas emisiones sean generadas, en todo o parte, a partir de **combustión**, entendiéndose como combustión al proceso de oxidación de sustancias o materias sólidas, líquidas o gaseosas que desprende calor y en el que se **libera su energía interna para la producción de electricidad**, vapor o calor útil, con la excepción de la materia prima que sea necesaria para el proceso productivo.
- Se permitirá que los **contribuyentes afectos** al impuesto puedan compensar todo o parte de sus **emisiones gravadas mediante la implementación de proyectos de reducción de emisiones** del mismo contaminante. Es decir, se configura un mercado de **offsets**.

Bajo este esquema de impuesto a las fuentes fijas de emisión, la industria siderúrgica quedó excluida de pagar este tributo debido a que sus emisiones no se asocian a la generación de electricidad.

A partir de las modificaciones indicadas, se desprenden como puntos centrales para la industria siderúrgica que:

Esta seguirá excluida del pago del impuesto verde a fuentes fijas, toda vez que el sujeto gravado son las fuentes emisoras, definidas como aquellas fuentes fijas cuyas emisiones sean generadas a partir de procesos de combustión, lo cual excluiría aquellas emisiones

- como consecuencia del uso de materias primas necesarias para el proceso
- La oportunidad de materializar proyectos de reducción de emisiones de CO₂ a partir de financiamiento proveniente del mercado de *offsets* que se generará.

⁸⁶ <https://www.diariooficial.interior.gob.cl/publicaciones/2020/02/24/42587/01/1730320.pdf>

⁸⁷ Si bien la Ley se encuentra vigente, según el artículo trigésimo primero transitorio de la ley, las modificaciones relativas a los impuestos verdes entrarán en vigencia a contar del 1 de enero del año 2023 respecto de las emisiones generadas a contar de dicho año. En consecuencia, dentro de dicho plazo de tres años, el Ministerio del Medio Ambiente y la Superintendencia del Medio Ambiente dictarán los reglamentos respectivos, definirán las metodologías y protocolos que correspondan.

Así, las modificaciones son positivas en un escenario de alza del precio del carbono, dado que permitiría financiar proyectos de abatimiento menos costo-eficientes (medidas de abatimiento más caras)⁸⁸.

Por lo tanto, el estado del arte actual se puede considerar como el escenario base, y más probable de ocurrencia, que se tomará como referencia para evaluar las medidas que aparecen como más costo-efectivas para la reducción de emisiones de la industria siderúrgica. También se evaluarán otros tres escenarios alternativos, los cuales estarán determinados por la sensibilización de: la tasa del impuesto verde, el año en que la industria siderúrgica será afectada por el gravamen y el funcionamiento de un mercado de offsets de carbono. Es importante destacar que el “mercado de offsets” se simula debido a su incorporación en la modernización tributaria, y porque dentro de los contenidos principales del proyecto de Ley Marco de Cambio Climático⁸⁹ se establecen “Normas de emisión de gases de efecto invernadero y certificados de reducción de emisiones”, entre las cuales se determina que para el cumplimiento de las normas de emisión podrán utilizarse certificados que acrediten la reducción, absorción o excedentes de emisiones de GEI, obtenidas mediante la implementación de proyectos para tal efecto (los que pueden generar un mercado de offsets). Además, este análisis es representativo de la introducción de cualquier mecanismo de mercado para la transacción de reducciones de emisiones, como podría ser un sistema de emisiones transables o la transacción de certificados de reducciones de emisiones.

7.1.2 Simulación de Escenarios

La simulación de escenarios tiene como objetivo estimar el impacto que tendría sobre la competitividad de la industria siderúrgica chilena (medida como el impacto en su estructura de costos), cambios en las políticas de instrumentos de precios al carbono, y cómo a partir de cada uno de estos escenarios es conveniente, o no, invertir en medidas de abatimiento disponibles en el mercado. Análogamente, el impuesto verde al CO₂ puede ser considerado el contrafactual en cada escenario de no implementar determinadas medidas de abatimiento.

Definiciones y supuestos

En cada escenario, la tributación por concepto de impuesto verde será comparada respecto a la tributación neta con medida de abatimiento incluida⁹⁰, la cual también varía en función de la tasa del impuesto verde al CO₂, con el fin de determinar el punto de equilibrio (año) a partir del cual, a la industria le conviene económicamente dar un salto tecnológico en materia de abatimiento.

Así, la sensibilización de parámetros críticos del sistema de precios al carbono permitirá ir analizando periodo a periodo si es preferible para la industria siderúrgica pagar el impuesto

⁸⁸ Para esto, las iniciativas deberían ser elegibles bajo el reglamento que aún debe diseñarse para comenzar a regir el año 2023.

⁸⁹ <http://leycambioclimatico.cl/leyccchile/>

⁹⁰ Esto es incluido el gasto asociado a la implementación de la medida que aparece como más costo-eficiente a partir de las curvas MACC.

verde a fuentes fijas o invertir en proyectos de abatimiento de CO₂. Específicamente, la variabilidad de cada escenario estará dada por la sensibilización de dos elementos:

1. La tasa del impuesto verde a fuentes fijas,
2. El año en el cual la industria siderúrgica se verá afectada por el impuesto anteriormente mencionado.

Los cuatro escenarios posibles bajo este esquema se ilustran en la **Tabla 16**

Tabla 16 Escenarios de simulaciones regulatorias

Tasa de impuesto (Constante vs Creciente)	Año en que el sector quedará afecto al impuesto	
	2030	2040
Impuesto creciente = US\$5/t (2020) → US\$40/t (2050)	Escenario 1	Escenario 2
Impuesto constante = US\$5/t.	Escenario 3	Escenario 4

Fuente: Elaboración propia.

- El **escenario 1** asume que la **tasa del impuesto al CO₂ se irá duplicando cada 10 años** lo cual implica que al año 2030 el precio del carbono establecido por este mecanismo sería de US\$10, luego en el año 2040 de US\$20 y finalmente en el año 2050 de US\$40-, y que la industria siderúrgica quedará **afecta a partir del año 2030**.
- El **escenario 2** difiere exclusivamente en que asume que la industria siderúrgica **quedará afecta al impuesto recién en el año 2040**.
- Por su parte, los **escenarios 3 y 4** asumen que la **tasa del impuesto se mantendrá fija en US\$5 por tonelada**, siendo la única diferencia entre estos escenarios el año de afectación de la industria.

En todos los casos se asume que existe un mercado de offsets operativo a partir del año 2023, donde la arquitectura de este mercado es lo suficientemente restrictiva en materia de los estándares de compensaciones y adicionalidad. Esto haría converger el precio del carbono en el mercado de offset al valor de la tasa impositiva de cada periodo.

Los supuestos para la calibración de los distintos escenarios se muestran a continuación (se recuerda que está analizado para la ruta de proceso integrado):

- Producción de acero = 789.011 toneladas.
- Emisiones de CO₂ iniciales (2020) = 1.882.131 toneladas.
- Tasa inicial impuesto⁹¹ al CO₂ = US\$5/tonelada.
- Precio unitario CO₂ - Offsets = US\$X⁹²/ton

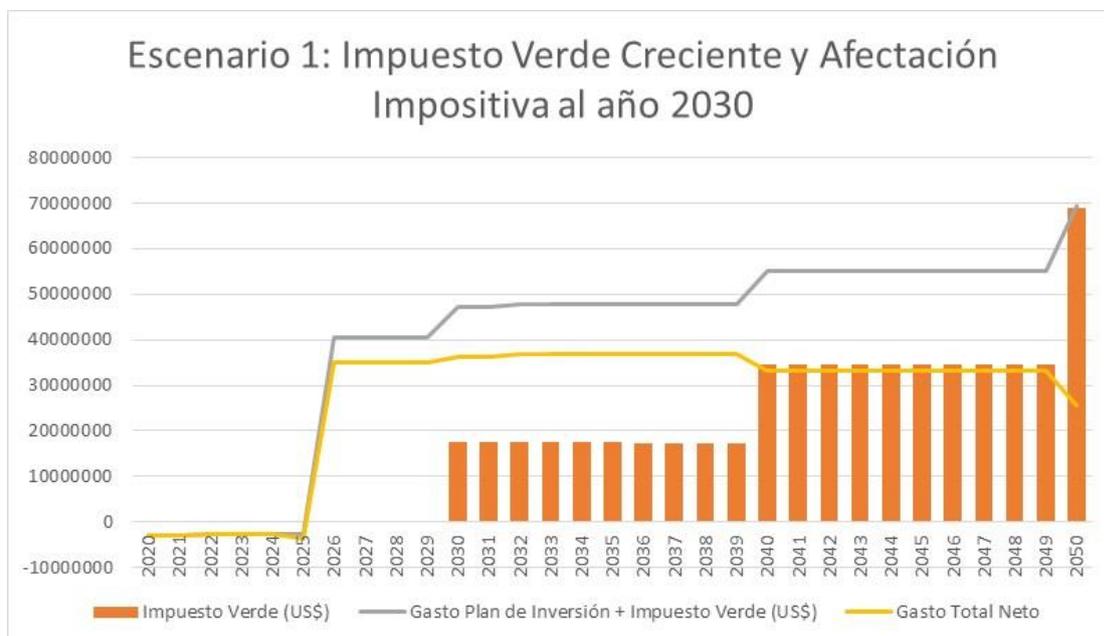
⁹¹ Cabe señalar que las simulaciones de un ETS son análogas a las simulaciones de un impuesto verde, toda vez que el precio de equilibrio sea el mismo.

⁹² Donde X toma el valor de la tasa del impuesto verde en cada periodo del tiempo.

7.1.3 Resultados (modelación de 4 escenarios)

La **Figura 20a** muestra el **escenario 1** el cual se considera con mayor probabilidad de ocurrencia, donde la tasa impositiva se duplica cada década y la industria siderúrgica queda afecta al impuesto a partir del año 2030. De este modo, las barras naranjas muestran el monto de impuesto verde anual que la industria siderúrgica pagaría a partir del año 2030 en el caso de no realizar ninguna inversión en términos de abatimiento. Así, el impuesto ascendería a US\$18,8 millones anuales⁹³ durante el periodo 2030-2039, US\$37,6 millones anuales durante el periodo 2040-2049 y US\$75,2 millones anuales a partir del año 2050. Mientras que las líneas verde y morada representan el gasto de implementar el plan de inversiones propuesto más el impuesto verde en base a las nuevas emisiones (reducidas) y el gasto neto descontados los ingresos por offsets, respectivamente.

Figura 20 Escenario 1 para proceso integrado



Fuente: Elaboración propia.

De lo anterior se desprende que, bajo este escenario, a partir del año 2040 le resulta rentable a la industria ejecutar el plan de inversiones propuesto, ya que, de hacerlo, el costo económico de este más el pago de impuesto verde alcanzaría los US\$33,1 millones anuales versus los US\$34,5 millones anuales⁹⁴ que implicaría pagar el impuesto sin aplicar ninguna medida de abatimiento. Para los decenios anteriores, esto no es así dado que siempre el costo del impuesto verde sin medidas de abatimiento es menor. Adicionalmente, el gráfico refleja la importancia de la existencia de un mercado de *offsets* que no sea laxo, ya que este permite hacer rentable el

⁹³ Nominales no descontados.

⁹⁴ Nominales no descontados.

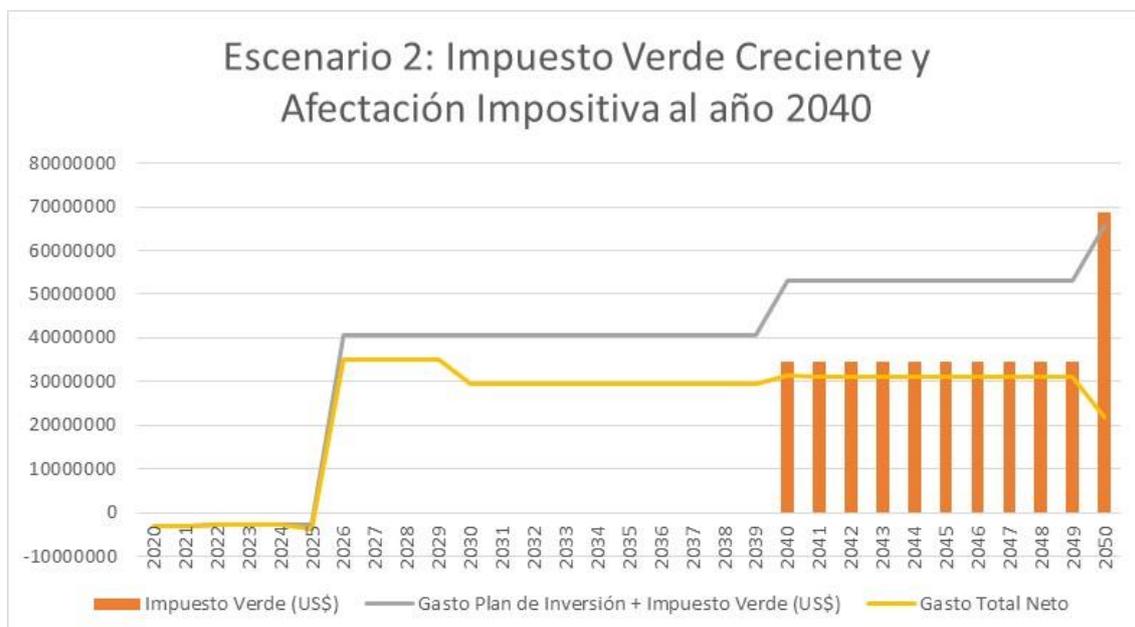
recambio tecnológico el año 2040 y no el año 2050, como sería en el caso de no existir este mercado (cruce entre la línea verde y las barras rojas).

De esta forma, la estrategia óptima desde la perspectiva de la empresa sería tener operativo en régimen el plan de inversiones a partir del año 2040, dado que así se minimizaría el gasto por concepto de CO₂ (impuesto y recambio tecnológico).

Desde una perspectiva intertemporal, el implementar el plan de inversiones propuestos para el periodo 2020-2050 tiene un valor presente neto de US\$-167,9 millones, mientras que bajo un escenario donde la empresa no realiza actualización tecnológica y simplemente paga el impuesto verde el valor presente sería de US\$-76,3 millones, de lo cual se desprende que existe una brecha de casi US\$90 millones para que la firma se encuentre indiferente económicamente entre una opción y la otra. O puesto de otra forma, US\$90 millones son las rentas extras sobre las utilidades del escenario base (no realizar inversiones) que la firma debiese capturar a partir del atributo verde para hacer rentable las inversiones.

Luego, la **Figura 21** retrata la misma dinámica anteriormente explicada, variando solo el año en el cual la industria queda gravada por el impuesto verde (2040). Este escenario resulta ser el más beneficioso, dado que no se paga impuesto verde durante la década del 2030 y podría materializar el plan de inversiones justo antes de quedar afectos (2040). Desde una perspectiva intertemporal, el implementar el plan de inversiones propuestos para el periodo 2020-2050 tiene un valor presente neto de US\$-149,4 millones, mientras que bajo un escenario donde la empresa no realiza actualización tecnológica y simplemente paga el impuesto verde el valor presente sería de US\$-35 millones.

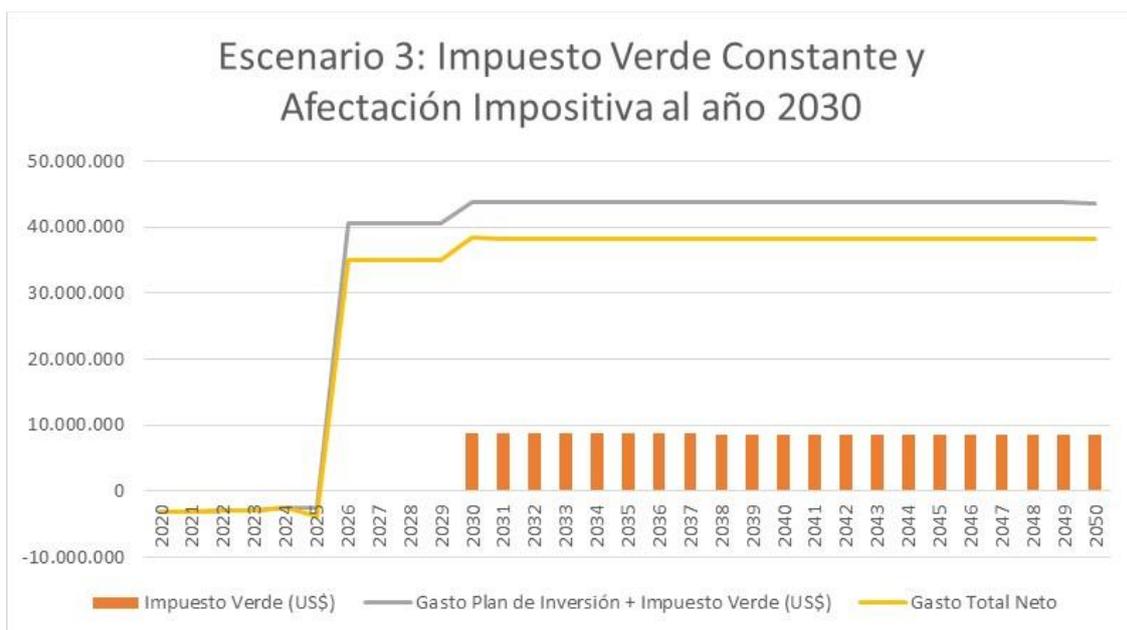
Figura 21 Escenario 2 para proceso integrado.



Fuente: Elaboración propia.

La **Figura 21** expone el **Escenario 3**, en que el impuesto verde constante y afectación impositiva al año 2030, donde claramente se aprecia que no existen incentivos para que la industria realice innovaciones en materia de abatimiento, toda vez que el costo neto de esto, siempre estará por sobre el costo monetario de pagar el impuesto verde, dado que este se mantiene en un nivel bajo a lo largo del tiempo (US\$8,6 millones anuales en promedio). Desde una perspectiva intertemporal, el implementar el plan de inversiones propuestos para el periodo 2020-2050 tiene un valor presente neto de US\$-177,2 millones, mientras que bajo un escenario donde la empresa no realiza actualización tecnológica y simplemente paga el impuesto verde el valor presente sería de US\$-29 millones.

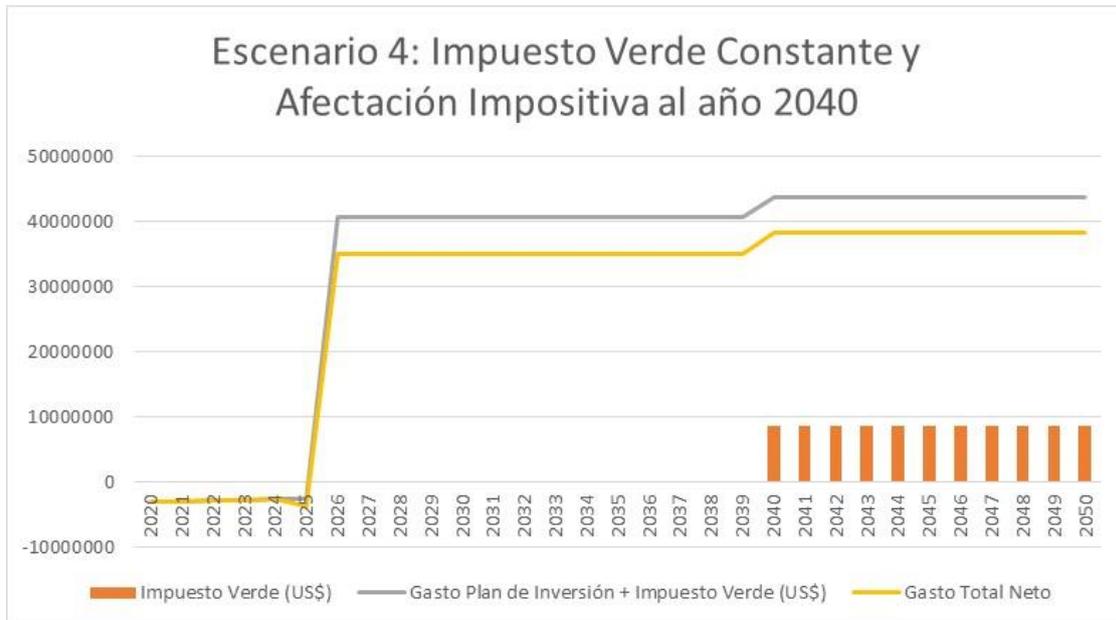
Figura 22 Escenario 3 para proceso integrado.



Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, la Figura 23 muestra el último escenario (**Escenario 4**) donde la tasa del impuesto verde se mantiene constante en US\$5/tonelada y la industria se ve afectada desde el año 2040. Las conclusiones en este caso son idénticas al escenario anterior y la única diferencia está dado por el menor costo agregado que desembolsaría la industria siderúrgica de aquí al año 2050, ya que pagaría US\$8,6 millones anuales en promedio por 11 años y no 20 años. Desde una perspectiva intertemporal, el implementar el plan de inversiones propuestos para el periodo 2020-2050 tiene un valor presente neto de US\$-169,6 millones, mientras que bajo un escenario donde la empresa no realiza actualización tecnológica y simplemente paga el impuesto verde el valor presente sería de US\$-8,3 millones.

Figura 23 Escenario 4 para proceso integrado



Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto, a partir de los distintos escenarios, se pueden establecer distintas brechas entre el valor presente neto de realizar el plan de inversión propuesto vis a vis mantener el status quo tecnológico, las cuales son: US\$-91,6, US\$-114,4, US\$-148,2 y US\$-161,3 para los escenarios 1, 2, 3 y 4 respectivamente. **Dado que todas son negativas, se desprende que el óptimo desde una perspectiva financiera de la empresa está dado por el escenario que minimice el valor total a pagar por concepto de impuesto verde, lo cual ocurre en el escenario N°4 donde el desembolso es de US\$8,3 millones en valor presente.**

Dicho lo anterior, el escenario 1, considerado como el más probable, es el que minimiza la brecha entre el valor presente del plan de inversión y el status quo tecnológico, por ende, es esa brecha la que la industria debiese preocuparse de cerrar ya sea por aumentos de productividad que reduzcan los costos operacionales usando la nueva tecnología y/o incrementos en el valor agregado a través de la diferenciación horizontal del acero producto de su huella de carbono.

Por último, cabe señalar que:

- Las estimaciones están realizadas manteniendo constante el costo unitario de las medidas de abatimiento, lo cual es un supuesto conservador, toda vez que se espera que el progreso tecnológico vaya abaratando el costo de estas tecnologías y haciendo que emerjan tecnologías aún más eficientes.
- **Un elemento adicional a considerar en el mediano plazo es la creación de un sistema de emisiones transables (ETS por sus siglas en inglés),** el cual dependiendo de los

sectores contemplados y su arquitectura podría presionar **el precio del carbono al alza o a la baja**, según cuan laxo sea para estipular las compensaciones o no. Estos factores están considerados en el proyecto de Ley Marco de Cambio Climático antes mencionado, en el cual se determinan Normas de emisión que definen los “Presupuestos sectoriales de emisiones” que **definen la cantidad máxima de emisiones de GEI acumulada a nivel sectorial** en un periodo determinado, según lo determine la Estrategia Climática de Largo Plazo⁹⁵, y que complementa lo establecido en la modernización tributaria respecto a la compensación por la implementación de proyectos de reducción de emisiones. De esta forma, el impacto en el precio al carbono dependerá del nivel de exigencia del instrumento (en el caso de un ETS la exigencia la define el grado de ambición de las cuotas sectoriales definidas por ley), toda vez que a partir de esto se determinará el precio de equilibrio del mercado de *offsets*. En el caso que el precio de equilibrio del ETS sea igual al impuesto de US\$5/tonelada, o a su progresión según el escenario, el efecto de utilizar un instrumento u otro, impuesto o ETS, será equivalente⁹⁶.

7.2 Escenario de 'descomoditización' del acero

Reflejadas las limitaciones de abordar la transición hacia una industria siderúrgica baja en carbono a través del lado de la oferta, dado el poco margen existente producto de las condiciones del mercado mundial y de la competitividad de la industria local, en esta sección se explora la posibilidad de *descomoditizar* este metal utilizando como factor diferenciador la intensidad de CO₂ utilizada para su producción, con el fin de **agregar valor a la producción y capturar rentas de innovación** en un mercado no perfectamente competitivo.

7.2.1 Premio al acero “verde”

Otra opción que se vislumbra como un marco facilitador para la transición baja en carbono, en el contexto altamente competitivo que caracteriza a la siderurgia, es el de la diferenciación del producto a partir de un atributo “verde”. Este escenario se basa en la hipótesis que generar una diferenciación horizontal de los productos de acero a partir del CO₂ contenido en su proceso de fabricación, creara una nueva categoría de producto con mayor valor agregado, lo cual debiese verse reflejado en un premio sobre el precio del acero normal.

El sistema de incentivos que subyace a este mercado se basa en que existen consumidores que tienen **disposición a pagar por productos más sustentables** (Polonsky, 2014) por lo tanto, sería posible segmentar el mercado al generar un acero “verde”⁹⁷.

Así, el principal *driver* para la descarbonización mediante la *descomoditización* son las preferencias de los consumidores, es decir, la demanda. Sin embargo, los mercados de los

⁹⁵ Estrategia Climática de Largo Plazo: define los lineamientos generales en materia de cambio climático, de manera transversal e integrada, de modo que orienta y se relaciona con todos los instrumentos de gestión del cambio climático. <http://leycambioclimatico.cl/leyccchile/>

⁹⁶ Propuestas de este estilo y con estos potenciales resultados son las que se están evaluando en el marco de la ley de cambio climático.

⁹⁷ Así llamaremos al acero bajo en carbono.

commodities se caracterizan por ser *business to business*, altamente competitivos y donde el costo y la disponibilidad son los principales determinantes de las transacciones realizadas (Åhman, Nillsson, & Johansson, 2017).

No obstante lo anterior, una estrategia para la comercialización del acero “verde” pasa por **traspasar el atributo de sustentabilidad a los productos finales** compuestos de acero, de esta forma se logra llegar al consumidor final que tiene una propensión a pagar un delta extra por productos sustentables, lo cual bajo mercados competitivos se debiese reflejar en un premio sobre el precio normal para el acero verde. Por ejemplo, aun cuando los productores de acero eligieran mitigar las emisiones de CO₂ a un alto costo, si estos se traspasan a los consumidores de automóviles implicarían un aumento de precio de estos de solo 0,5% (Rootzén & Johansson, 2016).

Si bien, en la actualidad no existe un mercado de acero “verde” operando, existen dos antecedentes relevantes para poder tener órdenes de magnitud del valor que podría alcanzar el premio por el acero verde en los mercados. El primero es, la evolución de la escasez y precio del CO₂ en los ETS⁹⁸, y el segundo corresponde a las estimaciones de la industria.

Por el lado de los ETS, las proyecciones sobre la escasez anual de derechos de CO₂ gratuitos⁹⁹ para emisiones directas de la industria siderúrgica llegarían al 100% el año 2030 en los mercados de ETS de Europa y Estados Unidos, pero también en México y Brasil, tal como muestra la **Tabla 17**¹⁰⁰, lo cual hace pensar que el premio al acero verde debiese confluir al valor de mercado del CO₂ en los ETS. Para tener ordenes de magnitud, el precio de la tonelada de CO₂ en el mercado del ETS europeo ha fluctuado entre los 18,35 y 29,46 euros durante el último año, actualmente¹⁰¹ se encuentra en 24,01 euros.

Tabla 17 Proyecciones de escasez de derechos de CO₂ gratuitos.

Year	EU		Brazil		Mexico		USA	
	ACT	LCT	ACT	LCT	ACT	LCT	ACT	LCT
2020	32%	32%	32%	0%	32%	32%	32%	32%
2030	100%	49%	100%	0%	100%	49%	100%	49%
2040	100%	66%	100%	0%	100%	66%	100%	66%

⁹⁸ Un ETS es un sistema de emisiones transables (por sus siglas en inglés) el cual establece una cuota de emisiones por industria y entrega permisos de emisiones a las empresas dentro de estas industrias. De esta forma, si una empresa emite por sobre su cuota debe salir a comprar permisos a otra empresa y de esta forma se conforma el mercado de permisos transables y el precio del carbono bajo este esquema.

⁹⁹ Concepto que mide cual es la demanda de derechos vis a vis oferta de derechos que están determinados por la cuotas del ETS europeo, representa la brecha existente entre la demanda en el mercado por derechos gratuitos y la oferta. Estos se asignan gratuitamente, pero cuando ya se han asignado todos los derechos, el poder emitir una tonelada extra tiene un precio, por lo tanto, existe disposición a pagar por estos derechos.

¹⁰⁰ Según estimaciones del “The Transition Risk – O – Meter” (2017)

¹⁰¹ 10/01/2020

Fuente: *The Transition Risk – O – Meter*, en base a Ecofyn 2016. Donde ACT corresponde al escenario de transición climática ambiciosa y LCT corresponde al escenario de transición climática limitada.

Por el lado de la industria, sus proyecciones muestran que el mayor costo de producir acero verde sería de hasta un 20% y que el efecto en precios sobre el consumidor final solo representaría un 1%¹⁰² (Commision, The Energy Transitions, 2018).

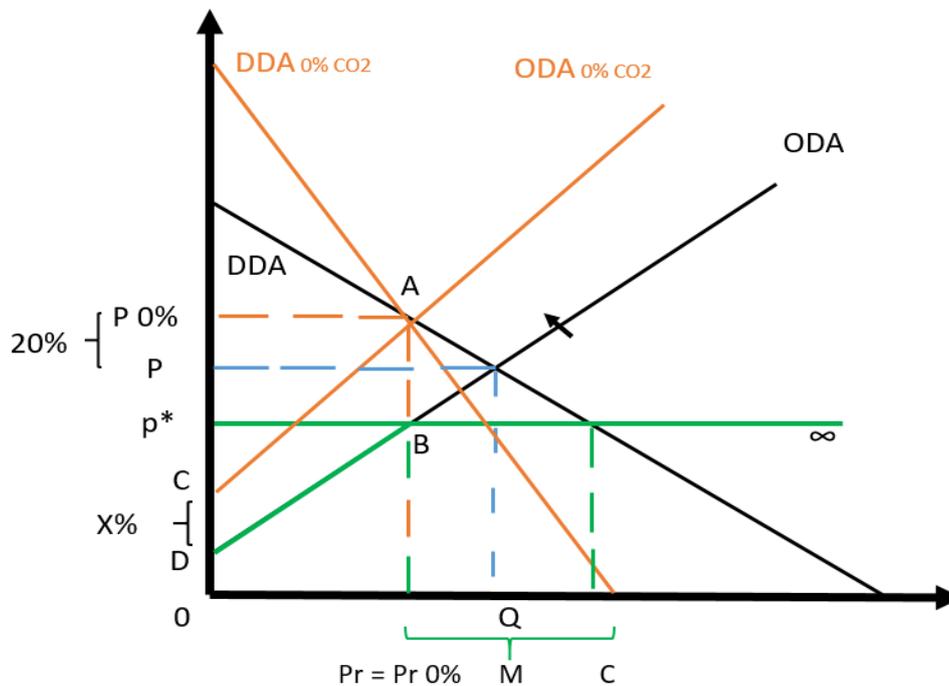
Adicionalmente, la industria evidencia las primeras señales de un eventual desarrollo de un mercado de acero verde, toda vez que observa como ciertas industrias aguas arriba demandan insumos con una menor huella de carbono. En esta línea, existen casos concretos de primas a tributos verdes de materias primas, como es el caso de la prima que las fundiciones de aluminio pagan a la energía proveniente de generación hidroeléctrica¹⁰³.

Por lo tanto, si asumimos que las relaciones entre la industria siderúrgica y las industrias a las que esta provee son perfectamente competitivas, el mayor precio de mercado se traspasará completamente a través de la cadena de suministro hasta la industria siderúrgica, es decir, las industrias demandantes de acero pagarían un premio sobre el precio del acero *commodity* de un 20%. Luego, el premio en términos netos por el acero verde estará dado por el delta entre un 20% de mayor precio percibido menos un X% de mayor costo total de producción del acero verde, tal como se refleja en la **Figura 24**

¹⁰² Este cálculo se efectúa sobre los vehículos como producto final.

¹⁰³ <https://www.reuters.com/article/us-aluminium-sales-environment/hydro-powered-smelters-charge-premium-prices-for-green-aluminum-idUSKBN1A11CF>

Figura 24 Equilibrio mercado de acero tradicional vs mercado de acero verde.



Fuente: Elaboración propia. Donde A es el punto de equilibrio (precio; cantidad) del mercado de acero verde, mientras que B es el punto de equilibrio de costos marginales (locales; internacionales), por lo tanto, define la cantidad de producción local que entra al mercado doméstico de acero.

La **Figura 24** refleja tanto el mercado del acero *commodity* (en negro y verde) como del acero verde (en naranja) desde una perspectiva de un país importador de acero (Chile). Así, **se aprecia que el mercado del acero verde: es más acotado (mercado nicho con funciones más inelásticas¹⁰⁴), no posee un precio único internacional (no es un *commodity*), posee mayores costos marginales (X%) y tiene un premio en el precio (20%).**

De esta forma, la decisión de los productores locales que participan del mercado tradicional del acero, con respecto a moverse a producir acero verde, estará dada por el análisis costo-beneficio de ambos escenarios. Así, el beneficio de mantenerse en el mercado tradicional de acero está dado por $P^*-B-Pr-0$, mientras que el costo comprende el área $D-B-Pr-0$, por consiguiente, el beneficio neto equivale al área del triángulo P^*-B-D . Por su parte, el beneficio de moverse al mercado del acero verde está dado por el área $P0\%-A-Pr-0$ y los costos por el área $C-A-Pr-0$, siendo el beneficio neto igual al área del triángulo $P0\%-A-C$.

Por lo tanto, los productores decidirán producir acero verde, solo si el premio neto percibido por el acero verde es mayor a cero, es decir, si $\Delta P0\% - A - C > \Delta P^* - B - D$. **En otras palabras, los productores de acero locales solo tendrán incentivo a producir acero verde si el excedente del productor estimado para este caso es mayor que el excedente del productor estimado en caso de mantenerse compitiendo en el acero "*commodity*".**

¹⁰⁴ Una función inelástica es aquella en la cual la cantidad reacciona menos que proporcionalmente al cambio en el precio. Asimismo, una función elástica es aquella donde las cantidades reaccionan más que proporcionalmente a un cambio en el vector de precios.

Como se mencionó en el comienzo de esta sub sección, el acero “verde” sería en la práctica una diferenciación horizontal de producto. Es decir, una nueva variedad de acero, con atributos característicos y perceptibles, que le permitirá a los consumidores auto segmentarse a partir de sus preferencias individuales.

No obstante, el acero “verde” no sería distinguible del acero tradicional ya que su contenido, calidad y utilidad serían exactamente iguales. Lo único que diferenciaría a uno del otro es el proceso de producción, estando en este punto la característica diferenciadora de ambos productos. Por lo tanto, para que los consumidores puedan percibir la diferenciación es fundamental contar con una herramienta fidedigna que acredite los distintos procesos por los cuales pasó el acero “verde”.

Así, la tecnología de *blockchain* emerge como una solución factible al problema de trazabilidad e identificación del acero verde, dado que esta permite un registro digital inmutable de transacciones, es decir, que no puede ser modificado una vez realizadas y verificadas las transacciones (Benton and Ranziwill, 2017).

De esta forma, la tecnología de *blockchain* parece encajar perfecto en un esquema de comercialización del acero “verde” donde se hace necesario marcar cada etapa del proceso en relación a su intensidad de emisiones de CO₂ generadas, con el objetivo de garantizar la huella de carbono del producto a ojos de los consumidores (intermedios y/o finales).

Como antecedente preliminar para el caso de Chile, se encuentra el proyecto de producción de cobre “verde”¹⁰⁵ anunciado por Codelco¹⁰⁶ el año 2018, el cual incorporaba la realización de un inventario de ciclo de vida, además de otras dimensiones en temas de sustentabilidad, ética y transparencia. Lo interesante de este proyecto es que logró poner de manifiesto conjuntamente condiciones habilitantes, ventajas comparativas y asociatividades necesarias para el desarrollo del nicho de minerales “verdes”:

- i) Matriz energética con un factor de emisión decreciente en el tiempo a partir de la fuerte penetración de energías renovables no convencionales. Esto ya es una realidad y las proyecciones muestran que la tendencia debiese acrecentarse en el tiempo, lo cual generaría una matriz cada vez más limpia.
- ii) Existencia de socios estratégicos, tales como: BMW, Mitsui y Nexans, para el desarrollo, trazabilidad y comercialización del producto, con el fin de poder llegar con un producto que posea sello internacionalmente reconocido y confiable para los consumidores finales. Esto fueron conversaciones y negociaciones que no lograron concretarse, por lo cual, para cualquier nueva tecnología baja en carbono será un desafío generar las asociatividades que permitan traspasar a precio el atributo de sustentabilidad al cliente final.

7.2.2 Aspectos Económicos asociados a la descomoditización

Es importante recordar que el 90% de la producción nacional se consume en el mercado local, donde la minería representa un 54% de la demanda y la construcción aproximadamente un 20%,

¹⁰⁵ Llamado cobre responsable.

¹⁰⁶ Y desechado ya en su formato original.

por ende, estos sectores son claves en la determinación de la viabilidad económica del acero verde. Se destacan estos sectores porque serían los que deberían absorber y luego traspasar a los usuarios finales el mayor precio del acero verde, lo cual a primera vista se ve complejo, toda vez que la minería produce bienes intermedios *commodities* que compiten a nivel internacional y, por lo tanto, traspasar el mayor precio del acero verde posee mayores costos de transacción. Por su parte, el mercado inmobiliario tiene un link mucho más directo con el usuario final, quien es el que finalmente tiene una disposición mayor/menor a pagar por atributos de sustentabilidad, pero la competencia y elasticidades entre proveedores-constructora-consumidores podrían no permitir que las rentas de la innovación llegasen al innovador (siderúrgica) y fuesen percibidas por las constructoras.

Lo anterior, debido a que dependiendo de: el espacio que exista para traspasar a precios el mayor costo del acero verde al consumidor final y el grado de competencia que exista en la cadena de suministro para que los productores del acero verde capturen el valor agregado de este atributo, se determinará la capacidad de apalancamiento local para el desarrollo de una industria naciente innovadora (sin mercado previo). **Esto posee especial relevancia en la etapa temprana de desarrollo del producto cuando asegurar una demanda inicial es fundamental para comenzar con pilotos y marchas blancas que permitan desarrollar y perfeccionar las capacidades específicas de esta sub industria.**

Es importante destacar que el tamaño de mercado local no es suficiente para el desarrollo viable de una industria naciente de este tipo, pero sí es relevante para un apalancamiento inicial al asegurar un piso de demanda. Por lo tanto, la apuesta pasa por la capacidad de introducir el acero verde en los mercados internacionales, lo que depende de la disposición marginal a pagar por sobre el precio internacional del acero tradicional (la cual se asume que existe) y la capacidad de proveer acero verde certificado a un costo que implique un incremento marginal en el precio de los bienes finales.

Luego, desde una perspectiva de las políticas públicas y mirando el caso como una industria naciente, algunas preguntas interesantes de responder son:

- ¿Debe aportar el Estado en el apalancamiento inicial de la industria naciente?
- ¿Existen ventajas comparativas que hagan prever capacidad competitiva en mercados internacionales que justifiquen el apalancamiento?
- ¿Es socialmente rentable apalancar a la industria naciente?
- ¿Qué encadenamientos se esperan a partir del desarrollo de esta industria?

7.3 Análisis de Marcos facilitadores con la participación de Stakeholders

A partir de la realización del taller de análisis de barreras y de construcción de marcos facilitadores y de entrevistas con stakeholders, se plantea la habilitación de políticas domésticas que permitan a la industria incorporar en su plan de inversión tecnologías limpias y alcanzar la trayectoria de reducción establecida.

A continuación, se sistematizan las principales medidas que fueron validadas en el taller participativo con los stakeholders tanto para las barreras a la demanda como para las barreras a la oferta.

Tabla 18 Medidas y actores para superar barreras a la demanda

BARRERAS A LA DEMANDA	MEDIDAS PRELIMINARES PARA SU SOLUCIÓN	ACTORES
Márgenes acotados de la industria vs costos tecnologías – (tomadores de precio)	Establecer regulaciones que permitan controlar la entrada de acero intensivo en emisiones proveniente del extranjero, en particular de países como China y México.	-SUBREI -MMA -ASIMET -ICHA -CAP -AZA
Falta de una deuda adaptable al proyecto y de garantías que faciliten la obtención de la deuda.	Instrumentos y garantías que faciliten la obtención de la deuda tales como subsidios o créditos blandos CORFO o bonos verde del Ministerio de Hacienda.	-CORFO -MINISTERIO DE HACIENDA -MINISTERIO DE CIENCIA, TECNOLOGÍA, CONOCIMIENTO E INNOVACIÓN
Incertidumbre de la industria por estar inserta en un mercado global altamente competitivo	Identificación de nichos estratégicos de demanda para Acero verde y su certificación. Generar mercados de acero verde locales (valorización de productos largos). Ejemplos : - Construcción, a través de Cuota de Acero Verde Licitaciones de Obras Públicas MOP/Vivienda o inicialmente criterios de evaluación que favorezcan insumos con atributo verde. - Minería. Codelco (línea de producción sea carbono neutral)	- MINISTERIO de MEDIO AMBIENTE - MINISTERIO de OBRAS PÚBLICAS (DGOP) - ALACERO -ICHA

Fuente: Elaboración propia

Tabla 19 Medidas y actores para superar barreras a la oferta

BARRERAS A LA OFERTA	MEDIDAS PRELIMINARES PARA SU SOLUCIÓN	ACTORES
Capacidades habilitantes: Infraestructura, equipamiento, capital humano	Estrategias a largo plazo de Cambio Climático (LTS) Establecer periodicidad de evaluación de estrategia de CC	- MINISTERIO de MEDIO AMBIENTE - MINISTERIO DE CIENCIA, TECNOLOGÍA, CONOCIMIENTO E INNOVACIÓN -MINISTERIO DE HACIENDA - MINISTERIO DE RELACIONES EXTERIORES -ICHA -CAP -AZA
Bajo nivel de inversión en I+D+i e Inmadurez tecnológica	Programas de Fomento en innovación asociada a la industria siderúrgica	- MINISTERIO DE CIENCIA, TECNOLOGÍA, CONOCIMIENTO E INNOVACIÓN -ICHA -CAP -AZA -Centro de Energía U. de Chile -Centro Tecnológico para la innovación

BARRERAS A LA OFERTA	MEDIDAS PRELIMINARES PARA SU SOLUCIÓN	ACTORES
Falta de instrumento de financiamiento que apoye la adopción de tecnologías/transferencia tecnológica	<ul style="list-style-type: none"> - Programas de Subsidios para inversión en tecnologías limpias - Estrategias para transferencia tecnológica. En particular la incorporación de la industria en la estrategia de transferencia para CC. 	<ul style="list-style-type: none"> -CORFO - MINISTERIO DE CIENCIA, TECNOLOGÍA, CONOCIMIENTO E INNOVACIÓN -ICHA -CAP -AZA -Centro de Energía U. de Chile -Centro Tecnológico para la innovación

Fuente: Elaboración propia

7.4 Recomendaciones y propuestas de política pública

A partir de lo exhibido en las secciones anteriores, se desprende el difícil escenario que enfrenta la industria siderúrgica en Chile, tanto por su **pérdida de competitividad relativa** en comparación con el mercado internacional, como por el **alto costo relativo** que implica avanzar hacia medidas de abatimiento costo efectivas que permitan reducir la intensidad de emisiones de CO₂ en el proceso integrado, el cual representa más de 2/3 de la producción nacional. La relevancia de políticas públicas que permitan a la industria enfrentar este escenario, se relaciona con que esta posee algunas ventajas competitivas que se traducen en que una cuota de mercado se abastezca localmente () evitando que el acero que ellos proveen se deba importar con mayores emisiones de carbono.

Dado lo anterior, las recomendaciones a partir de la discusión dada en las secciones precedentes se focalizan en tres líneas que podrían contribuir a una industria baja en emisiones de carbono y más competitiva:

i) Diferenciación y desarrollo de mercado de acero verde.

Dadas las tecnologías vigentes en la industria nacional, el tamaño de esta y la competencia que le ha impregnado China al mercado del acero mundial, esta estrategia apunta a **descomoditizar el producto** final de acero a través de su atributo en sustentabilidad con el fin de no competir en un mercado perfectamente competitivo y así poder obtener rentas cuasi-monopólicas a partir de esta innovación.

Para poder llevar a cabo una estrategia de este tipo para la siderurgia integrada chilena, existen factores claves tanto por el lado de la oferta como de la demanda. Así, por el lado de la oferta, **los factores claves están dados por la adopción de tecnologías que minimicen las emisiones de CO₂ en la producción de acero, lo cual podría ser apalancado por una demanda aguas arriba de productos con una menor huella de carbono. Esto permitiría costear las inversiones necesarias para esto mediante un *mark up* sobre el precio actual.**

No obstante, **los desafíos más importantes parecen venir por el lado de la demanda, toda vez que no existe un mercado de estas características operando**, por lo cual no hay una demanda

cautiva al respecto y por lo tanto apostar por grandes inversiones en actualizaciones tecnológicas resulta muy riesgoso para las compañías.

Es justamente en esta dinámica del “el huevo y la gallina” donde el Estado podría jugar un rol clave mediante **políticas públicas que faciliten el desarrollo de este mercado localmente** con el fin de posibilitar un periodo de maduración de estas tecnologías que le permita a la industria siderúrgica optimizar procesos y lograr ser competitivas en los mercados locales e internacionales.

Una política concreta de apalancamiento de esta industria estaría dada porque el Ministerio de Vivienda y Obras Públicas en sus respectivas licitaciones estipulen una cuota de acero verde contenido en cada proyecto¹⁰⁷. De esta forma, se aseguraría una **demanda mínima anual** que permitiría generar un proyecto piloto de acero verde, lo cual no se traspasaría completamente a precios y por ende gasto fiscal, que estos procesos de licitación deberían ser lo suficientemente competitivos para poder traspasar parte del mayor costo a las constructoras e inmobiliarias. La necesidad de un apalancamiento estatal a este tipo de políticas, dado los volúmenes e impactos que este genera, ha sido documentado por varios autores, tales como (Wesseling & Edquist, 2018) y (Neuhoff, 2016). Un ejemplo concreto al respecto es la política pública sobre infraestructura climática neutral implementada por el gobierno sueco, la cual a través de normas de contratación pública mandata que los contratistas que se adjudiquen las obras sean neutrales a partir del año 2030.

Mediante una medida como la mencionada anteriormente, también se protege el mercado local de manera indirecta, sin transgredir las normas establecidas por la Organización Mundial del Comercio, por lo tanto, resulta un incentivo interesante para las siderúrgicas chilenas.

Posterior a la primera etapa, donde el poder de compra del Estado apalancaría los primeros pilotos y permitiría ganar el *know-how* por parte de la industria, **el desafío radicaría en lograr la escalabilidad del acero verde a través de su comercialización internacional**, lo cual permitiría aumentar la producción y generar economías de escala. En esta fase es crucial la **asociatividad con uno o más productores, de una industria intensiva en acero**, que permita generar el market place para el acero verde y así llegar a los consumidores finales que al tener una mayor disposición a pagar por este producto generarían el mayor valor agregado. Probablemente este es el desafío más complejo, no obstante, **nuevamente el Estado, a través de la Corfo, podría apalancar un consorcio público-privado que le dé garantías suficientes a la(s) empresa(s) que apuesten por demandar acero verde para sus productos finales. Este consorcio podría ser quien comercializase el acero verde**, generando así un contrato entre una entidad cuasi-pública que diera mayores garantías en términos de cumplir con la demanda requerida y certificar la calidad del producto.

En relación al desarrollo de un mercado de acero verde, es importante mencionar como ejemplos de iniciativas a nivel internacional, el lanzamiento en 2019, por parte del Foro

¹⁰⁷ Hay que considerar que el sector de la construcción representa solo el 40% de la producción nacional. Por lo que si no se contemplan acciones que eviten que el costo de la inversión impacte “negativamente” al 60% de la producción restante, esto podría ser dañino al final.

Económico Mundial (WEF) de la iniciativa “*Climate Action Platform for Delivering Carbon Neutrality in Hard-to-Abate Sectors*”¹⁰⁸, plataforma que busca impulsar una transición baja en carbono para el 2050 en sectores específicos, entre ellos el sector del acero. Además, la organización “*Responsible Steel*”¹⁰⁹ es la primera iniciativa global sectorial que impulsa estándares y certificaciones, incluyendo la sustentabilidad.

ii) Mercados de carbono líquidos y profundos.

Por el lado de la oferta de acero¹¹⁰ es importante que los mercados de carbono sean profundos y, por consiguiente, líquidos, es decir, **que exista un número considerable de oferentes y demandantes para estos valores, que permita automáticamente monetarizar el valor de estos activos.**

La relevancia de estas características para el mercado del carbono se debe a que los *offsets*, de ser considerados un **activo líquido y bancable, podrían utilizarse como colateral para acceder a financiamiento** que a la vez apalanque las inversiones necesarias para avanzar en el plan de inversiones que permita descarbonizar la industria.

Estas condiciones estarán dadas en una primera etapa por la arquitectura que se le dé al mercado de *offsets* propuestos en la Ley de Modernización Tributaria, así como por el precio que el impuesto asigne al carbono en cada periodo. **Así, por ejemplo, un mercado muy restrictivo en cuanto a las características de los proyectos considerados para compensar emisiones, más una tasa del impuesto al carbono baja, no generarían una profundidad de mercado suficiente para dar valor bancable a los *offsets*, ya que el valor de estos sería muy poco líquido.**

Una opción de política pública que podría ser beneficiosa para la industria siderúrgica sería que, una vez operando el mercado de *offsets* y que se logre profundidad en este, se **asignen cuotas de compensación por sector económico, es decir, que exista un porcentaje mínimo por tipo de industria con el fin de incentivar que todos los sectores avancen en la descarbonización y el mercado de *offsets* no se concentre, por ejemplo, solo en el sector forestal (u otro que resulte más costo-eficiente).**

Alternativamente, una segunda opción sería que el Estado subsidie en un X% a aquellos sectores que compensen emisiones de sectores definidos como estratégicos¹¹¹, dentro de ellos estaría la industria siderúrgica. Así, por ejemplo, si el precio de mercado de los *offsets* es

¹⁰⁸ <https://www.weforum.org/press/2019/09/launch-of-climate-action-platform-for-delivering-carbon-neutrality-in-hard-to-abate-sectors-by-mid-century/>

¹⁰⁹ <https://www.responsiblesteel.org/about/>

¹¹⁰ En general, no solo acero verde.

¹¹¹ El sector siderúrgico podría considerarse estratégico dadas las ventajas comparativas de Chile en minería. Las mejoras tecnológicas que se introduzcan en los sectores de vanguardia de la minería podría beneficiar al sector en su conjunto (uso de hidrógeno por ejemplo). Un cluster minero-siderúrgico que produzca productos metálicos verdes podría ser la palanca de crecimiento de Chile en los próximos años, de ahí la importancia de no dejar morir esta industria.

US\$5/tonelada, el Estado podría subvencionar en un 20% el precio, US\$1/tonelada, para aquellas empresas que estén compensando emisiones de estos sectores.

A partir de esta característica deseable de los mercados de carbono, se desprende que una de las principales dificultades para transitar hacia una industria baja en carbono se debe a las restricciones de financiamiento para invertir en nuevas tecnologías, especialmente en aquellas que se encuentran en etapas tempranas de desarrollo dado que representan un mayor riesgo (Bataille *et al*, 2018; Fishedick *et al*, 2014). Esta situación es típica en el desarrollo de innovación, donde los mercados no asignan perfectamente los recursos debido a la incertidumbre y asimetrías de información, entrando el Estado a jugar un rol para remediar la falla de mercado y promover un bien público como es el conocimiento inmerso en la innovación.

Siguiendo la analogía anterior, se puede plantear que la industria siderúrgica también enfrenta una falla de mercado y que de corregirse esta se genera una externalidad positiva, motivo por el cual el Estado también debiese tener incentivo a intervenir. **En particular, créditos blandos de la Corfo, o incluso la emisión de bonos verdes por parte del Ministerio de Hacienda que faciliten el desarrollo de nuevas tecnologías para industrias estratégicas locales, podrían ser políticas públicas útiles para abordar la restricción de financiamiento¹¹².**

Es importante señalar que la intervención del Estado se fundamenta en ambos casos (i y ii) por las externalidades positivas que implicaría el desarrollo de una industria siderúrgica baja en carbono, dado que por un lado se promueve la competitividad y se agrega valor a una industria local para su desarrollo en los mercados internacionales, y por otro lado se converge a las metas de emisión de CO₂ auto impuestas por Chile en el marco de los compromisos internacionales.

iii) Políticas Comparadas

Finalmente, si miramos las recomendaciones a nivel internacional de entes especializados, como por ejemplo el (Comission, The Energy Transitions, 2018), encontramos que las recomendaciones de política que proponen van en la misma línea de lo planteado anteriormente. En su último estudio¹¹³, esta organización plantea distintas fórmulas -que tienen distintos grados de impacto a nivel local- para lograr la completa descarbonización hacia mediados de siglos. Las principales medidas son:

- Invertir en nuevas tecnologías para el proceso integrado que permita minimizar las emisiones de CO₂, destacándose el uso del hidrógeno como agente reductor, la captura de CO₂, el uso de biomasa y la electrólisis.
- Reducir el consumo de acero a través de incentivos a la economía circular que permitan una mayor reutilización de los productos de acero y así contener la demanda por este metal¹¹⁴.
- Introducir tarifas a la importación de acero según el contenido de carbono de estos.

¹¹² Esta línea se profundiza en las siguientes secciones de este informe.

¹¹³ Mission Possible: Reaching Net Zero Carbon Emissions from Hardar to Abate Sectors by Mid-Century.

¹¹⁴ Chile importa cerca del 75% del acero que consume, en estas condiciones esta medida podría no generar impactos importantes.

Otras propuestas que se abordan en este documento son:

- La introducción de políticas que incentiven los sistemas de movilidad compartida¹¹⁵, lo cual generaría una disminución en la demanda por autos, ya que la fabricación de un automóvil explica el 23% de las emisiones que este genera desde su producción¹¹⁶.
- Políticas que promuevan la reutilización y mayor eficiencia en los diseños de construcción de edificios podrían reducir las emisiones en el sector de la construcción en un 34% al 2050. Cifra bastante considerable considerando que la construcción representa el 50% de la demanda por acero a nivel mundial.

Otras recomendaciones que recientemente han visto la luz¹¹⁷ son las formuladas por la Unión Europea en su documento llamado “Green Deal”, el cual es bastante ambicioso tanto por el rango de políticas como por su profundidad. Con respecto a la industria siderúrgica las medidas que parecen más relevantes son:

- La revisión, con miras a una mayor ambición, del EU ETS.
- La propuesta para apalancar una industria siderúrgica sin emisiones para el 2030.
- Las iniciativas que buscan estimular mercados líderes para la neutralidad climática y productos circulares en industrias intensivas en energía.

Según el discurso de la presidenta de la Comisión Europea, Ursula Von der Leyen, en Bruselas el 4 de marzo de 2020, Europa pretende establecer un Mecanismo de **Ajuste de Carbono en las Fronteras (CBAM)** por sus siglas en inglés¹¹⁸. Estos ajustes fiscales en las fronteras están siendo altamente discutidos y aún no se han aplicado. Los detalles de ellos no se esperan, cómo mínimo hasta el próximo año 2021.

Los objetivos de aplicar esta política en las importaciones serían: por un lado, **eliminar completamente las emisiones producidas por todos los productos consumidos en Europa independientemente de dónde se produzcan**, llegando a un consumo y una economía realmente neutra en CO₂eq y evitando así la externalización de emisiones. Para entender este hecho, es importante tener en cuenta que la Unión Europea importa mucho más dióxido de carbono del que exporta o, dicho de otra manera, la ciudadanía europea consume muchos más GEI de los que produce¹¹⁹. Por lo tanto, aunque las políticas de producción en la Unión Europea se establecieran como altamente rigurosas, la única forma de hacer que el consumo sea neutro en emisiones, sería regular la entrada fronteriza de los productos emisores. Por otro lado, esta política, de ser aplicada a los productos extranjeros, ayudaría no solo a reflejar su contenido en carbono y a no comprometer la producción doméstica, que tendría un precio elevado a causa de las regulaciones nacionales delante de la importación extranjera dónde no se aplicarían, sino que también ayudaría a hacer las importaciones de una forma que fuera consistente con las obligaciones de la UE bajo la OMC.

¹¹⁵ Este concepto a grandes rasgos se refiere a la utilización de un mismo vehículo para transportar a varias personas al mismo tiempo. Es una combinación entre el uso de transporte público y una alternativa inteligente de uso particular del auto particular. Este concepto engloba el carpooling, el ridesharing y el carsharing entre otros sistemas de transporte a demanda. <https://www.mapfre.es/seguros/particulares/coche/articulos/movilidad-compartida-que-es.jsp>

¹¹⁶ Actualmente en Chile no se fabrica acero para autos. Por lo que esta medida podría no tener un impacto importante.

¹¹⁷ Diciembre 2019.

¹¹⁸ Carbon Border Adjustment Mechanism

¹¹⁹ <https://www.pnas.org/content/pnas/107/12/5687.full.pdf>

Esta estrategia política se enmarcaría en el contexto del **European Green Deal** (especificada en el Roadmap, Annex to the Communication on the European Green Deal¹²⁰) enunciado en diciembre de 2019 y, específicamente, formaría parte de la nueva, y aún no aplicada, “**European Climate Law**”.

A continuación, exponemos su supuesto funcionamiento de ser aprobada esta medida por todos los miembros de la Unión Europea y la Organización Mundial del Comercio (OMC):

La Comisión Europea publicó recientemente un “**Inception Impact Assessment (IIA)**” con el fin de empezar el **proceso de consulta del CBAM**. En éste, la UE prevé que un CBAM podría tomar una de tres formas:

- **Un impuesto al carbono en productos seleccionados, aplicable tanto a los productos importados como a los de fabricación nacional;**
- **Un nuevo arancel aduanero o impuesto sobre las importaciones de carbono; o**
- **La ampliación del Régimen de Comercio de Derechos de Emisión de la UE a las importaciones.**

Este mecanismo se aplicaría a aquellos sectores donde el riesgo de “carbon leakage” sea más elevado.

Sobre el mecanismo para determinar el contenido de carbono y el precio del carbono de las importaciones, el IIA propone utilizar los puntos de referencia de toda la UE elaborados en el marco del “EU Emissions Trading Scheme” (ETS). También hay otros mecanismos para tal fin que están siendo evaluados, como la definición general del contenido de carbono de ciertos productos.

Además, el IIA indica que, con el fin de que este mecanismo para la importación fuera en sintonía con el precio interno al carbono en Europa, el supuesto funcionamiento del CBAM iría acompañado por un mecanismo de precio al carbono a nivel interno para la UE. Particularmente, se estudia usar el ETS como mecanismo de referencia para indexar el precio del carbono.

El **proceso de consulta del CBAM** se estableció por un período de 12 semanas y está abierta a todos los actores públicos y privados interesados, en cualquier sector económico, para dar su punto de vista sobre la propuesta.¹²¹

A continuación, exponemos los puntos más críticos de las negociaciones respecto a su formulación y los principales retos a superar:

- **Violación del compromiso de la OMC:**
El gobierno de los Estados Unidos podría emitir quejas ante la OMC, alegando que la nueva política de ajustes financieros viola el compromiso de los países miembros de la organización de no discriminar entre sus miembros, entre otras cosas. Éste impuesto sería un terreno nuevo para la OMC y hay administraciones que tienen sus dudas respecto el cumplimiento de los compromisos ya establecidos.

¹²⁰ Brussels, 11.12.2019 / COM(2019) 640 final / ANNEX: https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/european-green-deal-communication-annex-roadmap_en.pdf

¹²¹ <https://www.mayerbrown.com/en/perspectives-events/publications/2020/03/european-commission-starts-consultation-process-for-carbon-border-adjustment-mechanism>

Los retos que se presentan en este sentido pueden ser dos: el primero sería, precisar un diseño del BCAM que fuera compatible con las normas de la OMC, evitando las acusaciones de “green protectionism”. En este sentido, en 2019, un informe del bufete de abogados Mayer Brown concluyó que una política de carbono fronteriza bien construida probablemente resistiría las normas de la Organización Mundial del Comercio.¹²² También Jennifer Hillman, ex juez del órgano de apelación de la OMC, escribió sobre cómo hacer compatible el BCAM con la OMC en el estudio “Changing Climate for Carbon Taxes: Who’s Afraid of the WTO?”¹²³

El segundo reto sería establecer el BCAM aún que fuera el caso de no poder hacerlo compatible con la OMC. En este sentido, la UE debería tomar una opción política entre dos: o priorizar la protección y la mitigación de la crisis climática por encima de las reglas internacionales de comercio, o seguir de acuerdo a las reglas generales de la OMC.

Los socios comerciales pueden seguir viendo la propuesta como un "exceso extraterritorial" y las negociaciones correspondientes podrían llevar mucho tiempo y muchas complicaciones donde habría que invertir mucho capital político.

- **Desventaja de los países empobrecidos:**

Algunas personas se oponen a la idea de establecer un BCAM con el argumento de que los países en desarrollo, con pocas alternativas limpias para la producción de bienes, se verían en desventaja delante de las medidas de la Unión Europea en su venta de productos.

El reto que se presenta en este sentido puede ser que estos países, que tienen menos posibilidades de una producción eficiente, deberían en el mejor de los casos usar las ayudas que está establecidas que proporcionen los mecanismos de transferencia de tecnologías del Acuerdo de París, para mejorar esos sectores emisores.

- **El BCAM presenta dificultades en su aplicación derivadas del cálculo de emisiones en países terceros:**

El BCAM se presenta como un mecanismo muy difícil, en la práctica, de llevar a cabo a causa de la dificultad que supone el recuento de las emisiones relacionadas con la producción de bienes en los países empobrecidos. Sin un recuento válido de emisiones y una verificación veraz no se podría aplicar una tasa justa a estos productos en las fronteras. Tendría que haber esfuerzo importante para establecer criterios transparentes y estándares de medición, precisos o al menos rigurosos en cuanto establecer categorías de productos a ser grabados con un precio u otro, o directamente prohibidos, en base a estimaciones de sus emisiones de GEI. En este sentido, las empresas de verificación de conformidad que actualmente están trabajando en el mercado voluntario de carbono o en otros estándares precisos (como la certificación FLEGT de madera que prohíbe la entrada de productos forestales ilegales en la UE)

¹²² <https://time.com/5793918/european-union-border-carbon-tax/>

¹²³ <https://www.climateadvisers.com/wp-content/uploads/2017/07/2013-07-Changing-Climate-for-Carbon-Taxes.pdf>

podrían aportar experiencia y capacidad para materializar este sistema. Por ejemplo, se podría establecer un requerimiento de otorgación de certificados acreditados por la UE en países terceros, necesarios para el acceso al mercado europeo, como ya ocurre con el certificado FLEGT o para productos agroalimentarios por razones de sanidad pública.

El reto que se desprende de esta cuestión sería averiguar si es posible encontrar un marco de tratado internacional que establezca normas de medición y de verificación en todo el mundo.

Finalmente, y desde una perspectiva general, las recomendaciones buscan compatibilizar la transición hacia una industria baja en carbono con una industria competitiva, atributos que hoy no se encuentran presente en las acereras nacionales. Por lo mismo, el *timing* y la complementariedad con la cual se apliquen las distintas medidas es crucial, dado que los incentivos que genera el Estado pueden ser una ventana de oportunidad para un *upgrade* tecnológico que permita mayores niveles de competitividad, pero también pueden ser un peso que la industria no sea capaz de soportar.

Tabla 20 Resumen de propuestas de política pública

Propuesta	Barrera (s) a la que apunta	Quienes serían los involucrados	Vinculaciones instrumentales/habilitantes
Atributo de sustentabilidad	Ausencia de trazabilidad ambiental del producto	<ul style="list-style-type: none"> ICHA ALACERO CAP/AZA ASE MMA 	Se requeriría la creación de un atributo verde. Este atributo verde pudiera estar ligado a Certificación de Ahorros de Proyectos Energéticos (CAPE), mecanismo reconocido como MRV por el MMA o al programa de CORFO Construye 2025, mediante la iniciativa de Desarrollo y actualización de normativa y certificación sustentables. Para esto, se debería relevar el sector siderúrgico en las agendas de dichas instituciones.
Acero con Atributo verde en infraestructura pública y vivienda (Cuotas de Acero verde)	Márgenes acotados e incertidumbre de la industria(difícilmente se pueden traspasar costos relativos a implementación de tecnologías limpias sin perder cuota de mercado)	<ul style="list-style-type: none"> - Ministerio de Obras Públicas (DGOP). Mesa de trabajo de Cambio Climático (Huella en Obras públicas) -Vialidad - Mesa de construcción sustentable (MINVU, Instituto de la construcción, DGOP, Secretaría de Medio Ambiente y Territorio) - MMA -ICHA - Industria 	Asociado al punto anterior, de la mano de un mecanismo que permita establecer un atributo verde, la mesa de cambio climático del MOP cuyo interés es reducir la huella de carbono de las obras públicas) pudiese evaluar mecanismos para que se considerara la utilización de acero con atributo verde, a través de criterios de evaluación de las licitaciones o del establecimiento de un requisito de una cuota de acero verde.

Propuesta	Barrera (s) a la que apunta	Quienes serían los involucrados	Vinculaciones instrumentales/habilitantes
Mercado de Carbono (compensaciones)	Márgenes acotados	-MMA	- Modificación tributaria - Ley de Cambio Climático establecería un pseudo mercado y la propuesta es que sea una norma de emisión cuyo cumplimiento va a estar habilitado a través de compensaciones de reducción.
Instrumentos de financiamiento: Créditos blandos o emisión de bonos verdes	Márgenes acotados Falta de deuda adaptable al proyecto, y de garantías que faciliten la obtención de la deuda	- CORFO - Ministerio de Hacienda	
Estrategias para transferencia tecnológica.	Falta de instrumento de financiamiento que apoye la adopción de tecnologías/transferencia tecnológica	-CORFO - MINISTERIO DE CIENCIA, TECNOLOGÍA, CONOCIMIENTO E INNOVACIÓN -ICHA -CAP -AZA -Centro de Energía U. de Chile -Centro Tecnológico para la innovación	Incorporación de la industria en la estrategia de transferencia tecnológica para Cambio Climático y vinculación con centros académicos.

Fuente: Elaboración propia

8. Hoja de Ruta para la transferencia y adopción tecnológica

Basado en los resultados de los capítulos anteriores, se elaboró una hoja de ruta que permite proponer y proyectar las distintas medidas de acción que podrían desarrollarse como parte de la política de descarbonización del sector, la cual se presenta a continuación.

Tabla 21 Hoja de ruta, medidas de acción que podrían desarrollarse como parte de la política de descarbonización

Medidas	Explicación de por qué es importante	Plazo de Implementación	Responsable		Presupuesto esperado [en miles de USD]	Fuente de financiamiento
		¿Cuándo?	¿Quién?		¿Cómo?	
		Plazo	Primario	Secundario		
Validación de hoja de ruta	Es necesaria una validación de la hoja de ruta propuesta con todos los actores involucrados para que puedan ser parte del proceso.	Al término de este estudio	Ministerio de Energía	Todos los actores involucrados en esta hoja de ruta siendo fundamentales Ministerio de Medio Ambiente y Ministerio de Hacienda		
Creación de un comité multilateral de recambio tecnológico para impulsar la descarbonización de los sectores industriales del país	Crear una instancia que se reúna cada seis meses, en la cual se vayan levantando las necesidades y responsabilidades de la industria hacia un desarrollo bajo en carbono del país, y dando seguimiento a los compromisos asumidos	Al término de este estudio	Ministerio de Medio Ambiente y/o Energía: establecimiento de contrapartes públicas en el marco de la Estrategia de Cambio Climático de Largo Plazo (ECLP)	Ministerio de Hacienda Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación ICHA: consolidación de necesidades de la industria Gremios sectoriales industriales	-	-
Modelación y actualización del rol de la siderurgia en la	Para poder involucrar al sector en el cumplimiento de la NDC de Chile,	Segundo semestre 2020 - Cada 5 años	Ministerio de Medio Ambiente	Ministerio de Energía y comité	150	Co-financiamiento entre agencia de

Medidas	Explicación de por qué es importante	Plazo de Implementación	Responsable		Presupuesto esperado [en miles de USD]	Fuente de financiamiento
		¿Cuándo?	¿Quién?		¿Cómo?	
		Plazo	Primario	Secundario		
Estrategia Nacional de cambio climático de largo plazo y la NDC (perspectiva sector público)	y dimensionar el nivel de reducción de emisiones esperados en este sector. Puede ser evaluada en el marco de un plan más amplio			multilateral ya establecido		desarrollo y recursos públicos
Estrategia de cambio climático para una empresa de la siderurgia (perspectiva sector privado)	Confirmar hipótesis anteriores, re-evaluar escenarios de emisiones de GEI, necesidades tecnológicas, catastro de opciones tecnológicas y nivel de madurez, re-chequear costos y factibilidad de implementación de tecnologías, y actualizar plan de inversión	2021 - Cada 2 años	Industria	-	100	Financiamiento privado
Programa para fomentar la innovación colaborativa entre la industria siderúrgica y otras industrias asociadas a esta	Necesario para facilitar la adopción de tecnologías bajas en carbono y poder apoyar la creación de consorcios tecnológicos multisectoriales, para acelerar la transición nacional hacia una economía baja en carbono y poder escalar tecnologías de mitigación de	Marzo 2021	- CORFO (para colaborar en establecer las oportunidades tecnológicas asociativas más relevantes) - Industria del acero - Industrias y gremios en la cadena de valor del acero	- Centros académicos (universitarios y de investigación)	80	Financiamiento estatal

Medidas	Explicación de por qué es importante	Plazo de Implementación	Responsable		Presupuesto esperado [en miles de USD]	Fuente de financiamiento
		¿Cuándo?	¿Quién?		¿Cómo?	
		Plazo	Primario	Secundario		
	manera más costo-efectiva. Por ejemplo, para facilitar adopción de soluciones de economía circular y de tecnologías más avanzadas como la captura, uso y almacenamiento de carbono.					
Establecer regulaciones que permitan controlar la entrada de acero intensivo en emisiones proveniente del extranjero, en particular de países como China y México.	Necesario para controlar las fugas de carbono y conservar continuidad operativa de la industria nacional	Comenzar discusiones en segundo semestre 2020	SUBREI	MMA, ICHA	-	Financiamiento estatal
Diseño o ajustes Instrumentos y garantías públicas que faciliten la obtención de la deuda para sectores con riesgo de transición climática.	Necesario para el financiamiento en inversión inicial, dados los altos costos de capital asociados a las tecnologías de mitigación, y la realidad financiera del sector (margen acotado)	Comenzar discusiones en segundo semestre 2020	Gerencia de Inversión y Financiamiento de CORFO	Gremios sectoriales industriales	-	Financiamiento estatal
Levantamiento de capital en el mercado privado para financiamiento	Es una estrategia necesaria para apalancar la inversión inicial, a través del	En la medida que se necesite levantar financiamiento	Industria	-	-	Emisión de Bono Verde proveniente de la Industria o deuda privada (por

Medidas	Explicación de por qué es importante	Plazo de Implementación	Responsable		Presupuesto esperado [en miles de USD]	Fuente de financiamiento
		¿Cuándo?	¿Quién?		¿Cómo?	
		Plazo	Primario	Secundario		
de tecnologías de mitigación	financiamiento de inversionistas con la intención de financiar proyectos de acción climática					ejemplo, BID Invest)
Preparar postulación para acceder a financiamiento del fondo verde del clima para el financiamiento de tecnologías de mitigación	Necesario para financiar tecnologías de mitigación más transformacionales con elevados potenciales de reducción de emisiones	Comenzar evaluación de la postulación en el segundo semestre de 2020	Industria	-	-	Fondos no reembolsables del Fondo Verde del Clima
Diseño de mecanismos de certificación para garantizar el atributo de sustentabilidad y darle trazabilidad a las bajas emisiones del acero. A realizarse en coherencia con los lineamientos de Responsible Steel	Necesario para estandarizar los niveles de emisiones de GEI asociados a los productos de acero, y habilitar el mercado de acero verde	Comenzar diseño en segundo semestre del 2020	- ICHA - MMA	- Industria - Agencia de Sostenibilidad Energética (ASE)	80	Financiamiento mixto entre industria y financiamiento estatal
Creación de una plataforma de inteligencia de mercado, que permita identificar nichos de mercado estratégicos que demanden acero verde, y otros productos estratégicos que	Necesario para posicionar a Chile como productor verde, y orientar el destino de la producción industrial del país en torno a futuras necesidades de desarrollo global bajo en carbono e identificar los	Comenzar análisis y desarrollo a principios de 2021	Ministerio de Economía	ICHA y se requerirá del involucramiento de gremios industriales relevantes (minería del cobre, acero, cemento, construcción)	120	Financiamiento mixto entre industria y financiamiento estatal

Medidas	Explicación de por qué es importante	Plazo de Implementación	Responsable		Presupuesto esperado [en miles de USD]	Fuente de financiamiento
		¿Cuándo?	¿Quién?		¿Cómo?	
		Plazo	Primario	Secundario		
se fabriquen en Chile, dentro de una estrategia nacional de oferta de productos bajos en emisiones	consumidores dispuestos a pagar por la diferenciación de productos con sello verde en su cadena de valor					
Desarrollo de programa de fomento para el uso de acero verde en construcción de infraestructura pública y viviendas, mediante certificaciones de construcción baja en emisiones	Incrementa los mercados diferenciados, y que permiten incorporar los costos del recambio tecnológico al precio del acero mediante el cumplimiento de metas y estándares constructivos bajos en carbono	Comenzar discusiones en segundo semestre del 2020	ICHA, Ministerio del Medio Ambiente, Ministerio de Obras Públicas, y Ministerio de Vivienda y Urbanismo	- Mesa de construcción sustentable (MINVU, Instituto de la construcción, DGOP, Secretaría de Medio Ambiente y Territorio) - Mesa de trabajo de cambio climático del MOP - Industria	100	Financiamiento mixto entre industria y financiamiento estatal
Desarrollo de estrategias de transferencia tecnológica para la siderurgia, en el marco de la Estrategia Desarrollo y Transferencia Tecnológica para el Cambio Climático. (EDTTCC)	Necesario para traer las mejores prácticas internacionales en producción de acero baja en carbono, adaptadas a la realidad nacional, e incorporar a la industria en la estrategia de transferencia tecnológica para cambio climático.	Según el desarrollo de la ley de transferencia tecnológica, con inicio el 2020, que planifica actualizarse cada 5 años.	Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación	Vinculación de centros académicos con la Industria	-	Co-financiamiento entre agencia de desarrollo y recursos públicos* * Includo dentro del desarrollo de la EDTTCC

Medidas	Explicación de por qué es importante	Plazo de Implementación	Responsable		Presupuesto esperado [en miles de USD]	Fuente de financiamiento
		¿Cuándo?	¿Quién?		¿Cómo?	
		Plazo	Primario	Secundario		
Desarrollo de un mercado de carbono local	Necesidad de mantener la competitividad de la industria y poder reflejar los mayores costos de producción por inversión en tecnologías limpias en la posibilidad de venta de offsets, condicionado a reglamento disponible de MMA.	Según el desarrollo de la Ley Marco de Cambio Climático y reglamento de offsets que emane de la Modernización Tributaria	MMA, ICHA	Ministerio de Hacienda, Ministerio de Energía	-	Co-financiamiento entre agencia de desarrollo y recursos públicos* * Incluido dentro del costo de desarrollo de la Ley Marco de Cambio Climático y reglamentación de la reforma tributaria
Programa para fomentar la innovación colaborativa entre la industria siderúrgica y la industria de acero	El disponer de una siderurgia integrada de manera local crea las condiciones para que el encadenamiento acero-cemento genere una reducción de CO ₂ . Esto debido a que la escoria que se genera en el proceso de Alto Horno es usada para producción de cemento, disminuyendo las emisiones de la fabricación del Clinker ¹²⁴ .	Agosto 2021	- CORFO (para colaborar en establecer las oportunidades tecnológicas asociativas más relevantes) - Industria del acero - Industrias del cemento	Ministerio de Medio Ambiente		Financiamiento mixto entre industria y financiamiento estatal

Fuente: Elaboración propia

¹²⁴ De acuerdo a la IEA, sustituir el “cemento clinker” por “cemento escoria” podría permitir la reducción anual de 500 millones GJ de consumo energético y 200 MtCO₂

A continuación se presenta un cronograma de implementación de las medidas propuestas en la hoja de ruta.

Cronograma Hoja de Ruta para la transferencia y adopción tecnológica		2021						2022							
Medida	Plazo de implementación	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Ago
Validación de Hoja de Ruta, asignación de responsabilidades y planificación de trabajo	Al término del estudio	■	■												
Comité multilateral de recambio tecnológico para descarbonización	Al término de este estudio - cada 6 meses		■						■						■
Modelación y actualización del rol de la siderurgia en la Estrategia Nacional de cambio climático y la NDC	Segundo semestre 2021 - Cada 5 años		■	■											
Estrategia de cambio climático desarrollada por las empresas siderúrgicas locales	2022 - Cada 2 años								■	■	■				
Programa para fomentar la innovación colaborativa entre la industria siderúrgica e industrias asociadas	mar-22										■	■			
Establecer regulaciones que permitan controlar la entrada de acero intensivo en emisiones proveniente del extranjero, en particular de países como China y México.	Comenzar discusiones en segundo semestre 2021			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Diseño o ajustes a Instrumentos y garantías públicas que faciliten la obtención de la deuda para el sector	Comenzar discusiones en segundo semestre 2021			■	■	■									
Levantamiento de capital en el mercado privado para financiamiento de tecnologías de mitigación	En la medida que se necesite levantar financiamiento														
Preparar postulación para acceder a financiamiento del fondo verde del clima para el financiamiento de tecnologías de mitigación	Comenzar evaluación de la postulación en el segundo semestre de 2021			■	■	■									
Diseño de mecanismos de certificación para garantizar el atributo de sustentabilidad y darles trazabilidad a las bajas emisiones del acero. A realizarse en coherencia con los lineamientos de <i>Responsible Steel</i>	Comenzar diseño en segundo semestre del 2021			■	■	■									
Creación de una plataforma de inteligencia de mercado, que permita identificar nichos de mercado estratégicos que demanden acero verde, y otros productos estratégicos que se fabriquen en Chile, dentro de una estrategia nacional de oferta de productos bajos en emisiones	Comenzar análisis y desarrollo a principios de 2022									■	■	■			
Desarrollo de programa de fomento para el uso de acero verde en construcción de infraestructura pública y viviendas, mediante certificaciones de construcción baja en emisiones	Comenzar discusiones en segundo semestre del 2021			■	■	■	■	■							
Desarrollo de estrategias de transferencia tecnológica para la siderurgia, en el marco de la Estrategia Desarrollo y Transferencia Tecnológica para el Cambio Climático (EDTCC)	Según el desarrollo de la ley de transferencia tecnológica, con inicio el 2021, que planifica actualizarse cada 5 años.														
Desarrollo de un mercado de carbono local	Según el desarrollo de la Ley Marco de Cambio Climático y modificaciones a la reforma tributaria														
Programa para fomentar la innovación colaborativa entre la industria siderúrgica y la industria de acero	Segundo semestre 2022													■	■

Es importante destacar que la hoja de ruta propuesta se presenta en forma teórica, a base de la información que se maneja en el contexto de este estudio. Sin embargo, resulta imprescindible una instancia participativa, en que los actores involucrados puedan validar y asumir las medidas propuestas, definir plazos y actualizar esfuerzo. Adicionalmente, resulta imprescindible la voluntad política del sector público como condicionante para el cumplimiento de gran parte de las medidas.

Respecto de las medidas propuestas, cabe destacar la relación que existe entre ellas, y la criticidad de implementarlas en forma secuencial. Por ejemplo, la primera medida propuesta facilita la posterior adopción de las demás, por establecerse una organización que articule y vele por la transición baja en carbono de la industria. Otro ejemplo es la creación de un sistema de trazabilidad de emisiones, que es crítico para las medidas asociadas a la creación o fomento a mercados diferenciados (acero verde).

Finalmente, una vez que se cuente con una organización y estructura clara, y se asignen las medidas plasmadas en el Plan, es importante establecer un sistema de seguimiento de la hoja de ruta, basado en indicadores de impacto (en reducción de emisiones, para lo cual se sugiere la implementación de un sistema de Monitoreo, Reporte y Verificación – MRV) para financiamiento climático.

En base a esto, y con el objetivo de establecer un mecanismo que nos permita monitorear y evaluar la evolución de las medidas propuestas en la Hoja de Ruta a partir de su implementación, se definieron diferentes indicadores de impacto vinculados a las variables claves de estas medidas de acción

Para identificar estas variables claves, se definieron objetivos específicos relacionados a la iniciativa propuesta y así facilitar la definición de estos indicadores de impacto. La siguiente tabla muestra estos indicadores.

Tabla 22 Indicadores de impacto

Medidas	Indicadores de impacto
Creación de un comité multilateral de recambio tecnológico para impulsar la descarbonización de los sectores industriales del país	<p>1) Validación de soluciones tecnológicas: definir una cantidad de tecnologías que deben ser analizadas y validadas en un plazo determinado = N° soluciones validadas/año;</p> <p>2) Implementación de soluciones tecnológicas: definir una cantidad de tecnologías a ser implementadas en la industria en un plazo determinado = N° soluciones implementadas/año</p>
Modelación y actualización del rol de la siderurgia en la Estrategia Nacional de cambio climático de largo plazo y la NDC	1) Reducción de emisiones por periodo: de acuerdo a las acciones definidas se determina una cantidad de emisiones por periodo de tiempo = kg CO₂ e/año
Estrategia de cambio climático para una empresa de la siderurgia	<p>1) Reducción de emisiones por plazo establecido: kg CO₂e/año;</p> <p>2) Establecer metas de costos por reducción de emisiones: \$/kg CO₂e</p>
Programa para fomentar la innovación colaborativa entre la industria siderúrgica y otras industrias asociadas a esta	<p>1) Establecer un número de procesos de innovación colaborativa por periodos definidos = N° colaboraciones/año;</p> <p>2) Definir una meta de reducción de emisiones por innovación abierta al año: kg CO₂e/año</p>
Diseño o ajustes a Instrumentos y garantías públicas que faciliten la obtención de la deuda para el sector	<p>1) Establecer cantidad mínima de recursos monetarios disponibles por periodo de tiempo: \$/año;</p> <p>2) Definir una meta de reducción por recursos entregados por periodo de tiempo: kg CO₂e/\$/año</p>

Medidas	Indicadores de impacto
Preparar postulación para acceder a financiamiento del fondo verde del clima para el financiamiento de tecnologías de mitigación	1) Definición de una cantidad mínima de tecnologías a ser analizadas para financiamiento del fondo por periodo definido: N° tecnologías/tiempo
Diseño de mecanismos de certificación para garantizar el atributo de sustentabilidad y darle trazabilidad a las bajas emisiones del acero.	1) Definir cantidad mínima de reducción de emisiones que puedan ser trazadas por periodo de tiempo: kg CO₂e verificadas /año
Creación de una plataforma de inteligencia de mercado, que permita identificar nichos de mercado estratégicos que demanden acero verde	1) Identificación de cantidad mínima de nichos de mercado en un plazo determinado = N° de nichos/tiempo ; 2) Definir una cantidad mínima de venta de acero verde: Toneladas acero verde vendida/año
Desarrollo de programa de fomento para el uso de acero verde en construcción de infraestructura pública y viviendas, mediante certificaciones de construcción baja en emisiones	1) Definir una cantidad mínima de venta de acero verde: Toneladas acero verde vendidas/año
Levantamiento de capital en el mercado privado para financiamiento de tecnologías de mitigación	1) Definir una cantidad de reducción emitida debido al financiamiento de esta fuente = KgCO₂e/\$
Desarrollo de estrategias de transferencia tecnológica para la siderurgia, en el marco de la Estrategia Desarrollo y Transferencia Tecnológica para el Cambio Climático (EDTCC)	1) Definición de una cantidad mínima de mejores prácticas que sean implementadas en un periodo de tiempo = N° mejores prácticas /año
Desarrollo de un mercado de carbono local	1) Definir una relación entre el aumento en costos de producción y la venta de offsets que permita mantener competitividad = \$ Costos / \$ offsets
Programa para fomentar la innovación colaborativa entre la industria siderúrgica y la industria de acero	1) Definir cantidad de cemento producido por escoria proveniente de la industria del acero= \$ Ton / año 2) Cantidad de CO ₂ evitada por esta colaboración= Ton CO₂ e/año

Fuente:Elaboración propia

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

TKS. (2019, Noviembre). Gacetilla de prensa.

Åhman, M., Nillsson, L., & Johansson, B. (2017). Global climate policy and deep decarbonization of energy-intensive industries. *Climate Policy*, 634-649.

ALACERO. (2018). *América Latina en cifras 2018*. From https://www.alacero.org/sites/default/files/publicacion/america_latina_en_cifras_2018_es-en.pdf

Anon. (2018, Junio). *ArcelorMittal and LanzaTech break ground on €150 million project to revolutionise blast furnace carbon emissions capture*.

Anon. (2019, October 3). Tata Steel and partners explore potential carbon capture project to reduce CO2 emissions from steelmaking October 3 2019. *Tata Steel press release*.

Anon. (2019). *Technical background on the LanzaTech process*.

Anon. (2019). U.S. readies first wind-powered steel plant. E&E News.

Argenta, P. (2019). The future of DRI-HBI, with or without hydrogen? *Iron Metallics Association, Fall Meeting*.

AZA Acero Sostenible. (n.d.). *Proceso de Producción del Acero*. From [gerdau.cl: http://www.gerdau.cl/proceso-de-produccion-del-acero](http://www.gerdau.cl/proceso-de-produccion-del-acero)

Banco Interamericano de Desarrollo. (2013). *Desarrollo de una metodología para la construcción de curvas de abatimiento de emisiones de GEI incorporando la incertidumbre asociada a las principales variables de mitigación*.

Bataille, C. (2019). *Low and zero emissions in the steel and cement industry*. Paris: OECD.

Birat, J. P. (2010). *Global Technology Roadmap for CCS in Industry: Steel Sectoral Report. Version 5 of 09/09/2010: ArcelorMittal, United Nations Industrial Development Organization (UNIDO)*. From

<http://cdn.globalccsinstitute.com/sites/default/files/publications/15671/global-technology-roadmap-ccs-industry-steel-sectoral-report.pdf>

CAP Acero. (n.d.). *Infraestructura y Proceso*. From [capacero.cl: http://www.capacero.cl/cap_acero/site/edic/base/port/infografia.html](http://www.capacero.cl/cap_acero/site/edic/base/port/infografia.html)

Carbon4PUR. (S/I). From <https://www.carbon4pur.eu/wp-content/uploads/2018/05/Carbon4PUR-Flyer.pdf>

- Carpenter, A. (2012). *CO2 abatement in the iron and steel industry*. International Energy Agency Clean Coal Centre.
- Cobre, C. C. (2017). *Mercado del Hierro y el Acero*. Santiago de Chile.
- Commision, The Energy Transitions. (2018). *Reaching net-zero emissions from harder to abate sectors by mid-century*.
- Department for Communities and Local Government: London. (2009, January). *Multi-criteria analysis: a manual*. From http://eprints.lse.ac.uk/12761/1/Multi-criteria_Analysis.pdf
- Duarte, M. (2018, Marzo). By-Products, CO2 Emissions and Hydrogen use in an ENERGIRON DRI Plant. CONAC. Monterrey, México.
- European Commission. (2017). *Horizon 2020 Energy and transport*. From https://ec.europa.eu/inea/sites/inea/files/h2020-compendium_2017_web.pdf
- Federal Ministry of Education and Research. (2018). *The Carbon2Chem® project*. From <http://www.circularity.eu/project/carbon2chem/>
- FReSMe. (S/I). *FReSMe project*. From <http://www.fresme.eu/about.php>
- Fundación presencia. (2013). *Fundación presencia . (2013). Elementos para el mapeo de actores sociales y el diseño de estrategias para el desarrollo del plan de acción en Proyecto Ciudadano*.
- Gardarsdottir, S. (2019). *Comparison of Technologies for CO2 Capture from Cement Production— Part 2: Cost Analysis*. From <https://www.sintef.no/en/publications/publication/?pubid=CRISin+1675756>
- Geerdes, M. (2015). *Modern Blast Furnace Ironmaking, 3rd Edition*.
- GIZ. (2018). *Análisis de antecedentes para determinar las brechas tecnológicas existentes para la implementación de tecnologías limpias, en los sectores industriales expuestos al riesgo de una transición baja en carbono*. Santiago: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.
- Global Efficiency Intelligence . (2019, Noviembre). From <https://static1.squarespace.com/static/5877e86f9de4bb8bce72105c/t/5dd79c5befd2fe59137ebe70/1574411409958/How+Clean+is+the+U.S.+Steel+Industry-11.20.2019.pdf>
- Hensmann, M. (2018, February 22). *Smart Carbon Usage, Process Integration and*. From https://europa.eu/sinapse/webservices/dsp_export_attachement.cfm?CMTY_ID=0C46BEEC-C689-9F80-54C7DD45358D29FB&OBJECT_ID=3978AFA1-B5F7-F82B80B5AA99F67F40D5&DOC_ID=3A6FBC05-DAFF-1861-B14414BB2A8E8560&type=CMTY_CAL

- IIGCC. (2019). *Investor Expectations of Steel Companies*. Londres: The institutional Investors Group on Climate Change.
- International Trade Administration. (2019, September). From <https://www.trade.gov/steel/countries/pdfs/exports-china.pdf>
- IPCC. (2006). *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero - Volumen 3: Procesos industriales y uso de productos - Capítulo 4: Emisiones de la industria de los metales*. From https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/pdf/3_Volume3/V3_4_Ch4_Metal_Industry.pdf
- IPCC. (2018). *Resumen para Responsables de Políticas*. From <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/ar4-wg3-spm-sp.pdf>
- J. Rockström¹, O. Gaffney, M. Meinshausen, N. Nakicenovi, H. Schellnhuber,. (2017). A roadmap for rapid decarbonization. *Science, Vol 355, Issue 6331*, pp. 1269-1271.
- Madias. (2010). Recuperación de energía en hornos eléctricos de arco. *Acero Latinoamericano No. 521*, 34-41.
- Madias. (2013). Reciclado de residuos sociales – Un aporte de la industria del acero a la comunidad. *Acero Latinoamericano No. 541*, 42-55.
- Madias. (2014). Apagado en seco del coque. *Acero Latinoamericano No 544*, 42-51.
- Madias. (2014). Desarrollo de tecnologías de reducción y aceración – Contribuciones Latinoamericanas. *Acero Latinoamericano No. 543*, 36-46.
- Madias. (2014). Rutas de proceso en la siderurgia latinoamericana. *Acero Latinoamericano* , 64-73.
- Madias. (2017). Reducción de las emisiones de CO₂ de los altos hornos. *Acero Latinoamericano No. 560*, 48-62.
- Madias, J. (2017). Disminución de emisiones de CO₂ de los altos hornos. *Acero Latinoamericano*, 48-62.
- Madías, J. e. (2016). Ironmaking and steelmaking processes - greenhouse emissions, control and reduction - electric arc furnace Chapter.
- McKinsay &Company. (2019). *Pathway to a Low Carbon Economy*.
- McKinsey & Company. (2009). *Pathways to a low carbon economy*. From <https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Business%20Functions/Sustainability/Our%20Insights/Pathways%20to%20a%20low%20carbon%20economy/Pathways%20o%20a%20low%20carbon%20economy.ashx>
- Meerow, S., Newell, J., & Stults, M. (2016, March). *Defining urban resilience: A review*. From <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169204615002418>

- Ministerio del Medio Ambiente de Brasil. (2010, Noviembre 4). *Plano Setorial de Redução de Emissões da Siderurgia, Sumário Executivo*. From https://www.mma.gov.br/estruturas/smcq_climaticas/_arquivos/plano_setorial_siderurgia__sumrio_executivo_04_11_10_141.pdf
- Neuhoff, K. (2016). *Inclusion of Consumption of carbon intensive materials in emissions trading*.
- OECD Steel Committee. (2019, March 22). *IEA Technology Roadmap*. From <http://www.oecd.org/sti/ind/86th%20Steel%20Committee%20meeting%20%20Presentation%20by%20IEA,%20IEA%20Technology%20Roadmap.pdf>
- Pacheco, F; Contreras E. (2008). *Manual metodológico de evaluación multicriterio para programas y proyectos*. Santiago: Instituto Latinoamericano y del Caribe de Planificación. Serie Manuales 58, CEPAL.
- Pardo, Moya, & Vatopoulos. (2012). *Prospective Scenarios on Energy Efficiency and CO2 Emissions in the EU*. From <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC74811/Id1a25543enn.pdf>
- Parsons Brinckerhoff. (2015, March). *Industrial Decarbonisation & Energy Efficiency Roadmaps to 2050*. From This report has been prepared for the Department of Energy and Climate Change and the Department for Business, Innovation and Skills: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/419912/Cross_Sector_Summary_Report.pdf
- PNUD. (2010). *Manual para realizar una Evaluación de necesidades en materia de tecnología para el cambio climático*. Nueva York: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.
- Polonsky, M. (2014). Green Marketing. *Wiley Encyclopedia of Management*.
- Quader et al. (2015). A comprehensive review on energy efficient CO2 breakthrough technologies for sustainable green iron and steel manufacturing. *ELSEVIER: Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 594-614.
- Rootzén, J., & Johnsson, F. (2016). Paying the full price of steel– Perspectives on the cost of reducing carbon dioxide emissions from the steel industry. *Energy Policy*, 459-469.
- SDSN. (2019). *Roadmap to 2050 A Manual for Nations to Decarbonize by Mid-Century*. Sustainable Development Solutions Network (SDSN) and Fondazione Eni Enrico Mattei (FEEM).
- SETIS. (2019). From https://setis.ec.europa.eu/system/files/Technology_Information_Sheet_Energy_Efficiency_and_CO2_Reduction_in_the_Iron_and_Steel_Industry.pdf

- Strategic Energy Technologies Information System - European Commission. (2019). From https://setis.ec.europa.eu/system/files/Technology_Information_Sheet_Energy_Efficiency_and_CO2_Reduction_in_the_Iron_and_Steel_Industry.pdf
- Trærup, S., & Bakkegaard, R. K. (2015). *Evaluación y priorización de tecnologías para la adaptación al cambio climático: Una orientación práctica para un análisis multicriterio (AMC), identificación y evaluación de criterios relacionados*. From https://orbit.dtu.dk/files/118307046/MCA_Guidance_Adaptation_Spanish.pdf
- United States Environmental Protection Agency. (2012, September). *Available and emerging technologies for reducing greenhouse gas emissions from the iron and steel industry*. From [epa.gov: https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/ironsteel.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/ironsteel.pdf)
- WALGA. (2014, August). *Guidelines for Developing a Marginal Abatement Cost Curve (MACC)*. From Working for Local Government: https://walga.asn.au/getattachment/Policy-Advice-and-Advocacy/Environment/Climate-Change/Climate-Change-Resources/Guidelines_for_Developing_a_MACC_tool_Feb2016.pdf.aspx?lang=en-AU
- Wesseling, J., & Edquist, C. (2018). Public procurement for innovation to help meet societal challenges: a review and case study. *Science and Public Policy*, 493-502.
- Wiley. (2011). Assessment of opportunities for CO2 capture at iron and steel mills: an Australian Perspective. *Energy Procedia* 4 (2011) pp. 2654011). *Energy Procedia*, 654011.
- World Bank . (2017). From <http://documents.worldbank.org/curated/en/576251484770800494/text/108879-SPANISH-REVISED-ETP-ESP-02-03-17.txt>
- World Steel Assosiation. (2019, Abril). *Energy use in the steel industry*. From https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:f07b864c-908e-4229-9f92-669f1c3abf4c/fact_energy_2019.pdf
- Worldsteel Association. (2019). *worldsteel.org*. From [worldsteel.org: https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:7ec64bc1-c51c-439b-84b8-94496686b8c6/Position_paper_climate_2019_vfinal.pdf](https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:7ec64bc1-c51c-439b-84b8-94496686b8c6/Position_paper_climate_2019_vfinal.pdf)
- Wörtler, M. (2013). *Steel's Contribution to a Low-Carbon Europe 2050*.

