



UNIVERSITAT ROVIRA i VIRGILI
Facultat d'Economia i Empresa

Chatarra Ferrosa Impulsando la Economía Circular en la Industria Siderúrgica

Edgar Geovanni Agudelo Rodriguez

Trabajo Final de Máster

Máster en Emprendimiento e Innovación

junio de 2025

Universitat Rovira i Virgili

Índice

Índice.....	2
Resumen.....	6
Palabras clave.....	6
1. Introducción.....	7
2. Literatura.....	9
2.1. Revisión de la literatura.....	9
2.1.1. Contexto global de la industria siderúrgica, sostenibilidad y emisiones....	9
2.1.2. La economía circular: principios fundamentales.....	10
2.1.3. La economía circular aplicada a la industria siderúrgica.....	11
2.1.4. La chatarra como pilar de la economía circular en las siderúrgicas.....	13
2.1.5. Procesos de reciclaje y tecnologías asociadas.....	15
2.1.6. Beneficios ambientales y económicos del reciclaje de chatarra.....	18
2.1.7. Desafíos y barreras para la optimización del uso de chatarra.....	20
2.1.8. El rol de la Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+i).....	21
2.2. Hipótesis.....	24
3. Metodología y variables principales.....	24
3.1. Enfoque metodológico mixto.....	25
3.2. Estudio de casos múltiples.....	25
3.3. Estrategias de recolección de información.....	26
3.4. Base de datos y metodología de obtención de la información.....	28
3.5. Variables.....	28
3.6. Justificación de la metodología frente a alternativas.....	30
3.7. Limitaciones de la investigación.....	30
4. Análisis de casos de estudio.....	31
4.1. Tata Steel.....	31
4.1.1. Contexto y modelo operativo.....	31
4.1.2. Prácticas y estrategias en la gestión de chatarra ferrosa.....	32
4.1.3. Enfoque e iniciativas de I+D+i relevantes.....	33
4.1.4. Resultados reportados y desafíos específicos.....	34

4.1.5. Análisis preliminar y vinculación con hipótesis.....	35
4.2. ArcelorMittal.....	36
4.2.1. Contexto y modelo operativo.....	36
4.2.2. Prácticas y estrategias en la gestión de chatarra ferrosa.....	37
4.2.3. Enfoque e iniciativas de I +D + i relevantes.....	38
4.2.4. Resultados reportados y desafíos específicos.....	41
4.2.5. Análisis preliminar y vinculación con hipótesis.....	42
4.3. Nucor.....	43
4.3.1. Contexto y modelo operativo.....	43
4.3.2. Prácticas y estrategias en la gestión de chatarra ferrosa.....	43
4.3.3. Enfoque e iniciativas de I +D + i relevantes.....	44
4.3.4. Resultados reportados y desafíos específicos.....	45
4.3.5. Análisis preliminar y vinculación con hipótesis.....	46
4.4. Schnitzer Steel ahora (Radius Recycling).....	47
4.4.1. Contexto y modelo operativo.....	47
4.4.2. Prácticas y estrategias en la gestión de chatarra ferrosa.....	47
4.4.3. Enfoque e iniciativas de I + D + i relevantes.....	48
4.4.4. Resultados reportados y desafíos específicos.....	50
4.4.5. Análisis preliminar y vinculación con hipótesis.....	51
4.5. SSAB.....	52
4.5.1. Contexto y modelo operativo.....	52
4.5.2. Prácticas y estrategias en la gestión de chatarra ferrosa.....	52
4.5.3. Enfoque e iniciativas de I+D+i relevantes.....	53
4.5.4. Resultados reportados y desafíos específicos.....	54
4.5.5. Análisis preliminar y vinculación con hipótesis.....	55
4.6. POSCO.....	56
4.6.1. Contexto y modelo operativo.....	56
4.6.2. Prácticas y estrategias en la gestión de chatarra ferrosa.....	57
4.6.3. Enfoque e iniciativas de I+D+i relevantes.....	58
4.6.4. Resultados reportados y desafíos específicos.....	59
4.6.5. Análisis preliminar y vinculación con hipótesis.....	60
4.7. Voestalpine.....	61

4.7.1. Contexto y modelo operativo.....	61
4.7.2. Prácticas y estrategias en la gestión de chatarra ferrosa.....	61
4.7.3. Enfoque e iniciativas de I+D+i relevantes.....	62
4.7.4. Resultados reportados y desafíos específicos.....	63
4.7.5. Análisis preliminar y vinculación con hipótesis.....	64
4.8. HBIS Group.....	65
4.8.1. Contexto y modelo operativo.....	65
4.8.2. Prácticas y estrategias en la gestión de chatarra ferrosa.....	66
4.8.3. Enfoque e iniciativas de I+D+i relevantes.....	67
4.8.4. Resultados reportados y desafíos específicos.....	69
4.8.5. Análisis preliminar y vinculación con hipótesis.....	70
4.9. Gerdau.....	71
4.9.1. Contexto y modelo operativo.....	71
4.9.2. Prácticas y estrategias en la gestión de chatarra ferrosa.....	71
4.9.3. Enfoque e iniciativas de I+D+i relevantes.....	72
4.9.4. Resultados reportados y desafíos específicos.....	74
4.9.5. Análisis preliminar y vinculación con hipótesis.....	74
5. Resultados empíricos.....	75
5.1. Evidencia sobre la relación entre I+D+i y avance en economía circular y la gestión de chatarra (Evaluación de H1).....	76
5.1.1. Análisis cualitativo comparativo.....	76
5.1.2. Análisis cuantitativo descriptivo (Limitado):.....	77
5.1.3. Discusión y evaluación final de H1.....	78
5.2. Evidencia sobre I+D+i y tasas de uso de chatarra (Evaluación de H2).....	78
5.2.1. Análisis cuantitativo descriptivo sobre tasas de uso de chatarra.....	79
5.2.2. Relación con I+D+i.....	80
5.2.3. Discusión y evaluación final de H2.....	80
5.3. Evidencia sobre I+D+i y la reducción de emisiones de CO ₂ (Evaluación de H3).....	81
5.3.1. Análisis cuantitativo descriptivo de la intensidad de emisiones de CO ₂	81
5.3.2. Relación con I+D+i.....	82
5.3.3. Discusión y evaluación final de H3.....	82

5.4. Evidencia sobre I+D+i y gestión de calidad de la chatarra (Evaluación de H4)...	83
5.4.1. Análisis cualitativo comparativo.....	83
5.4.2. Discusión y evaluación final de H4.....	84
5.5. Evidencia sobre las barreras tecnológicas persistentes (Evaluación de H5)...	85
5.5.1. Análisis cualitativo comparativo.....	85
5.5.2. Discusión y evaluación final de H5.....	86
5.6. Síntesis general de resultados y hallazgos clave.....	86
6. Conclusiones.....	90
7. Glosario.....	94
8. Referencias Bibliográficas.....	97

Chatarra Ferrosa Impulsando la Economía Circular en la Industria Siderúrgica

Resumen

La industria siderúrgica global debe avanzar hacia una economía circular, utilizando la chatarra ferrosa como recurso estratégico. Este trabajo analiza el papel de la chatarra en la promoción de la circularidad en el sector, centrándose en cómo la Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+i) influye en las estrategias y resultados de empresas siderúrgicas líderes. El objetivo principal es comprender la gestión de este recurso, la inversión en innovación para superar barreras y la relación entre I+D+i, eficiencia en el uso de chatarra y reducción del impacto ambiental.

Se empleó una metodología mixta, con un estudio de casos múltiples de nueve empresas siderúrgicas globales (Tata Steel, ArcelorMittal, Nucor, Radius Recycling, SSAB, POSCO, Voestalpine, HBIS Group y Gerdau). El análisis de fuentes secundarias, como informes corporativos y publicaciones sectoriales, permitió evaluar las hipótesis planteadas.

Los resultados confirman que la I+D+i es un motor esencial para avanzar hacia la economía circular y mejorar la gestión de chatarra. Se observa una correlación positiva entre I+D+i y las tasas de uso de chatarra, y una negativa con las emisiones de CO₂, donde la innovación es clave para la descarbonización. La I+D+i específica mejora la gestión de la calidad de la chatarra. No obstante, persisten barreras tecnológicas en el procesamiento de chatarra heterogénea, impulsando la I+D+i continua y la adopción de Hierro de Reducción Directa (DRI) como complemento.

En conclusión, la I+D+i es indispensable para la transformación circular y la descarbonización de la siderurgia. La capacidad de innovación del sector en la valorización de la chatarra y el desarrollo de rutas productivas limpias determinará el éxito de esta transición.

Palabras clave

Chatarra ferrosa, economía circular, siderúrgica, I+D+i, sostenibilidad, reciclaje de acero, horno de arco eléctrico (EAF), alto horno (BOF), reducción de emisiones, descarbonización, gestión de residuos, tecnologías de clasificación, hierro de reducción directa (DRI), acero verde, hidrógeno, captura de carbono (CCUS).

1. Introducción

La industria siderúrgica durante muchos años se ha catalogado como un pilar fundamental en la economía global, proporcionando materiales esenciales para el desarrollo de infraestructuras críticas, la manufactura avanzada y una gran cantidad de sectores industriales que sustentan la vida moderna (Wheeler, 2024) y su producción masiva es un motor clave del crecimiento económico, especialmente en economías emergentes como las asiáticas; Aunque, actualmente enfrenta un desafío gigante en la búsqueda del equilibrio entre la producción de acero y lograr una sostenibilidad ambiental enmarcada en la economía circular para avanzar hacia modelos productivos sostenibles.

Tradicionalmente esta industria se caracterizó por un consumo intensivo de energía y recursos vírgenes como el mineral de hierro y el carbón, así como también es la responsable de una porción considerable de las emisiones globales de gases de efecto invernadero. Estudios y organismos internacionales como la Agencia Internacional de la Energía (IEA) y World Steel Association sitúan constantemente la contribución del sector entre el 7% y el 11% del total de las emisiones mundiales de CO₂ derivadas del sistema energético y los procesos industriales, una cifra que enfatiza la urgencia de su descarbonización ante la creciente crisis climática (Marcet et al., 2018; Mellon, 2024).

La preocupación global por el cambio climático, sumada a la presión sobre el cuidado de los recursos naturales y la necesidad de una gestión más eficiente de los residuos, ha impulsado al sector siderúrgico a buscar soluciones innovadoras que permitan desacoplar su producción del impacto ambiental. En este contexto de transformación necesaria, la economía circular emerge como un modelo fundamental, proponiendo un enfoque restaurativo y regenerativo que busca mantener los materiales en uso durante el mayor tiempo posible, minimizando la generación de residuos y reduciendo la dependencia de materias primas vírgenes (Marcet et al., 2018; Mellon, 2024).

Dentro de este marco, la chatarra de acero o chatarra ferrosa surge como un recurso estratégico clave en esta búsqueda (GME Recycling, 2023). Su reutilización continua en la producción de nuevo acero reduce significativamente la demanda de materias primas vírgenes y las emisiones asociadas a su extracción y procesamiento. Según los estudios de Kirschen et al., (2011); Worrell et al., (2001), el reciclaje de chatarra disminuye drásticamente el consumo energético del proceso (ahorros reportados de hasta 60%-70%) y en consecuencia puede reducir hasta un 30% las emisiones de CO₂ asociadas en comparación con la producción de acero a partir de mineral de

hierro, por ello, la optimización del uso de chatarra se considera una palanca esencial para la descarbonización del sector (Manthey, 2023).

Sin embargo, a pesar del enorme potencial que tiene la reciclabilidad de la chatarra, la forma en que se gestiona y su óptima valorización, permiten observar que existen grandes desafíos, como la disponibilidad de chatarra de alta calidad, la heterogeneidad de este material, la contaminación de los flujos de este residuo (especialmente en posconsumo), la volatilidad de los mercados y las limitaciones de tecnologías de clasificación y procesamiento son barreras que dificultan maximizar la inclusión y contribución a la economía circular (Energetics Inc, 2003).

Es en este punto donde la Investigación, Desarrollo e innovación (I+D+i) se convierte en una herramienta clave. Analizando cual es la capacidad de las empresas siderúrgicas para invertir estratégicamente en I+D+i ya sea para desarrollar tecnologías avanzadas de clasificación, optimizar procesos como el horno de arco eléctrico (EAF *Electric Arc Furnace*), crear nuevos aceros con alto contenido reciclado, o implementar rutas productivas disruptivas bajas en carbono como lo son el hidrógeno o CCUS (*Carbon Capture, Use and Storage*) que determinará en gran medida su éxito en la transición hacia un modelo verdaderamente circular y sostenible.

El objetivo principal de esta investigación es analizar el papel de la chatarra ferrosa como promotora de la economía circular en el sector siderúrgico, prestando especial atención a la influencia de la implementación de I+D+i en las estrategias y resultados de las empresas líderes a nivel mundial. Se busca comprender cómo estas empresas gestionan este recurso estratégico, cómo invierten en innovación para superar las barreras existentes, y si existe una relación observable entre estos esfuerzos de I+D+i y su desempeño en términos de eficiencia en el uso de chatarra y reducción del impacto ambiental.

Para ello, se realizó una revisión de la literatura sobre economía circular, gestión de chatarra, tecnologías siderúrgicas e I+D+i, se definirá una metodología basada en el estudio comparativo de casos de empresas líderes por lo cual analizamos 9 empresas siderúrgicas a nivel mundial como Tata Steel siderúrgica de India, ArcelorMittal siderúrgica de Luxemburgo, Nucor y Schnitzer Steel (Radius Recycling) siderúrgicas de Estados Unidos, SSAB siderúrgica Sueca, POSCO siderúrgica de Corea del sur, Voestalpine siderúrgica de Austria, HBIS Group siderúrgica de China, y Gerdau siderúrgica de Brasil, enfocándonos en los aspectos mencionados anteriormente. Las anteriores empresas fueron seleccionadas ya que son empresas reconocidas y algunas cuentan con varias plantas a nivel mundial.

El trabajo se estructura en seis secciones. La sección 1 da una breve introducción exponiendo el interés de esta investigación. En la sección 2 se realizó una revisión de la literatura sobre economía circular, gestión de chatarra, tecnologías siderúrgicas e I+D+i. La sección 3 se definirá una metodología basada en el estudio comparativo de casos de empresas líderes. La sección 4 se analizarán en detalle dichos casos de estudio de empresas siderúrgicas que han implementado estrategias de economía circular. En la sección 5 se sintetizan los resultados empíricos para evaluar las hipótesis planteadas. Finalmente, en la sección 6 se presentarán las conclusiones, implicaciones, limitaciones y futuras líneas de investigación. Este trabajo aspira a ofrecer una visión integrada y actualizada de cómo la innovación está configurando el futuro circular de una de las industrias más tradicionales para el desarrollo global.

2. Literatura

Esta sección establece el marco conceptual y revisa la literatura existente relevante para comprender el papel de la chatarra ferrosa y la I+D+i en la promoción de la economía circular dentro de la industria siderúrgica. Se abordan los conceptos clave, los procesos tecnológicos, los beneficios, los desafíos y el estado del arte de la innovación en el sector.

2.1. Revisión de la literatura

2.1.1. Contexto global de la industria siderúrgica, sostenibilidad y emisiones

La industria siderúrgica se establece como un pilar insustituible de la economía mundial actual, proporcionando materiales esenciales para el desarrollo de infraestructuras críticas, la manufactura avanzada y una multitud de sectores industriales que sustentan la vida moderna (Wheeler, 2024). Su producción masiva es un motor clave del crecimiento económico, especialmente en economías emergentes. No obstante, este papel crucial coexiste con un desafío ambiental urgente, la necesidad apremiante de avanzar hacia modelos de producción sostenibles, tradicionalmente caracterizada por un consumo intensivo de energía y recursos vírgenes como el mineral de hierro y el carbón, donde el sector siderúrgico es responsable de una porción considerable de las emisiones globales de gases de efecto invernadero.

Estudios y organismos internacionales como la Agencia Internacional de la Energía (IEA) y World Steel Association sitúan consistentemente la contribución del sector entre el 7% y el 11% del total de las emisiones mundiales de CO₂ derivadas del sistema energético y los procesos industriales (IRENA, 2023; Marcet et al., 2018; Mellon, 2024), una cifra que enfatiza la urgencia de su descarbonización ante la creciente crisis climática. Esta elevada huella de carbono se debe, en gran medida, a la dependencia histórica de la ruta de producción integrada mediante Alto Horno y Convertidor de Oxígeno (*BF-BOF Basic oxygen steelmaking*), concentrado en el uso de carbón coque.

La creciente preocupación global por el cambio climático, sumada a la presión actual de conservar los recursos naturales y la necesidad de una gestión más eficiente de los residuos, ha impulsado al sector siderúrgico a buscar soluciones innovadoras que permitan separar la producción del impacto ambiental generado. En este contexto de transformación necesaria, la economía circular emerge como un paradigma fundamental, proponiendo un modelo restaurativo y regenerativo que busca mantener los materiales en uso durante el mayor tiempo posible, minimizando la generación de residuos y reduciendo la dependencia de materias primas vírgenes (Marcet et al., 2018; Mellon, 2024).

2.1.2. La economía circular: principios fundamentales

Frente al modelo económico lineal predominante durante gran parte de la era industrial, caracterizado por una lógica secuencial de extraer, producir, usar y tirar, ha emergido con fuerza el paradigma de la economía circular. Este enfoque representa una transformación fundamental en la manera de concebir la producción y el consumo, proponiendo un sistema restaurativo y regenerativo por diseño (Ellen MacArthur Foundation, 2014) donde lejos de ser una mera tendencia pasajera, la economía circular se considera una evolución necesaria del concepto de sostenibilidad, integrando sus dimensiones ambiental, social y económica para abordar los desafíos globales del agotamiento de recursos y la degradación ecológica.

El principio central de la economía circular radica en mantener los productos, componentes y materiales en su máximo valor y utilidad en todo momento, tanto en ciclos técnicos como biológicos. Esto implica cerrar el ciclo, minimizando la extracción de recursos vírgenes y la generación de residuos a través de estrategias jerarquizadas que priorizan la prevención, la reutilización, la reparación, la remanufactura y como última opción preferente antes del vertido, el reciclaje de alta calidad. A diferencia del

modelo lineal, que externaliza los costos ambientales y sociales de la disposición final, la economía circular busca internalizar la gestión de los recursos a lo largo de toda su vida útil (Prieto-Sandoval et al., 2017).

Un componente esencial de este paradigma es como poder realizar el diseño para hacerlo circular, esto significa crear nuevos productos no solo para su función inicial, sino también pensando en su durabilidad, la facilidad de mantenimiento, reparación y su eventual desmontaje y recuperación de materiales al final de su vida útil. Debemos priorizar el uso de materiales sostenibles y la eliminación de sustancias o componentes que dificulten los procesos de reutilización o reciclaje.

Al implementar estos principios, la economía circular pretende desacoplar el crecimiento económico del consumo de recursos finitos y del impacto ambiental negativo. No se opone al desarrollo económico, sino que propone una vía alternativa donde la prosperidad se logra mediante la gestión inteligente y la valorización continua de los recursos ya existentes, en lugar de la explotación insostenible de nuevas materias primas (Prieto-Sandoval et al., 2017).

Además de sus evidentes beneficios ambientales, la transición hacia una economía circular presenta considerables oportunidades económicas y de innovación, donde se fomenta la creación de nuevos modelos de negocio (como el producto como servicio, las plataformas de ayuda, colaboración o la logística inversa), impulsando la investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías y procesos, así como poder generar nuevas cadenas de valor y empleo local en áreas como la reparación, la remanufactura y el reciclaje. Como señalan Marcet et al. (2018), la economía circular es un término genérico para definir un nuevo modelo económico que busca la reintegración constante en la cadena de valor, transformando lo que antes era considerado residuo en un recurso valioso.

2.1.3. La economía circular aplicada a la industria siderúrgica

La industria siderúrgica, por su escala productiva y su impacto ambiental (como se detalló en el numeral 2.1.1.) se encuentra en una posición única y crucial para liderar la transición hacia una circularidad, mediante la aplicabilidad de los principios de la economía circular en este sector y que no sea solo meramente teórica, ya que esta se fundamenta en las propiedades intrínsecas del propio acero y en la creciente necesidad de modelos productivos más sostenibles (Berlin et al., 2022), donde el acero destaca por ser un material permanente y 100% reciclable en teoría un número

indefinido de veces sin experimentar una degradación significativa de sus propiedades físico-químicas. Estas características la convierten en una candidata ideal para implementar estrategias de ciclo cerrado, diferenciándose de otros materiales cuyo reciclaje puede ser más complejo o resultar en una pérdida de calidad (World Steel Association, 2015). De hecho, su alta tasa de reciclaje a nivel global, estimada en torno al 85% en años recientes, demuestra su viabilidad como pilar de un sistema industrial más circular.

La piedra angular de la economía circular en la industria siderúrgica es, sin ninguna duda, el reciclaje de la chatarra ferrosa (Berlin et al., 2022). Donde la reintroducción sistemática de acero al final de su vida útil (proveniente de demoliciones, vehículos desechados, electrodomésticos, etc.) como materia prima en la fabricación de nuevo acero, permite cerrar el ciclo del material de manera efectiva (worldsteel, 2015). Este proceso, que se realiza predominantemente en los hornos de arco eléctrico (*EAF-Electric Arc Furnace*), pero también como carga refrigerante en convertidores de oxígeno básico (*BOF-Basic Oxygen Furnace*) o altos hornos, reduce sustancialmente la dependencia de la extracción de mineral de hierro y la producción de coque a partir de carbón, que son las etapas más intensivas en energía y emisiones de la ruta siderúrgica integral tradicional.

Sin embargo, la aplicación de la economía circular en el sector va más allá del simple reciclaje del material base, también abarca un enfoque global que incluye la reutilización directa de componentes estructurales de acero procedentes de edificios o infraestructuras desmontadas, alargando su vida útil sin necesidad de refundición generando una reutilización.

Incluye también la valorización de subproductos inherentes al proceso siderúrgico como las escorias, para poner un ejemplo, pueden ser procesadas y utilizadas como material en la construcción de carreteras o como materia prima en la fabricación de cemento, mientras que los gases ricos en CO, CO₂ e hidrógeno, tradicionalmente quemados en antorcha, pueden capturarse y transformarse en productos químicos como el nafta de valor añadido o en energía, como ilustran iniciativas analizadas en el proyecto *Steel2Chemicals*, dirigida por el Instituto de Tecnología de Procesos Sostenibles (ISPT) y con la colaboración de socios clave de la industria y la academia, exploró la viabilidad de un enfoque de economía circular, este proyecto se centró en reutilizar el monóxido de carbono (CO) liberado por la industria siderúrgica, una fuente significativa de emisiones de CO₂, como materia prima para la producción de productos químicos, específicamente nafta sintética, su objetivo principal era crear una cadena de valor circular que permitiera la reducción de emisiones y proporcionara a la

industria química una alternativa a los recursos fósiles, aunque el proyecto demostró los beneficios ambientales mutuos y sentó las bases para futuras sinergias interindustriales, también identificó desafíos económicos y técnicos importantes, como los altos costos asociados a la separación del nitrógeno y el aporte de hidrógeno necesario para el proceso (Institute for Sustainable Process Technology (ISPT), 2023).

Además, la economía circular impulsa la innovación en el diseño de productos, donde el desarrollo y uso de aceros avanzados de alta resistencia (*AHSS-Advanced High-Strength Steels*) permite fabricar componentes más ligeros, por ejemplo, los usados en la industria automotriz, lo que reduce el consumo de material en la fabricación y, disminuye el consumo de energía y las emisiones durante la fase de uso del producto final. Asimismo, se promueve el diseño para el desmontaje, facilitando la separación eficiente de los componentes de acero al final de la vida útil del producto para su posterior reutilización o reciclaje.

La adopción de estas prácticas circulares no solo conlleva beneficios ambientales evidentes, sino que también refuerza la competitividad y resiliencia económica del sector siderúrgico, permitiendo reducir la exposición a la volatilidad de los precios de las materias primas vírgenes, disminuyendo los costos energéticos y de gestión de residuos, abriendo nuevas líneas de negocio basadas en la valorización de subproductos o servicios de recuperación y generando empleo en la creciente industria del reciclaje y la remanufactura. No obstante, la transición hacia una economía circular plenamente implementada en la siderurgia requiere un enfoque sistémico, que aborde no solo las tecnologías de producción, sino también la reconfiguración de las cadenas de suministro (Berlin et al., 2022), la colaboración entre los diferentes actores, la adaptación en los modelos de negocio y el establecimiento de marcos regulatorios favorables.

2.1.4. La chatarra como pilar de la economía circular en las siderúrgicas

Como se estableció en la sección anterior, la economía circular encuentra en la industria siderúrgica un campo de aplicación ideal y el elemento central que articula esta circularidad es indiscutiblemente, la chatarra ferrosa, definida como el conjunto de residuos de acero y hierro generados tanto en los procesos productivos como al final de la vida útil de los bienes de consumo, la chatarra constituye una materia prima secundaria de valor estratégico, donde su reutilización sistemática en la fabricación de nuevo acero no solo es técnicamente viable, sino que representa la vía principal para reducir la dependencia del sector de los recursos naturales vírgenes y mitigar su

considerable impacto ambiental (GME Recycling, 2023). La contribución de la chatarra a la producción siderúrgica es considerable, ya que el acero es uno de los materiales más reciclados del mundo, con más de 650 millones de toneladas recicladas en el año 2015 (World Steel Association, 2015) y 720 millones de toneladas para 2021 (World Steel Association, 2021), lo que representa aproximadamente el 30% de la materia prima total utilizada en este sector.

Para comprender su rol y los desafíos asociados a su gestión, es fundamental distinguir entre los principales tipos de chatarra ferrosa:

- 1. Chatarra doméstica (*home scrap* / *pre-consumo*):** Originada directamente en la acería durante la fabricación del acero (por ejemplo, recortes de laminación, coladas defectuosas, despunte de varilla, etc.), se caracteriza por su alta pureza, composición química conocida y homogénea, dada su calidad y origen interno, suele ser recirculada de forma inmediata dentro de la misma planta, representando un ciclo cerrado casi perfecto con mínimas pérdidas (Hundt & Pothen, 2025).
- 2. Chatarra industrial o rápida (*prompt scrap* / *pre-consumo*):** Generada como subproducto en industrias transformadoras que utilizan acero como insumo (automoción, electrodomésticos, fabricación de maquinaria, etc.), esta chatarra, también conocida como 'pre-consumo', suele ser limpia, de composición relativamente bien definida y retorna al ciclo de reciclaje con rapidez, por su calidad y previsibilidad, es un material muy valorado en el mercado (Hundt & Pothen, 2025).
- 3. Chatarra obsoleta o posconsumo (*obsolete scrap* / *post-consumer scrap*):** Proviene de productos de acero que han llegado al final de su vida útil y son desechados por los consumidores o retirados de servicio (vehículos fuera de uso, electrodomésticos viejos, estructuras metálicas de demolición, envases, etc.), constituye la mayor reserva potencial de chatarra a largo plazo, pero presenta una mayor complejidad, es heterogénea en su composición, a menudo está mezclada con otros materiales (plásticos, caucho, otros metales, hormigón) y puede contener contaminantes (pinturas, aceites, recubrimientos), su correcta valorización exige procesos sofisticados de recogida selectiva, clasificación, trituración y depuración (Hundt & Pothen, 2025).

El rol fundamental de la chatarra en la sostenibilidad de la industria siderúrgica se manifiesta en múltiples dimensiones, en primer lugar, su utilización reduce drásticamente la necesidad de extraer y procesar materias primas vírgenes, como el mineral de hierro, el carbón y la caliza, con esto no solo disminuye la presión sobre los

ecosistemas afectados por la minería (destrucción de hábitats, contaminación del agua, degradación del suelo), sino que también conserva estos recursos finitos para futuras generaciones.

En segundo lugar, la producción de acero a partir de chatarra, principalmente mediante la ruta del Horno de Arco Eléctrico (*EAF-Electric Arc Furnace*), es significativamente menos intensiva en energía que la producción primaria a través de la ruta Alto Horno-Convertidor (*BF-BOF Basic oxygen steelmaking*). Estudios han demostrado ahorros energéticos que pueden oscilar entre el 60% y el 74% (Worrell et al., 2001) y (Kirschen et al., 2011). Esta eficiencia energética se traduce directamente en una menor huella de carbono, si bien la reducción exacta de emisiones de CO₂ depende de factores como la matriz energética utilizada para alimentar el horno eléctrico (*EAF-Electric Arc*) que sea idealmente renovable y la calidad de la chatarra sea óptima, se estima que el proceso de horno eléctrico (*EAF-Electric Arc*) basado en chatarra puede generar hasta un 75% menos de emisiones de CO₂ en comparación con la ruta de alto horno (*BF-BOF Basic oxygen steelmaking*) ((Fischer, 2024; World Steel Association, 2021; Worrell et al., 2001)). Por ello, el fomento del uso de chatarra es una palanca clave en las estrategias de descarbonización del sector (Manthey, 2023).

Finalmente, aunque la siderúrgica semi integrada o (*EAF-Electric Arc*) es la principal consumidora de chatarra donde se puede operar teóricamente con una carga 100% de material reciclado, la chatarra también se utiliza en la siderurgia integrada o altos hornos (*BOF Basic oxygen steelmaking*), aunque en proporciones menores usualmente hasta un 15-30% según la tecnología y la calidad de la chatarra. En este caso, se añade al convertidor principalmente como refrigerante para controlar la temperatura de la reacción exotérmica de descarburación del arrabio y como fuente adicional de hierro (Carvalho et al., 2016), donde si se logra optimizar el uso de chatarra de alta calidad incluso en esta ruta puede contribuir a mejorar la eficiencia y reducir ligeramente las emisiones del proceso tradicional.

2.1.5. Procesos de reciclaje y tecnologías asociadas

El proceso mediante el cual la chatarra ferrosa se transforma nuevamente en acero útil es complejo e involucra una secuencia de etapas tecnológicamente rigurosas, diseñadas para asegurar la calidad y eficiencia del producto final generado con material reciclado, si bien los detalles pueden variar entre las diferentes instalaciones o

acérías, el flujo general típicamente abarca la recolección, una preparación exhaustiva, la fusión controlada y el afino final del metal.

La etapa de preparación de la chatarra es crítica, especialmente para la chatarra de obsolescencia o posconsumo, dada su variedad propia y el objetivo principal de esta etapa es obtener una carga lo más limpia y homogénea posible, de tamaño y densidad adecuados y con una composición química lo más controlada posible. Esto se logra mediante una combinación de conocimiento empírico por parte de los clasificadores y/o tecnologías de clasificación y separación. Los métodos tradicionales, como la inspección visual y la separación magnética que se usan para aislar el material ferroso, se complementan cada vez más con sistemas automatizados y avanzados como lo son sensores basados en Rayos X (XRF) o espectroscopía de Plasma Inducido por Láser (LIBS) que permiten analizar la composición elemental de la chatarra en tiempo real. También se cuenta con las corrientes de Foucault (Eddy Current) que son eficaces para separar metales no ferrosos valiosos como el aluminio o el cobre, además, nuevas tecnologías como la inteligencia artificial y la visión por computador están revolucionando la clasificación, permitiendo identificar y segregar diferentes tipos de chatarra con mayor precisión y velocidad. Una vez clasificada, la chatarra suele someterse a procesos de adecuación física como el cizallado, la fragmentación (*shredding*) o el empaquetado (compactación) para optimizar su manejo y fusión, las empresas líderes invierten continuamente en mejorar estas tecnologías para maximizar la recuperación de valor y asegurar la calidad del material o *input*.

Una vez preparada, la chatarra pasa a la etapa de fusión, donde las dos rutas principales de producción de acero divergen significativamente en su capacidad para utilizarla:

- 1. Horno de arco eléctrico (EAF - *Electric Arc Furnace*):** Esta ruta es característica de las acérías semiintegradas o *mini-mills* (Carvalho et al., 2016), es la tecnología por excelencia para el reciclaje de chatarra. Como ilustra la Figura 1 adaptada del ministerio Español (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2022b), los hornos eléctricos o EAF utilizan potentes electrodos de grafito para generar arcos eléctricos que funden la carga metálica a temperaturas superiores a los 1500°C, donde la carga se compone principalmente de chatarra, logrando teóricamente alcanzar el 100% de material reciclado, aunque en la práctica a menudo se complementa con hierro de reducción directa (DRI - *Direct Reduced Iron*) o arrabio líquido para ajustar la composición y diluir impurezas. El horno eléctrico ofrece flexibilidad en la carga y crucialmente, si se lograra alimentar con electricidad generada a partir de fuentes renovables, presenta un perfil de

emisiones de CO₂ drásticamente inferior al de la ruta convencional (Bonaplata, 2023). La optimización de la eficiencia energética, el diseño de los hornos y el control preciso del proceso son focos constantes de innovación.

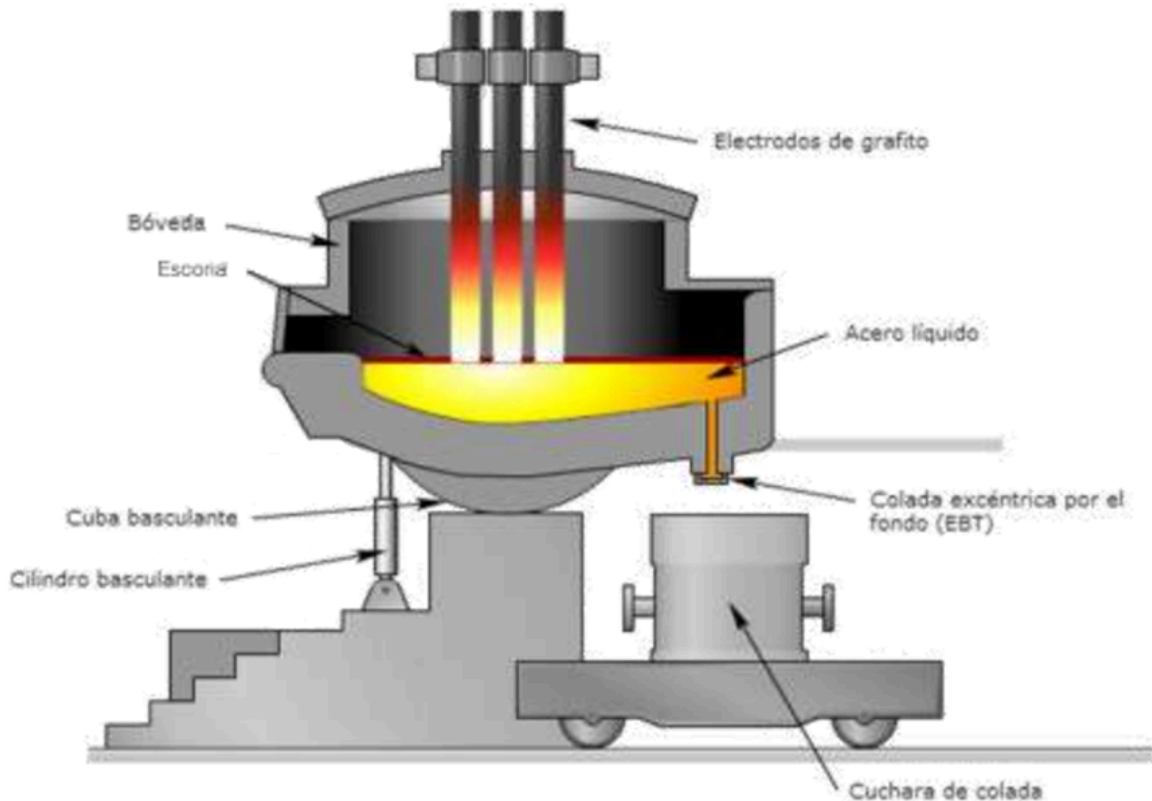


Figura 1. Esquema de un Horno de Arco Eléctrico (EAF). Fuente: Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2022b).

2. Horno Básico de Oxígeno (BF - BOF - Basic Oxygen Furnace) / Convertidor:

Propio de las siderúrgicas integradas, ver Figura 2, adaptada de Ministerio Español (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2022a) el proceso BOF parte fundamentalmente del arrabio líquido producido en un alto horno mediante la reducción de mineral de hierro con coque (Carvalho et al., 2016). En el convertidor, se inyecta oxígeno a alta presión para oxidar el exceso de carbono y otras impurezas del arrabio, en esta ruta, la chatarra juega un papel secundario, añadiéndolo en proporciones limitadas (generalmente 15-30%). Su función principal es actuar como refrigerante para controlar la elevada temperatura generada por la reacción exotérmica de oxidación, aunque también aporta unidades de hierro al baño metálico (Carvalho et al., 2016). Si bien existen desarrollos para intentar aumentar el porcentaje de chatarra admisible en el BOF por ejemplo el precalentamiento, su capacidad intrínseca para el reciclaje masivo es mucho menor que la del EAF.

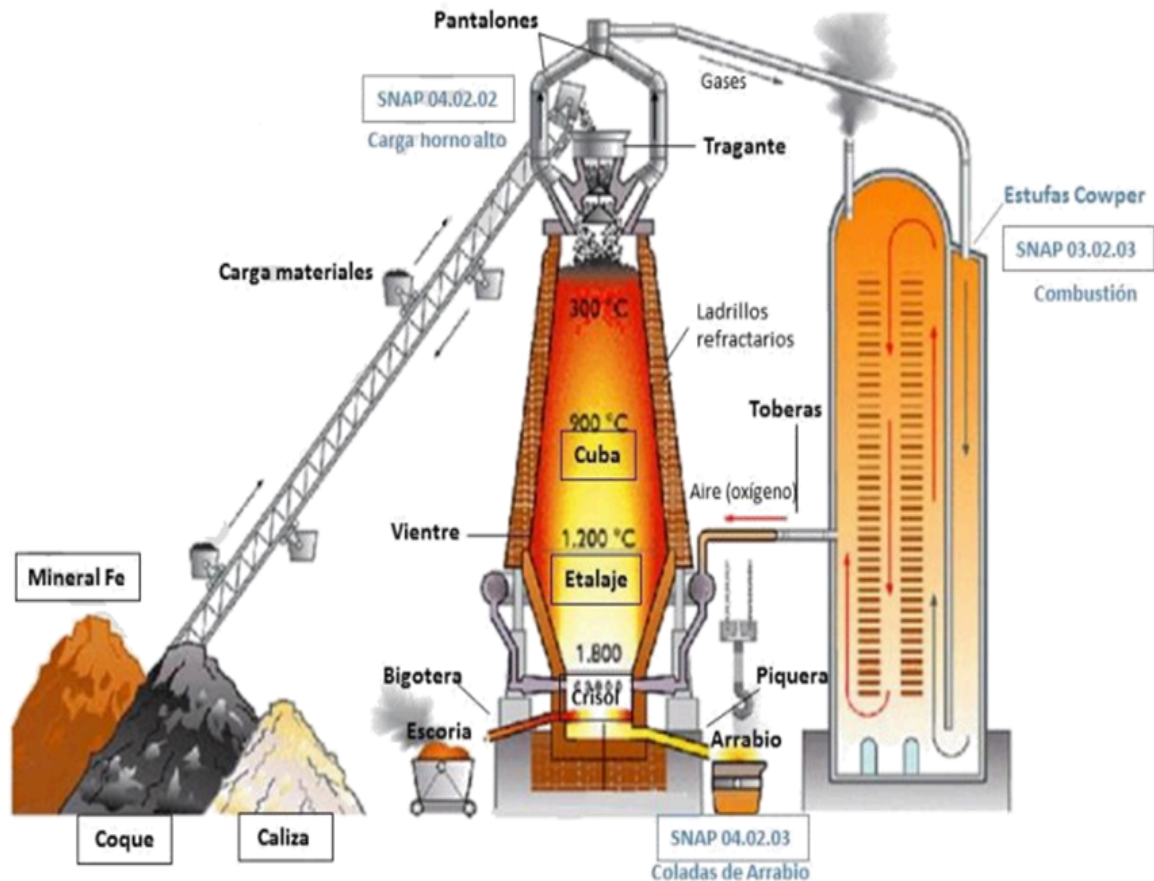


Figura 2. Esquema de un Alto Horno (BF) y Convertidor de Oxígeno (BOF). Fuente: Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2022a).

Finalmente, tras la fusión en EAF o BOF, el acero líquido pasa por una etapa de metalurgia secundaria o afino en cuchara, donde se ajusta su composición química final mediante la adición de ferroaleaciones, se eliminan impurezas residuales (desulfuración, desgasificación) y se controla la temperatura. Tecnologías emergentes, como la electro refinación con electrolitos específicos, buscan ofrecer soluciones para eliminar contaminantes persistentes como el cobre. El proceso concluye con la colada continua, donde el acero líquido se solidifica en productos semielaborados (palanquillas, blooms, planchones) listos para su posterior laminación.

2.1.6. Beneficios ambientales y económicos del reciclaje de chatarra

La intensificación del uso de chatarra ferrosa en la industria siderúrgica, como pilar de la economía circular, genera un abanico de beneficios que abarcan tanto la dimensión

ambiental como la económica, estas ventajas refuerzan la viabilidad y la necesidad de acelerar la transición hacia modelos productivos más circulares en el sector.

Desde la perspectiva ambiental, los beneficios son múltiples y significativos, el más destacado es la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, particularmente CO₂. Como se ha indicado, la producción de acero vía EAF basada en chatarra puede emitir hasta un 75% menos CO₂ por tonelada de acero que la ruta integrada tradicional (BF-BOF), especialmente si la electricidad utilizada proviene de fuentes renovables (Fischer, 2024; World Steel Association, 2021). Esta drástica disminución posiciona al reciclaje de chatarra como una de las estrategias más efectivas para la descarbonización del sector siderúrgico.

A su vez, el reciclaje conlleva un ahorro energético sustancial, ya que fundir acero ya existente requiere mucha menos energía que el complejo proceso químico y térmico de reducir el mineral de hierro para obtener metal primario. Diversos estudios cuantifican este ahorro entre un 60% y un 74%, dependiendo de las tecnologías y las condiciones específicas (Worrell et al., 2001), esta eficiencia energética no solo reduce costos, sino que también alivia la presión sobre los recursos energéticos.

Además, el uso de chatarra implica una menor extracción de recursos naturales no renovables que evita la necesidad de extraer millones de toneladas de mineral de hierro, carbón y caliza cada año, preservando estos recursos geológicos y minimizando los severos impactos ambientales asociados a la actividad minera, tales como la alteración de ecosistemas, la contaminación hídrica y la ocupación del suelo. El reciclaje de acero también contribuye a la reducción de residuos sólidos, disminuyendo la cantidad de material que termina en vertederos y según algunos análisis, puede llevar a una disminución general de otros tipos de contaminación atmosférica y acuática comparado con la producción primaria por ejemplo (Yellishetty et al., 2011).

Desde una perspectiva económica, el uso de chatarra en la industria siderúrgica ofrece ventajas significativas, incluida la reducción de costos de producción debido al menor consumo de energía y materias primas vírgenes. Esto es particularmente beneficioso para la competitividad de las acerías EAF, ya que reduce su exposición a la volatilidad de los precios de productos básicos como el mineral de hierro y el carbón de coque.

Además, el fortalecimiento de la cadena de valor del reciclaje (recolección, clasificación, procesamiento, logística) genera importantes oportunidades de empleo. La necesidad de una gestión eficiente de este recurso impulsa la innovación tecnológica y de procesos, creando nuevas oportunidades de negocio relacionadas

con la valorización de materiales y servicios circulares.

Finalmente, en un mercado cada vez más enfocado en la sostenibilidad, la producción de acero con una huella de carbono reducida y un alto contenido reciclado mejora la imagen corporativa y facilita el acceso a mercados con estrictos criterios ambientales, contribuyendo así a la solidez económica general.

2.1.7. Desafíos y barreras para la optimización del uso de chatarra

A pesar de los claros beneficios y del potencial estratégico de la chatarra ferrosa, su plena integración y optimización dentro de una economía circular en la industria siderúrgica enfrenta una serie de desafíos y barreras significativas. Estos obstáculos abarcan aspectos técnicos, económicos, logísticos, regulatorios y sociales, los cuales han sido objeto de numerosos análisis (Akiama & Spers, 2024).

- 1. Calidad y composición variable de la chatarra:** Este es uno de los desafíos técnicos más críticos, ya que la chatarra especialmente la de origen de posconsumo (obsolescencia), es esencialmente diversa y a menudo contiene contaminantes o elementos residuales indeseados. Elementos como el cobre (Cu), estaño (Sn), cromo (Cr) y níquel (Ni), presentes en aleaciones o como componentes de productos desechados, pueden acumularse en el acero reciclado y afectar negativamente sus propiedades mecánicas y su aptitud para ciertas aplicaciones (Energetics Inc, 2003), además, la presencia de impurezas no metálicas complica el proceso de fusión y afecta la calidad final. La variabilidad en la composición carga a carga dificulta el control preciso del proceso siderúrgico y poder superar esto requiere inversiones significativas en tecnologías avanzadas de clasificación, separación y limpieza, cuya implementación no es universal.
- 2. Disponibilidad y gestión de la cadena de suministro:** Asegurar un suministro constante y suficiente de chatarra de alta calidad es un reto logístico y económico, ya que la recogida eficiente de chatarra posconsumo depende de sistemas de gestión de residuos bien desarrollados, una logística inversa robusta que es compleja y costosa y una creciente competencia global por la chatarra de calidad, intensificada por restricciones a la exportación en algunos países. La falta de infraestructura de reciclaje adecuada en algunas regiones limita aún más la disponibilidad de este recurso.
- 3. Volatilidad del mercado y barreras económicas:** El elevado costo inicial de tecnologías de reciclaje avanzadas y de los hornos de arco eléctrico (EAF)

representa un obstáculo considerable, especialmente para las Pequeñas y Medianas Empresas (PYMES). Además, la volatilidad de los precios en el mercado de la chatarra, que se ve influenciada por diversos factores, crea un ambiente de incertidumbre.

- 4. Limitaciones tecnológicas y necesidad de innovación:** La capacidad de separar eficazmente ciertos contaminantes o de procesar tipos de chatarra muy complejos aún presenta limitaciones. Para crear nuevos métodos de purificación más eficaces y rentables, así como nuevas aleaciones de acero con mayor tolerancia a los residuos, es necesario seguir innovando.
- 5. Barreras regulatorias y políticas:** Con frecuencia, los marcos regulatorios existentes no fomentan de manera plena la economía circular. Es posible que existan regulaciones que favorecen implícitamente el uso de materias primas vírgenes en lugar de materiales reciclados, que no haya suficientes estándares armonizados para la calidad de la chatarra o que falten incentivos claros para el reciclaje. Además, la complejidad de las normativas transfronterizas sobre residuos puede obstaculizar el comercio y el reciclaje internacional.
- 6. Barreras Sociales y Organizacionales:** La percepción de una menor calidad en los productos reciclados y la resistencia de los consumidores a adoptar modelos circulares pueden obstaculizar el progreso. A nivel interno, las empresas pueden encontrar resistencia al cambio, falta de conocimiento o una estrategia clara, y dificultades para coordinar los esfuerzos a lo largo de la cadena de suministro.

Hay que resolver estos problemas variados para aprovechar al máximo la chatarra ferrosa e impulsar una industria del acero que sea realmente sostenible y circular.

2.1.8. El rol de la Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+i)

Frente a los desafíos técnicos, económicos y sistémicos detallados anteriormente, la Investigación, el Desarrollo y la Innovación (I+D+i) emergen como la palanca fundamental para acelerar la transición de la industria siderúrgica hacia una economía circular plena y sostenible. La I+D+i no es solo un complemento, sino el motor que permite superar las barreras existentes, optimizar el uso de recursos como la chatarra ferrosa y desarrollar las tecnologías disruptivas necesarias para la descarbonización profunda del sector. Las empresas líderes reconocen la importancia de la innovación para la sostenibilidad y la eficiencia, aunque la magnitud de la inversión y el enfoque específico de los proyectos varían considerablemente.

Las áreas clave donde la I+D+i está jugando un rol transformador incluyen:

- 1. Mejora de la calidad y procesamiento de la chatarra:** Ante la heterogeneidad y contaminación de la chatarra, la innovación se centra en desarrollar y perfeccionar tecnologías de clasificación y separación avanzadas. Esto incluye la aplicación de sensores más precisos (XRF) rayos x, la espectroscopia de plasma inducido por láser (LIBS-*Laser induced breakdown spectroscopy*), visión artificial combinada con inteligencia artificial (IA) para la identificación automatizada de grados y contaminantes como por ejemplo el proyecto de Voestalpine KiRAMET (Voestalpine AG, 2024a) el cual analizaremos más adelante y métodos de separación física y química más eficientes. Empresas como Radius Recycling invierten en tecnologías específicas como 3PR™-Third Party Recycling (Radius Recycling, 2024) servicios para mejorar la recuperación de metales no ferrosos de los flujos de residuos. Asimismo, se investigan nuevas técnicas de purificación del acero fundido para eliminar elementos residuales problemáticos como el cobre, utilizando métodos como la electro refinación con electrolitos específicos.
- 2. Optimización de procesos productivos:** La I+D+i busca mejorar la eficiencia de las rutas existentes. En la ruta EAF, se trabaja en optimizar el consumo energético, mejorar el diseño de los hornos como por ejemplo Nucor, que desarrolla sistemas de control más precisos y maximizar la carga de chatarra y/o el DRI (*Direct Reduction Iron*). En la ruta BOF, se exploran métodos para aumentar de forma segura y eficiente la proporción de chatarra utilizada, como tecnologías de precalentamiento o soplado modificado como el OTBB (*Oxygen Top and Bottom Blowing*) implementado o investigado por empresas como POSCO. La eficiencia energética general de las plantas y la recuperación de calor residual también son focos importantes de innovación.
- 3. Desarrollo de nuevos productos y diseño para la circularidad:** La innovación abarca la creación de nuevas aleaciones de acero que mantengan altas prestaciones incluso con un mayor contenido de material reciclado. También se enfoca en aceros avanzados de alta resistencia (AHSS) que permiten diseñar productos más ligeros y eficientes. Fundamentalmente, se promueve la investigación en diseño para la circularidad, facilitando el desmontaje, la reparación y la recuperación de componentes al final de la vida útil, las empresas como Gerdau exploran incluso materiales avanzados como el grafeno para mejorar productos.

4. Tecnologías disruptivas para la descarbonización: Quizás el área más crítica de I+D+i es el desarrollo de rutas de producción radicalmente nuevas y enfocadas a bajar las emisiones en carbono, dentro de las que se pueden destacar:

- **Producción basada en Hidrógeno:** Utilización de hidrógeno verde como agente reductor del mineral de hierro (DRI) para alimentar hornos eléctricos. Algunos proyectos que se encontraron incluyen **HYBRIT** el cual busca sustituir el carbón de coque, tradicionalmente necesario para la siderurgia a partir de mineral, por electricidad e hidrógeno sin combustibles fósiles (SSAB, 2025b), **Hlsarna** Este proceso convierte el mineral de hierro directamente en hierro líquido o arrabio (Tata Steel, 2020a), **HyREX** donde se utiliza hidrógeno para convertir el mineral de hierro fino en hierro de reducción directa (POSCO & POSCO HOLDINGS INC, 2024), y los desarrollos de Voestalpine como **HYFOR** que parte de hierro puro reducido con hidrógeno y chatarra, así como su proyecto **SuSteel** tecnología de plasma de hidrógeno (Voestalpine AG, 2024a).
- **Captura, utilización y almacenamiento de carbono (CCUS-Carbón Capture, Use and Storage):** Tecnologías que capturan y que dan un uso al CO₂ de procesos existentes, como el proyecto Steel2Chemicals que lo almacenan de forma segura para transformarlo en nafta sintética, donde ArcelorMittal y Tata Steel son participantes importantes en este ámbito (Institute for Sustainable Process Technology (ISPT), 2023).

5. Digitalización y automatización (Industria 4.0): La aplicación de tecnologías digitales (IoT, Big Data, IA, VR/AR, Blockchain) está transformando la gestión de la producción, el mantenimiento, la trazabilidad de la chatarra y la optimización de la cadena de suministro, algunos ejemplos incluyen plataformas digitales como FerroHaat de Tata Steel para la compra de chatarra (Tata Steel, 2020b).

Es fundamental que las empresas siderúrgicas inviertan de forma sostenida en I+D+i y que se creen políticas públicas que apoyen esta inversión para que prosperen estas innovaciones. Asimismo, es esencial la colaboración entre empresas siderúrgicas, centros de investigación, universidades, gobierno, proveedores de tecnología y otros actores de la cadena de valor para compartir conocimientos, desarrollar soluciones conjuntamente, mitigar los altos costos y riesgos asociados a la innovación disruptiva. También es crucial la creación de marcos regulatorios que incentiven la innovación y la adopción de tecnologías limpias.

2.2. Hipótesis

Con base en la revisión de la literatura anterior, que establece la importancia estratégica de la chatarra ferrosa y la I+D+i para la transición hacia una economía circular en la industria siderúrgica, se formulan las siguientes hipótesis para guiar esta investigación:

H1: La inversión estratégica en Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+i) por parte de las empresas siderúrgicas impulsa significativamente su avance hacia los objetivos de la Economía Circular, mejorando tanto la eficiencia en la gestión y valorización de la chatarra ferrosa como la sostenibilidad general de sus procesos productivos.

H2: Existe una correlación positiva observable entre la inversión reportada en I+D+i y las tasas de utilización de chatarra ferrosa en las empresas siderúrgicas analizadas.

H3: Existe una correlación negativa observable entre la inversión reportada en I+D+i enfocada en descarbonización y la intensidad de emisiones de CO₂ de las empresas siderúrgicas analizadas.

H4: Las empresas siderúrgicas que demuestran una mayor inversión y enfoque en I+D+i específica para tecnologías de clasificación y procesamiento de chatarra presentan una gestión cualitativamente superior de la calidad de esta y de sus contaminantes.

H5: Las limitaciones inherentes a las tecnologías actuales de clasificación y separación de chatarra heterogénea constituyen una barrera persistente que modera el impacto positivo de la inversión general en I+D+i sobre las tasas máximas alcanzables de reciclaje y la calidad del acero final, incluso en las empresas más innovadoras.

3. Metodología y variables principales

Esta investigación tiene como objetivo analizar el papel de la chatarra ferrosa como promotora de la economía circular en el sector siderúrgico, prestando especial atención a la influencia de la investigación, desarrollo e innovación (I+D+i) en las estrategias y resultados de empresas siderúrgicas líderes a nivel mundial. Dada la complejidad y las múltiples dimensiones de este objetivo, que exige tanto la comprensión detallada de estrategias de cada siderúrgica como la descripción de

tendencias observables, se ha optado por una metodología mixta, concretada mediante un diseño de estudio de casos múltiples.

3.1. Enfoque metodológico mixto

Se adoptó una metodología mixta para integrar enfoques cuantitativos y cualitativos, permitiendo una comprensión holística del problema. Esta metodología combina el análisis de datos numéricos con estudios de caso detallados, con el fin de comprender un problema de investigación (Creswell & Creswell, 2018), se considera particularmente adecuada para la investigación, ya que permite, por un lado, examinar la complejidad y los detalles que han tenido las estrategias de cada siderúrgica en la gestión de la chatarra y la I+D+i que sería el aspecto cualitativo y, por otro lado, describir y comparar algunos indicadores clave de desempeño y tendencias entre las siderúrgicas analizadas para la dimensión cuantitativa descriptiva.

El diseño mixto específico empleado en este TFM se alinea con un diseño convergente o de triangulación concurrente, en este diseño, los datos cualitativos y cuantitativos se recolectan y analizan de forma relativamente independiente pero concurrente, para luego ser integrados durante la fase de interpretación con el fin de comparar los resultados y obtener una validación cruzada o una comprensión más completa del fenómeno (Creswell & Creswell, 2018). La finalidad de esta convergencia es aprovechar las fortalezas inherentes a cada tipo de dato para ofrecer una visión más amplia y diversa que la que se obtendría con un solo método.

3.2. Estudio de casos múltiples.

La base de esta investigación es un diseño de estudio de casos múltiples, el estudio de casos es una indagación empírica que investiga un fenómeno contemporáneo en profundidad y dentro de su contexto de la vida real, especialmente cuando los límites entre el fenómeno y el contexto no son claramente evidentes (Yin, 2003). En esta investigación, cada una de las nueve empresas siderúrgicas seleccionadas constituye un caso individual, permitiendo un análisis intensivo de sus particularidades.

Se trata de un estudio de casos múltiples de tipo instrumental colectivo (Stake, 2006), donde el interés principal no está únicamente en la comprensión intrínseca de cada siderúrgica de forma aislada, sino en utilizar el conjunto de casos para obtener una visión más amplia y generalizada analíticamente sobre el papel de la chatarra ferrosa y la I+D+i en la promoción de la economía circular en la industria siderúrgica. La selección de nueve empresas líderes a nivel mundial Tata Steel (India), ArcelorMittal (Luxemburgo), Nucor (EE. UU.), Schnitzer Steel ahora Radius Recycling (EE. UU.),

SSAB (Suecia), POSCO (Corea del Sur), Voestalpine (Austria), HBIS Group (China) y Gerdau (Brasil), se justifica por su relevancia global, su diversidad geográfica cubriendo Europa, América del Norte, América del Sur y Asia, y la tecnológica que usan ya que estas incluyen producciones BOF, EAF y mixtos, y su reconocido papel e iniciativas en sostenibilidad y economía circular, lo que los convierte en casos paradigmáticos e informativos. Como indica Stake (2006), la selección de casos en un estudio de múltiples casos a menudo busca maximizar lo que se puede aprender sobre el *quintain*, considerando la diversidad y relevancia de los casos.

Este enfoque de casos múltiples permite la replicación lógica, no estadística (Yin, 2003), se busca identificar patrones consistentes de replicación literal o diferencias explicables en replicación teórica, en cómo las siderúrgicas abordan la gestión de chatarra y la I+D+i, lo que fortalece la validez externa de las conclusiones. Stake (2006) dedica su obra al análisis de estos casos múltiples, enfatizando la comprensión tanto de cada caso individual como del fenómeno colectivo que los une.

3.3. Estrategias de recolección de información

Acorde con la metodología de estudio de casos y el enfoque mixto, la recopilación de información se ha basado principalmente en un análisis exhaustivo de fuentes secundarias, esta decisión se fundamenta en la extensa cobertura geográfica de los casos estudiados y la disponibilidad pública de gran parte de la información para los objetivos de esta investigación, garantizando así una perspectiva integral, actualizada y verificable de las prácticas, estrategias y resultados de las empresas seleccionadas. Las fuentes de información primordiales consultadas fueron:

Informes corporativos: Se analizaron los informes anuales de sostenibilidad, informes financieros, reportes integrados y memorias anuales más recientes encontrados de las nueve empresas siderúrgicas. Estos documentos han sido cruciales para obtener datos cualitativos sobre sus estrategias de economía circular, modelos de gestión de chatarra, proyectos e inversiones en I+D+i, así como datos cuantitativos sobre inversión en I+D+i (cuando se desglosaban), tasas de uso de chatarra, objetivos de reducción de emisiones y cifras de emisiones de CO₂.

Informes de organismos internacionales: Se consultaron informes y bases de datos de la World Steel Association, la Agencia Internacional de la Energía (IEA), y otros organismos e instituciones de investigación relevantes que proporcionan datos contextuales, estadísticas de producción, análisis de tendencias tecnológicas y perspectivas sobre la sostenibilidad y descarbonización del sector siderúrgico.

Documentación web oficial y comunicados de prensa: Se revisó la información disponible en las secciones de sostenibilidad, inversores y noticias de los sitios web oficiales de las empresas, así como comunicados de prensa específicos relacionados con sus iniciativas de economía circular, gestión de chatarra, avances en I+D+i y proyectos de descarbonización.

Se implementó una triangulación de fuentes, contrastando información de fuentes académicas y corporativas siempre que fue posible. Se dio prioridad a los datos recientes y verificables de fuentes primarias, como informes anuales de sostenibilidad corporativos y publicaciones de organismos reconocidos, como se relaciona en la Tabla 1.

Tipo de información	Fuente
Bases de datos de producción de acero	International Renewable Energy Agency (IRENA), World Steel Association, World Economic Forum, International Energy Agency.
Informes corporativos de sostenibilidad de empresas siderúrgicas	Tata Steel, ArcelorMittal, Nucor, SSAB, POSCO, Voestalpine, HBIS Group, Radius Recycling, y Gerdau.
Estudios e investigaciones sobre la industria siderúrgica	Carvalho et al. 2016, Worrell et al. 2001, Kirschen et al. 2011, Energetics Inc 2003, Fischer 2024, GME Recycling 2023, Hundt et al. 2025, Institute for Sustainable Proc 2023, Ministerio para la Transición 2022, Ministerio para la Transición ... 2022, Wheeler 2024.
Publicaciones y artículos sobre economía circular y reciclaje de chatarra	Akiama et al. 2024, Berlin et al. 2022, Bonaplata 2023, Ellen MacArthur Foundation 2014, Fischer 2024, Manthey 2023, Marcet et al. 2018, Mellon 2024, Prieto-Sandoval et al. 2017, Worrell et al. 2001, Yellishetty et al. 2011.

Tabla 1. Creación propia basada en fuentes consultadas

3.4. Base de datos y metodología de obtención de la información.

El análisis de la información recopilada se articuló en dos vertientes principales, cualitativa y cuantitativa, seguidas de una fase de integración y análisis cross-case:

Análisis Cualitativo: La información cualitativa de informes corporativos, literatura y otras fuentes se sometió a un análisis de contenido temático, en este proceso se identificó patrones, desafíos y tecnologías, tendencias, similitudes y diferencias en las estrategias y prácticas de las empresas estudiadas respecto a la gestión de chatarra y la I+D+i presentada en la sección 4 de esta investigación, buscando comprender el cómo y porqué de las acciones de cada empresa, atendiendo a cada particularidad y contexto de su entorno (Stake, 2006).

Análisis Cuantitativo Descriptivo: Los datos numéricos de inversión en I+D+i, uso de chatarra, emisiones de CO₂, etc., se organizaron y sintetizaron, Esto facilitó comparaciones y la identificación de tendencias generales, considerando con cautela la heterogeneidad inherente a los reportes corporativos, y se presentaron de forma comparativa en texto y tabla 3 resumen en la sección 5.

Integración de Datos y Análisis Cross-Case: Finalmente, los hallazgos cualitativos y cuantitativos se integraron para abordar las hipótesis, El análisis cross-case se centró en identificar temas, similitudes y diferencias entre los nueve casos para formular afirmaciones sobre el *quintain* (Stake, 2006). Se empleó una narración conjunta, donde los datos cuantitativos contextualizaron los cualitativos y viceversa, buscando fortalecer las interpretaciones (Creswell & Creswell, 2018), con inspiración conceptual de las hojas de trabajo propuestas por Stake (2006) para el análisis de múltiples casos mostrado en la Sección 5.

3.5. Variables

Para la realización del análisis del caso de estudio se contemplarán dos variables fundamentales que nos permitirán identificar el impacto de I+D+i en la gestión de residuos en las diferentes siderúrgicas líderes en el mercado, las cuales se relacionan en la Tabla 2.

Variables e indicadores		Enfoque
Cualitativas	Estrategia de I+D+i en la economía circular	Enfoque general de las prioridades tecnológicas, de proceso, de producto, los proyectos específicos y las colaboraciones en investigación, desarrollo e innovación de cada empresa, orientados hacia la economía circular, la gestión de chatarra y la descarbonización.
	Prácticas de Gestión de Chatarra	Detalla las políticas y acciones concretas de cada empresa para la adquisición (fuentes de recolección y estrategias), clasificación (tecnologías usadas y niveles de calidad), procesamiento (métodos físicos o químicos) y utilización de la chatarra ferrosa en sus procesos productivos. Incluyendo también la gestión de residuos y subproductos asociados.
Cuantitativos	Indicador de Inversión en I+D+i:	Monto anual invertido en I+D+i y limitaciones
	Indicador de Uso de Chatarra	Tasa o porcentaje de chatarra utilizada en la producción total de acero o mejor estimación disponible basada en modelo EAF y/o BOF y datos corporativos. Volumen total de chatarra reciclada y procesada anualmente en toneladas métricas, (si está disponible).
	Indicador de Emisiones de CO2	Intensidad de emisiones directas e indirectas de CO2 por tonelada de acero crudo producido (si está disponible). Reducción porcentual de emisiones (absolutas o de intensidad) reportada en un período específico.
Contextuales		País o Región principal de operación. Tamaño de la empresa (producción anual de acero crudo, en millones de toneladas métricas). Mix tecnológico principal (predominio BF-BOF vs. EAF).

Tabla 2. creación propia con las variables a analizar.

3.6. Justificación de la metodología frente a alternativas

La elección de un enfoque metodológico mixto, específicamente un estudio de casos múltiples, se considera la opción más adecuada para este TFM, esta decisión se basa en las limitaciones que presentan otras alternativas.

Un enfoque puramente cuantitativo, aunque útil para identificar correlaciones estadísticas a gran escala, como la relación entre inversión en I+D y reciclaje, se ve obstaculizado por la escasez de datos globales homogéneos y accesibles para todas las variables relevantes, además, un análisis exclusivamente numérico no lograría capturar la complejidad simultánea, las estrategias particulares, ni los factores cualitativos tanto de impulsores como de barreras que influyen en la transición hacia la economía circular de cada empresa, aspectos fundamentales para este estudio (Stake, 2006).

Por otro lado, un enfoque cualitativo, como un estudio de caso único en profundidad o un análisis etnográfico, aunque proporcionaría una comprensión exhaustiva de un contexto específico, restringiría la capacidad de comparar diferentes líderes globales e identificar patrones y tendencias amplias en el sector. El estudio de casos múltiples, en cambio, ofrece un punto medio entre la profundidad contextual de cada caso y la amplitud necesaria para llevar a cabo comparaciones significativas y evaluar las hipótesis en diversos contextos empresariales (Stake, 2006; Yin, 2003).

Finalmente, se descartó la realización de encuestas a gran escala a empresas siderúrgicas debido a las dificultades logísticas para obtener una tasa de respuesta apropiada y datos suficientemente detallados y fiables a nivel internacional, especialmente considerando las limitaciones de recursos y tiempo de un TFM. Asimismo, la complejidad propia a las estrategias de I+D+i y economía circular difícilmente se podría capturar en su totalidad mediante un cuestionario estandarizado.

En conclusión, la combinación del enfoque mixto y el estudio de casos múltiples se presenta como la estrategia metodológica más sólida y practica para alcanzar una comprensión completa y detallada del fenómeno investigado.

3.7. Limitaciones de la investigación

Este estudio se basa en información secundaria, lo que implica limitaciones significativas debido a posibles sesgos y la variabilidad en el nivel de detalle. La heterogeneidad en las metodologías de recolección y procesamiento de datos entre

las siderúrgicas analizadas restringe considerablemente la comparabilidad de los datos cuantitativos. Además, la muestra de solo nueve casos concretos, aunque informativa, carece de la representatividad estadística necesaria para generalizar conclusiones a toda la industria siderúrgica. El análisis cualitativo, valioso para comprender dinámicas y estrategias, están por naturaleza influenciadas por la interpretación subjetiva del investigador, introduciendo variabilidad en los resultados.

A pesar de estas limitaciones metodológicas explícitas, la metodología implementada resultó eficaz para lograr los objetivos primarios de la investigación, el estudio proporcionó una perspectiva inicial valiosa y un acercamiento exploratorio fundamental para comprender la adopción de la economía circular en la industria siderúrgica. Aunque los hallazgos no son definitivos ni universalmente aplicables, establecen una base para futuras investigaciones con mayor profundidad y robustez metodológica.

4. Análisis de casos de estudio

Esta sección proporciona un análisis detallado de las estrategias y prácticas de economía circular, gestión de chatarra ferrosa e I+D+i de las nueve empresas siderúrgicas líderes a nivel mundial seleccionadas. Se utilizará un formato estandarizado para cada caso, con el objetivo de facilitar la comparación y evaluación de las hipótesis propuestas.

4.1. Tata Steel

4.1.1. Contexto y modelo operativo

Tata Steel hace parte del conglomerado indio Tata Group, es una de las mayores empresas siderúrgicas del mundo, con una presencia significativa tanto en India como en Europa, principalmente a través de Tata Steel Europa, anteriormente conocida como Corus (Wheeler, 2024). Su capacidad de producción global la sitúa entre los 10 principales actores del sector reportando cerca de 30 millones de toneladas anuales para los años 2022-2023, según World Steel Association, (2024). Históricamente, el modelo productivo de Tata Steel ha estado dominado por la siderúrgica integral de alto horno (BOF), especialmente en sus grandes centros productivos como Jamshedpur en India y Port Talbot en Reino Unido. Sin embargo, la compañía ha manifestado un compromiso creciente con la sostenibilidad, la reducción de su huella de carbono y la adopción de principios de economía circular, impulsado tanto por la presión regulatoria como por una estrategia corporativa orientada al futuro (Tata Steel Limited, 2023). Esto

se refleja en sus planes de inversión en nuevas tecnologías y en una mayor integración del reciclaje en sus operaciones.

4.1.2. Prácticas y estrategias en la gestión de chatarra ferrosa

La gestión de la chatarra en Tata Steel presenta enfoques diferenciados según la región, pero con una tendencia general hacia una mayor integración y valorización.

Fuentes y adquisición: Tata Steel está adoptando un enfoque estratégico para asegurar el suministro de chatarra, especialmente en India, donde el mercado es más diverso. Han lanzado la plataforma digital FerroHaat para conectar directamente con pequeños depósitos de chatarra y proveedores, buscando formalizar y optimizar la cadena de suministro (Tata Steel, 2020b), la estrategia de compra se enfoca en el costo total de propiedad de lotes de chatarra, más que en el precio de compra inicial, realizando una estrategia de fidelización y atracción de los proveedores más tecnológicos. Colaboran también con otras empresas del Grupo Tata para la adquisición de chatarra a largo plazo, Tata Steel tiene el ambicioso objetivo de construir una capacidad de negocio de reciclaje de acero de 5 millones de toneladas anuales en India para 2030, lo que indica una visión estratégica para integrar verticalmente el suministro de chatarra.

Procesamiento y control de calidad: La compañía opera plantas de procesamiento de chatarra donde se eliminan contaminantes como polvo, pintura, óxido y materiales no metálicos, a su vez utilizan equipos mecanizados como prensas compactadoras, trituradoras y manipuladores de materiales. Para asegurar la calidad y facilitar la comercialización, han desarrollado marcas propias para su chatarra procesada como son Tata FerroBaled® y Tata FerroShred® (Tata Steel, 2021). Además, Tata Steel Europa menciona la selección de materias primas incluida la chatarra basada en criterios ambientales y el uso de evaluación del ciclo de vida (LCA - *Life Cycle Analysis & Reports*) para ayudar a los clientes a diseñar productos más sostenibles (Tata Steel Limited, 2024).

Utilización en procesos: Dado que su base de producción en su mayoría es por altos hornos BOF, el uso actual de chatarra como porcentaje de la carga metálica es relativamente bajo en comparación con los hornos eléctricos EAF, sin embargo, la empresa ha mencionado planes para aumentar la carga de chatarra en los BOF hasta un 15%, aunque, en los últimos años han cambiado su estrategia principal para incrementar el uso de reciclados y esta parece estar más ligada a la expansión de la

producción vía hornos eléctricos EAF, especialmente para productos largos. Un dato relevante es su alta tasa de reciclaje interno de subproductos, reportada en un 98% (Tata Steel Limited, 2024), lo cual es un pilar mencionado dentro de la economía circular. A nivel del grupo, Tata Steel recicló alrededor de 4.3 millones de toneladas de chatarra en el año fiscal 2023-2024, es decir, aproximadamente 1.8 millones de toneladas de chatarra interna y 2.5 millones de toneladas de chatarra externa (Tata Steel Limited, 2024). Sin embargo, para calcular un porcentaje global, se necesitaría conocer la producción total de acero crudo del grupo que para este periodo fueron de 29.94 millones de toneladas (Tata Steel Limited, 2024), lo cual haría que el porcentaje global de reciclaje de chatarra fuera aproximadamente 14.36%.

4.1.3. Enfoque e iniciativas de I+D+i relevantes

Tata Steel ha invertido significativamente en I+D+i, enfocándose en sostenibilidad e innovación. Sus proyectos incluyen la tecnología Hlsarna para reducir emisiones y la plataforma FerroHaat para optimizar la cadena de suministro de chatarra. Estos esfuerzos reflejan su compromiso con la economía circular y la descarbonización.

Inversión y áreas prioritarias: Para el año fiscal 2023-2024, la empresa reportó una inversión en I+D de ₹953 crore (aproximadamente 112 millones de USD)¹, su enfoque principal está en la descarbonización, la sostenibilidad y la digitalización (Tata Steel Limited, 2024). También recibió un reconocimiento por sus esfuerzos digitales, este fue el premio 'Digital Enterprise of India – Steel' 2024 otorgado por el director de TI de Economic Times. Fomentan la colaboración externa, como evidencia el Memorando de Entendimiento (MoU - Memorandum of Understanding) con el Henry Royce Institute del Reino Unido para crear un centro de innovación en materiales avanzados, explorando incluso oportunidades más allá del acero (Tata Steel, 2023).

Innovaciones específicas en chatarra y/o economía circular: La plataforma FerroHaat™ representa una innovación en la gestión de la cadena de suministro de chatarra ferrosa (Tata Steel, 2020b). Sus actividades de investigación y desarrollo se centran en la creación de nuevos productos de acero de alta calidad que incorporen una mayor cantidad de chatarra reciclada, manteniendo los estándares de rendimiento. El objetivo de alcanzar una capacidad de reciclaje de 5 millones de toneladas por año probablemente se basa en la investigación y el desarrollo de procesos de tratamiento y logística avanzados. Además, la integración del Análisis del Ciclo de Vida (ACV) en el diseño de productos y sus más de 300 patentes concedidas

¹Conversión de ₹953 crore realizada utilizando la tasa de cambio de 1 INR = 0,0117511 USD (consultada en XE.com el 26 de mayo de 2025). Se considera 1 crore = 10 millones de rupias.

para el periodo 2023 - 2024 (Tata Steel Limited, 2024) subraya un enfoque innovador hacia la economía circular en la industria siderúrgica.

Innovaciones específicas para la descarbonización: Tata Steel está invirtiendo en tecnologías disruptivas como lo son la **Tecnología HIsarna:** Que es un proceso alternativo de fabricación de hierro en un reactor ciclónico que no requiere sinterización ni coquerías y utiliza directamente mineral de hierro y carbón pulverizados. Afirman que tiene el potencial de reducir las emisiones de CO₂ hasta en un 20% en comparación con la ruta BOF tradicional y está preparado para la integración con tecnologías CCUS (Tata Steel, 2020a) y que se encuentra en fase piloto avanzada. Por otro lado, tenemos la búsqueda en incorporación de Hidrógeno: Donde se investiga activamente el uso de hidrógeno, especialmente hidrógeno verde producido con fuentes renovables, como agente reductor para reemplazar el carbón en la producción de hierro, con el objetivo final de eliminar las emisiones de CO₂ del proceso.

4.1.4. Resultados reportados y desafíos específicos

Resultados Cuantificables: La compañía reporta una alta tasa de reciclaje aproximadamente del 98% por la reutilización de sus propios subproductos industriales (Tata Steel Limited, 2024). La inversión en I+D es significativa con un aproximado de 112 millones de dólares invertidos en el año 2023-2024. El potencial de reducción de CO₂ de HIsarna (20%) es un resultado clave de su I+D, aunque aún no a escala industrial completa. No se ha podido encontrar información pública disponible sobre las emisiones globales de CO₂ o las reducciones que se han logrado.

Desafíos propios: Los desafíos principales de Tata Steel incluyen la transformación de sus activos tradicionales basados en altos hornos BOF a tecnologías bajas en carbono, tanto en India como en Europa. Esta transición requiere inversiones significativas y complejas reconversiones, como lo ejemplifican las negociaciones para la planta de Port Talbot en el Reino Unido. En India, la empresa se enfrenta a la tarea de desarrollar y formalizar un mercado de chatarra actualmente fragmentado. Además, la escalabilidad industrial y la viabilidad económica de tecnologías disruptivas como HIsarna y la producción basada en hidrógeno aún son inciertas. La situación financiera de la empresa, que reportó pérdidas para el período 2023-2024 (Tata Steel Limited, 2024), podría afectar el ritmo de las inversiones necesarias.

4.1.5. Análisis preliminar y vinculación con hipótesis

H1: La inversión en I+D+i impulsa a las empresas siderúrgicas hacia la Economía Circular y mejora la eficiencia de la chatarra: La inversión sustancial de 112 millones de dólares destinada a Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+i), junto con su enfoque estratégico en objetivos de economía circular, como lo demuestra el reciclaje de subproductos y la iniciativa FerroHaat, y en sostenibilidad, evidenciada por proyectos como Hlsarna y el uso del Hidrógeno, respalda firmemente la hipótesis H1. Esta inversión no solo demuestra un compromiso tangible con el avance tecnológico y la innovación, sino que también subraya la importancia crucial de la I+D+i como motor impulsor para el progreso en las áreas de sostenibilidad y economía circular. La I+D+i no se presenta únicamente como un componente deseable, sino como un elemento esencial para alcanzar los objetivos planteados y para fomentar una industria más sostenible y responsable con el medio ambiente.

H2: La inversión en I+D+i aumenta el uso de chatarra ferrosa en la siderurgia: La relación es una visión a futuro ya que actualmente, la tasa de uso de chatarra está limitada por el modelo BOF en la mayor parte de sus plantas, a pesar de la inversión en investigación y desarrollo. Sin embargo, la I+D en hornos de arco eléctrico planificados, el negocio del reciclaje y la tecnología Hlsarna potencialmente adaptable se orientan a facilitar un mayor uso de chatarra en el futuro. El éxito de esta hipótesis depende en gran medida de la inversión continuada en investigación y desarrollo, cuyos resultados futuros y la recopilación de datos precisos y actualizados serán fundamentales para validar y refinar esta propuesta.

H3: Las empresas siderúrgicas que más invierten en I+D+i emiten menos CO2: La inversión en tecnologías innovadoras como Hlsarna, con su potencial de reducción de emisiones del 20%, y la creciente investigación en el uso del hidrógeno en la industria siderúrgica, respaldan firmemente la hipótesis de que la inversión en Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+i) está orientada a disminuir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero en el sector. Si bien es cierto que se requieren datos concretos y específicos sobre las emisiones reales para establecer una correlación definitiva entre la inversión en I+D+i y la reducción de emisiones, la dirección estratégica actual de la industria siderúrgica es evidente.

H4: La inversión en I+D+i mejora la gestión de la calidad y los contaminantes en la chatarra: El desarrollo de FerroHaat, junto con la creación de una planta de procesamiento propia y el desarrollo de marcas específicas para la chatarra

procesada, demuestran un gran esfuerzo por parte de la empresa para innovar y optimizar la cadena de suministro. Si bien estas innovaciones pueden no ser de vanguardia en la tecnología de clasificación de chatarra, representan una aplicación significativa de I+D+i con el objetivo de mejorar la gestión de la calidad y el suministro de chatarra ferrosa. Esto respalda moderadamente la hipótesis planteada.

H5: Las limitaciones tecnológicas actuales restringen el reciclaje de Chatarra:

Tata Steel está invirtiendo en investigación y desarrollo (I+D) con el objetivo de mejorar el uso de la chatarra. Como parte de esta iniciativa, están estudiando cómo optimizar los residuales en la chatarra para producir aceros avanzados y cómo utilizar la Inteligencia Artificial (IA) y el Aprendizaje Automático (AA) para beneficiar el uso de la chatarra. Además, a través del proyecto 'Reclamet' bajo la tecnología Hlsarna, han realizado pruebas para reciclar chatarra de acero recubierta de zinc, lo que indica un esfuerzo por superar las limitaciones en el reciclaje de tipos de chatarra más complejos. A pesar de que la tecnología actual permite un reciclaje significativo de chatarra y Tata Steel está adoptando tecnologías que utilizan más chatarra, existen limitaciones en cuanto a los tipos de acero que se pueden producir únicamente a partir de chatarra y la disponibilidad de chatarra de alta calidad. Para abordar estas limitaciones, la empresa está invirtiendo en I+D y explorando nuevas tecnologías con el fin de mejorar la utilización de la chatarra. El desarrollo de FerroHaat y la inversión en tecnologías como Hlsarna e hidrógeno demuestran que existen barreras tecnológicas, y que la innovación es clave para superarlas. Por lo tanto, la investigación y el desarrollo son esenciales para avanzar en el reciclaje de acero y superar las limitaciones actuales de la industria.

4.2. ArcelorMittal

4.2.1. Contexto y modelo operativo

ArcelorMittal, con sede en Luxemburgo, es un líder mundial en la industria siderúrgica, con operaciones en todo el mundo y una capacidad de producción masiva. En 2024, la empresa reportó una producción de 57.9 millones de toneladas métricas de acero crudo, de las cuales aproximadamente 43.5 millones de toneladas se produjeron mediante el proceso de horno básico de oxígeno (BOF) y aproximadamente 14.4 millones de toneladas mediante el proceso de horno de arco eléctrico (EAF). Además, la producción de mineral de hierro alcanzó los 42.4 millones de toneladas (ArcelorMittal, 2024). Esta diversificación le otorga flexibilidad en el uso de materias primas y energía, así como una mayor capacidad para satisfacer las necesidades de

los clientes.

Históricamente, ArcelorMittal ha dependido en gran medida de la ruta integrada (BOF) debido a su escala y a la naturaleza de sus activos. Sin embargo, la empresa está realizando una transición estratégica hacia la descarbonización y la economía circular, reflejando en su propósito declarado de producir "aceros más inteligentes para las personas y el planeta" utilizando procesos innovadores e iniciativas como su marca XCarb® para productos y procesos de bajas o nulas emisiones de carbono; así como en fuertes inversiones para aumentar su capacidad de producción vía EAF. Es el mayor productor de acero en Europa y uno de los más grandes de América tanto norte como sur, con una presencia cada vez mayor en Asia con foco en China e incluyendo India a través de su empresa conjunta AMNS India, en total tienen operaciones de fabricación de acero en 15 países, incluyendo 36 instalaciones integradas y mini plantas siderúrgicas. También vende sus productos en aproximadamente 129 países (ArcelorMittal, 2024).

La empresa tiene una larga historia, resultado de la fusión en 2007 de Mittal Steel Company N.V. y Arcelor, ambas compañías que crecieron mediante adquisiciones a lo largo de los años. Desde su creación, ArcelorMittal ha experimentado períodos de crecimiento externo, así como de consolidación y reducción de deuda. Reconociendo los desafíos estructurales y macroeconómicos continuos en su sector, la compañía ha adaptado su presencia a las nuevas realidades de la demanda, intensificado sus esfuerzos para controlar los costos y reposicionado sus operaciones con el objetivo de superar a sus competidores. Además, está desarrollando e implementando planes para descarbonizar sus activos de acero y minería de manera competitiva, buscando alcanzar la neutralidad de carbono para 2050.

4.2.2. Prácticas y estrategias en la gestión de chatarra ferrosa

ArcelorMittal busca aumentar la proporción de chatarra utilizada en sus procesos de fabricación de acero como parte de su estrategia de descarbonización.

Fuentes y adquisición: Esta siderúrgica ha reconocido los desafíos en la obtención de chatarra de alta calidad y ha respondido estratégicamente mediante la adquisición de empresas de reciclaje de metales como Riwald Recycling en Países bajos, John Lawrie Metals en Reino unido y activos de ALBA International Recycling en Alemania desde 2022, estas adquisiciones, junto con asociaciones estratégicas como la que tienen con Gestamp automotriz española, aseguran un suministro constante de

chatarra y promueven la integración vertical en parte de su cadena de suministro. Solo en 2022 y 2023, las adquisiciones en el Reino Unido y Europa agregaron una capacidad de procesamiento anual de aproximadamente 1,2 millones de toneladas, abarcando desde chatarra ferrosa y no ferrosa hasta desechos electrónicos y electrodomésticos (ArcelorMittal, 2024).

Procesamiento y control de calidad: Utiliza tecnología avanzada para separar y procesar chatarra, con el objetivo de garantizar la alta pureza del material, para ello, su división de I+D está trabajando para optimizar la recuperación de chatarra de residuos mixtos y mejorar la clasificación de chatarra de baja calidad para permitir su uso en hornos BOF mediante técnicas como la pre-fusión. Aplica modelos avanzados, incluidos modelos de aprendizaje automático basados en datos de múltiples plantas, para la gestión de la chatarra. Estos modelos tienen como objetivo mitigar el impacto de los residuos de la chatarra en la calidad de los productos de alto valor añadido y es complementado al incorporar modelos de monitoreo de densidad para la inspección y control sistemático de las entregas de chatarra, así como la clasificación automática de chatarra en la planta de Dunkerque (ArcelorMittal, 2024).

Utilización en procesos: Utiliza la chatarra como materia prima tanto en sus hornos de arco eléctrico (EAF) como en sus convertidores de oxígeno básico (BOF) y la ruta EAF es la principal vía para el reciclaje intensivo de esta chatarra. La empresa ha aumentado significativamente la proporción de su producción global realizada vía EAF, pasando del 19% en 2018 al 25% en 2024. Además, está invirtiendo en nuevas capacidades de producción con hornos de arco eléctrico en varias ubicaciones, como Gijón y Sestao en España y AMNS Calvert en Estados Unidos (ArcelorMittal, 2024).

La compañía también busca aumentar la proporción de chatarra utilizada en el proceso de fabricación de acero en el alto horno BOF y está investigando el uso de soluciones de aglomeración para permitir un mayor uso de residuos como el polvo y los lodos como alternativas a las materias primas utilizadas actualmente en el alto horno. Se realizaron pruebas a escala de laboratorio en 2023 con resultados validados para cumplir con los requisitos industriales para su valorización en el alto horno y se planteaban pruebas industriales en 2024. Además, ArcelorMittal está explorando la combinación de la ruta de Reducción Directa de Hierro (DRI) con hornos EAF, donde la chatarra puede ser una de las cargas del EAF.

4.2.3. Enfoque e iniciativas de I +D + i relevantes

Cuenta con una robusta estructura global de I+D+i para impulsar su transformación.

Inversión y áreas prioritarias: con una red global de 12 centros de I+D+i y aproximadamente 1.300 investigadores, ha dedicado importantes recursos en el desarrollo y la innovación, invirtiendo más de \$1.000 millones de dólares a nivel mundial en proyectos de descarbonización (hornos de arco eléctrico (EAFs), estudios de ingeniería de reducción directa de hierro (DRI)/EAFs y proyectos piloto de captura, utilización y almacenamiento de carbono (CCUS)) desde 2018 hasta 2023 y solo para I+D invirtió \$299 millones de USD solo en 2023 (ArcelorMittal, 2024).

Sus esfuerzos de I+D+i se centran en gran medida en la creación de procesos innovadores que reduzcan el consumo de energía y las emisiones de carbono, con un fuerte enfoque en la sostenibilidad y la economía circular. Las áreas clave de investigación incluyen la descarbonización a través de tecnologías como Hidrogeno-DRI y Smart carbón, la economía circular mediante el uso de subproductos y residuos, el aumento de las tasas de reciclaje, el desarrollo de productos diferenciados y más sostenibles, la eficiencia de los procesos y la exploración de tecnologías disruptivas como la fabricación de aditivos con subproductos, la inteligencia artificial y la digitalización (ArcelorMittal, 2024).

Además, ha establecido el XCarb® Innovation Fund, con una inversión anual de hasta 100 millones de dólares, para apoyar a empresas innovadoras que desarrollan tecnologías avanzadas para una industria siderúrgica neutra en carbono. El Fondo ha invertido un total de 200 millones de dólares en seis empresas desde 2021, con inversiones adicionales de 11 millones de dólares en 2024 (ArcelorMittal, 2024). La gobernanza de las actividades de I+D+i de la empresa está a cargo del Corporate Research Strategic Panel (CRSP), con paneles adicionales para iniciativas estratégicas como la descarbonización y el sector automotriz, y un panel digital para proyectos de digitalización e IA, realizando vigilancia tecnológica constante.

Innovaciones específicas en chatarra y/o economía circular: Actualmente está investigando activamente modelos de negocio, logística y requisitos tecnológicos para proporcionar servicios circulares sólidos a sectores clave como los fabricantes de equipos originales (OEM - *Original Equipment Manufacturer*) de la industria automotriz. Además, su departamento de I+D está trabajando en soluciones de aglomeración para permitir un mayor uso de los residuos de polvo y lodos como alternativas a las materias primas utilizadas actualmente, reciclando así la mayor parte de estos residuos internamente y con la ayuda de un proyecto financiado por la UE que comenzó en 2020.

También se están implementando modelos avanzados para la gestión de la chatarra, incluidos modelos de aprendizaje automático basados en datos de múltiples plantas, para mitigar el impacto de los residuos de la chatarra en la calidad de diversos productos de alto valor añadido. Se aplican modelos de monitoreo de la densidad de la chatarra para la inspección y el control sistemáticos de las entregas de chatarra, así como la clasificación automática de la misma. A su vez está explorando usos alternativos para sus residuos mineros (*tailings*), buscando aplicaciones innovadoras en industrias como la construcción, con el objetivo de aumentar la circularidad de las operaciones mineras, estas investigaciones se están realizando en colaboración con empresas, universidades y centros tecnológicos para dar una segunda vida a este material, buscando la utilización 100% eficiente de las materias primas (ArcelorMittal, 2024).

Adicionalmente, se está trabajando en la caracterización de los subproductos de las nuevas rutas de producción de acero bajo diferentes condiciones operativas, para prever las calidades calculadas para comparar el uso de escoria y ser reemplazadas por otros materiales. Por ejemplo, Sidercal® es un subproducto de acero a base de escoria utilizado en la construcción de carreteras. ArcelorMittal Tubarão ha logrado un índice de recuperación de residuos del 91.8% en 2023, con un objetivo de cero almacenamiento interno para 2030 y cero vertederos para 2035. El programa "New Paths o nuevos caminos" en Tubarão dona subproductos de escoria procesada (REVSOL® y REVSOL Plus®) para mejorar la movilidad urbana y rural, utilizándolos como revestimiento primario para calles y carreteras (ArcelorMittal, 2020).

Innovaciones específicas para la descarbonización: Está implementando una estrategia integral de descarbonización centrada en dos tecnologías principales: Smart carbón e Innovative-DRI. Smart carbón aprovechando las energías limpias en la fabricación de hierro dentro del entorno de reducción de alta temperatura, con tecnologías como Torero (conversión de residuos de madera en biocarbón), IGAR (producción de gas sintético a partir de CO₂ residual e hidrógeno), Carbalyst® (conversión de gases residuales en bioetanol) y la captura y almacenamiento de carbono (CCS). Y por su parte, Innovative-DRI utiliza la reducción directa de hierro (DRI) y hornos de arco eléctrico (EAF), con una transición gradual hacia el hidrógeno verde. Se están construyendo y ampliando instalaciones EAF en Gijón y Sestao (España), y en Calvert (EE. UU.). ArcelorMittal y John Cockerill planean construir la primera planta a escala industrial de electrólisis de hierro a baja temperatura (Voltearon™) para 2027 (ArcelorMittal, 2020).

Además, está invirtiendo en energías renovables (proyectos eólicos y solares) para un

suministro de energía limpia asequible; captura de carbono, con pruebas piloto utilizando gases reales de alto horno; tecnologías de descarbonización para las operaciones de acabado, como quemadores de hidrógeno, calentamiento por inducción y calentamiento por resistencia eléctrica; el desarrollo de acero **Hymatch®** para gasoductos de hidrógeno; modelos avanzados para optimizar la eficiencia energética de los hornos de recalentamiento; colaboraciones con empresas como SEKISUI CHEMICAL para capturar y reutilizar el CO₂ y el **Fondo de innovación XCarb** para invertir en empresas como Boston Metal y Utility Global, que desarrollan tecnologías de descarbonización para la producción de acero (ArcelorMittal, 2024). La marca XCarb® agrupa todas las actividades y productos de bajas y nulas emisiones.

4.2.4. Resultados reportados y desafíos específicos

Resultados Cuantificables: ArcelorMittal reporta una reducción de sus emisiones absolutas de CO₂ de aproximadamente 86 millones de toneladas, es decir, un 46% desde 2018, coincidiendo con el aumento de la producción EAF del 19% al 25% y las inversiones en descarbonización (ArcelorMittal, 2024). Las ventas de acero bajo la marca XCarb® alcanzaron unas 0.4 millones de toneladas en 2024. La producción total de acero en 2024 fue de 57.9 millones de toneladas métricas (ArcelorMittal, 2024). Han completado adquisiciones estratégicas de recicladoras y el programa "New Paths" en Brasil donó un récord anual de 1.2 millones de toneladas de subproductos para mejorar caminos y carreteras.

Desafíos propios: Los desafíos principales incluyen la reconversión de la extensa red global de altos hornos (BOF), lo cual requiere inversiones significativas y presenta complejidades considerables. También es esencial garantizar un suministro constante de chatarra de alta calidad para abastecer la creciente flota de EAFs en un mercado competitivo. Además, persisten dudas importantes sobre la viabilidad económica a gran escala y la infraestructura necesaria para tecnologías como el hidrógeno verde y el CCUS. La gestión e integración eficiente de las empresas de reciclaje adquiridas plantea otro desafío operativo. Por último, la coordinación global de la I+D y las inversiones resulta compleja debido a su escala.

4.2.5. Análisis preliminar y vinculación con hipótesis

H1: La inversión en I+D+i impulsa a las empresas siderúrgicas hacia la Economía Circular y mejora la eficiencia de la chatarra: La significativa inversión en descarbonización, la extensa red de I+D, las adquisiciones de recicladoras y el desarrollo de XCarb demuestran un claro impulso de la I+D+i hacia objetivos de la economía circular, incluyendo la gestión de chatarra y la sostenibilidad, lo que demuestra un fuerte apoyo a la hipótesis 1.

H2: La inversión en I+D+i aumenta el uso de chatarra ferrosa en la siderurgia: El aumento de la producción a través del horno de arco eléctrico (hasta el 25%) y las adquisiciones en el sector del reciclaje, junto con las inversiones en investigación y desarrollo, indican una correlación positiva. Esto proporciona un fuerte apoyo direccional a la hipótesis 2.

H3: Las empresas siderúrgicas que más invierten en I+D+i emiten menos CO2: La considerable disminución del 46% en las emisiones desde 2018, junto con la inversión en descarbonización y el desarrollo de XCarb®, respalda la hipótesis de una fuerte correlación negativa a la hipótesis 3.

H4: La inversión en I+D+i mejora la gestión de la calidad y los contaminantes en la chatarra: La aplicación directa de I+D+i a la gestión de la calidad de la chatarra se demuestra mediante los esfuerzos de I+D en recuperación y clasificación; la adquisición de tecnología avanzada a través de la compra de la empresa de reciclaje Riwald y el trabajo para utilizar chatarra de baja calidad en BOF. Esto respalda la hipótesis 4.

H5: Las limitaciones tecnológicas actuales restringen el reciclaje de Chatarra: Las barreras tecnológicas en el procesamiento de chatarra heterogénea impulsan la búsqueda de soluciones alternativas. Esto se evidencia en la necesidad de invertir en investigación y desarrollo para el uso de chatarra de baja calidad en hornos básicos de oxígeno (BOF) y la inversión significativa en hornos de arco eléctrico (EAF). Apoyando así la hipótesis 5.

4.3. Nucor

4.3.1. Contexto y modelo operativo

Nucor Corporation es el mayor productor de acero de Estados Unidos y uno de los mayores recicladores de Norteamérica, su modelo de negocio se diferencia notablemente de los productores integrados tradicionales, ya que se basa casi exclusivamente en la tecnología de horno de arco eléctrico EAF. Esta elección tecnológica, pionera en su adopción a gran escala por Nucor, la posiciona intrínsecamente dentro de un marco de economía circular, dado que los EAF utilizan la chatarra ferrosa como principal materia prima. La compañía opera una extensa red de plantas siderúrgicas principalmente *mini-mills* o pequeños hornos eléctricos y de procesamiento de materias primas en EE. UU. y Canadá. Se ha destacado consistentemente por su menor huella de carbono, derivada de su modelo EAF y alto uso de reciclados, como una ventaja competitiva en un mercado cada vez más enfocado en la sostenibilidad (Nucor, 2025b). La producción de Nucor en 2023 alcanzó los 21.2 millones de toneladas métricas (World Steel Association, 2024).

4.3.2. Prácticas y estrategias en la gestión de chatarra ferrosa

La adquisición y gestión de chatarra es un proceso fundamental para Nucor, ya que debe garantizar el suministro continuo de materia prima para sus hornos eléctricos.

Fuentes y adquisición: Opera una de las redes de adquisición y procesamiento de chatarra más grandes y sofisticadas de Norteamérica a través de su subsidiaria The David J. Joseph Company (DJJ) (Nucor, 2025a). DJJ funciona como un bróker líder y opera alrededor de 70 centros de reciclaje de servicio completo, proporcionando a Nucor un acceso directo y un control significativo sobre un gran volumen de chatarra ferrosa y no ferrosa (Nucor, 2025a). En 2022, Nucor y DJJ utilizaron aproximadamente 25.4 millones de toneladas netas de chatarra. La empresa ha implementado programas de venta directa para chatarra industrial y acuerdos de reciclaje de circuito cerrado con clientes clave, como Johnson Controls, para chatarra prima de alta pureza, además de las operaciones de DJJ. También ha adquirido estratégicamente otras empresas de chatarra para consolidar su suministro. Este modelo de integración vertical en el suministro de chatarra a través de DJJ es una ventaja competitiva clave para Nucor (Nucor, 2025b).

Procesamiento y control de calidad: Las instalaciones de DJJ realizan un procesamiento exhaustivo de la chatarra, incluyendo trituración, cizallamiento y prensado. Nucor establece requisitos específicos de limpieza para la chatarra entrante, exigiendo la eliminación de contaminantes como filtros de aceite, plásticos, líquidos y componentes de plomo. A través de DJJ, ofrecen sistemas de transacción avanzados como ScrapConnect™ que proporciona informes detallados para la recepción de material y datos en tiempo real a los proveedores, mejorando la transparencia y eficiencia (The David J. Joseph Company, 2025). Su marca Econiq™ para acero con cero emisiones netas de carbono logrado mediante el uso de renovables y compensaciones, subraya su enfoque en la calidad y sostenibilidad desde la materia prima (Nucor, 2025b).

Utilización en procesos: Nucor utiliza exclusivamente EAFs para la producción de acero, la chatarra ferrosa es la principal materia prima, alcanzando tasas de contenido reciclado muy elevadas en sus productos finales, consistentemente reportadas por encima del 70% y a menudo superiores al 80% en promedio, dependiendo del producto (Nucor, 2025b). Para complementar la chatarra y gestionar la calidad del acero, Nucor también invierte significativamente en la producción de Hierro de Reducción Directa (DRI) en plantas propias (Luisiana y Trinidad), que sirve como sustituto de alta calidad y bajo residuo para la chatarra en los EAF (Nucor, 2025b).

4.3.3. Enfoque e iniciativas de I +D + i relevantes

Aunque los documentos consultados no especifican una cifra global de inversión anual en I+D+i para Nucor, su enfoque en la optimización continua de sus operaciones EAF y la gestión de materias primas sugiere una actividad innovadora constante integrada en sus operaciones.

Inversión y áreas prioritarias: En 2024, Nucor invirtió aproximadamente 594 millones de USD en proyectos de crecimiento, de esta cantidad, 565 millones de USD se utilizaron en la adquisición de Rytec buscando oportunidades de venta cruzada en 2024, incluyendo costos preoperativos y de puesta en marcha (Nucor, 2025b). Si bien esto no se clasifica estrictamente como I+D+i, demuestra su compromiso con la innovación a través de la inversión en nuevas tecnologías y capacidades. La estrategia de Nucor se centra en la diversificación de productos, la expansión del mercado y la optimización de los costos de las materias primas.

Innovaciones específicas en chatarra y/o economía circular: Su innovación principal radica en la optimización constante del modelo de horno de arco eléctrico (EAF) basado en el reciclaje, donde fueron pioneros, donde esto abarca la

modernización continua de las instalaciones y la adopción de tecnologías EAF de vanguardia. La integración y eficiencia de David J. Joseph (DJJ) y sus sistemas (ScrapConnect™) también forman parte de su innovación en la cadena de valor del reciclaje, su inversión estratégica en Hierro de Reducción Directa (DRI) es una innovación clave para garantizar insumos de alta calidad y complementar la chatarra generando productos de alta (Nucor, 2025a).

Innovaciones específicas para la descarbonización: Está invirtiendo en energías renovables y tecnologías emergentes para reducir sus emisiones de carbono, incluyendo la colaboración con Electra donde está trabajando en el desarrollo y escalado de un proceso para producir hierro sin carbono que puede usarse para fabricar acero, utilizando energía intermitente y limpia para refinar minerales de hierro de bajo grado a baja temperatura. Esta tecnología elimina impurezas críticas y produce hierro de alta pureza, aunque actualmente no está probada a escala, y la producción de acero con cero emisiones netas bajo su producto Econiq™ (Nucor, 2025b).

La empresa también está explorando la energía nuclear de próxima generación, acuerdos de compra de energía solar y eólica donde es parte de dos (PPAs- *Power Purchase Agreements*) para comprar producción a precio fijo de un proyecto solar y uno eólico en Estados Unidos, lo que apoya la transición de la red eléctrica estadounidense a una mayor dependencia de la energía renovable y permite a Nucor recibir créditos de energía renovable (RECs) para aplicar contra una parte de sus emisiones de GEI. A su vez trabajan en la captura y secuestro de carbono con ExxonMobil, y la fabricación de hierro con emisiones casi nulas a través de inversiones conjuntas con Electra y Tata Steel.

Aunque Nucor informa sobre su intensidad de carbono, no ha formalizado metas de reducción basadas en la ciencia tan explícitamente como otros actores. Sus iniciativas buscan reducir las emisiones de GEI - Gases de Efecto Invernadero asociadas al consumo de energía eléctrica, que representan aproximadamente el 32% de su huella actual con su programa Net-Zero para 2050 (Nucor, 2025b).

4.3.4. Resultados reportados y desafíos específicos

Resultados Cuantificables: Nucor mantiene altas tasas de utilización de sus acerías 76% promedio en 2024 (Nucor, 2025c). Reportan altos porcentajes de contenido reciclado en sus productos mayor a un 80% promedio (Nucor, 2025b). Han logrado

una posición de liderazgo en el mercado estadounidense con un modelo de bajo costo y alta eficiencia, significativamente menor que el promedio BOF. Reportaron un beneficio neto de 2.03 mil millones de dólares en 2024, aunque inferior a 2023 (Nucor, 2025b).

Desafíos propios: El mayor desafío al que se enfrenta Nucor es que depende en gran medida de la disponibilidad y los precios variables de la chatarra ferrosa, a pesar de que DJJ y el uso de DRI mitigan este riesgo. Para mantener su ventaja competitiva, Nucor debe invertir continuamente en la modernización y eficiencia de sus plantas EAF, así como en asegurar materias primas alternativas de alta calidad (Nucor, 2025b). La integración de nuevas adquisiciones y la gestión de grandes proyectos de expansión también pueden presentar riesgos operativos para Nucor.

4.3.5. Análisis preliminar y vinculación con hipótesis

H1: La inversión en I+D+i impulsa a las empresas siderúrgicas hacia la Economía Circular y mejora la eficiencia de la chatarra: El éxito de Nucor con el modelo de circularidad de la chatarra parece estar estrechamente relacionado con su enfoque innovador en I+D+i, así como con las mejoras continuas en el modelo horno eléctrico EAF, su asociación con DJJ, la integración de DRI y la eficiencia operativa. Esto respalda la hipótesis H1.

H2: La inversión en I+D+i aumenta el uso de chatarra ferrosa en la siderurgia: La empresa Nucor utiliza una tasa de chatarra superior al 80%, una de las más altas del sector. Esta capacidad de mantener altas tasas de uso de chatarra se debe a su liderazgo tecnológico en EAF y a la continua optimización a través de I+D+i, respaldando la hipótesis H2.

H3: Las empresas siderúrgicas que más invierten en I+D+i emiten menos CO2: Su modelo de horno de arco eléctrico (EAF) produce una intensidad de CO2 considerablemente más baja que el promedio de los altos hornos con oxígeno básico (BF-BOF). La búsqueda continua de innovación a través de la eficiencia, el hierro de reducción directa (DRI), las energías renovables y el acero Econiq tiene como objetivo mantener y mejorar aún más esta ventaja, lo que reafirma la hipótesis H3.

H4: La inversión en I+D+i mejora la gestión de la calidad y los contaminantes en la chatarra: La integración vertical con DJJ, los sistemas como ScrapConnect, los requisitos de limpieza y la inversión estratégica en DRI indican una gestión muy

avanzada y controlada de la calidad de las materias primas, fruto de innovación en procesos y logística apoyando la hipótesis H4.

H5: Las limitaciones tecnológicas actuales restringen el reciclaje de Chatarra: La importante inversión de Nucor en DRI para complementar la chatarra indica que incluso el líder en reciclaje tiene dificultades para garantizar la calidad y cantidad deseadas de chatarra de forma constante. Esto confirma la hipótesis H5, que sugiere que se buscan materias primas alternativas para abordar las limitaciones del uso de chatarra.

4.4. Schnitzer Steel ahora (Radius Recycling)

4.4.1. Contexto y modelo operativo

Radius Recycling, Inc., operando bajo este nuevo nombre desde 2023 tras décadas como Schnitzer Steel Industries, Inc., es una figura prominente en la industria norteamericana del reciclaje de metales, con un modelo de negocio que se distingue por una fuerte integración vertical, donde su actividad principal es la recolección, procesamiento y comercialización incluida exportación de chatarra ferrosa y no ferrosa. Una parte de esta chatarra ferrosa alimenta directamente su propia acería, Cascade Steel Rolling Mills, que opera con tecnología EAF (Radius Recycling, 2024). Esta estructura, que abarca desde la obtención de la materia prima reciclada hasta la fabricación de productos de acero acabados principalmente barras de refuerzo y alambión, se alinea esencialmente con los principios de la economía circular.

La empresa gestiona una vasta red que incluye decenas de instalaciones de reciclaje y la popular cadena de desguaces y venta de piezas de automóvil Pick-n-Pull. Su estrategia declarada se enfoca en la sostenibilidad, la innovación tecnológica para maximizar la recuperación de valor y la producción eficiente de acero bajo en carbono (Radius Recycling, 2025).

4.4.2. Prácticas y estrategias en la gestión de chatarra ferrosa

Siendo el reciclaje su negocio central, la gestión de chatarra es sofisticada y estratégica.

Fuentes y adquisición: Radius Recycling: un importante exportador de metales reciclados en Norteamérica, opera una red de tiendas Pick-n-Pull e instalaciones de reciclaje, donde recolectan chatarra de vehículos, electrodomésticos y residuos

industriales, procesando 4.9 millones de toneladas métricas de metales en el año fiscal 2024 (Radius Recycling, 2024). Su modelo depende del suministro de materias primas, incluyendo vehículos al final de su vida útil y ofrecen servicios integrales de reciclaje de terceros denominado (3PR™). Los volúmenes de ventas de ferrosos aumentaron en el año fiscal 2025, aunque con condiciones de suministro ajustadas (Radius Recycling, 2025). Las exportaciones representan una gran parte de sus ventas de ferrosos, con Bangladesh, Turquía e India como principales destinos, para el 2024 alcanzaron un 85% de ventas de la siderúrgica (Radius Recycling, 2025).

Procesamiento y control de calidad: la empresa destaca por su inversión continua en tecnologías avanzadas de recuperación y clasificación para maximizar el valor extraído de los flujos de residuos, donde utilizan sistemas complejos que integran separación magnética, separación por corrientes de Foucault (corrientes eddy), clasificación por densidad, análisis por fluorescencia de rayos X (XRF), sensores ópticos y potencialmente otras tecnologías basadas en IA y sensores infrarrojos IR para segregar eficientemente los metales ferrosos, no ferrosos como cobre, aluminio, etc. y otros materiales (Radius Recycling, 2025).

Su iniciativa estratégica (3PR™ *Promoting Preservation of Resources*) se enfoca específicamente en maximizar la recuperación de metales no ferrosos de alto valor de los flujos de residuos de fragmentación (ASR - *Automotive Shredder Residue*), utilizando tecnologías avanzadas de sensores y clasificación, con el objetivo de incrementar el valor recuperado en más de un 10% (Radius Recycling, 2024). Aplican políticas rigurosas de aceptación de chatarra, prohibiendo materiales peligrosos y exigiendo la eliminación de contaminantes comunes. Sus instalaciones, como la terminal de Oakland, cuentan con sistemas avanzados de gestión ambiental, como el tratamiento de aguas pluviales (Radius Recycling, 2024).

Utilización en procesos: La acería de arco eléctrico (EAF) de Cascade Steel, que funciona con chatarra ferrosa preparada, tiene una capacidad de producción anual de casi 1 millón de toneladas. La empresa produce acero con un contenido reciclado extremadamente alto, superior al 95%, debido a su proceso de producción EAF, basado en chatarra de alta calidad controlada internamente (Radius Recycling, 2024). En el año fiscal 2024, Cascade Steel vendió 509 mil toneladas de productos de acero terminados, comercializados como de bajas emisiones de carbono (Radius Recycling, 2025).

4.4.3. Enfoque e iniciativas de I + D + i relevantes

La innovación tecnológica es clave para la competitividad y sostenibilidad de Radius Recycling.

Inversión y áreas prioritarias: Radius Recycling invirtió más de 300 millones de USD desde 2019 en mejoras, incluyendo 80 millones de USD en equipos de bajo consumo, 59 millones de USD en proyectos relacionados con el agua y 135 millones de USD en tecnología avanzada de recuperación de metales (AMRTS) para aumentar la recuperación de metales no ferrosos (Radius Recycling, 2024, 2025). Los gastos de capital totales fueron de 76 millones de USD en el año fiscal 2024 y se proyectan 60 millones de USD para el año fiscal 2025, incluyendo inversiones en nuevas tecnologías de procesamiento de metales no ferrosos (Radius Recycling, 2024, 2025). Las prioridades claras son: mejorar la eficiencia y precisión de la clasificación y separación de metales (especialmente los no ferrosos y los flujos complejos como AMRTS), optimizar el consumo de energía y agua en sus operaciones, desarrollar soluciones de reciclaje de valor añadido para sus clientes (3PR™) y asegurar la producción eficiente y sostenible de acero en Cascade Steel (Radius Recycling, 2024).

Innovaciones específicas en chatarra y/o economía circular: La tecnología 3PR™ es su innovación más destacada recientemente, aplicando sistemas avanzados de sensores para extraer más valor de los residuos de fragmentación (Radius Recycling, 2024). El desarrollo continuo y la implementación de los sistemas en tecnología avanzada de recuperación de metales AMRTS son una innovación clave que permite extraer más valor de la chatarra, especialmente en lo que se refiere a la recuperación de metales no ferrosos de las actividades de trituración. Esto incluye tecnologías como la separación magnética y por densidad, la fluorescencia de rayos X y las tecnologías de dimensionamiento, algoritmos de clasificación y tecnologías de sensores es un proceso constante de I+D aplicada (Radius Recycling, 2024). Además, su enfoque innovador incluye el desarrollo de plataformas digitales para interactuar con proveedores y clientes. Buscan atraer talento a la industria del reciclaje a través de Radius Academy, ofreciendo recursos educativos y capacitación práctica. Esto puede considerarse una innovación en el desarrollo de capital humano para el sector de la economía circular.

Innovaciones específicas para la descarbonización: Su contribución principal es la operación de un modelo EAF con bajas emisiones de carbono. La investigación y el desarrollo se centran en optimizar la eficiencia energética y el uso de recursos en

todas sus operaciones, incluyendo el reciclaje y la fabricación de acero (Radius Recycling, 2024).

También se dedican a la gestión responsable del fin de vida de los vehículos eléctricos, un flujo de residuos emergente y complejo. La comercialización de acero bajo en carbono implica I+D en la medición y verificación de su huella ambiental. Buscan continuamente reducir las emisiones de Scope 1 y 2 en sus operaciones de reciclaje, logrando una reducción del 30% en el año fiscal 2024 en comparación con la línea base de 2019 (Radius Recycling, 2024). Se han invertido más de 70 millones de USD desde 2019 para avanzar en sus objetivos de reducción de emisiones. Se está aumentando el uso de combustibles alternativos en su flota y equipos, incluyendo el uso de más de 680 mil galones de diésel renovable en el año fiscal 2024 (Radius Recycling, 2024).

Exploran activamente la electrificación de sus equipos y vehículos para mejorar la calidad del aire local y minimizar su impacto ambiental y la compra de electricidad neta 100% libre de carbono para sus operaciones de reciclaje, donde el 91% provino de energía verde de la red y el 9% se compensó con la compra de energías renovables (Radius Recycling, 2024). Están explorando capacidades de producción de acero "bajo en carbono" o "libre de carbono" y aplicaciones avanzadas de captura y almacenamiento de carbono para su planta siderúrgica (Radius Recycling, 2024).

4.4.4. Resultados reportados y desafíos específicos

Resultados Cuantificables: La empresa procesó 4.9 millones de toneladas métricas de metales en el año fiscal 2024 y vendió 509 mil toneladas de acero bajo en carbono (Radius Recycling, 2024, 2025), manteniendo una posición de liderazgo en el reciclaje norteamericano y global. El contenido reciclado de su acero supera el 95%, sin embargo, la compañía enfrentó dificultades económicas significativas, reportando una pérdida neta de aproximadamente 266.224 millones de USD en el año fiscal 2024, debido a la menor oferta y precios de venta, y altos niveles de exportaciones de acero chino que deprimieron la demanda y los precios del metal ferroso reciclado a nivel mundial (Radius Recycling, 2025).

En el año fiscal 2024, de las 4.9 millones de toneladas métricas de volumen de ventas de metales ferrosos y no ferrosos de Radius ayudaron a evitar aproximadamente 5.5 millones de toneladas métricas de emisiones de CO₂e. El uso de 1 tonelada de metales reciclados en lugar de material virgen resulta en hasta un 58% menos de

emisiones de CO₂e para el acero, 65% menos para el cobre y 92% menos para el aluminio(Radius Recycling, 2025).

Desafíos propios: La extrema volatilidad de los precios de la chatarra tanto ferrosa como no ferrosa y de los mercados del acero impacta directamente su rentabilidad, siendo un factor clave en las pérdidas del año 2024 (Radius Recycling, 2025). La competencia intensa en el sector del reciclaje exige eficiencia constante y resalta la necesidad de inversiones continuas en tecnología de punta para mantener la ventaja competitiva representa un desafío financiero, especialmente en períodos de baja rentabilidad. La gestión ambiental y la conformidad regulatoria en su extensa red de operaciones son también desafíos constantes, donde equilibrar las fluctuaciones entre el negocio principal de reciclaje, exportación de este y las operaciones de fabricación de acero puede ser complejo.

4.4.5. Análisis preliminar y vinculación con hipótesis

H1: La inversión en I+D+i impulsa a las empresas siderúrgicas hacia la Economía Circular y mejora la eficiencia de la chatarra: La I+D+i de Radius Recycling está claramente enfocada en mejorar la eficiencia del reciclaje su core business circular, con desarrollos como 3PR™. Lo que apoya a la hipótesis H1.

H2: La inversión en I+D+i aumenta el uso de chatarra ferrosa en la siderurgia: Su elevado índice de utilización de chatarra, superior al 95%, es resultado directo de su modelo EAF y de su capacidad tecnológica para procesar chatarra de manera eficiente, una capacidad que se mantiene y mejora gracias a la inversión en investigación y desarrollo. Fuerte apoyo a la hipótesis H2.

H3: Las empresas siderúrgicas que más invierten en I+D+i emiten menos CO₂: Su modelo EAF de bajo contenido de carbono, combinado con la optimización de procesos a través de I+D+i, da como resultado un acero con bajas emisiones de carbono. La empresa muestra un fuerte apoyo hacia la hipótesis H3.

H4: La inversión en I+D+i mejora la gestión de la calidad y los contaminantes en la chatarra: La fuerte inversión en tecnologías avanzadas de clasificación y separación, como XRF, sensores y 3PR™, muestra un compromiso con la innovación y la investigación, lo que resulta en una gestión de calidad superior. Además, evidencia un fuerte apoyo a la hipótesis H4.

H5: Las limitaciones tecnológicas actuales restringen el reciclaje de Chatarra: El desarrollo continuo de tecnologías como 3PR™ para extraer *más* valor de flujos

complejos, indica que las limitaciones tecnológicas para una recuperación o limpieza perfecta y económica siguen existiendo y motivan la I+D+i, incluso para un líder del sector. Apoya la hipótesis H5.

4.5. SSAB

4.5.1. Contexto y modelo operativo

SSAB (Svenskt Stål AB) es una empresa siderúrgica con sede en Suecia, con importantes operaciones de producción en los países nórdicos (Suecia, Finlandia) y en Estados Unidos (SSAB Américas). Se ha posicionado estratégicamente como un líder global en la transición hacia la producción de acero libre de combustibles fósiles, un compromiso que define su identidad corporativa y su dirección futura (SSAB, 2025c). Su modelo operativo actual es mixto, mantiene operaciones basadas en altos hornos (BOF) en sus plantas nórdicas (Luleå, Raabe, Oxelösund), mientras que sus plantas en EE.UU. (Montpellier, Mobile) operan con hornos de arco eléctrico (EAF) utilizando un alto porcentaje de chatarra (SSAB, 2025c), sin embargo, SSAB está inmersa en un ambicioso plan de transformación completa de su sistema de producción nórdico, reemplazando todos sus altos hornos por horno eléctricos EAF flexibles y eficientes, alimentados con una combinación de chatarra y hierro esponja (DRI) producido con hidrógeno verde (SSAB, 2025a). En 2024, SSAB generó 7.349 mil toneladas métricas de acero crudo, lo que representa una disminución del 6% en comparación con las 7.778 mil toneladas producidas en 2023. Cabe destacar que la capacidad de producción anual de acero crudo de SSAB es de 8.800 mil toneladas (SSAB, 2025c).

4.5.2. Prácticas y estrategias en la gestión de chatarra ferrosa

La chatarra es un componente cada vez más crítico en la estrategia de SSAB, tanto para sus operaciones EAF existentes como para su futura producción nórdica transformada.

Fuentes y adquisición: Utiliza chatarra ferrosa en todos sus procesos productivos actuales, aunque en proporciones variables, con el objetivo de asegurar el suministro necesario para la conversión de su planta de Oxelösund y Luleå a EAF (prevista para finales de 2026 (SSAB, 2025d), ha establecido una cooperación estratégica con Stena Metall, uno de los mayores recicladores de los países nórdicos con el fin de abastecer sus futuras plantas (SSAB, 2024). Este acuerdo garantiza el flujo de chatarra reciclada de alta calidad para el nuevo horno eléctrico EAF.

Procesamiento y control de calidad: La empresa implementa tecnologías de clasificación y procesamiento para asegurar la calidad del material reciclado, clasifican la chatarra según estándares nacionales e internacionales y en sus operaciones americanas ya utilizan un alto porcentaje de material reciclado reportado como 97% en algunos contextos (SSAB, 2025c). La colaboración con Stena Metall también implica asegurar el suministro de chatarra que cumpla con las especificaciones requeridas para su acero de alta calidad y sus futuros productos libres de fósiles.

Utilización en procesos: Está implementando una importante transformación en sus plantas nórdicas de altos hornos BOF, donde el uso de chatarra es actualmente menor. Los nuevos hornos de arco eléctrico (EAF) en Oxelösund y Luleå utilizarán una mezcla flexible de chatarra reciclada y hierro de reducción directa (DRI) libre de fósiles producido con la tecnología HYBRIT, esta flexibilidad permitirá a SSAB producir acero con emisiones de carbono significativamente reducidas, como el producto SSAB Zero™, hecho 100% de chatarra reciclada y energía libre de fósiles (SSAB, 2025b). Cabe destacar que las plantas de horno eléctrico EAF de SSAB en EE. UU. ya utilizan una alta proporción de chatarra, sin embargo, es importante tener en cuenta que la tasa global de uso de chatarra puede variar en el futuro dependiendo de la fase de transición.

4.5.3. Enfoque e iniciativas de I+D+i relevantes

La I+D+i es el motor de la transformación de SSAB y su posicionamiento como líder en acero verde.

Inversión y áreas prioritarias: Aunque no se especifica una cifra global anual de I+D+i, la inversión indicada para el periodo 2024 fue de 488 millones de SEK (aproximadamente 51 millones de USD)², y para la transformación nórdica, la conversión de Oxelösund a horno eléctrico y manejo de materia prima fue de 6.2 mil millones de SEK (aproximadamente 648 millones de USD)³, al igual que solo Luleå la inversión se estima en €4.5 mil millones de EUR (aproximadamente 5.1 mil millones de USD)⁴ (SSAB, 2025c). El enfoque principal es la eliminación casi total de las emisiones de CO₂, el desarrollo de aceros libres de fósiles y la optimización de sus procesos productivos.

² Conversión de 488 millones de SEK realizada utilizando la tasa de cambio de 1 SEK = 0,104510 USD (consultada en XE.com el 26 de mayo de 2025).

³ Conversión de 6.2 mil millones de SEK realizada utilizando la tasa de cambio de 1 SEK = 0,104510 USD (consultada en XE.com el 26 de mayo de 2025).

⁴ Conversión de 4.5 mil millones de EUR realizada utilizando la tasa de cambio de 1 EUR = 1,13647 USD (consultada en XE.com el 26 de mayo de 2025).

Innovaciones específicas en chatarra y/o economía circular: El desarrollo y lanzamiento comercial de SSAB Zero™ es una innovación clave, demostrando la viabilidad de producir acero de alta calidad con cero emisiones fósiles netas utilizando chatarra reciclada y energía limpia, al igual que la colaboración estratégica con Stena Metall es una innovación en la cadena de suministro circular (SSAB, 2024, 2025a). La colaboración con Saint-Gobain para usar escoria de cuchara es otro ejemplo de valorización de subproductos.

Innovaciones específicas para la descarbonización: La iniciativa más importante es el desarrollo y escalado de la tecnología HYBRIT (Hydrogen Breakthrough Ironmaking Technology), en colaboración con LKAB y Vattenfall donde HYBRIT reemplaza el carbón por hidrógeno verde en la reducción directa del mineral de hierro, ya han producido acero libre de fósiles a escala piloto y planean lanzarlo comercialmente en 2026 (SSAB, 2025b). El proyecto incluye investigación exitosa en almacenamiento subterráneo de hidrógeno. La conversión de sus plantas nórdicas a hornos eléctricos EAFs es la implementación industrial de esta estrategia y han logrado establecer colaboraciones con clientes como Volvo y AWS para entregas piloto de acero libre de fósiles (SSAB, 2025c).

4.5.4. Resultados reportados y desafíos específicos

Resultados Cuantificables: lanzó comercialmente SSAB Zero™ en 2023, con entregas de aproximadamente 40 mil toneladas en 2023 y más de 50 mil toneladas para 2024. El piloto HYBRI desarrollado juntamente con socios como Vattenfall y LKAB, ha estado funcionando durante seis años, ha sido un éxito (SSAB, 2025c). La transformación de Oxelösund está en marcha y se espera que esté operativa a finales de 2026 y la inversión de Luleå ya ha sido aprobada en abril de 2024.

En 2024, reportó un beneficio operativo de 7.860 millones de SEK (aproximadamente 822 millones de USD)⁵, aunque fue inferior al obtenido en 2023 por movimientos del mercado, esto puede hacer frenar algunas inversiones (SSAB, 2025c). Las emisiones de gases de efecto invernadero GEI de Scope 1 fueron de 9.483 mil toneladas en 2024 frente a las 9.947 mil toneladas en 2023 y las de Scope 2 fueron de 713 mil toneladas en Suecia, 99 mil toneladas en Finlandia y 524 mil toneladas en USA en 2024 (SSAB, 2025c). Se ha logrado una reducción de emisiones de CO2 para Scope 1, 2 y 3 del 7.1% entre 2018 y 2024. El consumo total de energía fue de 8.927 GWh en

⁵ Conversión de 7.860 millones de SEK realizada utilizando la tasa de cambio de 1 SEK = 0,104510 USD (consultada en XE.com el 26 de mayo de 2025).

2024 a diferencia de los 9.142 GWh en 2023, y la intensidad energética fue de 1.215 kWh/tonelada de acero crudo en 2024 frente a los 1.175 kWh/tonelada consumidos en 2023 (SSAB, 2025c).

Desafíos propios: El principal desafío es la ejecución exitosa y económicamente viable de su ambiciosa transformación nórdica de altos hornos BOF a hornos eléctricos EAF alimentados con energía HYBRIT, con enormes inversiones y riesgos. Por otro lado, asegurar el suministro a gran escala de hidrógeno verde a precios competitivos y la disponibilidad de electricidad renovable suficiente y estable es crítico. Así como también, gestionar la transición de la fuerza laboral y adaptar la cadena de suministro para chatarra y DRI se convierte en otro reto. Y, por último, la debilidad de los mercados que en 2024 afectó sus resultados financieros (SSAB, 2025c).

4.5.5. Análisis preliminar y vinculación con hipótesis

H1: La inversión en I+D+i impulsa a las empresas siderúrgicas hacia la Economía Circular y mejora la eficiencia de la chatarra: El departamento de I+D+i de SSAB está impulsando firmemente la estrategia de la empresa hacia una economía circular, con proyectos como HYBRIT y SSAB Zero™. Esta fuerte inversión en investigación y desarrollo se materializa en las grandes inversiones de transformación, con un fuerte apoyo a la hipótesis H1.

H2: La inversión en I+D+i aumenta el uso de chatarra ferrosa en la siderurgia: La investigación y el desarrollo (I+D) en HYBRIT y la implementación de hornos eléctricos EAF permiten un modelo futuro adaptable que utilizará chatarra y DRI verde. SSAB Zero™ muestra la capacidad de usar 100% chatarra gracias a la I+D en EAF con energía limpia. El acuerdo con Stena Metall está vinculado a la I+D de la transformación. Todo lo anterior, indica que hay un fuerte apoyo a la hipótesis H2.

H3: Las empresas siderúrgicas que más invierten en I+D+i emiten menos CO2: Toda la estrategia I+D+i (HYBRIT, EAF, SSAB Zero™) está fundamentalmente dirigida a reducción drástica y casi la eliminación de CO2. Es el ejemplo más claro para el apoyo de la hipótesis H3.

H4: La inversión en I+D+i mejora la gestión de la calidad y los contaminantes en la chatarra: El desarrollo de SSAB Zero™ implica control de calidad muy alto, apoyado por I+D+i, a esto se suma el acuerdo con Stena Metall busca asegurar chatarra de calidad específica. apoyando la hipótesis H4.

H5: Las limitaciones tecnológicas actuales restringen el reciclaje de Chatarra: la necesidad de desarrollar HYBRIT para DRI virgen sin emisiones como complemento a la chatarra en futuros hornos eléctricos EAF sugiere que depender exclusivamente de chatarra presenta limitaciones tanto en volumen y calidad para toda su gama, lo que apoya la hipótesis H5.

4.6. POSCO

4.6.1. Contexto y modelo operativo

Posco, inicialmente conocida como Pohang Iron and Steel Company, es una pieza clave en la industria siderúrgica de Corea del Sur y del mundo. Su dominio en la producción de acero es vital para la economía coreana, pero también la convierte en un actor importante en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) del país, representando un 16.7% del total, al estar consciente de su impacto ambiental y alineándose con las tendencias globales, la compañía ha trazado un ambicioso plan para alcanzar la neutralidad de carbono para 2050; este plan incluye un objetivo intermedio de reducción del 30% en sus emisiones de carbono para 2035, Para lograr esta meta, la empresa está implementando una serie de cambios estratégicos (POSCO & POSCO HOLDINGS INC, 2024).

Tradicionalmente, Posco ha dependido en gran medida del proceso del alto horno BOF, ahora, la compañía está buscando diversificar sus métodos de producción y adoptar tecnologías más sostenibles. Esto incluye una fuerte inversión en innovación tecnológica y una exploración de nuevos materiales y fuentes de energía. Por ejemplo, a través de su filial Posco Future M, la empresa está incursionando en la producción de componentes para baterías, un sector en rápido crecimiento y con un gran potencial para el almacenamiento de energía renovable, además, está invirtiendo en el desarrollo del hidrógeno como fuente de energía limpia, lo que podría revolucionar la industria del acero y otros sectores (POSCO & POSCO HOLDINGS INC, 2024). Esta transformación no solo es una respuesta a la presión ambiental, sino también una estrategia para asegurar la competitividad a largo plazo de Posco, ya que la demanda de acero "verde" está en aumento y las empresas que puedan ofrecer productos sostenibles estarán mejor posicionadas en el mercado, además, la diversificación hacia nuevos sectores, como los componentes para baterías y el hidrógeno, puede abrir nuevas fuentes de ingresos y reducir la dependencia de la producción de acero tradicional (POSCO & POSCO HOLDINGS INC, 2024).

Con una producción de 38.4 millones de toneladas métricas en 2023, según datos de Worldsteel (World Steel Association, 2024), Posco tiene un largo camino por recorrer para alcanzar sus objetivos de sostenibilidad. Sin embargo, su compromiso con la neutralidad de carbono y su inversión en innovación tecnológica sugieren que está tomando medidas serias para abordar su impacto ambiental y asegurar su futuro en un mundo cada vez más consciente del cambio climático.

4.6.2. Prácticas y estrategias en la gestión de chatarra ferrosa

Históricamente limitada por su dependencia del BOF, la gestión y utilización de chatarra se ha convertido en un área de creciente importancia estratégica para Posco dentro de su plan de descarbonización.

Fuentes y adquisición: Está implementando una estrategia para aumentar significativamente sus compras de chatarra ferrosa, con el objetivo de incrementar en un 27% para 2030, comparando con el consumo real de chatarra en 2023, que fue de 7.25 millones de toneladas (2.24 millones de toneladas de chatarra propia + 5.01 millones de toneladas de chatarra comprada), alcanzar las 9.2 millones de toneladas para 2030 representa un aumento sustancial aproximadamente un 27% respecto al total consumido en 2023 (POSCO & POSCO HOLDINGS INC, 2024). Para asegurar este suministro, están recurriendo a contratos a largo plazo con proveedores, arrendamiento de instalaciones de procesamiento externas y planes para construir centros propios de recolección y procesamiento de chatarra. Fomentan también la colaboración con PYMES para fortalecer el ecosistema local de reciclaje y la logística global de adquisición se apoya en la red de su filial POSCO INTERNATIONAL, de donde también recuperan la chatarra autogenerada (POSCO & POSCO HOLDINGS INC, 2024).

Procesamiento y control de calidad: La compañía aplica tecnologías de clasificación y procesamiento en las instalaciones que utiliza como espectroscopia XRF y LIBS por medio de un CCTV circuito cerrado de televisión para mantener monitoreado el suministro de chatarra. Una práctica destacada es la valorización de la escoria de acería rica en hierro, la cual, tras ser triturada y sometida a separación magnética, se utiliza como sustituto parcial de la chatarra (POSCO & POSCO HOLDINGS INC, 2024). Además de los EAF y los centros integrados, Posco está desarrollando tecnologías para maximizar el uso de chatarra en los convertidores, lo que se conoce como Tecnología de Operación con Baja Proporción de Arrabio Líquido (*Low HMR Operation Technology*), esto implica reducir la cantidad de arrabio líquido del alto

horno al aumentar la cantidad de chatarra utilizada en el convertidor. También buscan desarrollar tecnología para mezclar el arrabio líquido del alto horno BOF con el acero líquido del EAF horno eléctrico dentro del convertidor para mitigar las emisiones de carbono y aun así producir acero premium (POSCO & POSCO HOLDINGS INC, 2024).

Utilización en procesos: Si bien la mayor parte de su producción sigue siendo en altos hornos BOF, están trabajando para incrementar el ratio de chatarra en sus convertidores BOF mediante tecnologías como la carga de chatarra pre-fundida y el soplado combinado por la parte superior e inferior con oxígeno (OTBB - Oxygen Top and Bottom Blowing). El cambio más significativo es la construcción de un nuevo Horno de Arco Eléctrico (EAF) a gran escala en su planta de Gwangyang, este nuevo horno eléctrico EAF, tiene una capacidad prevista de 2.5 millones de toneladas anuales, está diseñado para operar con una mezcla de chatarra y arrabio líquido y se espera que entre en funcionamiento en 2026 (POSCO & POSCO HOLDINGS INC, 2024).

4.6.3. Enfoque e iniciativas de I+D+i relevantes

POSCO mantiene una fuerte apuesta por la I+D+i como motor de su competitividad y transformación sostenible.

Inversión y áreas prioritarias: Bajo su visión de "Materiales que abren el futuro", la I+D+i es central. Han creado el POSCO N.EX.T Hub como centro Vital para la investigación del grupo, enfocándose en áreas clave como IA, materiales para baterías secundarias y tecnología de hidrógeno bajo en carbono (POSCO & POSCO HOLDINGS INC, 2024). Colaboran internacionalmente, por ejemplo, con Hysata (Australia) en tecnología de electrólisis para hidrógeno verde, también invierten en proyectos de hidrógeno azul de gas natural y participan en proyectos nacionales de CCU (Captura y Utilización de Carbono) (POSCO & POSCO HOLDINGS INC, 2024). Además de la siderurgia, su I+D abarca materiales avanzados de carbono (grafeno, nanotubos) y materiales ecológicos para diversas aplicaciones. No se encontró públicamente la cifra consolidada del gasto anual en I+D+i para los periodos 2023/2024.

Innovaciones específicas en chatarra y/o economía circular: El desarrollo de las tecnologías OTBB que aumenta la eficiencia de combustión y la conductividad del calor al introducir oxígeno en la parte superior e inferior del convertidor y de pre-fusión para aumentar el uso de chatarra en el alto horno BOF (POSCO & POSCO HOLDINGS INC, 2024). La planificación y diseño de centros de gestión de chatarra y

la creación de un ecosistema de reciclaje con PYMES y la valorización de escorias como sustituto de chatarra. La investigación en materiales de construcción ecológicos y reciclados.

Innovaciones específicas para la descarbonización: Su proyecto estrella es el desarrollo de la tecnología propia de producción de acero basada en hidrógeno el HyREX (Hydrogen Reduction Ironmaking), que ya cuentan con una planta piloto en Pohang y que ha logrado producir hierro reducido con hidrógeno y planean construir una planta a escala real para 2027 (POSCO & POSCO HOLDINGS INC, 2024). La construcción del EAF en Gwangyang es otra iniciativa clave en la I+D+i en CCU y en tecnologías de producción de hidrógeno limpio como electrólisis de alta temperatura, colaboración con Hysata completan su enfoque multifacético.

4.6.4. Resultados reportados y desafíos específicos

Resultados Cuantificables: Éxito en la producción piloto de hierro reducido con hidrógeno (HyREX) en Pohang (POSCO & POSCO HOLDINGS INC, 2024). Inicio de la construcción del EAF de 2.5 Millones de toneladas por año en Gwangyang operación prevista para 2026 (POSCO & POSCO HOLDINGS INC, 2024). Establecimiento del N.EX.T Hub y colaboraciones internacionales en hidrógeno. Sólida posición en el mercado global de aceros de alta calidad. Reportaron un beneficio neto consolidado de W 947.580 millones (aproximadamente 1.053 millones de USD)⁶ en 2024, aunque inferior al año anterior debido a condiciones de mercado adversas (POSCO HOLDINGS INC, 2025). La intensidad de GEI de POSCO para 2023 mejoró a 2.02 tCO₂eq/ton, lo que representa una reducción del 3.3% respecto a la línea base 2017-2019 (2.09 tCO₂eq/ton), esta reducción se atribuye, entre otros factores, a la reducción de costos de carbón gracias a operaciones bajas en carbono (POSCO & POSCO HOLDINGS INC, 2024).

Desafíos propios: El principal desafío es la enorme inversión y el largo plazo requeridos para la transición de sus gigantescas instalaciones de altos hornos BOF hacia HyREX y/o EAF, también el poder asegurar el suministro masivo de chatarra necesario para el nuevo horno eléctrico EAF y el potencial aumento en BOF representa un reto logístico y de mercado. El escalado comercial de HyREX desde la fase piloto es un desafío tecnológico y económico considerable. La obtención de cantidades masivas de hidrógeno verde competitivo y electricidad renovable es

⁶ Conversión de 947.580 millones de KPW realizada utilizando la tasa de cambio de 1 KPW = 0,00111117 USD (consultada en XE.com el 26 de mayo de 2025).

fundamental para el éxito de su estrategia de descarbonización, manteniendo la rentabilidad durante esta costosa transición, especialmente en un mercado siderúrgico global volátil y con sobrecapacidad influenciada por China (POSCO & POSCO HOLDINGS INC, 2024).

4.6.5. Análisis preliminar y vinculación con hipótesis

H1: La inversión en I+D+i impulsa a las empresas siderúrgicas hacia la Economía Circular y mejora la eficiencia de la chatarra: El fuerte y diversificado enfoque en I+D+i por sus iniciativas HyREX, horno eléctrico EAF, CCU, N.EX.T Hub indican que está claramente orientado a objetivos de economía circular y sostenibilidad, incluyendo planes concretos para aumentar drásticamente el uso de chatarra vía EAF. indicando un fuerte apoyo a la hipótesis H1.

H2: La inversión en I+D+i aumenta el uso de chatarra ferrosa en la siderurgia: La inversión en el nuevo horno eléctrico EAF y en tecnologías para el alto horno BOF (OTBB) es consecuencia directa de su estrategia de I+D+i y resultará en un aumento futuro de la tasa de uso de chatarra. La correlación es prospectiva pero claramente impulsada por la I+D. Apoya la hipótesis H2, aunque a futuro.

H3: Las empresas siderúrgicas que más invierten en I+D+i emiten menos CO2: El desarrollo de HyREX, la construcción del nuevo horno eléctrico EAF y la I+D en CCU y el hidrógeno son la máxima expresión de una I+D enfocada en la reducción drástica de CO2. mostrando un fuerte apoyo a la hipótesis H3 en cuanto a intención y estrategia.

H4: La inversión en I+D+i mejora la gestión de la calidad y los contaminantes en la chatarra: La investigación en OTBB y en sistemas de pre-fusión para usar más chatarra en el alto horno BOF, la valorización de escorias y la planificación de centros propios de gestión indican que la I+D+i se aplica a gestionar mejor el suministro y la calidad de la chatarra y sus sustitutos, apoyando la hipótesis H4.

H5: Las limitaciones tecnológicas actuales restringen el reciclaje de Chatarra: La decisión estratégica de Posco de seguir una doble vía con la construcción del nuevo horno eléctrico EAF y el desarrollo de HyREX basado en DRI sugiere que consideran que la chatarra por sí sola ya sea por limitaciones de cantidad y/o calidad no es suficiente para cumplir sus objetivos de producción y descarbonización, necesitando I+D+i en rutas alternativas. apoyando la hipótesis H5.

4.7. Voestalpine

4.7.1. Contexto y modelo operativo

Voestalpine AG es un grupo siderúrgico, tecnológico y de bienes de capital con sede en Austria, con una fuerte especialización en aceros y productos de alto rendimiento para industrias exigentes como la automotriz, aeroespacial, ferroviaria y energética, opera a nivel mundial con aproximadamente 500 empresas y ubicaciones en más de 50 países en los cinco continentes (Voestalpine AG, 2024b), a diferencia de productores masivos, Voestalpine se enfoca en segmentos de mayor valor añadido. Su estructura productiva incluye tanto plantas integradas o altos hornos BOF en Linz y Donawitz (Austria), como operaciones basadas en hornos eléctricos EAF dentro de su división High Performance Metals. La compañía ha adoptado una estrategia de descarbonización clara y ambiciosa denominada "greentec Steel", con el objetivo de alcanzar la neutralidad de carbono (Net Zero) para 2050, un pilar fundamental de esta estrategia es la transición tecnológica de sus principales centros productivos de BOF a EAF, alimentados con electricidad renovable (Voestalpine AG, 2024b).

4.7.2. Prácticas y estrategias en la gestión de chatarra ferrosa

La chatarra es una materia prima importante para Voestalpine y su gestión es clave tanto para sus operaciones EAF actuales como para su futura transformación "greentec Steel".

Fuentes y adquisición: La empresa se ha fijado el ambicioso objetivo de lograr una tasa de reciclaje de materiales secundarios superior al 50% para el año 2030 y para ello considera la chatarra como una materia prima fundamental (Voestalpine AG, 2024c). Con el fin de fomentar activamente el cierre de ciclos de materiales, la empresa ha establecido asociaciones estratégicas con otras empresas, como Welser Profile, Mercedes-Benz y TSR Recycling, colaborando con clientes y proveedores (Voestalpine AG, 2024d). Estas asociaciones, especialmente la de Mercedes-Benz y TSR Recycling, se centran en garantizar el suministro de chatarra de calidad y en el reprocesamiento de la chatarra posconsumo del sector automotriz.

Procesamiento y control de calidad: Está a la vanguardia en la investigación y aplicación de tecnologías avanzadas para la clasificación de chatarra, con un enfoque particular en poder utilizar chatarra posconsumo de menor calidad sin comprometer sus exigentes estándares de producto, por eso ha desarrollado su proyecto KiRAMET

investiga la clasificación "inteligente" asistida por Inteligencia Artificial (IA), donde están probando activamente sistemas de análisis en tiempo real como la detección de defectos mediante sistemas ópticos, la identificación y el seguimiento de piezas mediante reconocimiento óptico de caracteres (OCR), a menudo en combinación con separación magnética y otros sensores, para determinar la composición química precisa de la chatarra sobre la marcha (Voestalpine AG, 2024b). El proyecto piloto con Mercedes-Benz y TSR se centra específicamente en desarrollar procesos para purificar y reutilizar chatarra compleja posconsumo.

Utilización en procesos: Actualmente, utiliza chatarra en sus convertidores del alto horno (BOF) en Linz y Donawitz y de forma más intensiva en los hornos eléctricos EAFs de su división High Performance Metals. La transición hacia la producción de acero verde implica un aumento significativo en el uso de chatarra, como parte del plan greentec Steel, Voestalpine está reemplazando estos dos altos hornos basados en carbón con un horno de arco eléctrico (EAF) en cada sitio a partir de 2027 (Voestalpine AG, 2024b, 2024c).

La tasa de reciclaje general reportada, medida por el contenido de hierro del producto derivado de materias primas secundarias como la chatarra, fue del 27.4% en 2023, ligeramente por debajo del 27.7% en 2022 (Voestalpine AG, 2024b, 2024c). Esta tasa aumentará drásticamente con la puesta en marcha de los nuevos hornos eléctricos EAFs con una proyección de 1.6 millones de toneladas por año y Donawitz con un promedio de 0.85 millones de toneladas por año, que reemplazarán parcialmente a los altos hornos. Estos EAFs están diseñados para operar con una mezcla flexible de chatarra, arrabio líquido y/o hierro de reducción directa (DRI/HBI) (Voestalpine AG, 2024b).

4.7.3. Enfoque e iniciativas de I+D+i relevantes

La I+D+i es un pilar fundamental de Voestalpine, dada su especialización tecnológica y su ambicioso plan de transformación.

Inversión y áreas prioritarias: La compañía mantiene un alto nivel de inversión en I+D+i, reportando en €214 millones de EUR (aproximadamente 243 millones de USD)⁷ para el año fiscal 2023/2024 (Voestalpine AG, 2024e). Sus prioridades incluyen el desarrollo de nuevos aceros de altas prestaciones, por ejemplo, alta resistencia para automoción, recubrimientos avanzados, la optimización de procesos productivos y de forma central, la reducción del impacto ambiental a través de su programa "greentec

⁷ Conversión de €214 millones de EUR realizada utilizando la tasa de cambio de 1 EUR = 1,13380 USD (consultada en XE.com el 27 de mayo de 2025).

Steel", HYFOR y SuSteel para la reducción de mineral de hierro (Voestalpine AG, 2024b, 2024a).

Innovaciones específicas en chatarra y/o economía circular: La I+D+i en clasificación inteligente de chatarra como lo son los programas de KiRAMET, LIBS, el uso de IA es un área distintiva y avanzada, orientada a valorizar flujos complejos de posconsumo (Voestalpine AG, 2024b, 2024c). Las asociaciones para procesar chatarra de (Mercedes-Benz/TSR) y el diseño de la logística de chatarra para los nuevos EAFs también son fruto de la innovación.

Innovaciones específicas para la descarbonización: El programa "greentec Steel" incluye la inversión confirmada en EAFs con la construcción de dos EAFs en Linz y Donawitz operativos en 2027, alimentados con electricidad renovable, con una inversión de €1.5 mil millones de EUR (aproximadamente 1.7 mil millones de USD)⁸ en su primera etapa (Voestalpine AG, 2024b). La Investigación en Hidrógeno con el desarrollo activo de rutas alternativas basadas en hidrógeno como lo son el proyecto HYFOR y su planta piloto en Donawitz para la reducción directa de mineral de hierro fino utilizando hidrógeno, produciendo HBI (*Hot Briquetted Iron*) (Voestalpine AG, 2024c) y el proyecto SuSteel sobre la investigación básica en colaboración con socios sobre producción directa de acero líquido a partir de mineral usando plasma de hidrógeno (Voestalpine AG, 2024c).

4.7.4. Resultados reportados y desafíos específicos

Resultados Cuantificables: Decisión de inversión y comienzo de construcción de los hornos eléctricos EAFs de "greentec Steel" fase 1 (Voestalpine AG, 2024b, 2024c). Alta inversión continuada en I+D+i de aproximadamente 1.7 mil millones de USD en el periodo 2023/2024. Progreso en proyectos piloto como HYFOR y KiRAMET, generando conocimiento técnico (Voestalpine AG, 2024c). Compromiso validado por Science Based Targets initiative (SBTi) para reducir emisiones Scope 1+2 en 30% y Scope 3 en 25% para 2029 frente al inicial de 2019, esta primera fase implica la sustitución de dos de los cinco altos hornos existentes por hornos de arco eléctrico (EAFs) que funcionarán con electricidad verde (Voestalpine AG, 2024c).

⁸ Conversión de €1.5 mil millones de EUR realizada utilizando la tasa de cambio de 1 EUR = 1,13363 USD (consultada en XE.com el 27 de mayo de 2025).

Reportaron un beneficio neto reducido de €125 millones EUR (aproximadamente 141 millones de USD)⁹ en el periodo 2023/2024 frente en el año anterior (2022/23) fue de €1.177.3 millones EUR (aproximadamente 1.334 millones de USD)¹⁰, lo que representa una caída significativa del 82.4%. No se encontraron datos públicos recientes y comparables sobre su intensidad global de emisiones de CO2.

Desafíos propios: El coste y la complejidad de la transición de altos hornos BOF a hornos eléctricos EAF más la tecnología de Hidrógeno son enormes, se debe asegurar un suministro de hidrogeno a un precio económico y suficiente chatarra, especialmente del tipo posconsumo de calidad variable que buscan valorizar, es un reto logístico y tecnológico. El escalado de las tecnologías de hidrógeno como HYFOR y SuSteel desde la fase piloto o investigación a la industrial es incierto y a largo plazo. Garantizar el acceso a grandes cantidades de electricidad renovable a precios competitivos para los EAFs y la producción de hidrógeno verde es crítico (Voestalpine AG, 2024c, 2024b), así como mantener su liderazgo en aceros de alta especialización durante este período de transformación tecnológica es fundamental.

4.7.5. Análisis preliminar y vinculación con hipótesis

H1: La inversión en I+D+i impulsa a las empresas siderúrgicas hacia la Economía Circular y mejora la eficiencia de la chatarra: La alta inversión en I+D+i (243 millones de USD) está directamente enfocada en habilitar la economía circular permitiendo que el programa "greentec Steel", logre un 90% de reciclaje meta y específicamente en mejorar drásticamente la eficiencia y capacidad de usar chatarra con una clasificación inteligente (I+D en Smart sorting). Fuerte apoyo a la hipótesis H1.

H2: La inversión en I+D+i aumenta el uso de chatarra ferrosa en la siderurgia: La I+D+i es la que permite el cambio estratégico a hornos eléctricos EAFs, lo que causará un aumento radical en la tasa de uso de chatarra de un aproximado de 27%-30% actual a niveles mucho mayores. La correlación es claramente prospectiva y habilitada por la I+D indicando un fuerte apoyo a la hipótesis H2 en dirección futura.

H3: Las empresas siderúrgicas que más invierten en I+D+i emiten menos CO2: El programa "greentec Steel" y la I+D en EAFs y el hidrógeno (HYFOR y SuSteel) están

⁹ Conversión de €125 millones EUR realizada utilizando la tasa de cambio de 1 EUR = 1,13293 USD (consultada en XE.com el 27 de mayo de 2025).

¹⁰ Conversión de €1.177.3 millones EUR realizada utilizando la tasa de cambio de 1 EUR = 1,13292 USD (consultada en XE.com el 27 de mayo de 2025).

explícitamente diseñados para la descarbonización que está alineado a la meta Net Zero 2050, meta SBTi 2029, indicando un fuerte apoyo a la hipótesis H3.

H4: La inversión en I+D+i mejora la gestión de la calidad y los contaminantes en la chatarra: Voestalpine es un ejemplo perfecto de cómo la inversión en I+D+i (LIBS, AI, KiRAMET) puede mejorar la gestión de la calidad de la chatarra, incluso al centrarse en la valorización de materiales posconsumo difíciles. Esto proporciona una evidencia muy fuerte para la hipótesis H4.

H5: Las limitaciones tecnológicas actuales restringen el reciclaje de Chatarra: Su fuerte inversión en I+D como el programa KiRAMET, para poder usar chatarra posconsumo demuestra que las limitaciones de las tecnologías actuales para este tipo de material son una barrera real que requiere innovación específica. La exploración paralela de rutas de hidrógeno (HYFOR y SuSteel) también sugiere que la chatarra sola no se considera suficiente o adecuada para todos sus productos por el volumen, indicando un fuerte apoyo a la hipótesis H5.

4.8. HBIS Group

4.8.1. Contexto y modelo operativo

HBIS Group (Hebei Iron and Steel Group) grupo estatal, uno de los conglomerados siderúrgicos más grandes de China y del mundo, tradicionalmente ha basado su modelo operativo en la ruta integrada BOF a gran escala, sin embargo, para alinearse con los objetivos de descarbonización de China y las tendencias globales, la compañía está adoptando una estrategia de desarrollo ecológico y bajo en carbono, donde están invirtiendo en tecnologías innovadoras, como la metalurgia basada en hidrógeno, y se ha comprometido a alcanzar la neutralidad de carbono para 2050 (HBIS Group Co, 2024).

La compañía se enfoca en la producción de materiales de acero y también participa en industrias emergentes, operaciones en el extranjero y servicios financieros. Su visión es convertirse en la empresa siderúrgica más competitiva y con mayor influencia de marca a nivel mundial, con una filosofía de desarrollo centrada en la "armoniosa coexistencia de las personas, el acero y el medio ambiente" (HBIS Group Co, 2024). Posee diversas empresas filiales que cubren diferentes áreas de negocio y utiliza sistemas como el de control de Marketing inteligente para implementar una gestión unificada en áreas como decisiones de marketing y desarrollo de mercado.

HBIS Group está construyendo fábricas inteligentes y adopta prácticas de producción ecológica, centrándose en la eficiencia energética y la economía circular, donde ha establecido un comité de desarrollo sostenible e implementar un sistema de inclusión de carbono para los empleados por medio de su aplicación WisCarbon, con el fin de incentivar comportamientos de baja emisión de carbono (HBIS Group Co, 2024). También fomenta la cooperación internacional y el intercambio de conocimientos en materia de prácticas de producción ecológica.

4.8.2. Prácticas y estrategias en la gestión de chatarra ferrosa

En su búsqueda por establecer una cadena de suministro de adquisiciones competitiva y de alto valor, ha adoptado una filosofía de "compra verde" (HBIS Group Co, 2024). HBIS ha implementado la gestión online unificada de todo el proceso de adquisición de chatarra ferrosa, han desarrollado de forma independiente una plataforma integral de servicios de transacción de chatarra ferrosa utilizando big data, esta plataforma integra funciones como transacción, cotización en efectivo, logística e inspección de calidad inteligente, se basa en el modelo "base + plataforma + finanzas" para integrar a las partes participantes en la transacción de chatarra ferrosa, logrando la estandarización de la clasificación, la visualización de la transacción y la automatización de la liquidación (HBIS Group Co, 2024). Se puede inferir que la adquisición de chatarra ferrosa por parte de HBIS probablemente se alinee con criterios de sostenibilidad.

Fuentes y adquisición: Realiza la compra centralizada de materias primas, incluyendo la chatarra ferrosa, a través de su plataforma HBIS Group Supply Chain Management Co., Ltd., su estrategia de adquisición ecológica sugiere una creciente consideración por la sostenibilidad de sus proveedores y materias primas donde han establecido cooperaciones internacionales, como el Memorando de Entendimiento (MoU) con Vale en el marco de un acuerdo China-Brasil enfocado en la descarbonización de la cadena de valor de la industria siderúrgica, para explorar tecnologías como **Tecnored** que podrían procesar biomasa o residuos, afectando potencialmente la mezcla de materias primas (HBIS Group Co, 2025), entre otras alianzas que han realizado se mencionan a BMW, Mercedes-Benz, Chery Automobile, Volvo y otras empresas automotrices, Siemens (Alemania), POSCO (Corea del sur), Tenova (Italia), entre otras (HBIS Group Co, 2024).

Procesamiento y control de calidad: HBIS ha implementado sistemas inteligentes para la inspección de la calidad de la chatarra, basados en el reconocimiento de imágenes y redes neuronales (IA), con el objetivo de identificar los grados de la

chatarra y las impurezas. Además, la plataforma de transacciones de chatarra de HBIS se enfoca en una gestión estandarizada y automatizada de la chatarra, incluyendo la clasificación, visualización de transacciones y liquidación (HBIS Group Co, 2024). Esto se complementa con funciones de inspección de calidad inteligente y estandarización de la clasificación de la chatarra.

Utilización en procesos: HBIS Group utiliza principalmente chatarra ferrosa en sus hornos de arco eléctrico (EAF), como parte de su estrategia de descarbonización, también utiliza chatarra junto con el hierro de reducción directa (DRI) producido con hidrógeno en su proceso HYMEX en hornos eléctricos EAF para producir "acero verde". Además, la compañía ha construido plantas de acero especializadas que utilizan un proceso corto basado completamente en chatarra y horno eléctrico EAF, como la Nueva Planta Shisteel, lo que permite una producción limpia con cero carbón y cero coque, reduciendo significativamente el consumo de energía y las emisiones (HBIS Group Co, 2024).

Aunque el uso intensivo de chatarra no ha sido su foco principal debido a su predominio BOF, HBIS ha desarrollado tecnologías para aumentar el consumo de chatarra en sus convertidores BOF, donde su inversión principal en descarbonización para la metalurgia del hidrógeno prevé el uso de DRI producido con hidrógeno para alimentar hornos EAF. Este DRI puede actuar como sustituto de la chatarra de alta calidad, lo que podría modificar su dependencia futura de la chatarra externa. No hay datos públicos disponibles que indiquen el porcentaje actual de chatarra utilizada a nivel mundial.

4.8.3. Enfoque e iniciativas de I+D+i relevantes

HBIS Group está posicionándose como un líder en innovación dentro de China, especialmente en tecnologías de descarbonización.

Inversión y áreas prioritarias: HBIS ha implementado una estrategia de desarrollo basada en la innovación y está estableciendo un sistema de I+D "3+1" del grupo, que incluye el centro de I+D de HBIS y un sistema de innovación colaborativo de tres niveles, primero una plataforma de I+D a nivel de grupo, segundo centros tecnológicos en las subsidiarias y tercero unidades de I+D en las fábricas (HBIS Group Co, 2024). La plataforma de I+D a nivel de grupo se centra en áreas clave alineadas con la vanguardia mundial, la estrategia nacional y la demanda del mercado. Los centros tecnológicos de las subsidiarias se centran en la actualización, eficiencia y garantía de la tecnología. Las unidades de I+D en las fábricas se centran en la reducción de costos, el aumento de la eficiencia, el control de calidad y la estandarización.

El "1" en el sistema "3+1" se refiere a la construcción de una plataforma global de investigación y desarrollo tecnológico, colaborando con empresas líderes e institutos para la investigación y el desarrollo en diversas áreas, incluyendo materiales metálicos, investigación de procesos, desarrollo verde y bajo en carbono y mejora inteligente (HBIS Group Co, 2024) En total, la empresa ha establecido 39 plataformas globales de I+D+i con universidades e institutos, con una alta intensidad de inversión en I+D+i.

Innovaciones específicas en chatarra y/o economía circular: La compañía está desarrollando un sistema inteligente para la inspección de calidad de la chatarra, así como nuevas aleaciones y procesos para optimizar el uso de la chatarra en los hornos BOF. También están desarrollando y operando plantas con hornos de arco eléctrico (EAF) que utilizan principalmente chatarra como materia prima, como la planta Shisteel que utiliza chatarra al 100%.

Además, la empresa está investigando y desarrollando tecnologías para reciclar la escoria de acero y recuperar totalmente los residuos sólidos que contienen zinc, su equipo y tecnología para la recuperación de residuos sólidos con zinc fueron incluidos en el directorio nacional de procesos, tecnologías y equipos avanzados y aplicables para la utilización integral de recursos industriales (Versión 2023) (HBIS Group Co, 2024). Finalmente, la compañía está desarrollando una plataforma integral de servicios para la transacción de chatarra que incluye funciones de inspección de calidad inteligente y clasificación estandarizada.

Innovaciones específicas para la descarbonización: La empresa opera el primer proyecto de demostración de hidrógeno metalúrgico a escala mundial HyMEX, utilizando gas de horno de coque sin reformar para reducir las emisiones de CO₂ en aproximadamente un 70% (HBIS Group Co, 2024). También están desarrollando tecnología CCUS para capturar y refinar CO₂ y promoviendo el uso de energía verde como el hidrógeno y la electricidad verde. Ha logrado un gran avance en la tecnología de hidrometalurgia con su proyecto de demostración de 1,2 millones de toneladas, que utiliza un proceso único de reducción directa de hierro (DRI) sin reformado de gas de horno de coque combinado con un horno de arco eléctrico (EAF), este proyecto ha logrado una producción estable y continua de DRI verde con una tasa de metalización del 94% (HBIS Group Co, 2024a).

La compañía también está implementando un plan de desarrollo de productos de bajas emisiones de carbono y ha desarrollado la plataforma digital WisCarbon para la neutralidad de carbono, que realiza la recopilación, contabilidad y presentación de

informes de datos de carbono corporativos y la huella de carbono del producto (HBIS Group Co, 2024). Está investigando y aplicando activamente la tecnología CCUS y ha desarrollado una tecnología líder a nivel internacional capaz de capturar y refinar dióxido de carbono en dióxido de carbono líquido de grado industrial y de grado alimenticio, lo cual le permitió establecer una alianza de tecnología industrial CCUS con la provincia de Hebe y han desarrollado una solución integrada de proceso completo, replicable y escalable para la descarbonización profunda de la industria del acero (HBIS Group Co., 2024).

HBIS lidera varios proyectos de investigación clave y está explorando nuevas rutas para la logística verde con hidrógeno, han publicado el "Libro Azul sobre el Desarrollo de la Tecnología de la Hidrometalurgia" y están liderando el grupo de trabajo conjunto sobre normas de hidrometalurgia (HBIS Group Co, 2024). La compañía ha iniciado la formulación de 11 estándares nacionales e industriales, ha solicitado 54 patentes relacionadas con la hidrometalurgia y ha liderado el desarrollo de 5 metodologías de productos para la reducción de carbono (HBIS Group Co, 2024). Están trabajando para construir zonas de demostración para la transformación verde de la industria del acero y han recibido el premio "proceso único de DRI basado en gas de horno de coque sin reformado combinado con horno de arco eléctrico (EAF)" de la Asociación Mundial del Acero.

4.8.4. Resultados reportados y desafíos específicos

Resultados Cuantificables: Operación exitosa de la planta de demostración de metalurgia de hidrógeno de 1.2 millones de toneladas por año, produciendo DRI verde. Posicionamiento de una amplia red global de plataformas de I+D+i. Acuerdos de suministro de acero bajo en carbono a clientes como BMW. Producción total de 41.3 millones de toneladas en 2023 (World Steel Association, 2024). No se encontraron datos públicos específicos y recientes sobre su intensidad global de CO₂ o tasas de uso de chatarra.

Desafíos propios: Expandir la metalurgia del hidrógeno a gran escala y garantizar su viabilidad económica para reemplazar la capacidad de los altos hornos y hornos básicos de oxígeno, así como poder asegurar el suministro de grandes cantidades de hidrógeno verde a precios competitivos y la infraestructura necesaria.

Gestionar la transición tecnológica y operativa en una empresa de gran tamaño y complejidad, cumpliendo con los objetivos cada vez más estrictos de China en cuanto

a la reducción de emisiones en el sector siderúrgico y garantizar la calidad y disponibilidad de la chatarra en China también puede ser un factor que impulse su enfoque en la ruta del hidrógeno el DRI y los hornos eléctricos EAF.

4.8.5. Análisis preliminar y vinculación con hipótesis

H1: La inversión en I+D+i impulsa a las empresas siderúrgicas hacia la Economía Circular y mejora la eficiencia de la chatarra: HBIS realiza importantes inversiones en investigación y desarrollo, con un enfoque particular en la sostenibilidad, especialmente en lo que respecta al hidrógeno. Si bien su enfoque principal en hidrógeno y DRI podría verse como una alternativa al uso extensivo de chatarra externa, su investigación en la inspección y el uso de chatarra en altos hornos BOF indica un compromiso con la eficiencia. Esto respalda la Hipótesis H1 en el sentido más amplio de Economía Circular y Sostenibilidad.

H2: La inversión en I+D+i aumenta el uso de chatarra ferrosa en la siderurgia: La relación entre la I+D+i en HBIS y la maximización del uso de chatarra externa no es directamente proporcional. El enfoque en la ruta hidrógeno y DRI sugiere un esfuerzo por disminuir la dependencia de chatarra externa de calidad variable, lo que podría no resultar en un aumento directo del uso de chatarra externa. La conexión con la hipótesis H2 es compleja y requiere más análisis.

H3: Las empresas siderúrgicas que más invierten en I+D+i emiten menos CO2: La inversión pionera en metalurgia del hidrógeno es la evidencia más clara posible de una I+D+i orientada a la reducción drástica de CO2. apoyando la hipótesis H3.

H4: La inversión en I+D+i mejora la gestión de la calidad y los contaminantes en la chatarra: El desarrollo de sistemas de inspección de chatarra basados en IA demuestra aplicación directa de I+D+i para mejorar la gestión de calidad de la chatarra que utilizan. apoya la hipótesis H4.

H5: Las limitaciones tecnológicas actuales restringen el reciclaje de Chatarra: Su fuerte enfoque en la ruta del hidrógeno, el DRI y los hornos eléctricos EAF, utilizando DRI como reemplazo de chatarra de alta calidad, indica que reconocen limitaciones importantes en calidad, cantidad y costo en el suministro de chatarra en China, lo que impulsa su investigación y desarrollo en rutas alternativas. apoya fuertemente la hipótesis H5.

4.9. Gerdau

4.9.1. Contexto y modelo operativo

Gerdau S.A. es una multinacional siderúrgica brasileña con sede en São Paulo y uno de los mayores productores de aceros largos en el continente americano, con una presencia significativa en 7 países de América del Norte y América sur. Su modelo de negocio está fuertemente orientado hacia la producción de acero mediante la ruta de hornos eléctricos EAF produciendo el 70% de su acero a partir de esta fuente, utilizando la chatarra ferrosa como principal materia prima, se posiciona como un líder en reciclaje en América latina y ha manifestado un compromiso explícito con la sostenibilidad y la economía circular como pilares de su estrategia (GERDAU, 2024a).

Además de su negocio principal de acero, tiene otras áreas de innovación como Gerdau Next, esta rama es donde focaliza sus nuevos negocios, se dedica a la exploración de áreas innovadoras en sectores adyacentes al acero, se centra en la construtech, la movilidad y la sostenibilidad, con iniciativas como Gerdau Graphene centrada en el grafeno y Newave Energía centrada en energías renovables (GERDAU, 2024a). Según datos de Worldsteel (2024), Gerdau produjo 12,7 millones de toneladas métricas en 2023.

4.9.2. Prácticas y estrategias en la gestión de chatarra ferrosa

Siendo un productor basado en EAF, la gestión eficiente de la chatarra es vital para Gerdau.

Fuentes y adquisición: Siendo el mayor reciclador de chatarra en Latinoamérica, transforma anualmente más de 11 millones de toneladas métricas de chatarra en acero, lo que representa el 70% de su producción total de acero, esto lo logra con su amplia red de centros de acopio y reciclaje en las regiones donde opera, adquiriendo, clasificando, procesando y vendiendo chatarra ferrosa y no ferrosa de todas las calidades. Sus fuentes de chatarra incluyen tanto residuos domésticos como electrodomésticos, automóviles, bicicletas, residuos industriales como desechos de la metalurgia, automoción, maquinaria y equipos (GERDAU, 2024a).

La compañía también participa en subastas para desmantelar plataformas petrolíferas y se asocia con propietarios de flotas de vehículos para adquirir y procesar vehículos al final de su vida útil, comprometiéndose a construir relaciones de confianza con sus proveedores y ofrece soluciones logísticas integrales que incluyen ferrocarril, camión y

barco, así como asociaciones para el reciclaje con otras empresas. Gerdau reconoce a los comerciantes de chatarra como colaboradores clave en la cadena de logística inversa y mantiene iniciativas específicas para su desarrollo, donde establece relaciones con pequeñas empresas y cooperativas de recolección de chatarra, interactúa directamente con la cadena de logística inversa e incluye a los comerciantes de chatarra en eventos como el "Día del Chatarrero", además, de brindar apoyo a sus proveedores de chatarra a través de acciones de desarrollo en materia de ESG - *Environmental Social and Governance*, emprendimiento y concientización, e implementar programas de desarrollo para la cadena de suministro de chatarra mediante acciones informativas y orientativas (GERDAU, 2024b, 2024a).

Procesamiento y control de calidad: La empresa gestiona una amplia red de centros dedicados a la compra, clasificación, procesamiento y venta de chatarra ferrosa y no ferrosa, lo que lo ha consolidado como el principal reciclador de América, con un volumen de reciclaje anual de 11 millones de toneladas métricas (GERDAU, 2024a). Su modelo de negocio se basa en la confianza con los proveedores y la transparencia en los precios. Ofrece soluciones logísticas integrales que incluyen transporte por ferrocarril, camión y barco, así como establece alianzas estratégicas con otras empresas para optimizar el reciclaje. Asegura la fiabilidad de las materias primas mediante auditorías internas, pero no proporciona detalles específicos sobre los procesos de control de calidad y procesamiento de la chatarra.

Utilización en procesos: Gerdau utiliza la chatarra como la principal materia prima en sus hornos de arco eléctrico (EAF). La empresa reporta que un alto porcentaje de su acero se produce a partir de chatarra reciclada, los Informes corporativos recientes y análisis externos confirman consistentemente una tasa promedio del 71% de la producción de acero proveniente de chatarra (GERDAU, 2024a). Esta alta tasa de utilización es fundamental para su modelo de negocio y su estrategia de sostenibilidad.

4.9.3. Enfoque e iniciativas de I+D+i relevantes

Aunque no se reporta una cifra específica de inversión anual en I+D+i en los documentos, Gerdau destaca la investigación y la innovación como elementos clave en su modelo de creación de valor.

Inversión y áreas prioritarias: Gerdau centra su I+D+i en optimizar los hornos eléctricos EAF, mejorar el procesamiento de chatarra, asegurar la calidad del acero (acero limpio) y desarrollar nuevas áreas de negocio mediante Gerdau Next. Aunque no se ha encontrado la cifra de gasto anual total en I+D+i, la empresa colabora con universidades y centros de investigación para fomentar la innovación e invierte en

nuevos productos y start-ups (GERDAU, 2024a). Gerdau Next es la división enfocada en nuevos negocios adyacentes al acero como construtech, movilidad y sostenibilidad, refleja un enfoque en la innovación y la diversificación. A través de Gerdau Next Ventures, su unidad de capital de riesgo corporativo y aceleradora de start-ups, busca tendencias disruptivas y promueve el emprendimiento. En 2023, adquirió participación en Ai Fleet, una start-up de logística con inteligencia artificial (GERDAU, 2024c).

En 2023, la innovación y la tecnología avanzaron rápidamente en Gerdau, transformando el negocio bajo pilares estratégicos como clientes, cadena de suministro integrada, Industria 4.0, optimización de materias primas y ventas de próxima generación, estos pilares impulsan el desarrollo de proyectos y productos para el crecimiento, adaptándose a una sociedad hiperconectada y sostenible.

Innovaciones específicas en chatarra y/o economía circular: La implementación de tecnologías avanzadas de reciclaje mencionadas como la clasificación, limpieza, separación es fruto de la inversión e innovación aplicada, integrado con el desarrollo de soluciones logísticas para la gestión de chatarra y las iniciativas para la reutilización de subproductos como gases de proceso y la alta tasa de reutilización de agua del 97.7% son también parte de su enfoque de economía circular (GERDAU, 2024a). También utiliza gemelos digitales, que son representaciones virtuales de procesos existentes en sus instalaciones industriales donde se utilizan datos en tiempo real para modelar diferentes escenarios de fabricación y secuenciación de la producción, lo que ayuda a identificar rápidamente y de forma segura las compensaciones e interpretar el comportamiento del mundo real en un entorno digital, haciendo que los procesos sean más eficientes y generando ganancias en el consumo de materias primas (GERDAU, 2024a). Esta tecnología se implementa en sus tres principales líneas de producción, incluyendo el proceso de horno de arco eléctrico para la chatarra.

Innovaciones específicas para la descarbonización: Su principal estrategia es la producción eficiente vía hornos eléctricos EAF, ya que, por cada tonelada de acero producida a partir de chatarra reciclada, se evita la emisión de 1.5 toneladas de CO₂ (GERDAU, 2024a). Complementan esto con inversiones significativas en energía eléctrica renovable, tanto para autoconsumo como para comercialización, a través de su filial Newave energía que hace parte de Gerdau Next, donde han realizado inversiones multimillonarias en parques solares y PCHs Pequeñas Centrales Hidroeléctricas con el objetivo de autoabastecer el 80% de su energía con energía renovables para 2031, como las granjas solares de Midlothian y Arinos (GERDAU, 2024a).

4.9.4. Resultados reportados y desafíos específicos

Resultados Cuantificables: Gerdau se destaca como el mayor reciclador de chatarra ferrosa en Latinoamérica, con una capacidad de procesamiento de 11 millones de toneladas por año. Su producción siderúrgica presenta una alta tasa de utilización de chatarra, cercana al 71%, además, la empresa indica un elevado índice de reutilización de agua, alcanzando el 97.7% (GERDAU, 2024a). En materia de sostenibilidad energética, Gerdau ha realizado progresos significativos mediante la operación de parques solares y adquisiciones estratégicas. Al igual que ha incursionado en la innovación de materiales con el desarrollo de productos y soluciones basados en grafeno. En el ámbito financiero, Gerdau reportó un sólido desempeño en el año fiscal 2023, con un beneficio neto ajustado de R\$ 6.9 mil millones (aproximadamente 1.223 millones de USD)¹¹. Asimismo, la empresa informa una baja intensidad de emisiones, situándose en alrededor 0,91 toneladas de CO₂e por tonelada de acero en 2023 (GERDAU, 2024a).

Desafíos propios: Como todos los productores basados en hornos eléctricos EAF, Gerdau es dependiente de la volatilidad de los mercados de chatarra como el precio y la disponibilidad, también debe asegurar la calidad consistente de la chatarra para cumplir los requisitos de sus productos que será un desafío continuo. Además, debe mantener la competitividad de sus operaciones EAF que requiere inversión constante en modernización y eficiencia energética. La gestión de las operaciones de reciclaje a gran escala conlleva retos logísticos y ambientales y la diversificación hacia nuevas áreas como el grafeno y la energía también implica riesgos y necesidad de inversión.

4.9.5. Análisis preliminar y vinculación con hipótesis

H1: La inversión en I+D+i impulsa a las empresas siderúrgicas hacia la Economía Circular y mejora la eficiencia de la chatarra: Gerdau opera bajo un modelo circular basado en el uso de chatarra y su estrategia de I+D+i enfocada en hornos de arco eléctrico, el procesamiento de chatarra y las energías renovables que dirigen la optimización y sostenibilidad de este modelo, contando con un fuerte apoyo a la hipótesis H1.

¹¹ Conversión de R\$ 6.9 mil millones BRL realizada utilizando la tasa de cambio de 1 BRL = 0,177261 USD (consultada en XE.com el 27 de mayo de 2025).

H2: La inversión en I+D+i aumenta el uso de chatarra ferrosa en la siderurgia: La siderúrgica se distingue por su elevado consumo de chatarra un aproximado de 71%, es un factor clave y para sostener esta eficiencia, la I+D+i en el tratamiento de chatarra y hornos de arco eléctrico EAF resulta fundamental. Se destaca un sólido respaldo a la hipótesis H2.

H3: Las empresas siderúrgicas que más invierten en I+D+i emiten menos CO2: Su modelo de horno eléctrico EAF más su inversión en energías renovables con Newave demuestran estrategia clara, habilitada por I+D+i, para bajas emisiones. Fuerte apoyo a la hipótesis H3.

H4: La inversión en I+D+i mejora la gestión de la calidad y los contaminantes en la chatarra: La inversión en equipos de limpieza para la chatarra, la priorización del "acero limpio" y el procesamiento avanzado demuestran una gestión de calidad superior impulsada por la innovación. Sólido respaldo a la hipótesis H4.

H5: Las limitaciones tecnológicas actuales restringen el reciclaje de Chatarra: Invertir en líneas de limpieza especializadas para la clasificación de la chatarra con el fin de priorizar la calidad revela que las deficiencias en la calidad de la chatarra disponible constituyen un obstáculo significativo y superar esta barrera en un modelo de horno de arco eléctrico EAF exige soluciones tecnológicas innovadoras I+D+i, apoyando la hipótesis H5.

5. Resultados empíricos

Esta sección ofrece un análisis comparativo y consolidado de los resultados detallados en los nueve estudios de caso de empresas siderúrgicas presentados en la Sección 4, el propósito es descubrir patrones, tendencias y relaciones significativas entre las estrategias de I+D+i, las prácticas de gestión de chatarra y los indicadores de desempeño en economía circular y sostenibilidad de las empresas siderúrgicas examinadas.

Este análisis proporcionará una base empírica para evaluar las hipótesis de investigación propuestas (H1, H2, H3, H4 y H5), donde se combinarán hallazgos cualitativos sobre estrategias y tecnologías con datos cuantitativos descriptivos disponibles acerca de la inversión en I+D+i, las tasas de utilización de chatarra y la intensidad de las emisiones de CO₂, teniendo en cuenta las limitaciones de información propias de la comparación de datos entre distintas empresas y regiones.

5.1. Evidencia sobre la relación entre I+D+i y avance en economía circular y la gestión de chatarra (Evaluación de H1)

La hipótesis 1 (H1) pretende que la inversión estratégica en I+D+i por parte de las empresas siderúrgicas impulsa significativamente su avance hacia los objetivos de la Economía Circular, mejorando tanto la eficiencia en la gestión y valorización de la chatarra ferrosa como la sostenibilidad general de sus procesos productivos. El análisis comparativo de los nueve casos de estudio proporciona una evidencia sólida que apoya esta hipótesis, aunque con matices importantes relacionados con el punto de partida tecnológico y estratégico de cada empresa.

5.1.1. Análisis cualitativo comparativo

Se observa un patrón claro entre las empresas que demuestran un compromiso más explícito y estratégico con la I+D+i orientada a la sostenibilidad y la economía circular que son también aquellas que presentan planes más ambiciosos y acciones más concretas para transformar sus operaciones, estas se pueden clasificar en 4 grupos:

Líderes en transformación: (Alta inversión en I+D+i, pero en puntos estratégicos) Empresas como SSAB y Voestalpine destacan por vincular directamente su alta inversión en I+D+i, cuantificada en Voestalpine con 243 millones de USD y demostrada por la magnitud de los proyectos en SSAB, con programas transformadores como lo son "greentec Steel", la transición a HYBRIT y la incorporación de hornos eléctricos EAF. Su I+D no solo busca optimizar lo existente, sino habilitar un cambio de tendencia hacia la producción libre de fósiles y una gestión avanzada de la chatarra con programas como Smart sorting en Voestalpine y SSAB Zero™ basado 100% en chatarra.

Gigantes en Transición: (Alto I+D+i en sectores diversificados) ArcelorMittal, POSCO y HBIS Group, a pesar de partir de una gran base tradicional de altos hornos BOF, muestran inversiones explícitas significativas como él de 1.000 millones de USD en descarbonización que ha invertido ArcelorMittal desde 2018 o implícitas por la escala de sus proyectos de hidrogeno, captura de gases CCUS, su integración de hornos eléctricos EAF y estructuras de I+D+i robustas como la red global en innovación de ArcelorMittal, N.EX.T Hub de POSCO y las 39 plataformas globales establecidas por HBIS, donde su I+D+i impulsa una estrategia multifacética hacia la economía circular, aumentando la capacidad con sus hornos eléctricos EAF, desarrollando las rutas de

uso de hidrógeno (HyREX, HBIS), la integración de programas de captura de CO2 CCUS, mejorando el uso de chatarra en altos hornos BOF y buscando la valorización de subproductos.

Líderes en hornos eléctricos EAF: (I+D+i enfocada en optimización) Nucor, Gerdau y Radius Recycling, cuyo modelo ya es intrínsecamente circular basado en hornos eléctricos EAF y altos ratios de reciclaje, enfocan su I+D+i más en la optimización continua de este modelo, buscando la eficiencia del EAF, mejoramiento del procesamiento y calidad de la chatarra con programas como David J. Joseph Company (DJJ), limpieza en Gerdau y 3PR™ en Radius, logrando el aseguramiento del suministro por medio de DRI en Nucor, red de reciclaje en Gerdau y en Radius, y desarrollo de productos de valor añadido como Econiq™, acero limpio y libre carbón. Aunque la inversión en I+D+i disruptiva pueda ser menos visible que en los grupos anteriores o no desglosada, la innovación continua es clave para su liderazgo y eficiencia.

Caso Particular: Tata Steel muestra una inversión en I+D+i significativa de 112 millones de USD y proyectos ambiciosos como Hlsarna, hidrogeno y FerroHaat, con una meta de 5 millones de toneladas por año de reciclaje, pero enfrenta el reto de aplicar esta innovación a gran escala en geografías y activos muy diversos como India versus Europa, lo que puede ralentizar el impacto visible en la eficiencia global de economía circular y la consecución de chatarra en el corto plazo.

5.1.2. Análisis cuantitativo descriptivo (Limitado):

La información comparable sobre la inversión en I+D+i dentro de la industria siderúrgica es escasa. Algunas empresas proporcionan datos concretos, como Voestalpine (243 millones de USD en el año fiscal 23/24) y Tata Steel (112 millones de USD en el año fiscal 23/24). ArcelorMittal informó de una inversión de 1.000 millones de USD en proyectos de descarbonización desde 2018, pero no detalla su gasto anual total en I+D. Para otras compañías como HBIS Group, SSAB (51 millones de USD en 2024), Nucor (594 millones de USD en 2024), Gerdau, Radius (300 millones de USD desde 2019) y POSCO, no se dispone de cifras de gasto en I+D comparables o desglosadas. Sin embargo, se infiere cualitativamente una inversión significativa a través de la magnitud de sus proyectos y su enfoque estratégico.

A pesar de esta limitación de datos, se percibe una clara tendencia: las empresas que evidencian cualitativamente una mayor inversión y un enfoque estratégico en I+D+i (SSAB, Voestalpine, ArcelorMittal, POSCO, HBIS) son las que están implementando las transformaciones más significativas hacia modelos productivos circulares y de

bajas emisiones de carbono. Esto incluye cambios esenciales en la gestión de sus materias primas, priorizando el uso de chatarra y DRI verde. Por otro lado, las empresas líderes en la tecnología EAF (Nucor, Gerdau, Radius), si bien su inversión en I+D disruptiva podría ser menos evidente, demuestran la importancia de la innovación continua para mantener la eficiencia en un modelo de producción que ya es inherentemente circular.

5.1.3. Discusión y evaluación final de H1

La hipótesis H1 está respaldada por la evidencia empírica, mostrando una correlación directa entre la inversión en I+D+i y el avance hacia la economía circular. Las empresas que priorizan la I+D+i logran optimizar la gestión de chatarra y reducir su impacto ambiental, destacando la importancia de la innovación tecnológica en la transición hacia modelos sostenibles, donde la I+D+i actúa como:

Facilitador tecnológico: Permitiendo el desarrollo de instrumentos fundamentales, tales como nuevos protocolos de procesamiento de material y una clasificación más eficiente.

Impulsor estratégico: permite a las organizaciones plantearse y ejecutar transformaciones sustanciales, como la migración hacia hornos de arco eléctrico (EAF) o la incorporación del hidrógeno (H2).

Agente de optimización: Posibilita la mejora continua de la eficiencia de los modelos ya establecidos, mediante la optimización de los hornos eléctricos EAF y la logística de los residuos metálicos.

Cabe destacar que el impacto de la I+D+i en los resultados de eficiencia actuales puede diferir según el punto de partida de cada entidad en función de si emplean altos hornos BOF o hornos eléctricos EAF y de si la orientación de la I+D se centra en la optimización gradual o en una transformación a largo plazo, sin embargo, en todas las circunstancias analizadas, la I+D+i surge como un componente indispensable de sus estrategias de sostenibilidad y economía circular.

5.2. Evidencia sobre I+D+i y tasas de uso de chatarra (Evaluación de H2)

En la hipótesis 2 (H2) se plantea una correlación positiva observable entre la inversión declarada en I+D+i y el nivel de uso de chatarra ferrosa en las empresas siderúrgicas estudiadas. El análisis comparativo de los casos respalda esta hipótesis, no obstante,

esta relación se ve significativamente influenciada por el modelo productivo principal ya sea por horno eléctrico EAF o alto horno BOF y la orientación de la siderúrgica frente a su estrategia de I+D+i ya sea para optimización o enfocada a transformación.

5.2.1. Análisis cuantitativo descriptivo sobre tasas de uso de chatarra

La disponibilidad de datos públicos consistentes y comparables sobre las tasas exactas de uso de chatarra para todas las empresas y años es limitada, sin embargo, basándonos en la información recopilada de los documentos y la investigación externa, podemos establecer categorías generales:

Alto uso mayor al 70%: Común en productores basados principalmente en hornos de arco eléctrico (EAF).

Nucor: Consistentemente reporta tasas superiores al 70-80%.

Gerdau: Tasa promedio del 71%.

Radius Recycling: Produce acero en hornos eléctricos EAF a partir de su propia chatarra, con tasas superiores al 95%.

Uso moderado y/o variable pero creciente o con potencial: Empresas con operaciones mixtas o en proceso de transición.

SSAB: Sus operaciones con hornos eléctricos EAF en EE.UU tienen una alta tasa de uso superior al 97%, se espera que la transformación nórdica a hornos eléctricos EAF aumente el uso total global y continuar con su programa SSAB Zero™ donde utiliza 100% chatarra.

Voestalpine: Su tasa global actual es de aproximadamente 27.4%, pero las operaciones de horno eléctrico EAF para aceros especiales usan más chatarra y la transición a los nuevos hornos EAF en Linz y Donawitz aumentará significativamente esta tasa.

ArcelorMittal: Su proporción global de hornos eléctricos EAF es del 25% y está en aumento, recicla 30 millones de toneladas por año, pero la tasa global exacta es difícil de determinar, aunque la tendencia es creciente.

Bajo uso por el predominio BOF, pero con planes en I+D para aumentar:

Tata Steel: Su uso actual es bajo debido al predominio de altos hornos y convertidores BOF, con un objetivo del 15%, tienen planes de expansión de hornos eléctricos EAF y un negocio de reciclaje de 5 millones de toneladas por año.

POSCO: Su uso actual también es bajo en BOF, pero están invirtiendo en I+D para el proyecto OTBB para aumentarlo, además, tienen una inversión clave en un futuro de un horno eléctrico EAF con proyección de 2.5 millones de toneladas por año.

HBIS Group: Su modelo dominante es el alto horno BOF, pero investigan el hidrógeno, el DRI y horno eléctrico EAF, donde el DRI sustituye a la chatarra de alta calidad, aunque optimizan el uso de chatarra en sus hornos BOF.

5.2.2. Relación con I+D+i

Empresas EAF: En Nucor, Gerdau y Radius, la alta tasa de uso de chatarra es inherente a su modelo de hornos eléctricos EAF, la I+D+i se enfoca en mantener y optimizar esta alta tasa buscando la eficiencia en sus hornos eléctricos EAF, el aseguramiento del suministro, el procesamiento avanzado de la chatarra y la gestión calidad de esta misma. La I+D+i sostiene y mejora la alta utilización de chatarra.

Empresas en transición de BOF a EAF o hidrógeno: En SSAB, Voestalpine, ArcelorMittal, POSCO y Tata Steel, la I+D+i es el habilitador clave del aumento futuro en el uso de chatarra, sus inversiones en I+D están directamente ligadas a la construcción de nuevos hornos EAFs, el desarrollo de tecnologías de hidrógeno que alimentan los hornos EAFs que también usan chatarra, la mejora de la clasificación y el uso de chatarra de menor calidad y el desarrollo de la cadena de suministro. En estos casos, la correlación positiva entre I+D+i y tasa de uso de chatarra es prospectiva y causal.

Caso HBIS: Muestra una relación más compleja, ya que su I+D principal es el hidrógeno para genera DRI el cual sustituye a la chatarra de alta calidad, aquí, la I+D busca una ruta limpia que podría no maximizar la tasa de uso de chatarra externa.

5.2.3. Discusión y evaluación final de H2

La hipótesis H2 se ve respaldada por la evidencia, que muestra una correlación positiva entre la I+D+i y el uso de chatarra, en las empresas con hornos de arco eléctrico EAF, la I+D+i perfecciona las tasas de utilización ya elevadas. Por otro lado, en las empresas con hornos altos y convertidores de oxígeno básico BOF en proceso de cambio, la I+D+i fomenta la estrategia e inversión necesarias para un aumento considerable en el consumo futuro de chatarra. Si bien la correlación no es inmediata ni homogénea, la dirección general es evidente, una mayor dedicación e inversión en I+D+i se relaciona con tasas de uso de chatarra más altas en el presente en modelos EAF optimizados o con proyectos definidos y viabilizados tecnológicamente para incrementarlas sustancialmente en modelos BOF en transformación.

5.3. Evidencia sobre I+D+i y la reducción de emisiones de CO2 (Evaluación de H3)

La Hipótesis 3 (H3) sugiere que existe una correlación negativa observable entre la inversión reportada en I+D+i con foco en sostenibilidad, la descarbonización y la intensidad de emisiones de CO2 de las empresas siderúrgicas analizadas. El comparativo de los casos respalda firmemente esta hipótesis, demostrando que la I+D+i es el principal promotor para la disminución de la huella de carbono en el sector, aunque los resultados medibles dependen de la implementación y escala de las tecnologías desarrolladas.

5.3.1. Análisis cuantitativo descriptivo de la intensidad de emisiones de CO2

La información pública actualizada y estandarizada sobre la intensidad de las emisiones tonelada de CO2 por tonelada de acero (tCO2/t acero) es escasa y requiere un análisis cuidadoso. No obstante, es posible deducir ciertos rangos y tendencias.

Empresas con hornos eléctricos EAF: Muestran consistentemente una baja intensidad de emisiones inherente a su proceso típicamente menores al 1.0 tonelada de CO2 por tonelada de acero en Scope 1+2 si la red eléctrica es relativamente limpia.

Nucor: Aproximadamente 1.086 tCO2e/t (incluye Scope 3 parcialmente) en 2023.

Gerdau: Aproximadamente 0.91 tCO2e/t (Scope 1+2) en 2023.

Radius Recycling: Se espera baja intensidad para 2024 del 30%, comercializan acero "bajo en carbono".

Empresas con altos hornos BOF y/o mixtas: Presentan intensidades más altas promedio global BOF aproximadamente 2.3 tCO2/t acero según World Steel Association, (2024), pero aquellas con fuertes programas de I+D+i en descarbonización muestran metas ambiciosas y resultados iniciales de reducción.

SSAB: Objetivo de eliminar emisiones con HYBRIT y hornos eléctricos EAF. SSAB Zero™ tiene virtualmente 0 emisiones fósiles.

Voestalpine: Metas SBTi (Science Based Targets initiative) reducción de un 30% Scope 1+2 para 2029 vs 2019 vía hornos eléctricos y uso de hidrógeno.

ArcelorMittal: Reducción aproximada de un 50% Scope 1+2 absolutas desde 2018 y su meta es reducir un 25% a 35% para 2030.

POSCO: la meta que tiene con su programa Net Zero 2050 es cero emisiones lográndolo vía HyREX, hornos eléctricos EAF y captura de gases CCU.

HBIS Group: su ruta de hidrógeno, el uso de DRI y su horno eléctrico EAF de muy bajas emisiones en desarrollo, con metas de reducción de un 10% para 2025, y un 30% para 2030.

Tata Steel: I+D en HIsarna e hidrógeno tiene un potencial de reducción de 20% de las metas establecidas en su ESG.

5.3.2. Relación con I+D+i

La conexión entre la I+D+i enfocada en la descarbonización y la reducción, actual o esperada, de emisiones es directa e innegable.

Tecnologías Habilitadas por I+D: Las empresas con hornos de arco eléctrico (EAF) emiten menos CO₂ gracias a esta tecnología, pero es resultado de una innovación pasada, su I+D+i actual se centra en optimizar la eficiencia, integrar energías renovables y el uso de hierro de reducción directa (DRI) para mantener o mejorar su perfil de bajas emisiones.

Transformación Impulsada por I+D: En las empresas con altos hornos y convertidores de oxígeno (BOF), la I+D+i es indispensable para lograr reducciones significativas de emisiones, estas inversiones en I+D hacen posible el desarrollo e implementación de tecnologías como EAFs, rutas de producción con hidrógeno y captura, utilización y almacenamiento de carbono (CCUS), sus ambiciosas metas de descarbonización se basan firmemente en sus programas de I+D+i.

Evidencia de la Correlación: Se observa que las empresas con los programas de descarbonización más ambiciosos y con tecnología de punta como SSAB, Voestalpine, HBIS, POSCO, ArcelorMittal son las que informan de las mayores inversiones en el sector o han establecido las metas de reducción más exigentes. ArcelorMittal ejemplifica esto con una notable reducción absoluta de emisiones que ya ha alcanzado una reducción del 50%, directamente relacionada con dichas inversiones.

5.3.3. Discusión y evaluación final de H3

La información analizada respalda significativamente la hipótesis H3, la cual pretende una correlación negativa entre la I+D+i en sostenibilidad y las emisiones de CO₂. Se observa que las siderúrgicas que realizan inversiones estratégicas en I+D+i para la creación e implementación de tecnologías de bajas emisiones de carbono (como en hornos de arco eléctrico existentes) son las que consiguen o proyectan conseguir las

mayores disminuciones en su intensidad de emisiones (en el caso de altos hornos con convertidor de oxígeno), donde la I+D+i se mantiene como un elemento crucial para la transformación tecnológica profunda requerida para la descarbonización.

5.4. Evidencia sobre I+D+i y gestión de calidad de la chatarra (Evaluación de H4)

La hipótesis 4 (H4) establece que las empresas siderúrgicas con una inversión y enfoque significativos en I+D+i para tecnologías de clasificación y procesamiento de chatarra demuestran una gestión cualitativamente superior de la calidad de este material y sus impurezas, el análisis cualitativo comparativo de los casos examinados proporciona un sólido respaldo a esta hipótesis, evidenciando una relación directa entre la inversión en innovación tecnológica y la sofisticación de las prácticas de gestión de la calidad de la chatarra.

5.4.1. Análisis cualitativo comparativo

La gestión de la calidad de la chatarra presenta distintos niveles de sofisticación tecnológica, directamente relacionados con la inversión en I+D+i específica de cada empresa de los cuales podemos identificar tres categorías principales:

Liderazgo tecnológico en clasificación y procesamiento (Alto I+D+i):

Empresas como Voestalpine destacan por su I+D de vanguardia en clasificación inteligente ("Smart sorting") mediante tecnologías como LIBS (Laser-Induced Breakdown Spectroscopy) y la IA con su proyecto KiRAMET, buscando valorizar chatarra posconsumo de baja calidad. Además de esto su colaboración con Mercedes-Benz y TSR es un ejemplo de este enfoque.

Radius Recycling invierte continuamente en tecnologías avanzadas de recuperación XRF (X-ray fluorescence) mejorando la densidad, y con su programa 3PR™ (Promoting Preservation of Resources) para optimizar el valor y la pureza de la chatarra, especialmente en flujos complejos.

El Grupo HBIS ha desarrollado sistemas inteligentes de inspección de calidad de chatarra basados en inteligencia artificial.

Gestión avanzada a través de integración y procesos (Innovación en modelo y/o proceso):

Nucor ejemplifica la integración vertical con su empresa subsidiaria The David J. Joseph Company (DJJ), la implementación de estrictos requisitos de limpieza, el uso

de sistemas digitales como ScrapConnect™ y la utilización estratégica de DRI como diluyente de alta pureza para asegurar la calidad.

Gerdau se centra en la producción de "acero limpio", invirtiendo específicamente en líneas de limpieza de chatarra y empleando tecnologías de procesamiento avanzadas.

Enfoque en desarrollo o con menos detalle:

ArcelorMittal reporta actividades de I+D en recuperación y clasificación, habiendo adquirido empresas de reciclaje de metales, como Riwald Recycling (Países Bajos), John Lawrie Metals (Reino Unido) y activos de ALBA International Recycling (Alemania), integrando así verticalmente parte de su cadena de suministro de chatarra, si bien se enfoca en el uso de chatarra de baja calidad en hornos BOF, proporciona menos información y detalles sobre sus propias tecnologías de clasificación.

SSAB, a través de su iniciativa SSAB Zero™, exige un alto control de calidad, no obstante, su principal esfuerzo de I+D se centra en HYBRIT, dependiendo de socios como Stena Metall para el suministro de chatarra de calidad.

POSCO dedica I+D+i a incrementar el uso de chatarra en hornos BOF y a valorizar subproductos como las escorias, sin embargo, muestra un menor énfasis en la clasificación avanzada, priorizando su futuro enfoque en HyREX y hornos eléctricos EAF.

Tata Steel opera una planta de procesamiento con equipos mecanizados y marcas propias, además de utilizar la aplicación FerroHaat para mejorar el suministro. No obstante, se observa menos evidencia de I+D en tecnologías de clasificación de punta.

5.4.2. Discusión y evaluación final de H4

La evidencia cualitativa comparativa respalda con claridad la hipótesis H4, ya que las compañías con mayor dedicación o estrategia de I+D+i centrada en tecnologías para la clasificación, el procesamiento y el análisis de la chatarra como Voestalpine, Radius, HBIS, o aquellas que han introducido innovaciones en su modelo para asegurar la calidad de esta como Nucor y Gerdau, tienden a presentar una gestión cualitativamente más sofisticada y proactiva de la calidad de la chatarra.

5.5. Evidencia sobre las barreras tecnológicas persistentes (Evaluación de H5)

La Hipótesis 5 (H5) sostiene que las restricciones propias de las tecnologías actuales para clasificar y separar chatarra mixta en particular la posconsumo representan un obstáculo constante que disminuye el efecto positivo de la inversión general en I+D+i sobre los niveles máximos de reciclaje que se pueden lograr y la calidad del acero final, incluso en las compañías más innovadoras. El estudio comparativo de los casos analizados indica un sólido respaldo para esta hipótesis.

5.5.1. Análisis cualitativo comparativo

A pesar de los avances tecnológicos en la clasificación y el procesamiento de chatarra, como lo demuestran las continuas inversiones en I+D+i de las empresas líderes como Voestalpine y Radius Recycling, la heterogeneidad y la contaminación adherida al material siguen siendo desafíos significativos para su uso generalizado y universal en todos los grados de acero.

La considerable inversión estratégica de numerosas compañías siderúrgicas importantes como Nucor, SSAB, Voestalpine, POSCO y HBIS en la producción de DRI (hierro de reducción directa) y HBI (hierro briqueteado en caliente), particularmente con base en hidrógeno, nos muestra indirectamente las limitaciones percibidas de la chatarra. Si bien esta inversión responde a la necesidad de reducir emisiones, también se justifica por la demanda de una fuente de hierro virgen de alta pureza y composición controlada, que permita que este material diluya los contaminantes presentes en la chatarra y asegurar una producción consistente de aceros de alta calidad. La magnitud de estas inversiones sugiere que la chatarra disponible y las tecnologías de procesamiento actuales no son suficientes por sí solas para satisfacer las necesidades de la industria.

El énfasis en estrictas políticas de aceptación de chatarra, las inspecciones internas rigurosas llevadas a cabo por las acerías y las colaboraciones específicas para el tratamiento de flujos de chatarra complejos como la de Voestalpine con Mercedes Benz y TSR evidencian que la calidad de la chatarra sigue siendo una preocupación activa, para que los mecanismos de control y las soluciones a medida sean necesarias para complementar las tecnologías de clasificación estándar y asegurar la calidad requerida en la producción de acero.

5.5.2. Discusión y evaluación final de H5

Pese a la I+D+i que han tenido las siderúrgicas, la hipótesis H5 se ve sólidamente respaldada por la evidencia de las limitaciones tecnológicas en el tratamiento eficiente de chatarra compleja (heterogénea y contaminada) siguen siendo un obstáculo importante, ya que esta barrera restringe el máximo potencial de reciclaje y calidad que se podría alcanzar solo con chatarra, lo que fomenta la innovación continua en la clasificación y de manera crucial, la adopción estratégica de materias primas vírgenes de alta pureza como el DRI. Esto último se considera un complemento necesario para satisfacer las rigurosas demandas de calidad y volumen del sector.

5.6. Síntesis general de resultados y hallazgos clave

El análisis empírico comparativo de los nueve casos de estudio valida las cinco hipótesis iniciales, estos revelan patrones consistentes sobre la importancia de la I+D+i y la chatarra en la transición hacia una economía circular dentro del sector siderúrgico.

Hallazgos Principales:

La I+D+i se presenta como un motor esencial para progresar hacia la economía circular, que mejora la eficiencia en la utilización de chatarra y logra la descarbonización (H1, H2, H3).

Se observa una relación positiva entre la inversión en I+D+i y el aprovechamiento de la chatarra lo que se manifiesta tanto en la optimización de altas tasas de uso en hornos de arco eléctrico EAF como en la posibilidad de incrementar su empleo futuro en modelos de alto horno BOF en proceso de transición (H2).

Existe una fuerte correlación negativa entre la I+D+i enfocada en la descarbonización y las emisiones de CO₂, donde la innovación tecnológica surge como un factor crucial para alcanzar las metas climáticas establecidas (H3).

La I+D+i centrada en tecnologías de clasificación y procesamiento contribuye a mejorar la gestión de la calidad de la chatarra (H4).

A pesar de los avances, las limitaciones tecnológicas en el tratamiento de chatarra compleja continúan representando un obstáculo importante. Esta situación impulsa la necesidad de una I+D continuada y por el momento la adopción de hierro de reducción

directa (DRI) o hierro briqueteado en caliente (HBI) como materiales complementarios (H5).

Patrones Clave:

Se consolidan dos vías estratégicas principales, la optimización del modelo de hornos eléctricos EAF existente versus la transformación radical del modelo de alto horno BOF.

La tecnología es el habilitador central, con hornos eléctricos EAF más eficientes, la incorporación de hidrógeno, la implementación de captura de gases CCUS y clasificación avanzada como focos clave de I+D+i.

La calidad y consistencia de la chatarra sigue siendo un cuello de botella universal que condiciona las estrategias de materia prima y requiere soluciones innovadoras ya sean tecnológicas y/o de integración y colaboración.

La inversión requerida es masiva, especialmente para la transformación de los altos hornos BOF, subrayando la importancia de marcos políticos y financieros favorables.

A continuación, la tabla 3 presenta un resumen comparativo de los casos, incluyendo las estimaciones cualitativas y cuantitativas disponibles:

Siderúrgica	Modelo principal (BOF/ EAF)	Nivel de I+D+i (Estimado)	Enfoque en I+D+i principal	Tasa de uso de chatarra (Estimada)	Intensidad CO2 (Estimada)	Gestión de calidad de chatarra (Sofisticación)	Estrategia adicional DRI/HBI/H2/CCUS
Tata Steel	Dominado por BOF (India, Port Talbot UK). Planes de expansión vía EAF (productos largos).	₹953 crore (aprox. 112 millones de USD) para el año 2023-2024.	Descarbonización (Tecnología Hlsarna, Hidrógeno), sostenibilidad, digitalización (FerroHaat), creación de nuevos productos de acero con mayor chatarra, Análisis Ciclo de Vida.	14.36% (2023-2024). Objetivo BOF 15%. Objetivo negocio reciclaje 5Mt/año para 2030.	Alta, pero en reducción (Hlsarna tiene potencial reducción 20%).	Plantas de procesamiento, marcas propias (Tata FerroBaled®, Tata FerroShred®), plataforma digital FerroHaat, selección basada en criterios ambientales y Análisis Ciclo de Vida.	Tecnología Hlsarna (potencial CCUS), investigación activa en uso de Hidrógeno.

ArcelorMittal	Mixto. 2024: 43.5 Mt BOF, 14.4 Mt EAF (25% EAF). Transición estratégica hacia EAF.	\$1.000M USD en descarbonización (2018-2023). \$299M USD en I+D (2023). XCarb® Innovation Fund: hasta \$100M/año.	Descarbonización (H2-DRI, Smart carbón - Torero, IGAR, Carbalyst®, CCS), economía circular, productos sostenibles, eficiencia procesos, digitalización (IA).	Aumentando con expansión EAF. Adquisiciones recicladoras añaden 1.2M ton/año capacidad procesamiento. (Porcentaje global no especificado).	Reducción de emisiones absolutas CO2 ~46% desde 2018. (1.75tCO2e/tcs (Grupo, Scope 1+2, ajustado 2024)).	Tecnología avanzada para separar y procesar. I+D para optimizar recuperación y clasificar chatarra baja calidad para BOF (pre-fusión). Modelos aprendizaje automático, monitoreo densidad.	Smart carbón (incluye CCS), Innovative-DRI (transición a H2 verde), planta electrólisis Voltearon™.
Nucor	Casi exclusivamente EAF (mini-mills).	No hay cifra global especificada. Inversión \$594M USD en proyectos de crecimiento en 2024 (incl. adquisición).	Optimización continua modelo EAF, gestión materias primas, diversificación productos, producción hierro sin carbono (colabora con Electra), acero Econiq™.	Muy alta, 70-80%. 2022: usó ~25.4M toneladas. Complementa con DRI propio.	Significativamente menor que promedio BOF. Programa Net-Zero para 2050. (tCO2/t no especificado).	Red de adquisición/procesamiento (DJJ). Requisitos limpieza. ScrapConnect™. Producción propia DRI.	Producción propia DRI. Colabora con Electra (hierro sin carbón). Explorando nuclear, PPA solar y eólica, CCS (con ExxonMobil).
Radius Recycling	Reciclaje de metales con acería propia operando con EAF (Cascade Steel).	\$300M USD desde 2019 en mejoras (incl. \$135M en AMRTS). Gasto capital \$76M para 2024, proyección de \$60M 2025.	Mejorar eficiencia de clasificación y separación (AMRTS, 3PR™), optimizar consumo energía y agua, soluciones reciclaje valor añadido, producción acero bajo Carbono.	Aproximadamente 95% para Cascade Steel. Procesó 4.9M toneladas en 2024.	Bajas emisiones. Reducción 30% Scope 1+2 (reciclaje, 2024 vs 2019). Evitó 5.5M toneladas CO2e en 2024.	Inversión continua en tecnologías avanzadas (XRF, Eddy, IA/IR). Iniciativa 3PR™. Políticas de aceptación rigurosas. Sistemas AMRTS.	Optimización eficiencia energética, diésel renovable, electrificación equipos, compra electricidad 100% libre (reciclaje). Explorando CCS acería.
SSAB	Mixto (BOF nórdicos, EAF USA). Transformación nórdica a EAF (chatarra y DRI de H2 verde-HYBRIT).	488M SEK (51M USD) en 2024. Inversiones transformación Oxelösund (648M USD) y Luleå (5.1MM USD).	Eliminación emisiones CO2 (HYBRIT), aceros libres de fósiles (SSAB Zero™), optimización procesos.	Variable. EAF USA 97%. Nuevos EAF nórdicos: mezcla chatarra/DRI. SSAB Zero™: 100% chatarra.	Reducción 7.1% (Scope 1,2,3) 2018-2024. SSAB Zero™ con cero emisiones fósiles netas.	Cooperación estratégica con Stena Metall para chatarra de alta calidad. Clasificación según estándares.	Tecnología HYBRIT (H2 verde para DRI), almacenamiento subterráneo H2.

POSCO	Mayormente BOF. Nuevo EAF (2.5Mt/a, Gwangyang, inicia en 2026) para mezcla chatarra/arrabio.	No hay cifra consolidada, POSCO N.EX.T Hub. Colaboraciones internacionales.	Acero basado en H2 (HyREX), EAF, CCU, baterías, H2 bajo carbón, materiales avanzados.	Consumo 2023: 7.25Mt. Objetivo aumentar compras 27% para 2030. Tecnologías OTBB y pre-fusión para BOF. Nuevo EAF usará chatarra.	2.02 tCO2eq/ton en 2023 (reducción 3.3% vs 2017-2019).	Tecnologías XRF y LIBS (vía CCTV). Valorización escoria. Desarrollo Low HMR. Planes centros propios recolección/procesamiento.	HyREX (H2 para DRI, planta piloto y escala real 2027), CCU, tecnologías producción H2 limpio.
Voestalpine AG	Mixto (BOF; EAF). Transición BOF a EAF ("greentec Steel").	€214M EUR (243M USD) año 2023-2024. Inversión EAFs "greentec Steel" (1ª etapa): €1.5MM EUR (1.7.MM USD)	"greentec Steel" (EAF con renovables), rutas H2 (HYFOR, SuSteel), clasificación inteligente chatarra (KiRAMET, IA, LIBS), aceros alto rendimiento.	27.4% en 2023 (general). Aumentará con nuevos EAFs (usarán chatarra, arrabio, DRI/HBI). Objetivo aumentar 50% con materiales secundarios para 2030.	SBTi: reducir Scope 1+2 en 30%, Scope 3 en 25% para 2029 (vs 2019). (tCO2/t no especificado).	Vanguardia I+D clasificación inteligente (KiRAMET, IA) para chatarra posconsumo. Proyecto piloto Mercedes-Benz/TSR.	HYFOR (H2 para DRI fino, HBI), SuSteel (plasma H2). EAFs usarán DRI/HBI.
HBIS Group	Principalmente BOF. Adopción metalurgia H2 (HyMEX) y EAF.	No hay cifra específica. Sistema I+D "3+1". 39 plataformas globales I+D+i.	Metalurgia H2 (HyMEX), CCUS, energía verde, productos bajas emisiones, plataforma WisCarbon, IA para calidad chatarra.	EAF usan chatarra y DRI de H2. Planta Shisteel 100% chatarra y EAF. Tecnologías para BOF. DRI puede sustituir chatarra. (Porcentaje global no especificado).	HyMEX reduce CO2 en un 70%. (tCO2/t no especificado).	Sistemas inteligentes inspección calidad (IA). Plataforma transacción chatarra (big data). Reciclaje escoria y residuos con zinc.	HyMEX (DRI con gas horno coque + EAF). Tecnología CCUS (captura y refino CO2).

Gerdau S.A.	Fuertemente orientado a EAF (70% producción).	No hay cifra específica. Gerdau Next. Colaboraciones.	Optimización EAF, procesamiento chatarra, calidad acero (acero limpio), nuevas áreas negocio (Gerdau Next - grafeno, renovables), Industria 4.0.	Alta, 71%. Transforma más de 11M ton/año.	Baja 0.91 tCO2e/t acero en 2023.	Amplia red centros acopio/reciclaje. Soluciones logísticas. Auditorías. Gemelos digitales para optimizar uso de materias primas.	Foco en EAF con chatarra y energía renovable (Newave Energía).
--------------------	---	---	--	---	----------------------------------	--	--

Tabla 3. Creación propia basada en fuentes consultadas para los 9 casos de estudio.

La síntesis presentada y la tabla comparativa adjunta ofrecen una perspectiva general de los hallazgos empíricos obtenidos del análisis de los casos estudiados, estableciendo así el fundamento para las conclusiones del trabajo.

6. Conclusiones

Este trabajo final de máster se centró en analizar a profundidad el rol de la chatarra ferrosa como motor de la economía circular en la industria siderúrgica a nivel global, destacando la influencia crucial de la Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+i). El objetivo principal fue investigar la conexión o relación entre la inversión estratégica en I+D+i realizada por las principales empresas siderúrgicas, la su habilidad para optimizar la gestión de la chatarra y si esto mejora la sostenibilidad de sus operaciones, para lograr esto se adoptó una metodología mixta, combinando un análisis cualitativo detallado de nueve casos de estudio de empresas líderes mundiales, con la recopilación y análisis descriptivo de indicadores cuantitativos clave, utilizando fuentes secundarias verificadas de ámbito académico, corporativo y sectorial.

El análisis empírico comparativo de los casos de estudio de la sección anterior arrojó conclusiones significativas en relación con las hipótesis planteadas:

H1 (I+D+i impulsa la economía circular optimizando la gestión de chatarra): Esta hipótesis queda confirmada. La evidencia respalda sólidamente que la I+D+i es un motor esencial para la transición de la industria siderúrgica hacia la economía circular mostrando que las empresas con mayor compromiso estratégico y/o inversión en I+D+i demuestran una mayor capacidad y ambición para implementar prácticas circulares, optimizar la gestión de la chatarra y abordar la descarbonización. La I+D+i

actúa como habilitador tecnológico y motor estratégico, tanto para mejorar modelos existentes en hornos eléctricos (EAF) como para transformar modelos tradicionales de alto horno (BOF).

H2 (I+D+i correlaciona con Uso Chatarra): Confirmada con excepciones. Se observa una correlación positiva, para los líderes con siderúrgicas semi integradas de hornos eléctricos EAF, donde la innovación continua es crucial para mantener altas tasas de reciclaje de manera eficiente, pero en las siderúrgicas integradas o en transición, la I+D+i es el factor clave que permite y dirige la transición hacia tecnologías más limpias ya sea con la integración de hornos eléctricos EAFs y/o con rutas de uso de hidrógeno que aumentarían significativamente el uso futuro de la chatarra.

H3 (I+D+i correlaciona negativamente con CO2): Confirmada. La evidencia apoya firmemente una correlación negativa, donde las empresas que invierten estratégicamente en I+D+i para la descarbonización (EAF eficientes, hidrógeno, CCUS, renovables) logran o proyectan las mayores reducciones en su intensidad de emisiones. La I+D+i es indispensable para el cambio tecnológico radical que requiere la descarbonización del sector.

H4 (I+D+i específica mejora la gestión y calidad de la chatarra): Confirmada. Los casos demuestran que empresas con I+D+i específica en tecnologías de clasificación avanzada como sensores, la IA o en modelos de control integrado de la cadena de suministro presentan una gestión cualitativamente superior a los desafíos asociados a la calidad y contaminación en la chatarra.

H5 (Barreras tecnológicas persistentes): Confirmada. A pesar de los avances, las limitaciones tecnológicas en el procesamiento eficiente y eficaz de chatarra heterogénea principalmente las de posconsumo siguen siendo una barrera significativa, esto se evidencia por la continua inversión en I+D+i en clasificación, purificación o limpieza y por la inversión estratégica generalizada en DRI y/o HBI como materia prima complementaria de alta pureza para gestionar las limitaciones de la chatarra.

Los hallazgos de este estudio tienen implicaciones relevantes en los ámbitos teórico, práctico y político:

Implicaciones teóricas: El estudio refuerza la aplicabilidad de los principios de la economía circular en industrias pesadas y de capital intensivo como la siderurgia, se señala la naturaleza sistémica de la transición, donde la innovación tecnológica en I+D+i debe complementarse con cambios en modelos de negocio, cadenas de suministro y marcos regulatorios. También evidencia la complejidad de cerrar los ciclos

de materiales ante limitaciones en la calidad de los flujos de retorno de estos, en especial para la chatarra que llega de posconsumo, lo que exige soluciones tecnológicas avanzadas y/o el uso complementario de materias primas vírgenes producidas de forma sostenible como el hidrógeno o el DRI, esta coexistencia de estrategias centradas en maximizar el reciclaje de chatarra con otras basadas en la producción limpia de materia prima virgen ilustra la necesidad de enfoques adaptados al contexto actual y a las limitaciones reales de los materiales secundarios.

Implicaciones Prácticas: Para las siderúrgicas, integrar la I+D+i como estrategia principal es crucial para la sostenibilidad de su negocio y la circularidad, esto implica evaluar continuamente el equilibrio entre maximizar el uso eficiente de chatarra sea invirtiendo en la cadena de suministro o mejorando el procesamiento, y por otro lado desarrollando o adoptando rutas tecnológicas bajas en carbono que complementen o superen las limitaciones de la chatarra. La gestión proactiva de la cadena de suministro de chatarra mediante integración vertical, asociaciones, plataformas digitales y la colaboración en I+D+i son factores clave para el éxito.

Implicaciones políticas: Los hallazgos refuerzan la necesidad de políticas públicas proactivas y coherentes para acelerar la transición a una economía circular y baja en carbono de la siderurgia, que creo se pueden agrupar en 5 aspectos a desarrollar, primero, incentivos específicos para incrementar la I+D+i en tecnologías de reciclaje avanzado, producción limpia (H₂, CCUS) y eficiencia energética. Segundo, mecanismos que fomenten el reciclaje de chatarra de calidad, como estándares claros, apoyo a la infraestructura de recogida y clasificación en especial en posconsumo y posiblemente mecanismos de mercado que reconozcan su valor ambiental, por ejemplo, certificados verdes. Tercero, políticas que incentiven la demanda y que impulsen el mercado de acero verde, por ejemplo, criterios de compra pública verde, estándares de contenido reciclado o baja huella de carbono en sectores clave como construcción y automoción, etc. Cuarto, apoyo al desarrollo de nuevas infraestructuras clave como son las redes de hidrógeno, captura de CO₂, redes eléctricas robustas con energía renovable, entre otras. Quinto y último, generar marcos regulatorios estables y predecibles que brinden seguridad a las siderúrgicas sobre las grandes inversiones a largo plazo necesarias para la transformación del sector.

Este trabajo contribuye al conocimiento existente, al ofrecer un análisis comparativo actualizado y detallado de las estrategias de economía circular, gestión de chatarra e I+D+i de un grupo diverso de empresas siderúrgicas líderes a nivel mundial, integrando perspectivas cualitativas y cuantitativas descriptivas, proporcionando una visión más completa que estudios puramente descriptivos o centrados en una única

empresa. Además de la evaluación sistemática de hipótesis específicas sobre el rol de la I+D+i que puede aportar evidencia empírica relevante para comprender los impulsores y las barreras de la transición circular en este sector crucial.

Es importante reconocer las limitaciones inherentes a este estudio, en primer lugar, se basa exclusivamente en información secundaria de dominio público lo que implica una dependencia de la transparencia y la calidad de la información reportada por las siderúrgicas y otras fuentes consultadas, que puede variar y contener sesgos e interpretación erróneas, aunque se tuvo acceso a datos primarios publicados de cada una de las siderúrgicas. En segundo lugar, la disponibilidad y comparabilidad de datos cuantitativos especialmente en la inversión detallada en I+D+i, tasas de reciclaje específicas por producto o planta, intensidad de emisiones calculada con metodologías homogéneas, etc., fue limitada, restringiendo la profundidad del análisis estadístico correlacional. En tercer lugar, la selección de casos de estudio, aunque se intentó que fuera lo más diversa posible, no cubre la totalidad de empresas siderúrgicas existentes y los hallazgos podrían no ser generalizables a todos los segmentos, es decir, a productores más pequeños, regiones menos representadas, etc. Finalmente, el análisis cualitativo implica un grado de interpretación por parte del investigador.

A partir de estos hallazgos y limitaciones, se identifican diversas líneas prometedoras para futuras investigaciones, incluyendo estudios de caso en profundidad con acceso a datos primarios, ampliación del análisis comparativo a un mayor número de empresas y regiones, desarrollo de modelos cuantitativos más sofisticados, investigación detallada de la efectividad de tecnologías avanzadas de clasificación de chatarra, análisis de ciclo de vida comparativos de diferentes rutas de descarbonización, análisis del impacto de políticas públicas específicas, exploración de las dimensiones sociales de la transición, investigación de nuevos modelos de negocio circulares y profundización en la valorización de otros subproductos siderúrgicos.

En conclusión, la industria siderúrgica enfrenta un momento crucial donde la chatarra ferrosa es y seguirá siendo fundamental para su circularidad y sostenibilidad. Esto, siempre y cuando se mantenga una vigilancia tecnológica constante, pues su máximo aprovechamiento dependerá de las tecnologías aplicadas al proceso tanto en pre como en post consumo, la velocidad de adaptación de la siderúrgica que lo implemente y la flexibilidad del entorno o ecosistema que se haya creado alrededor de esta materia prima.

La urgente necesidad de descarbonización no debe depender únicamente de tecnologías de hidrógeno, cuyo costo es elevado, ni enfocarse exclusivamente en la incorporación de energías renovables, que, aunque reducen las tasas de CO₂, no cumplen con el objetivo de economía circular que la industria debe perseguir. En cambio, es crucial dirigir la investigación y el desarrollo hacia planes como los de captura de carbono CCUS, cerrando así el ciclo y permitiendo aprovechar desde los vapores emitidos en los hornos hasta los proyectos de valorización de escorias o coproductos generados en la fundición como los de abonos para agroindustrias o fuente de materia prima para carreteras. La inversión estratégica y colaborativa en I+D+i y de ser posible una open Innovation es fundamental para acelerar y asegurar el éxito de esta transformación, la cual es vital para el futuro del acero y del planeta.

7. Glosario

Término	Definición
Aceros Avanzados de Alta Resistencia (AHSS - Advanced High-Strength Steels)	Nuevas aleaciones de acero que permiten la fabricación de componentes más ligeros.
Aglomeración (de residuos)	Proceso siderúrgico para compactar residuos finos de hierro (polvos y lodos) en partículas mayores, facilitando su reutilización como materia prima en el alto horno o la sintonización.
Alto Horno y Convertidor de Oxígeno (BF-BOF - Basic Oxygen Furnace)	Ruta de producción siderúrgica integrada que parte fundamentalmente del arrabio líquido producido en un alto horno (BF) mediante la reducción de mineral de hierro con coque. En el convertidor de oxígeno básico (BOF), se inyecta oxígeno a alta presión para oxidar el exceso de carbono y otras impurezas del arrabio.
Análisis del Ciclo de Vida (ACV / LCA - Life Cycle Analysis & Reports)	Metodología utilizada para evaluar los impactos ambientales asociados a un producto, proceso o servicio a lo largo de todo su ciclo de vida, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final.
Arrabio	Hierro líquido producido en un alto horno mediante la reducción de mineral de hierro con coque.

<p>CCUS (Captura, Utilización y Almacenamiento de Carbono - Carbon Capture, Use and Storage)</p>	<p>Conjunto de tecnologías que permiten capturar las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) de grandes fuentes puntuales, como plantas industriales, para su posterior utilización en la creación de otros productos o su almacenamiento geológico seguro a largo plazo, evitando su liberación a la atmósfera.</p>
<p>Chatarra Ferrosa</p>	<p>Conjunto de residuos de acero y hierro generados tanto en los procesos productivos (pre-consumo: doméstica e industrial) como al final de la vida útil de los bienes de consumo (posconsumo: obsoleta). Constituye una materia prima secundaria de valor estratégico.</p>
<p>Cizallado</p>	<p>Proceso mecánico de corte o seccionamiento de la chatarra ferrosa, especialmente la de gran tamaño o formas irregulares, en piezas de dimensiones más pequeñas y manejables. Se realiza mediante máquinas cizalladoras hidráulicas o mecánicas.</p>
<p>Coque</p>	<p>Material carbonoso sólido derivado de la destilación destructiva de carbón bituminoso bajo en cenizas y azufre. Se utiliza como combustible y como agente reductor en los altos hornos para la producción de arrabio.</p>
<p>Corrientes de Foucault (Eddy Current)</p>	<p>Tecnología de separación que utiliza campos magnéticos alternos para inducir corrientes eléctricas (de Foucault) en partículas metálicas conductoras, lo que genera fuerzas repulsivas que permiten separar los metales no ferrosos (como aluminio y cobre) de otros materiales en un flujo de residuos.</p>
<p>Descarbonización</p>	<p>Proceso de reducción de las emisiones de carbono, particularmente de dióxido de carbono (CO₂), generadas por actividades humanas, especialmente en procesos industriales y energéticos, con el objetivo de mitigar el cambio climático.</p>
<p>Espectroscopía de Plasma Inducido por Láser (LIBS - Laser-Induced Breakdown Spectroscopy)</p>	<p>Técnica analítica avanzada que utiliza un pulso láser de alta energía para crear un micro plasma en la superficie de un material. El análisis de la luz emitida por este plasma permite determinar la composición elemental del material en tiempo real.</p>

Ferroaleaciones	Aleaciones maestras de hierro con uno o más elementos químicos (como manganeso, silicio, cromo, vanadio, molibdeno, etc.), que se utilizan en la industria siderúrgica como aditivos durante la etapa de metalurgia secundaria (afino en cuchara). Su función principal es introducir estos elementos de aleación en el acero líquido de forma controlada para ajustar su composición química final y conferirle propiedades específicas deseadas (como mayor resistencia, dureza, tenacidad, resistencia a la corrosión, etc.).
Fragmentación (Shredding de chatarra)	Es un proceso mecánico severo para triturar chatarra voluminosa (VFU, electrodomésticos) en molinos de martillos. Reduce el volumen y libera materiales (ferrosos, no ferrosos, plásticos, caucho, vidrio) para su posterior separación por métodos diversos (magnético, Foucault, sensores).
Hierro de Reducción Directa (DRI - Direct Reduced Iron)	Material producido a partir de la reducción directa de mineral de hierro (en estado sólido) utilizando un gas reductor (generalmente monóxido de carbono e hidrógeno derivados de gas natural o carbón, o crecientemente, hidrógeno puro). El producto es hierro metálico sólido, a menudo en forma de pelets o briquetas (HBI - Hot Briquetted Iron).
Horno de Arco Eléctrico (EAF - Electric Arc Furnace)	Tecnología de producción de acero característica de las acerías semiintegradas o mini-mills. Utiliza potentes electrodos de grafito para generar arcos eléctricos que funden una carga metálica, principalmente chatarra ferrosa, a temperaturas superiores a los 1500°C. Puede complementarse con Hierro de Reducción Directa (DRI) o arrabio líquido.
Metalurgia Secundaria (o Afino en Cuchara)	Etapa del proceso de fabricación del acero que tiene lugar después de la fusión primaria en el horno de Arco Eléctrico (EAF) o en el Convertidor de Oxígeno Básico (BOF). En esta etapa, el acero líquido se trata en una cuchara para ajustar su composición química final mediante la adición de ferroaleaciones, eliminar impurezas residuales (desulfuración, desgasificación) y controlar la temperatura antes de la colada.
Mini-mills	Acerías de menor escala en comparación con las plantas integradas tradicionales. Se caracterizan por utilizar Hornos de Arco Eléctrico (EAF) para fundir principalmente chatarra ferrosa y producir acero.
OTBB (Oxygen Top and Bottom Blowing)	Tecnología de soplado combinado de oxígeno por la parte superior e inferior en los convertidores de oxígeno básico (BOF).

Quintain	Refiere al fenómeno o asunto central que se investiga a través del estudio de varios casos.
Scope 1, 2 y 3 (Emisiones de GEI)	(Scope 1) Alcance 1: Emisiones directas de GEI provenientes de fuentes que son propiedad o están controladas por la empresa (p.ej., combustión en altos hornos, procesos industriales, flota de vehículos). (Scope 2) Alcance 2: Emisiones indirectas de GEI generadas por la electricidad, vapor, calefacción o refrigeración adquiridos y consumidos por la empresa, cuyas emisiones se producen en las instalaciones del proveedor de energía. (Scope 3) Alcance 3: Todas las demás emisiones indirectas que ocurren en la cadena de valor de la empresa, tanto aguas arriba (p.ej., extracción de materias primas, transporte de insumos) como aguas abajo (p.ej., transporte de productos, uso de productos vendidos, fin de vida de los productos).
Sensores basados en Rayos X (XRF - X-ray fluorescence)	Sistemas avanzados y automatizados que utilizan la fluorescencia de rayos X para analizar la composición elemental de los materiales.
Tailings (Residuos mineros)	Materiales de desecho que quedan después del proceso de extracción de los minerales valiosos de una mena. Suelen ser una mezcla de roca triturada y fluidos del proceso.

8. Referencias Bibliográficas

- ArcelorMittal. (2020). Climate Action in Europe. <https://corporate-media.arcelormittal.com/media/b4wh4cd0/climate-action-in-europe.pdf>
- ArcelorMittal. (2024). Integrated Annual Review 2023-2024 ArcelorMittal. En Integrated Annual Review 2023. <https://corporate.arcelormittal.com/media/3rhdod3o/mt-31-12-2024-annual-report.pdf>
- Berlin, D., Feldmann, A., & Nuur, C. (2022). Supply network collaborations in a circular economy: A case study of Swedish steel recycling. *Resources, Conservation and Recycling*, 179, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106112>
- Bonaplata, J. (2023, enero 17). What is steel scrap and how can it help us reach net zero? *World Economic Forum*. <https://www.weforum.org/stories/2023/01/davos23-steel-scrap-decarbonization/>

- Carvalho, P. S. L. de, Dias Mesquita, P. P., Melo, L., & BNDES. (2016). Panoramas Setoriais - Mudanças Climáticas SIDERURGIA (BNDES, Ed.; Siderurgia). Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/7210/2/Siderurgia_P.pdf
- Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2018). Research design : qualitative, quantitative, and mixed methods approaches. En LCCN 2017044644 (Ed.), Research Defign: Qualitative, Quantitative, and Mixed M ethods Approaches (Fifth edition, Vol. 5).
- Ellen MacArthur Foundation. (2014). Towards the circular economy Vol. 1: an economic and business rationale for an accelerated transition. Ellenmacarthurfoundation.Org. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/towards-the-circular-economy-vol-1-an-economic-and-business-rationale-for-an>
- Energetics Inc. (2003). Steel Industry Technology Roadmap Barriers and Pathways for Yield Improvements. https://www1.eere.energy.gov/manufacturing/intensiveprocesses/pdfs/steel_roadmap_2003.pdf
- Fischer, L. (2024, agosto 29). Recycling in the steel industry - environmentally friendly to new steel. Grupo Swiss Steel. <https://swisssteel-group.com/en/journal/recycling-in-the-steel-industry>
- GERDAU. (2024a). Annual Report 2023 Gerdau. En Sustainability. <https://www2.gerdau.com.br/wp-content/uploads/2024/07/gerdau-annual-report-en-2023.pdf>
- GERDAU. (2024b). Gerdau-Social-Responsibility-Report-2023. <https://www2.gerdau.com.br/wp-content/uploads/2024/09/Gerdau-Social-Responsibility-Report-2023.pdf>
- GERDAU. (2024c). Relatórios e Formulários Anuais - Gerdau RI. <https://ri.gerdau.com/governanca-corporativa/relatorios-e-formularios-anuais/>
- GME Recycling. (2023, noviembre 18). El impacto ambiental del reciclaje de metales. Gianni Mori Engineering. <https://www.gme-recycling.com/the-environmental-impact-of-metal-recycling/>
- HBIS Group Co. (2024). Gestión Sostenible (HBIS Group Co, Trad.). En 可持續經營. <https://www.hbisco.com/sustainable>
- HBIS Group Co. (2025, marzo 25). HBIS and VALE Signing MOU focus on Steel Industry Value Chain Decarbonization. HBIS GROUP Co. <https://www.hbisco.com/en/news/group/t698/2816>

- Hundt, C., & Pothen, F. (2025). European Post-Consumer Steel Scrap in 2050: A Review of Estimates and Modeling Assumptions. *Recycling 2025*, Vol. 10, Page 21, 10(1), 21. <https://doi.org/10.3390/RECYCLING10010021>
- Institute for Sustainable Process Technology (ISPT). (2023, junio 30). Steel2Chemicals: Advancing Circular Carbon in the industry. © Institute for Sustainable Process Technology (ISPT). https://ispt.eu/media/ISPT-S2C-whitepaper_20230710.pdf
- IRENA. (2023). Towards a circular steel industry. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Jul/IRENA_G20_circular-steel_industry_2023.pdf
- Kirschen, M., Badr, K., & Pfeifer, H. (2011). Influence of direct reduced iron on the energy balance of the electric arc furnace in steel industry. *Energy*, 36(10), 6146-6155. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.07.050>
- Manthey, E. (2023, noviembre 16). Why ferrous scrap is emerging as a key strategic raw material | articles | ING Think. ING THINK Economic and Financial Analysis. <https://think.ing.com/articles/why-is-ferrous-scrap-a-strategic-raw-material/>
- Marcet, X., Marcet, M., & Vergés, F. (2018). Qué es la economía circular y por qué es importante para el territorio Xavier Marcet. *Asociación Pacto Industrial de la Región Metropolitana de Barcelona*, 4, 1-56. <https://www.pacteindustrial.org/wp-content/uploads/2018/02/Papel-del-Pacto-Industrial-4-Que-es-la-economia-circular-y-por-que-es-importante-para-el-territorio.pdf>
- Mellon, R. A. (2024, diciembre 19). Moving the steel industry toward a sustainable future. *The Fabricator*. <https://www.thefabricator.com/thefabricator/blog/metalsmaterials/moving-the-steel-industry-toward-a-sustainable-future>
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2022a). CARGA DE HORNOS ALTOS Y COLADAS DE ARRABIO. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/040202-hornosaltos-arrabio_tcm30-446948.pdf
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2022b). HORNOS ELÉCTRICOS DE LAS ACERÍAS. https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/040207-hornos-electr-acerias_tcm30-502317.pdf

Nucor. (2025a). Nucor | Nucor Raw Materials. Nucor.
<https://nucor.com/products/raw-materials>

Nucor. (2025b). Nucor - Financials - Annual Reports. En 2024 ANNUAL REPORT.
<https://investors.nucor.com/financials/annual-reports/default.aspx>

Nucor. (2025c). Nucor Reports Results for the Fourth Quarter and Full Year 2024. En News Details.
<https://investors.nucor.com/news/news-details/2025/Nucor-Reports-Results-for-the-Fourth-Quarter-and-Full-Year-2024/>

POSCO HOLDINGS INC. (2025). Consolidated FY 2024 Audit Report.
<https://www.posco-inc.com:4453/poscoinc/v3/eng/investor/s91e3000500c.jsp>

POSCO, & POSCO HOLDINGS INC. (2024). Sustainability Report. En POSCO HOLDINGS 2023 SUSTAINABILITY REPORT.
<https://www.posco-inc.com:4453/poscoinc/v3/eng/esg/s91e4000400c.jsp>

Prieto-Sandoval, V., Jaca, C., & Ormazabal, M. (2017). Economía circular: Relación con la evolución del concepto de sostenibilidad y estrategias para su implementación Circular economy: Relationship with the evolution of the concept of sustainability and strategies for its implementation. Memoria Investigaciones en Ingeniería, 1-11.
<https://es.scribd.com/document/852878361/Prieto-Sandoval-Jaca-Ormazabal-2017-Economia-circular-Relacion-con-la-evolucion-del-concepto-de-sostenibilidad-y-estrategias-para-annotated>

Radius Recycling, I. (2024). Radius Recycling Sustainability. En Sustainability is at the core of what we do and how we operate.
<https://www.radiusrecycling.com/company/sustainability>

Radius Recycling, Inc. (2025). Radius Recycling Company. En Sustainability Highlights.
<https://www.radiusrecycling.com/company>

SSAB. (2024, diciembre 12). SSAB and Stena Metall enter into strategic cooperation agreement on deliveries of recycled scrap metal - SSAB. SSAB.
<https://www.ssab.com/en/news/2024/12/ssab-and-stena-metall-enter-into-strategic-cooperation-agreement-on-deliveries-of-recycled-scrap-metal>

SSAB. (2025a). El futuro libre de combustible fósiles está a la vuelta de la esquina. - SSAB. SSAB. <https://www.ssab.com/es-es/acero-libre-de-combustibles-fosiles>

SSAB. (2025b). HYBRIT® – A new revolutionary steelmaking technology - SSAB. SSAB - Hybrit.

<https://www.ssab.com/en/fossil-free-steel/insights/hybrid-a-new-revolutionary-steelmaking-technology>

SSAB. (2025c). Informe anual 2024. En SSAB. <https://www.ssab.com/en/download-center>

SSAB. (2025d, marzo 7). New electric arc furnace in SSAB Oxelösund will shorten SSAB ZeroTM lead times - SSAB. SSAB. <https://www.ssab.com/en/news/2025/03/new-electric-arc-furnace-in-ssab-oxelsund-will-shorten-ssab-zero-lead-times>

Stake, R. E. (2006). Multiple Case Study Analysis - Robert E. Stake (Guilford Press). The Guilford Press. [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=rQWT5aDHiZYC&oi=fnd&pg=PT26&dq=como+scholar+Stake,+R.+E.+\(2006\).+Multiple+case+study+analysis.&ots=IlhXDzHxBm&sig=Vg1LtYjQo0dsI5DhiOGcMSb6qk#v=onepage&q&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=rQWT5aDHiZYC&oi=fnd&pg=PT26&dq=como+scholar+Stake,+R.+E.+(2006).+Multiple+case+study+analysis.&ots=IlhXDzHxBm&sig=Vg1LtYjQo0dsI5DhiOGcMSb6qk#v=onepage&q&f=false)

Tata Steel. (2020a). HISarna - A Radical New Steel Making Process at Tata Steel The Tomorrow Series. <http://www.tatasteel.com/corporate/wealsomaketomorrow/blog/hisarna-a-radical-new-steel-making-process-at-tata-steel-the-tomorrow-series/>

Tata Steel. (2020b, agosto 19). Tata Steel launches FerroHaatTM App for sourcing steel scrap. FerroHaat. <http://www.tatasteel.com/newsroom/press-releases/india/2020/tata-steel-launches-ferrohaat-app-for-sourcing-steel-scrap/>

Tata Steel. (2021, agosto 18). Tata Steel commissions its first Steel Recycling Plant in Rohtak, Haryana. Wwww.Tatasteel.Com. <https://www.tatasteel.com/media/newsroom/press-releases/india/2021/tata-steel-commissions-its-first-steel-recycling-plant-in-rohtak-haryana/>

Tata Steel. (2023, diciembre 13). Tata Steel, The Henry Royce Institute Sign MoU to set up a Centre for Innovation in Advanced Materials. Wwww.Tatasteel.Com. <https://www.tatasteel.com/newsroom/press-releases/india/2023/tata-steel-the-henry-royce-institute-sign-mou-to-set-up-a-centre-for-innovation-in-advanced-materials/>

Tata Steel Limited. (2024). Integrated Report & Annual Accounts 2023-24 (117th Year) and related documents Tata Steel. <http://www.tatasteel.com/investors/integrated-reportannual-report/integrated-report-annual-accounts-2023-24-117th-year-and-related-documents/>

Tata Steel Limited, U. (2023). Circular economy. En Green steel future Enabling a circular economy. <https://www.tatasteeluk.com/green-steel-future/circular-economy>

- The David J. Joseph Company. (2025, abril 19). ScrapConnect: Home. DJJ-Nucor.
<https://www.scrapconnect.net/Home/Index>
- Voestalpine AG. (2024a). Research and development. En voestalpine Annual Report 2023/24.
<https://reports.voestalpine.com/2324/ar/management-report/research-and-development.html>
- Voestalpine AG. (2024b). voestalpine AG annual report 2023/24. En voestalpine Annual Report 2023/24.
https://reports.voestalpine.com/2324/ar/_assets/downloads/entire-va-ar2324.pdf
- Voestalpine AG. (2024c). voestalpine Corporate Responsibility Report 2023/24. En voestalpine Corporate Responsibility Report 2023/24.
<file:///C:/Users/Usuario/Desktop/TFM/pdf/voestalpine-2024-agm-corporate-responsibility-report.pdf>
- Voestalpine AG. (2024d, mayo 14). voestalpine, Mercedes-Benz, and TSR launch showcase project in circular economy - voestalpine. Voestalpine AG.
<https://www.voestalpine.com/group/en/media/press-releases/2024-05-14-voestalpine-mercedes-benz-and-tsr-launch-showcase-project-in-circular-economy/>
- Wheeler, K. (2024, agosto 7). Top 10: Largest Steel Companies | Construction Digital. Top 10: Largest Steel Companies.
<https://constructiondigital.com/top10/top-10-largest-steel-companies>
- World Steel Association. (2015). STEEL IN THE CIRCULAR ECONOMY A life cycle perspective. Worldsteel.Org, 1-32.
https://canadiansteel.ca/files/resources/Steel_20in_20the_20circular_20economy_20_20A_20life_20cycle_20perspective.pdf
- World Steel Association. (2021). Scrap use in the steel industry.
https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Fact-sheet-on-scrap_2021.pdf
- World Steel Association. (2024). World Steel in Figures 2024. Worldsteel.Org, 1-30.
<https://worldsteel.org/data/world-steel-in-figures/world-steel-in-figures-2024/>
- Worrell, E., Price, L., & Martin, N. (2001). Energy efficiency and carbon dioxide emissions reduction opportunities in the US iron and steel sector. En Energy (Vol. 26).
[https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(01\)00017-2](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(01)00017-2)
- Yellishetty, M., Mudd, G. M., Ranjith, P. G., & Tharumarajah, A. (2011). Environmental life-cycle comparisons of steel production and recycling: Sustainability issues,

problems and prospects. *Environmental Science and Policy*, 14(6), 650-663.
<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2011.04.008>

Yin, Robert. K. (2003). *Case study methodology* R.K. Yin (2003, 3rd edition). Case Study Research design and methods. Sage, Thousand Oaks (CA)..pdf. Case Study Research: Design and Methods, 5, 1-181.
https://books.google.com/books/about/Case_Study_Research.html?hl=es&id=BWea_9ZGQMwC