

05-028

THE IMPORTANCE OF THE CARBON FOOTPRINT FOR THE EVALUATION OF INVESTMENTS: USE OF HEAT PIPES FOR THE PRODUCTION OF STEAM.

Llera Traviesa, Rocío ⁽¹⁾; Vigil Berrocal, Miguel Ángel ⁽²⁾; Ortega Fernández, Francisco ⁽³⁾;
Martínez Huerta, Gemma M. ⁽³⁾

⁽¹⁾ ARCELORMITTAL, ⁽²⁾ INNVEL2 CONSULTING, ⁽³⁾ Universidad de Oviedo

The reduction of greenhouse gases emission by the large industry is not only a moral obligation, but also an economic one, due to the imposition of carbon taxes in several of the major world markets. Carbon prices are raising remarkably and represent a great pressure to the competitiveness of the less environmentally efficient producers, which entails the alignment of both environmental and economic sustainability. Therefore, for the large industry the investment in technologies aimed at improving energy efficiency are gaining interest and, when they are assessed, must take into account the economic effect of such taxes. This communication evaluates the importance of taking into account carbon taxes, and therefore the correct quantification of the carbon footprint, through a case study. To this end, the economic viability of the novel application of a heat recovery technology known as Heat Pipes for steam generation in an industrial context is analysed, focusing on the influence of CO₂ emissions.

Keywords: Carbon footprint; energy efficiency; carbon tax; heat pipes.

LA IMPORTANCIA DE LA HUELLA CARBONO PARA LA EVALUACIÓN DE INVERSIONES: USO DE HEAT PIPES PARA LA PRODUCCIÓN DE VAPOR.

La reducción de las emisiones de efecto invernadero por parte de la industria es una obligación no solo moral, sino económica, debido a los impuestos sobre el carbono vigentes en varios de los grandes mercados mundiales. Estos precios están creciendo notablemente y en la actualidad representan una gran presión para la competitividad de los productores menos eficientes ambientalmente, lo que está consiguiendo alinear las sostenibilidades ambiental y económica. Para la gran industria por tanto, las inversiones en tecnologías destinadas a mejorar su eficiencia energética están resultando cruciales y cuando se evalúan, deben de tener en cuenta los efectos económicos de estas tasas. En la presente comunicación se evalúa la importancia de tener en cuenta los impuestos al carbono, y por tanto la correcta cuantificación de la huella de carbono, a través de un caso ejemplo. A tal efecto se analiza la viabilidad económica de la aplicación novedosa de una tecnología de recuperación de calor conocida como Heat Pipes para la generación de vapor en un contexto industrial, poniendo el foco a la influencia de las emisiones de CO₂.

Palabras claves: Huella de carbono; eficiencia energética; impuestos al carbono; heat pipes.

Correspondencia: Francisco Ortega Fernández fdeasis@uniovi.es fran@api.uniovi.es



1. Introducción

La emisión excesiva de gases de efecto invernadero (GEI) es una gran preocupación en la sociedad actual, siendo la presencia de CO₂ en los gases de escape industriales uno de los mayores contribuyentes a las consecuencias ambientales de estos vertidos, más notablemente el cambio climático

Reducir significativamente las emisiones de GEI a la atmósfera en la industria no solo conlleva un beneficio global gracias a la mitigación del cambio climático y sus consecuencias (aumento de temperaturas, subida del nivel del mar, etc.) sino que debe valorarse también desde un punto de vista económico. Debido a los impuestos al carbono repercutidos sobre estos fabricantes, la disminución de la emisión de CO₂ al medio ambiente promueve una mejora significativa de la competitividad del producto. El comercio de derechos de emisión se está convirtiendo en un actor clave en la rentabilidad de la fabricación de las industrias afectadas por el régimen de derechos de emisión, como la del acero, debido al rápido aumento de los costes derivados de las emisiones de CO₂ en los últimos años. De hecho, mientras que en 2017 el coste medio fue de 5,18 € / ton CO₂-eq, los precios han aumentado hasta 25 € / ton CO₂-eq en 2020 (Directorate-General for Internal Market, Industry, 2019).

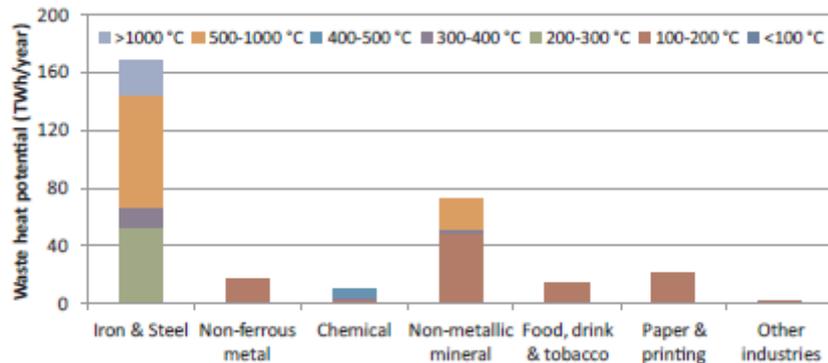
Como resultado, las industrias acereras, por ejemplo, están enfocando sus esfuerzos en actualizar sus procesos para lograr productos más sostenibles y competitivos mediante la reducción de sus emisiones de carbono. En este contexto, dado que el proceso de producción para la fabricación de acero es intensivo en energía (He y Wang 2017), y la energía se obtiene principalmente de fuentes no renovables con la consiguiente emisión de GEI, una de las principales preocupaciones de los fabricantes radica en idear alternativas energéticamente eficientes para los procesos actuales. Actualmente, el sector siderúrgico representa casi el 20% del consumo total de energía final de la industria en el mundo (He y Wang 2017), pero los procesos de alta temperatura necesarios a lo largo de la cadena de producción aun presentan pérdidas de energía significativas en forma de calor emitido a la atmósfera (McBrien, Serrenho and Allwood, 2016). Por ejemplo, en las instalaciones de laminación en caliente, el proceso de conformado que finaliza con la producción de bobinas o chapas de acero, precalienta los formatos a 1200°C y los humos de combustión se liberan directamente a través de la chimenea sin aprovechar el calor residual (Kun y Szemmelveisz 2014).

Para aprovechar el potencial térmico de estos humos, la recuperación de calor residual se ha convertido en una estrategia interesante en la industria siderúrgica, como se describe en (Brückner et al. 2015; He and Wang 2017; Kun and Szemmelveisz 2014; McBrien, Serrenho, and Allwood 2016; Ortega-Fernández and Rodríguez-Aseguinolaza 2019; Zhang et al. 2017). La mayoría de los sistemas de recuperación de calor se basan en sistemas convencionales como intercambiadores de calor, recuperadores y regeneradores y su finalidad es principalmente precalentar el aire de combustión del propio horno de recalentamiento. Sin embargo, se encuentran grandes limitaciones cuando tienen que

trabajar a temperaturas muy altas o en condiciones adversas con gases de combustión sucios (Ma *et al.*, 2000; Sharma *et al.*, 2014; He and Wang, 2017).

La Figura 1 muestra el potencial de calor residual general para varias industrias a temperaturas medias y altas.

Figura 1: Potencial de calor residual general para varias industrias. Fuente (Medarac, Moya, and Somers, 2020).



Por lo tanto, dado que las emisiones juegan un papel crucial en la viabilidad económica de las tecnologías de recuperación de calor debido a las tasas al carbono, la evaluación de los ahorros o emisiones que su implementación pueden ocasionar es clave durante su proceso de evaluación.

En (Ascher, Li and You, 2020) se analizaron los beneficios económicos del aprovechamiento del calor residual de un horno siderúrgico de arco eléctrico para alimentar un sistema municipal de *Heat District*. En este caso los ahorros obtenidos debido a las emisiones evitadas de CO₂ computaron en el beneficio operacional anual de la instalación y se consideraron unas tasas al carbono de 5€/ton CO₂. Esta cuantificación de ahorros en emisiones GEI se realizó directamente a partir de los factores de emisión del gas natural evitado. Por otro lado, en la reciente referencia (Khayyam *et al.*, 2021) se evalúan las mejoras en eficiencia energética de la fabricación de fibra de carbono mediante tecnologías de recuperación de calor. En este caso se realiza una huella de carbono, pero no se tiene en cuenta para el análisis económico, que únicamente considera los ahorros por el consumo eléctrico evitado. De igual modo, en (Pili *et al.*, 2020) se evalúa la viabilidad económica de la inclusión de la tecnología de ciclo orgánico de Rankine para la recuperación de calor residual en el proceso siderúrgico y otros de consumo energético intensivos y cuestiona la viabilidad económica de su inclusión. Sin embargo, aunque realiza una estimación de los ahorros en emisiones de CO₂ que podrían obtenerse mediante su inclusión, no lo tiene en cuenta en análisis económico al tener únicamente en cuenta los costes de amortización de la tecnología y los ahorros energéticos en forma de electricidad. De forma similar se maneja el asunto en (Valencia, Fontalvo and Duarte Forero, 2021) donde se realiza un Análisis de Ciclo de Vida completo para el uso de esta tecnología para una caldera de gas natural de

2MW, donde consigue una cuantificación rigurosa de las emisiones evitadas aunque tampoco lo incluye en el análisis económico.

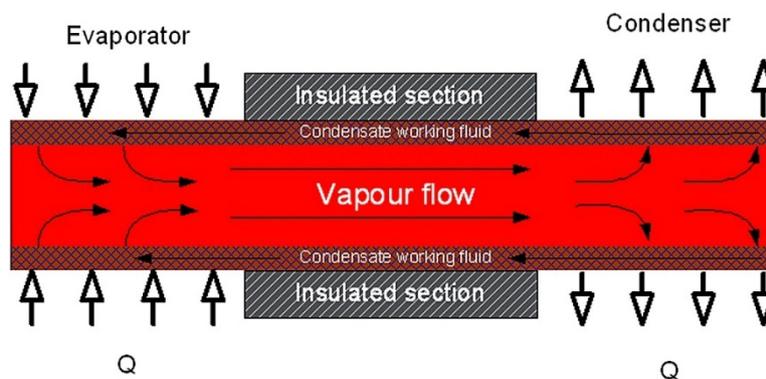
Finalmente, en (Jouhara *et al.*, 2021) se investiga la conveniencia de la instalación de la tecnología *heat pipe* para el aprovechamiento de corrientes residuales en la industria cerámica. En este caso sí se tienen en cuenta los ahorros en tasas de carbono en el análisis económico que emplea el concepto económico Retorno de la Inversión simple para su cuantificación. Sin embargo, las emisiones evitadas se calculan simplemente mediante un factor de emisión a partir del ahorro de gas natural debido a la tecnología y no se especifica la tasa empleada y lo excluye del cálculo del flujo de caja.

A la vista del estado del arte realizado, queda patente que los costes ahorrados a raíz de los ahorros en tasas a la emisión de GEI no se están incluyendo en los estudios de evaluación económica de las tecnologías industriales de recuperación de calor y, en caso de realizarlo, no se acompaña de un análisis riguroso de las emisiones a ser contabilizadas. La correcta cuantificación de las emisiones de GEI y sus efectos asociados se pueden calcular mediante la realización de análisis de ciclo de vida (ACV) que está considerada como la herramienta más rigurosa para la cuantificación de las cargas ambientales de un producto, proceso o servicio ya que el análisis incluye todo su ciclo de vida, desde la extracción de recursos, producción, uso y reciclaje, hasta la disposición de residuos, incluyendo un registro de todas las entradas y salidas derivadas del mismo (López-Sabirón *et al.*, 2014; Duan *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2019; Baidya, de Brito and Ghoreishi-Madiseh, 2020; Liu *et al.*, 2020).

1.1 Objetivos

El objeto de la presente comunicación es la evaluación de la influencia de las tasas de emisión de CO₂ en la evaluación de la viabilidad económica de las tecnologías de recuperación de calor a partir de un caso real de uso novedoso de la tecnología *heat pipe*. Un *heat pipe* (HP) es un intercambiador de calor pasivo que tiene la apariencia de un serpentín de agua con aletas de placa común, con la excepción de que los tubos no están interconectados. Se llena con una pequeña cantidad de fluido de trabajo (generalmente agua, metanol o amonio) que se selecciona con respecto al rango de temperaturas de trabajo.

Figura 2: Ciclo de trabajo de la *heat pipe* (Jouhara *et al.*, 2017).



Está compuesto por tres secciones: evaporador en un extremo, donde se absorbe el calor y se vaporiza el fluido; condensador en el otro extremo, donde se condensa el vapor y se

rechaza el calor y luego entre ambos hay una sección adiabática, donde la fase de vapor del refrigerante fluye en el núcleo y la fase líquida circula en sentido opuesto a través de la mecha. El retorno al evaporador del fluido de trabajo líquido se realiza a través de una estructura de mecha por capilaridad, de manera que, el *heat pipe* puede trabajar en cualquier posición (Jouhara et al. 2017).

2. Materiales & Métodos

En una experimentación a escala piloto en laboratorio se estudió la capacidad de producir vapor aprovechando el calor residual presente en los humos de combustión de un horno de recalentamiento industrial mediante la tecnología HP. La eficiencia obtenida empíricamente para una corriente de calor residual se muestra en la Tabla 1 (datos no publicados):

Tabla 1. Resultados de laboratorio de generación de vapor mediante *heat pipes*

Temperatura de entrada de los humos	Temperatura de salida de los humos	Transferencia de calor desde los humos	Potencia transformada en vapor saturado	Eficiencia
400°C	240°C	27kW	11kW	39.7%

Tal y como se estableció en la introducción de la presente comunicación, la cuantificación rigurosa de las emisiones GEI de una tecnología debe realizarse mediante un ACV, que permite una evaluación sistemática de los aspectos ambientales de un producto o sistema contemplando todas las etapas de su ciclo de vida. Sin embargo, para que un ACV sea realmente útil, no debe limitarse a modelizar una casuística de laboratorio, sino que debe reflejar un entorno realista, en este caso industrial, de forma que sus resultados sean verdaderamente válidos para el proceso de toma de decisiones. Por lo tanto, se procedió de forma teórica a realizar el ACV para unas condiciones industriales reales conocidas, extrapolando los resultados de laboratorio.

2.1 Planteamiento de la modelización

Se elige una instalación industrial en cuyo proceso se encuentra un horno de recalentamiento, cuyos humos de combustión se descargan por chimenea directamente sin ser térmicamente aprovechados. Las condiciones de dichos humos se muestran en la Tabla 2:

Tabla 2. Caracterización de los humos de combustión

T media (°C)	T máxima(°C)	T mínima (°C)	σ	Cp (kJ/kg K)	Caudal (Nm ³ /h)	Presión (bar)
383,186	466,375	96,000	107,98	1,24	70000	1

Esta instalación es consumidora de 11.500 t/año de vapor que compra a un proveedor externo, que lo produce mediante cogeneración de gas natural y gases (residuales) siderúrgicos, por lo que su perfil ambiental es presumiblemente mejor que si quemase únicamente gas natural. Otros autores (García *et al.*, 2019) realizaron un ACV de dicha instalación cuyo inventario nos permite calcular el potencial de calentamiento global (huella de carbono) de la producción de este vapor.

Por otro lado, se modelizó la generación de vapor en la misma instalación para ser realizada por un HP hipotético, dimensionado siguiendo la misma filosofía de diseño que se empleó

para el prototipo de laboratorio anteriormente mencionado. Se calculó el perfil ambiental de esta ruta de producción de vapor.

Por lo tanto, el beneficio ambiental de la inclusión de la nueva tecnología viene dado por la diferencia entre el perfil ambiental de la forma actual de producción vapor mediante cogeneración, respecto al perfil de la producción con HP.

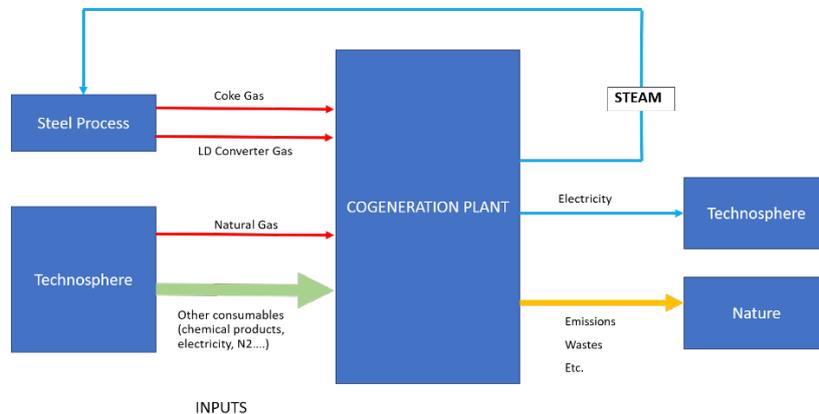
Los ACV se realizan siguiendo los estándares de la ISO 14040-2006. Dado que el interés principal de esta publicación es explorar la inclusión de las tasas al carbono para la evaluación económica de tecnologías, únicamente se calcula el indicador de potencial de calentamiento global (GWP) siguiendo la metodología ReCiPe (H/H).

La unidad funcional elegida es 1MWh de energía térmica utilizada por la instalación industrial a estudio en forma de vapor. Esta unidad funcional se ha utilizado en varios ACV realizados para evaluaciones de sistemas de energía como (Turconi, Boldrin and Astrup, 2013; Adams and McManus, 2014; Parajuli *et al.*, 2014; García *et al.*, 2019).

2.2 Descripción del escenario actual de producción de vapor

La instalación de referencia obtiene todo el vapor de una planta de cogeneración combinada externa que produce electricidad y vapor a partir de la valorización energética de los gases siderúrgicos. Su inventario se obtiene de (García *et al.*, 2019) y los límites del sistema pueden consultarse en la Figura 3.

Figura 3: Límites del Sistema para el escenario de producción de vapor por cogeneración de gases siderúrgicos. Adaptado de (García *et al.*, 2019).

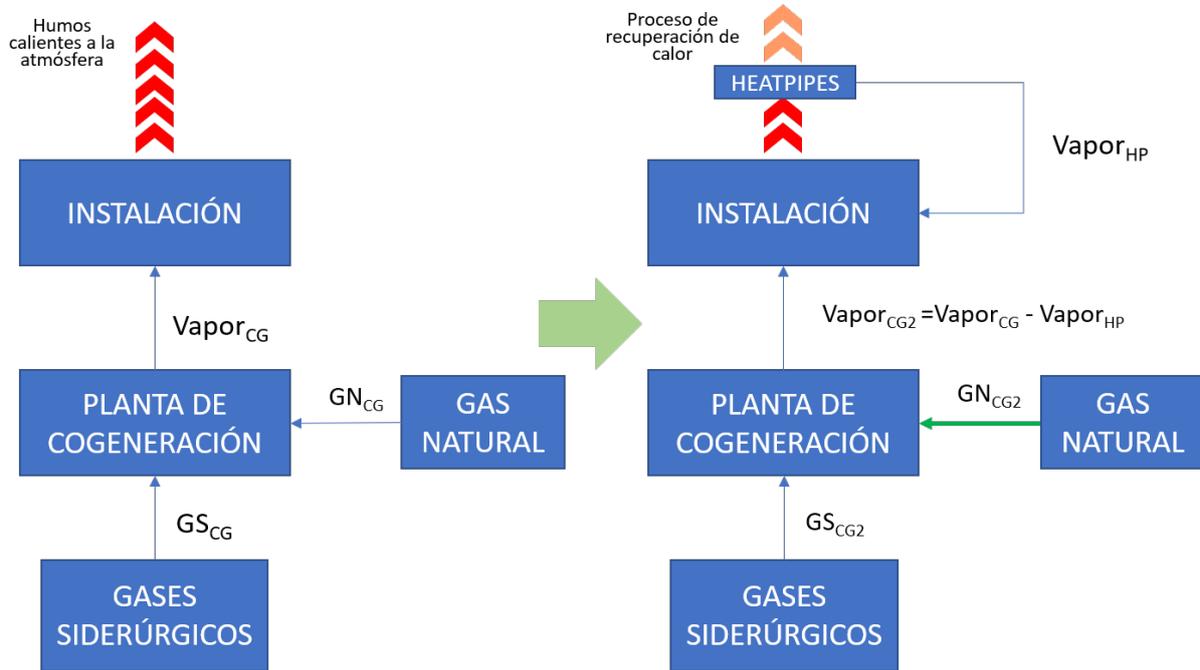


2.3 Descripción del escenario de producción de vapor mediante heat pipes

El escenario HP asume la instalación hipotética de la tecnología propuesta mediante un bypass desde chimenea principal de la instalación. Como se puede apreciar en la Figura 4, la instalación de HP permitiría la producción de una determinada cantidad de vapor de forma limpia, reduciendo la demanda de vapor a su proveedor habitual, la planta de cogeneración. El HP se considera una adición a la instalación que no cambia las condiciones de producción de la planta. Por tanto, se asume que tras la puesta en marcha del sistema HP, las

instalaciones seguirán funcionando bajo el mismo régimen, con la única excepción de la presencia de los nuevos equipos.

Figura 4: Descripción de escenarios: Situación actual vs producción mediante heat pipes



2.4 Análisis de sensibilidad

El rendimiento del HP ha sido evaluado empíricamente en el laboratorio y su eficiencia se utiliza para estimar la producción de vapor a escala industrial. Sin embargo, las variaciones provocadas por un diseño final diferente al propuesto, la reducción de la capacidad de transferencia de calor por incrustaciones o las diferencias en la temperatura de los humos de recuperación provocadas por cambios en el sistema de producción pueden provocar desviaciones de rendimiento de los resultados experimentales. Por esa razón, se realiza un análisis de sensibilidad considerando variaciones en la tasa de generación de vapor de $\pm 30\%$.

3. Resultados y discusión

La Tabla 3 muestra claramente cómo el GWP de la producción de vapor mediante heat pipes para cada MWh producido en forma de vapor es marcadamente más bajo, representando en el caso promedio solo el 3% del perfil de emisiones actual. Esto es debido principalmente a la reducción de consumo de gas natural durante la cogeneración, seguido de los insumos necesarios para la operativa de la planta de cogeneración. Paralelamente, el único consumo energético por parte de las heat pipes es la electricidad empleada para el bombeo de agua para su conversión en vapor y el funcionamiento de la instrumentación que se consideró despreciable.

Tabla 3: Potencial de calentamiento global de la producción de vapor referido a la unidad funcional.

Cogeneración	674 kg CO ₂ -eq/MWh
Producción de vapor mediante heat pipes (eficiencia media)	19,6 kg CO ₂ -eq/MWh
Producción de vapor mediante heat pipes (eficiencia media+30%)	15,0 kg CO ₂ -eq/MWh
Producción de vapor mediante heat pipes (eficiencia media-30%)	27,5 kg CO ₂ -eq/MWh

Los cálculos con el rendimiento promedio muestran que el sistema HP podría proporcionar el 65% de los requisitos de vapor de la planta industrial, lo que conduciría a reducciones de aproximadamente 335 toneladas CO₂-eq / mes.

Por otro lado, como se indicó en la introducción, los impuestos al carbono implican una participación drástica en los costos de producción de las industrias sujetas al régimen de derechos de emisión, como es el caso de la industria seleccionada para el caso ejemplo, por lo que su reducción es clave para asegurar su viabilidad. Por tanto, es de suma importancia incluir su adecuada cuantificación en la valoración de la viabilidad económica de la tecnología. En (Fierro *et al.*, 2021; Jouhara *et al.*, 2021) se pueden consultar ejemplos que muestran la inclusión del CO₂ evitado y el uso de energía en la evaluación de tecnologías novedosas de WHR.

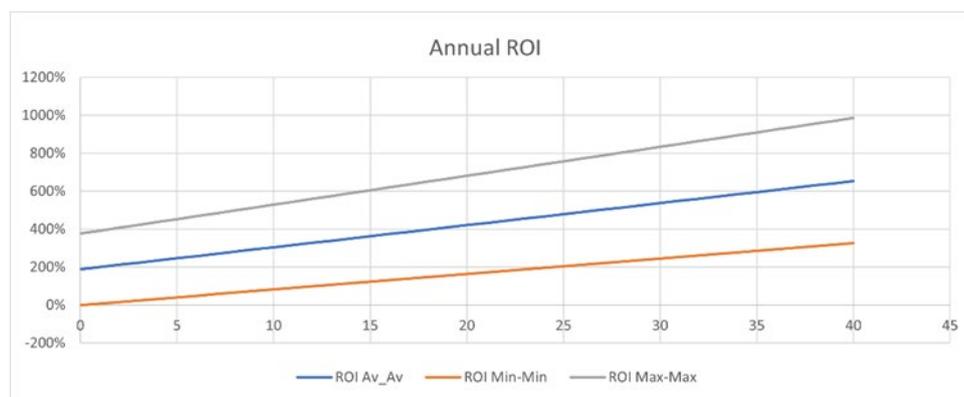
La Figura 5 muestra el Retorno de la Inversión (ROI) anual para valores medios de eficiencia de producción de vapor-costo promedio de compra de vapor (ROI Av_Av), valores mínimos (ROI Min_Min) y valores máximos (ROI Max_Max) y referidos a las emisiones del costo de emisiones de CO₂. El ROI se calculó de acuerdo con la fórmula:

$$ROI = Rn/Ci \times 100 \quad (1)$$

Donde el costo de inversión (Ci) toma en cuenta: costos de fabricación e instalación de equipos (prorratados considerando un período de vida útil de 10 años), costo de electricidad para bombeo y mantenimiento anual.

Asimismo, la inversión de retorno neto (Rn) tiene en cuenta: El costo evitado del vapor comprado (precio promedio de compra) y el costo evitado debido a las emisiones de CO₂.

Figura 5: Rentabilidad anual de la inversión referida a los precios de los impuestos al carbono



El ROI anual es positivo para todos los escenarios, excepto el caso más desfavorable, cuando el precio del carbono se establece en 0€ combinado con el rendimiento de producción de vapor más bajo y el costo de compra de vapor más bajo, mostrando un ROI de -0.03%. Como era de esperar, a mayor costo del impuesto al carbono, mayor ROI debido a las emisiones evitadas. A principios de 2020, los derechos de emisión europeos de CO₂ alcanzaron los 25,15 € (Revision for phase 4 (2021-2030) | Climate Action, no date) resultando en un ROI del

204% para el escenario más desfavorable y del 758% para el más favorable, lo que demuestra la viabilidad financiera de la instalación de HP para la producción de vapor en el caso seleccionado.

Por otro lado, la Figura 5 muestra que incluso para el escenario hipotético de la supresión del impuesto al carbono, la viabilidad financiera de la tecnología está prácticamente asegurada. Sin embargo, este evento es muy poco probable debido al fuerte apoyo a los instrumentos de fijación de precios del carbono por parte de la UE. De hecho, el marco legislativo del RCDE UE para el próximo período comercial (fase 4) aumenta el ritmo de las reducciones anuales de derechos de emisión al 2,2% a partir de 2021 (*Revision for phase 4 (2021-2030) | Climate Action*, no date), por lo que parece probable que los precios del carbono sigan aumentando.

4. Conclusiones

Se ha realizado un Análisis de Ciclo de Vida para condiciones de producción de vapor mediante heat pipes a escala industrial que han demostrado las ventajas ambientales de la inclusión de dicha tecnología, principalmente por el ahorro en la quema de gas natural para generar el vapor necesario para el proceso productivo. Es importante resaltar que esta vía de producción se comparó con condiciones de cogeneración con gases residuales siderúrgicos, sistema con cargas ambientales significativamente menores al de las calderas de vapor tradicionales, obteniendo reducciones de las emisiones de CO₂-eq de un 97% respecto al medio de producción actual.

Finalmente, se muestra cómo la consideración de las reducciones en emisiones GEI es muy importante cuando se evalúa económicamente tecnologías destinadas a la mejora de la eficiencia energética en la industria, mostrando en un caso en que su inclusión cambia la valoración económica, desde prácticamente neutra (Retorno anualizado de la inversión próximo a 0), hasta alcanzar un retorno anualizado de la inversión del 200% para los casos más bajos de eficiencia de generación de vapor y ahorros por compra de vapor evitada.

5. Bibliografía

- Adams, P. W. R. and McManus, M. C. (2014) 'Small-scale biomass gasification CHP utilisation in industry: Energy and environmental evaluation', *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 6, pp. 129–140. doi: 10.1016/j.seta.2014.02.002.
- Ascher, S., Li, W. and You, S. (2020) 'Life cycle assessment and net present worth analysis of a community-based food waste treatment system', *Bioresource Technology*, 305, p. 123076. doi: 10.1016/j.biortech.2020.123076.
- Baidya, D., de Brito, M. A. R. and Ghoreishi-Madiseh, S. A. (2020) 'Techno-economic feasibility investigation of incorporating an energy storage with an exhaust heat recovery system for underground mines in cold climatic regions', *Applied Energy*, 273(June), p. 115289. doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115289.
- Brückner, S. et al. (2015) 'Industrial waste heat recovery technologies: An economic analysis of heat transformation technologies', *Applied Energy*, 151, pp. 157–167. doi: 10.1016/j.apenergy.2015.01.147.
- Delpech, B. et al. (2018) 'Energy efficiency enhancement and waste heat recovery in industrial processes by means of the heat pipe technology: Case of the ceramic industry', *Energy*, 158, pp. 656–665. doi: 10.1016/j.energy.2018.06.041.
- Directorate-General for Internal Market, Industry, E. and Sme. (European C. (2019) Masterplan for a competitive transformation of EU energy intensive industries enabling a climate-neutral, circular economy by 2050. doi: 10.2873/854920.
- Duan, W. et al. (2018) 'Life cycle and economic assessment of multi-stage blast furnace slag waste heat recovery system', *Energy*, 142, pp. 486–495. doi: 10.1016/j.energy.2017.10.048.

- Fierro, J. J. et al. (2021) 'Techno-economic assessment of a rotary kiln shell radiation waste heat recovery system', *Thermal Science and Engineering Progress*, 23, p. 100858. doi: 10.1016/j.tsep.2021.100858.
- García, S. G. et al. (2019) 'Evaluation of the synergies in cogeneration with steel waste gases based on Life Cycle Assessment: A combined coke oven and steelmaking gas case study', *Journal of Cleaner Production*, 217, pp. 576–583. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.01.262.
- He, K. and Wang, L. (2017) 'A review of energy use and energy-efficient technologies for the iron and steel industry', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70(September 2016), pp. 1022–1039. doi: 10.1016/j.rser.2016.12.007.
- Jouhara, H. et al. (2017) 'Heat pipe based systems - Advances and applications', *Energy*, 128, pp. 729–754. doi: 10.1016/j.energy.2017.04.028.
- Jouhara, H. et al. (2021) 'Investigation on a full-scale Heat Pipe Heat Exchanger in the ceramics industry for waste heat recovery', *Energy*, 223, p. 120037. doi: 10.1016/j.energy.2021.120037.
- Khayyam, H. et al. (2021) 'Improving energy efficiency of carbon fiber manufacturing through waste heat recovery: A circular economy approach with machine learning', *Energy*, 225, p. 120113. doi: 10.1016/j.energy.2021.120113.
- KUN, E. and SZEMMELVEISZ, T. (2014) 'Energy efficiency enhancement in the hot rolling mill', *Materials Science and Engineering*, 3(2), pp. 43–50.
- Liu, X. et al. (2020) 'Energy, exergy, economic and environmental (4E) analysis of an integrated process combining CO₂ capture and storage, an organic Rankine cycle and an absorption refrigeration cycle', *Energy Conversion and Management*, 210(March), p. 112738. doi: 10.1016/j.enconman.2020.112738.
- López-Sabirón, A. M. et al. (2014) 'Carbon footprint of a thermal energy storage system using phase change materials for industrial energy recovery to reduce the fossil fuel consumption', *Applied Energy*, 135, pp. 616–624. doi: 10.1016/j.apenergy.2014.08.038.
- Ma, H. et al. (2000) 'The influence of hydrogen sulfide on corrosion of iron under different conditions', *Corrosion Science*, 42(10), pp. 1669–1683. doi: 10.1016/S0010-938X(00)00003-2.
- McBrien, M., Serrenho, A. C. and Allwood, J. M. (2016) 'Potential for energy savings by heat recovery in an integrated steel supply chain', *Applied Thermal Engineering*, 103, pp. 592–606. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.04.099.
- Medarac, H., Moya, J. A. and Somers, J. (no date) 'Production costs from iron and steel industry in the EU and third countries', in. doi: 10.2760/705636.
- Ortega-Fernández, I. and Rodríguez-Aseguinolaza, J. (2019) 'Thermal energy storage for waste heat recovery in the steelworks: The case study of the REslag project', *Applied Energy*, 237(January), pp. 708–719. doi: 10.1016/j.apenergy.2019.01.007.
- Parajuli, R. et al. (2014) 'Life Cycle Assessment of district heat production in a straw fired CHP plant', *Biomass and Bioenergy*, 68, pp. 115–134. doi: 10.1016/j.biombioe.2014.06.005.
- Pili, R. et al. (2020) 'Techno-economic potential of waste heat recovery from German energy-intensive industry with Organic Rankine Cycle technology', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd, p. 110324. doi: 10.1016/j.rser.2020.110324.
- Revision for phase 4 (2021-2030) | Climate Action (no date). Available at: https://ec.europa.eu/clima/policies/ets/revision_en (Accessed: 26 January 2021).
- Sharma, H. et al. (2014) 'A review of metallic radiation recuperators for thermal exhaust heat recovery', *Journal of Mechanical Science and Technology*, 28(3), pp. 1099–1111. doi: 10.1007/s12206-013-1186-4.
- Srimuang, W. and Amatachaya, P. (2012) 'A review of the applications of heat pipe heat exchangers for heat recovery', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6), pp. 4303–4315. doi: 10.1016/j.rser.2012.03.030.

- Turconi, R., Boldrin, A. and Astrup, T. (2013) 'Life cycle assessment (LCA) of electricity generation technologies: Overview, comparability and limitations', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd, pp. 555–565. doi: 10.1016/j.rser.2013.08.013.
- Valencia, G., Fontalvo, A. and Duarte Forero, J. (2021) 'Optimization of waste heat recovery in internal combustion engine using a dual-loop organic Rankine cycle: Thermo-economic and environmental footprint analysis', *Applied Thermal Engineering*, 182, p. 116109. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.116109.
- Zhang, Q. et al. (2017) 'Waste energy recovery and energy efficiency improvement in China's iron and steel industry', *Applied Energy*, 191, pp. 502–520. doi: 10.1016/j.apenergy.2017.01.072.
- Zhang, Q. et al. (2019) 'Exergy-based analysis combined with LCA for waste heat recovery in coal-fired CHP plants', *Energy*, 169, pp. 247–262. doi: 10.1016/j.energy.2018.12.017.

**Comunicación alineada con los
Objetivos de Desarrollo Sostenible**

