



**IIT**  
**INSTITUTO DE**  
**INVESTIGACIÓN**  
**TECNOLÓGICA**

## **INFORME TÉCNICO**

# **Tecnologías para la descarbonización de la industria del uso intensivo de energía**

Timo Gerres

Dr. José Pablo Chaves Ávila

Prof. Pedro Linares Llamas

Tomás Gómez San Román

Septiembre de 2019

Estudios para la preparación de la estrategia de Descarbonización de la economía española

Versión: 1.1

La industria con uso intensivo de energía (IIE) es responsable de dos tercios de las emisiones de dióxido de carbono industriales en la UE. Se ha reconocido tanto por los actores públicos y privados que se requiere una profunda transformación de estas industrias para cumplir con los objetivos de reducción de emisiones establecidos por la Unión Europea para el año 2050. Cuando se contrastan las innovaciones discutidas en las publicaciones científicas sobre itinerarios y hojas de ruta de las diferentes industrias, se puede concluir que hay poco consenso sobre cómo se puede lograr una profunda descarbonización de la IIE. Esta revisión del estado del arte consta de dos partes. En la primera parte se presenta una revisión de las publicaciones sobre itinerarios y hojas de ruta y la literatura científica. Esto permite identificar áreas clave para la reducción de emisiones en todos los sectores. Los resultados muestran diferencias significativas en la literatura con respecto a las reducciones de emisiones alcanzables. En la segunda parte se presenta una revisión de costes para las tecnologías claves para la reducción de emisiones en las diferentes industrias que se han identificado en la primera sección.

Este documento es uno de los “Estudios para la preparación de la estrategia de Descarbonización de la economía española” realizados por el IIT para el Ministerio de la Transición Ecológica (MITECO).

#### **Titularidad y responsabilidad**

El derecho de autor corresponde a los miembros del equipo investigador, los cuales deberán ser citados en cualquier uso que se haga del resultado de su trabajo.

Conforme a los usos de la comunidad científica, las conclusiones y puntos de vista reflejados en los informes y resultados son los de sus autores y no comprometen ni obligan en modo alguno a la Universidad Pontificia Comillas ni a ninguno de sus Centros e Institutos o al resto de sus profesores e investigadores.

Por tanto, cualquier cita o referencia que se haga de este documento deberá siempre mencionar explícitamente el nombre de los autores, y en ningún caso mencionará exclusivamente a la Universidad.

## ÍNDICE

|  |           |
|--|-----------|
| <b>LOS POTENCIALES INTERSECTORIALES PARA LA DESCARBONIZACIÓN DE LAS INDUSTRIAS EUROPEAS CON USO INTENSIVO DE ENERGÍA</b> | <b>1</b>  |
| I. INTRODUCCIÓN  | 2         |
| II. METODOLOGÍA  | 4         |
| III. CATEGORIZACIÓN DE LOS HALLAZGOS   | 8         |
| IV. EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE DESCARBONIZACIÓN   | 11        |
| 4.1 <i>Recuperación de calor</i>   | 11        |
| 4.2 <i>Hornos</i>  | 13        |
| 4.3 <i>La captura y almacenamiento de carbono (CCS)</i>  | 16        |
| 4.4 <i>Biomasa y residuos de origen biológico</i>  | 18        |
| 4.5 <i>La provisión de calor de proceso</i>  | 20        |
| 4.6 <i>Materias primas alternativas</i>  | 21        |
| 4.7 <i>Electrólisis y producción de hidrógeno</i>  | 23        |
| 4.8 <i>La cogeneración (CHP)</i>   | 24        |
| 4.9 <i>Hornos industriales</i>   | 25        |
| 4.10 <i>Procesos catalíticos y la separación de membrana</i>   | 27        |
| V. LA DESCARBONIZACIÓN INDUSTRIAL EN EL HORIZONTE 2050   | 28        |
| 5.1 <i>La optimización de procesos con equipos estandarizados</i>  | 28        |
| 5.2 <i>Las tecnologías innovadoras son claves para la descarbonización</i>   | 29        |
| 5.3 <i>La preparación tecnológica y los ciclos de inversión</i>  | 30        |
| 5.4 <i>La incertidumbre del potencial de reducción de emisiones</i>  | 31        |
| 5.5 <i>Implicaciones intersectoriales de las innovaciones</i>  | 32        |
| VI. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS  | 33        |
| <b>EL COSTE ASOCIADO A LA TRANSICION DE LAS INDUSTRIAS INTENSIVAS EN ENERGIA</b>   | <b>35</b> |
| I. INTRODUCCIÓN  | 36        |
| II. CEMENTO  | 36        |
| III. SIDERURGIA  | 38        |
| IV. PLÁSTICO Y PETROQUÍMICA  | 40        |
| V. PAPEL Y PASTA   | 41        |
| VI. HIDRÓGENO  | 43        |
| <b>REFERENCIAS</b>   | <b>45</b> |



**PARTE 1:**

**LOS POTENCIALES INTERSECTORIALES PARA LA DESCARBONIZACIÓN DE  
LAS INDUSTRIAS EUROPEAS CON USO INTENSIVO DE ENERGÍA**

## I. Introducción

El cambio climático causado por las emisiones de gases de efecto invernadero se considera uno de los principales retos de la humanidad en el siglo XXI. La necesidad de reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> drásticamente ha sido aceptada ampliamente. La Unión Europea se dirige a una reducción de 100% de las emisiones para el año 2050 [1]. Las diferentes industrias con uso intensivo de energía (IIEs) son unos de los principales emisores de carbono. A saber, la producción de acero, la (petro)química, el cemento, la cerámica, el vidrio, el papel y la alimentación son los sectores con la intensidad de CO<sub>2</sub> más alto. Estos sectores son responsables de alrededor del 64% del total de las emisiones industriales en la Unión Europea (UE) [2]. La producción en estas industrias requiere calor de proceso de alta temperatura, y además algunas tienen emisiones directamente asociadas a los procesos químicos de fabricación. Según los datos de consumo de la industria en la UE, la IIE utiliza principalmente combustibles fósiles con un alto poder calorífico para generar calor [3]. Las rutas de procesos dentro de los diferentes sectores son maduras y estandarizadas, lo que limita el número de diferentes procesos de producción comercialmente competitivos.

Varias características de la IIE dificultan la transición necesaria para lograr la descarbonización del sector. Los equipos de procesos productivos primarios se caracterizan por altos costes de inversión inicial, con una vida útil de hasta 50 años, como en el caso de las plantas de cemento [4] y una larga vida útil de los equipos individuales de más de 20 años, como en el caso de los hornos de la industria siderúrgica [5]. Durante la última década, las mejoras de eficiencia económicamente más viables se han implementado dentro de los distintos sectores, y la intensidad energética de los procesos industriales se redujo significativamente [6]. Las nuevas tecnologías y otras opciones para reducir la intensidad de carbono en estos sectores no son rentables a escala comercial. Sigue siendo incierto cuando las posibles nuevas tecnologías podrían ser competitivas para cada una de las industrias. Los pioneros de las nuevas tecnologías con largos períodos de recuperación de costes corren el riesgo de pérdidas económicas si las tecnologías no son suficientemente maduras o no pueden lograr un coste competitivo de operación en el largo plazo. La IIE está estrechamente vinculada al sector del metal y la construcción. Estas industrias se consideran como más conservadoras con respecto a los cambios que otras industrias [7]. Un análisis de los desarrollos históricos de los métodos de producción predominantes en las industrias del cemento y de vidrio en el siglo XX realizado por Anderson y Tushman [8] muestra que después de la introducción de grandes innovaciones con viabilidad económica, pasaban 5 a 20 años antes que las nuevas tecnologías se convirtieran en el nuevo diseño dominante. Publicaciones recientes dudan de que las transformaciones necesarias en el sector sean posibles sin grandes incentivos públicos [9].

En respuesta a la primer hoja de ruta de la UE para 2050 [10], varios actores públicos y privados publicaron hojas de ruta e itinerarios para la IIE y los sectores. Una comparación

de estas publicaciones demuestra un alto grado de inconsistencia de las visiones sectoriales y las tecnologías que permitirían la descarbonización de toda la industria. La agencia federal de medio ambiente de Alemania espera que la utilización de metano renovable como gas de síntesis sea clave [11]. Los proyectos "Deep Decarbonisation Pathways" del Reino Unido [12] y los EEUU [13] prevén una alta dependencia del gas natural. Los informes que evalúan el itinerario de Holanda [14] y Suecia [15] hacia una economía baja en carbono se centran en la electrificación de toda la industria. La mayoría de estas publicaciones de hojas de ruta tienen en común que se elige un enfoque de arriba abajo (top-down). En función de los objetivos de descarbonización se proponen cambios basados en tecnologías intersectoriales como la implementación de procesos de electrólisis a gran escala, nuevas rutas de producción basadas en hidrógeno, y la captura de carbono y la infraestructura necesaria para su utilización. Las tasas de aplicación de estas tecnologías se presentan con poca base científica y análisis profundo con respecto a la viabilidad y la verosimilitud de los desarrollos tecnológicos descritos.

Un segundo grupo de publicaciones presenta unos análisis profundos de las diferentes opciones tecnológicas para cada sector industrial. En estas publicaciones consideran la probabilidad de que diferentes opciones tecnológicas se implementen en la industria y especifican su potencial para la descarbonización. La vista de abajo arriba (bottom-up) para evaluar las opciones para la descarbonización industrial es típica de publicaciones de las asociaciones que representan los sectores europeos, como el de la siderurgia [16], cemento [17] o industria cerámica [18]. Algunas publicaciones que estudian todo el sector de la IIE utilizan una metodología parecida, como los "Industrial Decarbonisation & Energy Efficiency Roadmaps to 2050" publicados por el gobierno del Reino Unido [19]. Las revisiones tecnológicas realizadas por las diferentes industrias suelen analizar los diferentes sectores industriales como entidades separadas. Diferentes opciones para la reducción de emisiones como los hornos electrificados, la utilización de la biomasa o de hidrógeno no se contrastan con respecto a su aplicabilidad para todas las industrias. El potencial intersectorial de ciertas tecnologías no es capturado, y la visión integral de cómo se puede alcanzar la descarbonización de todo el sector industrial es limitada. El potencial de descarbonización de las diferentes tecnologías presentadas por estas publicaciones varía significativamente.

Las publicaciones actuales de hojas de ruta e itinerarios no ofrecen una visión clara de cómo la industria puede lograr las reducciones de emisiones requeridas en las próximas décadas. La vista de arriba abajo no captura la viabilidad tecnológica y económica. Las hojas de ruta de abajo arriba con énfasis en la viabilidad técnica a menudo ignoran la dimensión intersectorial de las opciones de reducción consideradas. Esta revisión aborda esta brecha mediante el análisis sistemático de las publicaciones de hojas de ruta e itinerarios con una vista de abajo arriba y con un enfoque en la descarbonización industrial. Se identifican diferentes áreas comunes de reducción de las emisiones con importancia intersectorial para múltiples IIE. Contrastando los resultados con la literatura científica podemos definir rangos del potencial de descarbonización para

---

opciones en diferentes sectores industriales. Dicha revisión no se ha hecho hasta ahora y ofrece a los políticos, la industria y la comunidad científica una nueva perspectiva sobre las diferentes posibles opciones tecnológicas, que no es ni de arriba hacia abajo, ni específica para un solo un sector. Tal punto de vista es clave para la creación de una visión sobre medidas a seguir hacia la descarbonización de la IIE que sea congruente para toda la industria. Las conclusiones pueden ser una aportación valiosa para los responsables políticos de cara a diseñar incentivos para la industria para fomentar la aplicación de tecnologías de baja emisión. Dado que muchas de las tecnologías revisadas requieren apoyo público para lograr su introducción en todo el sector, el trabajo presentado se puede utilizar para el diseño de instrumentos políticos y centrar futuras investigaciones sobre tecnologías clave para asegurar una producción más limpia y sostenible dentro de la IIE hasta 2050.

El objetivo de este trabajo es la identificación de las principales opciones de descarbonización para la IIE y evaluar su relevancia y potencial intersectorial de descarbonización para el sector industrial tomando en cuenta los objetivos de descarbonización de la UE 2050. Un enfoque sistemático para identificar y clasificar las opciones de reducción más mencionados en hojas de ruta e itinerarios se presenta en la Sección 2. Los resultados iniciales (Sección 3) se contrastan con la literatura científica para estimar su potencial para la descarbonización y su madurez tecnológica (Sección 4). El análisis de fondo de los resultados con respecto a la hoja de ruta de la descarbonización de la UE 2050 que se presenta en la sección 5 nos permite a identificar cinco resultados claves que se deben considerar para la futura investigación de la descarbonización.

## **II. Metodología**

La IIE con altas emisiones de carbono se define como la siderurgia, la (petro)química, el cemento, la cerámica, el vidrio, el papel y pasta de papel y la industria de alimentos y bebidas. Estas industrias representan actualmente el 64% de la huella de carbono industrial de la UE, según los datos presentados por Croezen y Korteland [20] y Buckley y Lemmens [2] (Tabla 1). No se incluyen las IIEs electrificadas como la producción de aluminio o cobre: la descarbonización de las industrias electrificadas depende de la futura intensidad de CO<sub>2</sub> del sector eléctrico, que está fuera del ámbito de este trabajo. Los autores reconocen que también se requieren más esfuerzos en las industrias de baja intensidad energética para realizar la descarbonización total. Una reflexión sobre la importancia de los hallazgos de este trabajo para otras actividades industriales se presenta en la Sección 5.



Tabla 1. La participación de las IIEs en el total de las emisiones de la industria de la UE en 2017

| Siderurgia | (Petro)química | Cemento | Papel y Pasta | Cerámica | Vidrio | Alimentación |
|------------|----------------|---------|---------------|----------|--------|--------------|
| 23%        | 18%            | 16%     | 4%            | 2%       | 1%     | 1%           |

Las IIEs con altas emisiones de carbono fabrican diferentes productos finales que van desde las materias primas o los productos químicos hasta los alimentos. Se requiere un análisis estructurado de las publicaciones disponibles para evaluar los posibles potenciales intersectoriales e identificar áreas que ofrecen posibles opciones para la reducción de emisiones. Se han identificado dos tareas principales para encontrar respuestas relacionadas con el objetivo de la investigación. En primer lugar, se han revisado las publicaciones actuales para desarrollar una clasificación de las posibles áreas de opciones de reducción en las diferentes IIEs. Los resultados se utilizan para evaluar el potencial de descarbonización en todas las IIE para cada área de opciones de reducción (Figura 1).

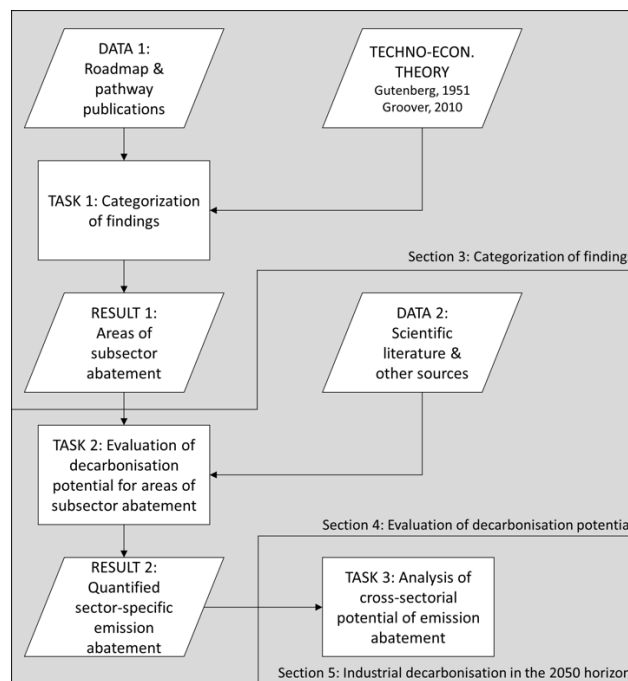


Figura 1. Metodología de revisión

Las publicaciones relevantes se han identificado por una búsqueda dirigida a las hojas de ruta, tanto de fuentes públicas y privadas (DATA 1). Las publicaciones incluidas en esta revisión son hojas de ruta técnica de las organizaciones europeas sectoriales con foco en los objetivos de la UE 2050, opiniones intersectoriales dirigidas a la descarbonización industrial a nivel europeo, y hojas de ruta nacionales y regionales de la industria. Los informes sobre Best Available Techniques (BAT) publicados por el Joint Research Center de la Comisión Europea también se han considerado. Los documentos

que no evalúan específicamente el contexto europeo como los del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático, las agencias del gobierno de Estados Unidos y otros también se han incluido en la revisión. Todas las publicaciones tienen en común que las BAT y las tecnologías emergentes para diferentes sectores son revisadas a un cierto nivel de detalle (Tabla 2). En total se han revisado 40 hojas de ruta, itinerarios y publicaciones relacionadas. Las opciones de reducción y las posibles tecnologías mencionadas por estas fuentes se han indexado en una base de datos. Cuando estaba disponible, se ha revisado información sobre los sectores, el potencial para la reducción de CO<sub>2</sub>, el impacto sobre el consumo de energía y la madurez de la tecnología.

Tabla 2. Publicaciones revisadas para la TAREA 2: Categorización de los resultados

| <u>Hojas de ruta de sectores para 2050</u> |   | <u>Publicaciones intersectoriales</u> | <u>Publicaciones intersectoriales regionales/nacionales</u> |      | <u>JRC BAT informes</u> | <u>Otros</u> |                            |      |                         |
|--|---|---------------------------------------|---|------|-------------------------|--------------|----------------------------|------|-------------------------|
| [21]                                       | European Cement Research Academy (2017) | [15]                                  | Brolin et al. (2017)  | [14] | Berenschot (2017)       | [22]         | Barthe et al. (2015)       | [23] | Baldwin et al. (2015)   |
| [24]                                       | British Glass (2014)                    | [25]                                  | Wyns y Axelson (2016)                                       | [26] | Samadi et al. (2016)    | [27]         | Suhr et al. (2015)         | [28] | Brueske et al. (2015)   |
| [29]                                       | CEFIC (2013)                            | [30]                                  | Carbon Market Watch (2016)                                  | [19] | WSP y DNV GL (2015)     | [31]         | JRC (2013)                 | [32] | Miller et al. (2015)    |
| [17]                                       | CEMBUREAU (2013)                        | [33]                                  | van Kranenburg et al (2016)                                 | [34] | Fleiter et al. (2013)   | [35]         | Remus et al. (2013)        | [36] | IPCC (2014)             |
| [16]                                       | EUROFER (2013)                          | [37]                                  | Åhman y Nilsson (2015)                                      | [38] | Haydock y Napp (2013)   | [39]         | Scalet et al. (2013)       | [40] | Gellings (2009)         |
| [41]                                       | Glass for Europe (2013)                 | [42]                                  | Chan y Kantamaneni, (2015)                                  | [43] | Åhman et al. (2012)     | [44]         | Schorcht et al. (2013)     | [45] | McKinsey&Company (2009) |
| [18]                                       | Cerame-Unie (2012)                      | [46]                                  | Napp et al. (2014)  |      |                         | [47]         | Pardo-Garcia et al. (2012) |      |                         |
| [48]                                       | FoodDrinkEurope (2012)                  | [49]                                  | Brown et al. (2012)   |      |                         | [50]         | JRC (2007)                 |      |                         |
| [51]                                       | CEPI (2011)                             | [20]                                  | Croezen y Korteland (2010)                                  |      |                         |              |                            |      |                         |
| [52]                                       | European Copper Institute (2014)        |                                       |   |      |                         |              |                            |      |                         |

Las tecnologías y opciones de reducción discutidas por los diferentes sectores se han clasificado mediante una clasificación de múltiples criterios técnico-económicos desarrollado por los autores para esta revisión. En primer lugar, todos los resultados se asignan dentro de un marco de entrada-proceso-salida. Las entradas, salidas y procesos de transformación tienen características físicas y no físicas. Se distingue entre las "materias primas", los "portadores de energía" y la dimensión de "información" basado en la teoría de factores de producción de Gutenberg [53]. Tomando en cuenta que la mayoría de los hallazgos se refieren a los procesos de fabricación, se aplica un marco adicional presentado por Groover [54], que se ha extendido para identificar diferentes subcategorías de opciones de reducción. El marco resultante se muestra en la Figura 2. En la Figura 3 se demuestra a modo de ejemplo cómo se identifican diferentes opciones de reducción. El resultado de este proceso de clasificación de los resultados (RESULTADO 1) se presenta en la Sección 3. Se establece también una lista reducida de las cinco opciones de reducción más mencionadas, que sirve como entrada para la Tarea 2 (Figura 1).

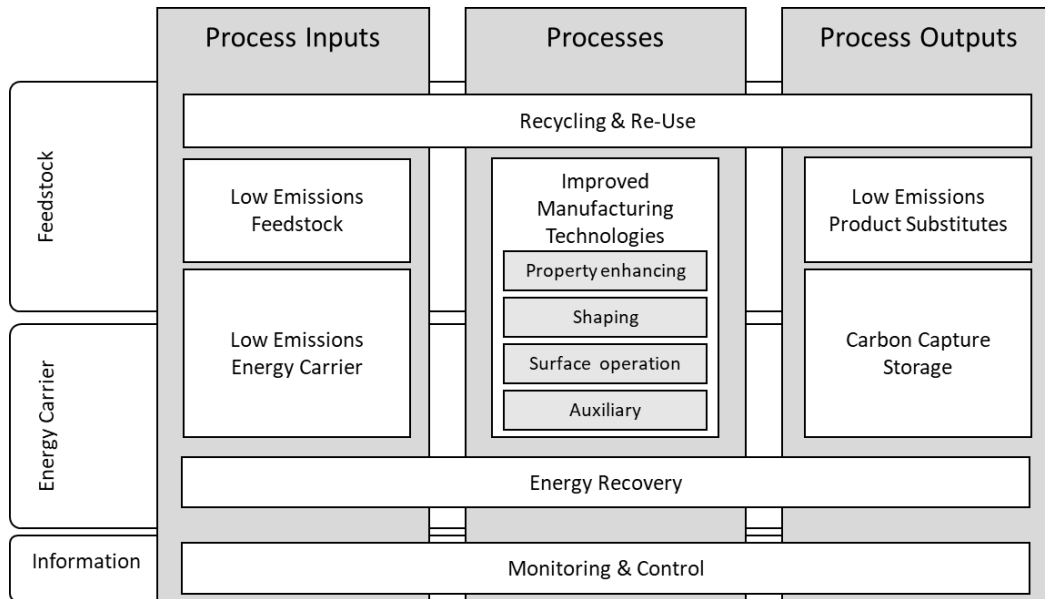


Figura 2. El marco para la clasificación de los potenciales de descarbonización

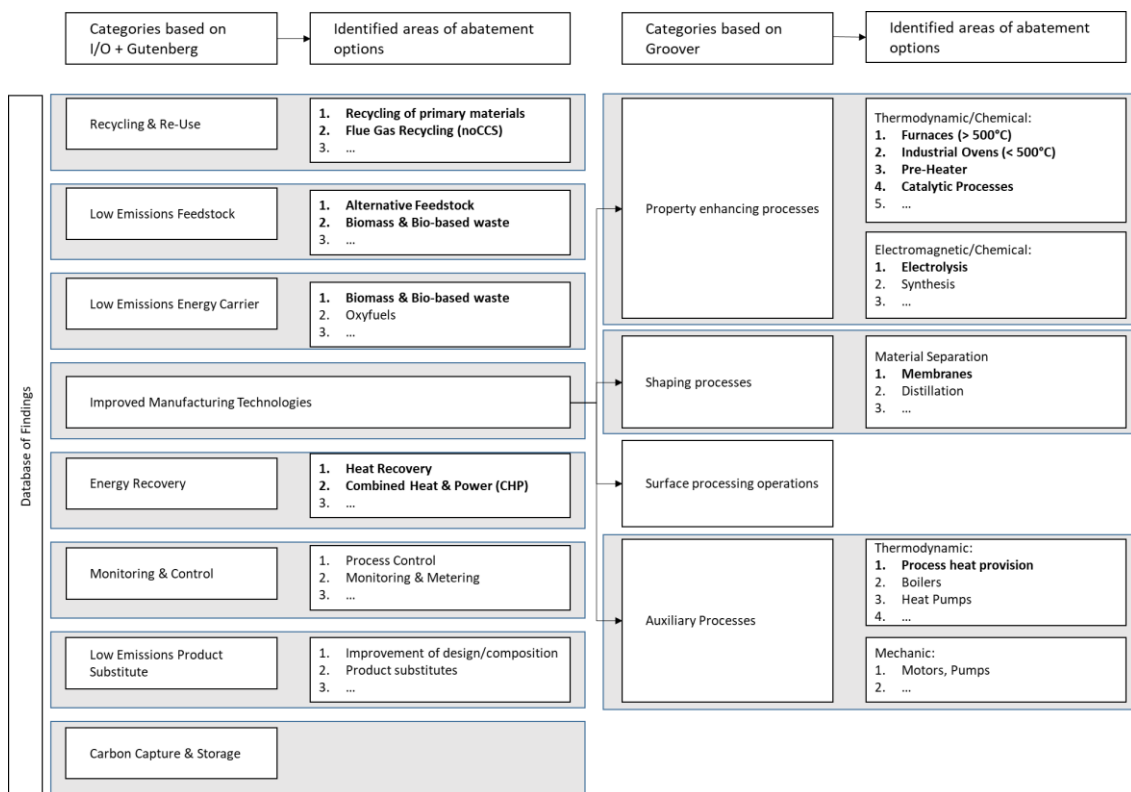


Figura 3. Identificación de las áreas de opciones de reducción. Las opciones más mencionadas están resaltadas.

En un segundo paso, cuantificamos el potencial de descarbonización de las áreas más mencionadas de opciones de reducción identificados en RESULTADO 1. La información de las publicaciones revisadas para la Tarea 1 se contrasta con la literatura científica y otras publicaciones tecnológicas para las principales áreas de reducción de emisiones con relevancia intersectorial. Se requieren breves revisiones de la literatura con un enfoque especial en las posibilidades de reducción para cada sector pertinente (DATA 2). Con la Tarea 2 se cuantifica el potencial a reducir emisiones con respecto a una posible descarbonización del sector en la UE (Figura 1). Cuando las fuentes indican el posible ahorro de energía, las estimaciones sobre el potencial para la descarbonización se derivan a partir del consumo y la intensidad de las emisiones para los diferentes subprocesos. El supuesto principal para la estimación de los potenciales de descarbonización es la disponibilidad de electricidad de cero emisiones netas en 2050. La reducción de emisiones del sector eléctrico está vinculada a altos niveles de la producción de energía renovable variable, flexibilidad de la demanda y el almacenamiento de energía. La transición del sector eléctrico es un otro campo de investigación y no se ha analizado en el contexto de esta revisión. Si no se indica lo contrario, los datos de emisiones de los procesos actuales indicados por Fleiter et al. [34] se utilizan para calcular las estimaciones de ahorro si las fuentes revisadas solamente indican el potencial de ahorro de energía. Basado en los datos disponibles se calculan valores mínimos y máximos para el potencial de descarbonización específica de cada industria. Estos valores representan los mínimos y máximos derivados de las fuentes revisadas. Los hallazgos (RESULTADOS 2) se presentan en detalle en la Sección 4. Reconocemos en cualquier caso que este método sólo permite una estimación aproximada de los potenciales de reducción de CO<sub>2</sub>.

En la Sección 5 se contrastan los resultados cuantitativos de los potenciales de descarbonización de las diferentes tecnologías. El análisis de los datos (TAREA 3) permite identificar tendencias y tecnologías clave que son necesarias para alcanzar la descarbonización industrial en el horizonte 2050 (Figura 1).

### III. Categorización de los hallazgos

En esta sección se presentan los resultados obtenidos mediante la revisión de las publicaciones de hoja de ruta e itinerarios. Se identifican las cinco áreas de potenciales de reducción más mencionadas para cada uno de los sectores analizados.

En total, se pueden extraer 834 opciones de reducción de las 40 publicaciones de hojas de ruta e itinerarios (Tabla 2). El 96% de los hallazgos encajan en las categorías propuestas en el marco introducido en la Sección 2. Alrededor del 50% de los hallazgos se refieren a procesos de fabricación. Las cinco opciones de reducción más mencionadas se identifican para cada uno de los sectores analizados. Los resultados de esta revisión se resumen en la Tabla 3. Por simplicidad solamente se han incluido hallazgos de las categorías de los potenciales de reducción más mencionados.

Tabla 3. Opciones de reducción en publicaciones revisadas (1. recuperación de calor, 2. hornos, 3. CCS, 4. biomasa y residuos de base biológica, 5. suministro de calor de proceso, 6. materias primas alternativas, 7. electrólisis, 8. cogeneración, 9. hornos industriales, 10. catalizadores y tecnología de membranas)

|  | Siderurgia | (Petro)química     | Cemento   | Papel y pasta | Cerámica      | Vidrio    | Alimentación     |
|--|------------|--------------------|-----------|---------------|---------------|-----------|------------------|
| [14] Berenschot (2017)                       | 2          |                    |           | 9             |               | 2         | 5,9,10           |
| [15] Brolin et al. (2017)                    | 2,7        | 4,6                | 5,8       | 4,5           |               |           |                  |
| [21] European Cement Research Academy (2017) |            |                    | 1,2,3,4,6 |               |               |           |                  |
| [30] Carbon Market Watch (2016)              | 2          | 4,6,7              | 3,6,      |               |               |           |                  |
| [26] Samadi et al. (2016)                    |            | 1,2,3,4,5,6,7,8,10 |           |               |               |           |                  |
| [33] van Kranenburg et al (2016)             |            | 5,7,10             |           |               |               |           |                  |
| [25] Wyns y Axelson (2016)                   | 2,3,7      | 4,7,10             | 3,6,7     |               |               |           |                  |
| [37] Åhman y Nilsson (2015)                  | 4          | 4,6,7              | 4,6       | 4             |               |           |                  |
| [23] Baldwin et al. (2015)                   | 1          | 1                  |           | 1             |               | 1         | 1                |
| [22] Barthe et al. (2015)                    |            | 3,4,10             |           |               |               |           |                  |
| [28] Brueske et al. (2015)                   |            | 2,9,10             |           |               |               |           |                  |
| [42] Chan y Kantamaneni, (2015)              | 1,2        | 1,2,8,10           |           | 1,3,8,9       |               |           | 8                |
| [19] WSP y DNV GL (2015)                     | 1,2,3,4,7  | 1,3,4,5,6,7,8,10   | 1,2,4,6   | 1,4,5,9       | 1,2,3,4,5,6,8 | 1,2,3,6   | 1,3,4,5,6,8,9,10 |
| [32] Miller et al. (2015)                    |            |                    |           | 9,10          |               |           |                  |
| [27] Suhr et al. (2015)                      |            |                    |           | 1,3,8         |               |           | 8                |
| [24] British Glass (2014)                    |            |                    |           |               |               | 1,2,3,4,6 |                  |
| [36] IPCC (2014)                             | 2,3,7      | 8,10               | 2,3,4,6   | 3             |               |           | 5                |
| [46] Napp et al. (2014)                      | 1,8        | 1,2,3              | 1,3,6     |               |               |           |                  |
| [29] CEFIC (2013)                            |            | 1,3,4,5,6,7,8,10   |           |               |               |           |                  |
| [17] CEMBUREAU (2013)                        |            |                    | 1,2,3,6   |               |               |           |                  |
| [16] EUROFER (2013)                          | 2,3,4,7    |                    |           |               |               |           |                  |
| [34] Fleiter et al. (2013)                   | 1,2,4,7    | 4,7,10             | 1,6       | 1,3,9         | 1,2,9         | 1,2       | 1,9              |
| [41] Glass for Europe (2013)                 |            |                    |           |               |               | 2,4,6,    |                  |
| [38] Haydock y Napp (2013)                   | 1,2,3,4,8  | 1,3,10             | 3,4,6,    | 1,4,5,9       | 1,2,4,6,8     | 1,2       | 5,8,9            |
| [31] JRC (2013)                              |            |                    |           |               |               |           | 5                |
| [35] Remus et al. (2013)                     | 3,7        |                    |           |               |               |           | 8                |
| [39] Scalet et al. (2013)                    |            |                    |           |               |               | 1,2,4,6   |                  |
| [44] Schorcht et al. (2013)                  |            |                    | 2,8       |               |               |           |                  |
| [43] Åhman et al. (2012)                     | 2,3,7      | 4,6                | 6,        | 3,5           |               |           | 5                |
| [49] Brown et al. (2012)                     | 1          | 10                 | 2,6,      |               |               |           |                  |
| [18] Cerame-Unie (2012)                      |            |                    |           |               | 1,2,6,8       |           |                  |
| [48] FoodDrinkEurope (2012)                  |            |                    |           |               |               |           | 4,8              |
| [47] Pardo-Garcia et al. (2012)              |            |                    |           | 2             | 2,4           |           | 4                |
| [51] CEPI (2011)                             |            | 6                  |           | 4,9           |               |           |                  |
| [20] Croezen y Korteland (2010)              | 2,3,4,7    |                    | 2,3,4,6   | 3,9           |               |           |                  |
| [52] European Copper Institute (2014)        | 5          | 5                  | 5         | 5             | 5             | 5         |                  |
| [40] Gellings (2009)                         | 2,7,10     | 9,10               |           | 9             |               | 2         | 9,10             |
| [45] McKinsey&Company (2009)                 | 2,3,4,8    | 3                  |           |               |               |           |                  |
| [50] JRC (2007)                              |            |                    |           |               | 2,8,9         |           |                  |

La mayoría de las áreas de potencial de reducción son relevantes para más de una industria. Cuando se listan las cinco áreas más mencionadas de reducción de emisiones para las industrias identificadas se muestra que la descarbonización requiere avances tecnológicos en diez áreas clave (Figura 4): recuperación de calor, hornos, CCS, biomasa y residuos de origen biológico, la provisión de calor de proceso, la materia prima alternativa, electrólisis, la cogeneración (CHP), hornos industriales, y la separación con membranas. Las áreas de reducción de las emisiones de color rojo están relacionadas con el suministro de energía en forma de calor. El color verde indica materias primas alternativas o combustibles alternativos. Las tecnologías resaltadas en azul son una colección de procesos de separación (electro) químicos y mecánicos principalmente aplicados a medios líquidos. La captura y almacenamiento de carbono (CCS) se señala en gris. La electrólisis es una de las opciones más mencionadas para la siderurgia. Esta tecnología también es clave para la generación de hidrógeno neutro en carbono y es ampliamente mencionada en hojas de ruta que defienden una economía basada en el hidrógeno y la electrificación. Por lo tanto, la electrolisis es relevante para todos los sectores. Los precalentadores, el reciclado de materiales primarios, la oxicomustión y reciclaje de los gases de combustión no se revisan de forma separada, sino que solamente se consideran para ciertas industrias específicas y se revisan junto con áreas de reducción de emisiones estrechamente relacionadas.

La categorización de los resultados obtenidos a partir de la revisión de las publicaciones de hojas de ruta muestra que especialmente la descarbonización de procesos de calentamiento es esencial para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> de la IIE. Múltiples hojas de ruta consideran la biomasa como una alternativa viable a las entradas a procesos. El CCS es ampliamente mencionado para limitar las emisiones de carbono directas de la salida del proceso.

|                     | Siderurgia                       | (Petro)química             | Cemento                              | Papel y pasta                           | Cerámica                             | Vidrio                          | Alimentación                            |
|---------------------|----------------------------------|----------------------------|--------------------------------------|---|--------------------------------------|---------------------------------|---|
| 1. más mencionada   | Hornos                           | Procesos catalíticos       | Materia prima alternativa            | Hornos                                  | Hornos                               | Hornos                          | Provisión tratamiento por calentamiento |
| 2.                  | Electrólisis                     | Recuperación de calor      | Residuos de base biológica y biomasa | Recuperación de calor                   | Recuperación de calor                | Recuperación de calor           | Hornos                                  |
| 3.                  | Reciclaje de gases de combustión | La separación con membrana | CCS                                  | CCS                                     | CHP                                  | Precalentador                   | CHP                                     |
| 4.                  | CCS                              | CHP                        | Hornos                               | Residuos de base biológica y biomasa    | Residuos de base biológica y biomasa | Oxicombustión                   | Residuos de base biológica y biomasa    |
| 5. menos mencionado | Recuperación de calor            | CCS                        | Recuperación de calor                | Provisión tratamiento por calentamiento | Materia prima alternativa            | Materiales primarios reciclados | La separación con membrana              |

Figura 4. Áreas de opciones de reducción más discutidos

## IV. Evaluación del potencial de descarbonización

Las tecnologías en desarrollo y las innovaciones potenciales están levantando grandes expectativas. En esta sección se estudia la incertidumbre del potencial de reducción de emisiones de las diez áreas identificadas en la Sección 3. El potencial de descarbonización de opciones de reducción se contrasta con la literatura científica y otras fuentes. Se contrastan también las características técnicas de las opciones de reducción dentro de las diferentes áreas para evaluar su aplicabilidad intersectorial e identificar tendencias y limitaciones.

### 4.1 Recuperación de calor

La utilización de calor residual de procesos de alta temperatura para otras aplicaciones con una demanda de calor inferior no es un concepto novedoso. Múltiples hojas de ruta exploran este tema (Tabla 4). La literatura científica a menudo utiliza conceptos como el análisis Pinch y otros métodos económicos / técnicos para determinar el potencial restante de recuperación del calor residual. A continuación, se revisan las aplicaciones de recuperación de calor para la siderurgia, la (petro) química, el cemento, la pasta y papel, la cerámica y la industria del vidrio.

Tabla 4: Potenciales reducciones de las emisiones por sector por medio de recuperación de calor

|                             |                             | Siderurgia       | (Petro)química | Cemento                | Papel y pasta | Cerámica      | Vidrio         |
|-----------------------------|-----------------------------|------------------|----------------|------------------------|---------------|---------------|----------------|
| [42]                        | Chan and Kantamaneni (2015) | <1%              | 2%             |                        | <1%           |               |                |
| [19]                        | WSP y DNV GL (2015)         | 15%              |                | Electricidad del calor | 9%            | 3 - 5%        |                |
| [46]                        | Napp et al. (2014)          | 3 - 9%           |                |                        |               |               |                |
| [34]                        | Fleiter et al. (2013)       | 2% BF / 12% EAF  |                |                        |               | <8%           |                |
| [29]                        | CEFIC (2013)                |                  | 10%            |                        |               |               |                |
| [17]                        | CEMBUREAU (2013)            |                  |                | Electricidad del calor |               |               |                |
| [38]                        | Haydock y Napp (2013)       |                  |                |                        | 7-24%         | 5%            |                |
| <b>Fuentes adicionales:</b> |                             | <b>2,5 a 12%</b> | <b>-</b>       | <b>&lt;8%</b>          | <b>8-13%</b>  | <b>2 - 8%</b> | <b>6 - 15%</b> |

Hoy en día hay establecidas dos rutas diferentes de producción en la siderurgia; altos hornos (BF) utilizados para la fabricación de acero primario y hornos de arco eléctrico (EAF) para acero secundario reciclando chatarra. El BAT revisado por Pardo y Moya [55] podría reducir las emisiones de la ruta BF en 93 kg CO<sub>2</sub>/t, una reducción de la huella de carbono de un 2%. Las tecnologías emergentes para la recuperación de calor de los hornos puede reducir la demanda de energía en 2,5% en rutas de producción BF y hasta 7,5% en la ruta EAF asumiendo la actual intensidad de carbono del mix eléctrico [56]. Las reducciones de CO<sub>2</sub> se encuentran dentro del mismo rango. Un fabricante afirma que los hornos EAF con carga continua y precalentamiento del gas de escape, ambos comercialmente disponibles, pueden reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> hasta un 10-30% en comparación con los hornos con carga discontinua [57]. No está claro si esta cifra incluye la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> indirecta. Un enfoque teórico publicado por McBrien

---

et al. [58] muestra que la optimización de los flujos de la red de calor y la recuperación de calor pueden reducir la intensidad energética de la fabricación de acero primario en 3,0 GJ/t. Si se asume una intensidad energética BAT de 19,2 GJ/t, la intensidad de carbono de esta ruta de producción se reduciría en un 12%. Las publicaciones de hojas de ruta esperan que las reducciones de emisiones no superan el 9% para toda la industria de la siderurgia. Se podrían lograr mejores si se suministrara calor residual a entidades externas como las redes locales de calefacción urbana [59].

Múltiples hojas de ruta mencionan que se pueden lograr reducciones adicionales de emisiones en el sector (petro)químico por medio de la recuperación de calor residual, pero sin cuantificar su potencial. El impacto en la descarbonización está en el rango entre un 2 y un 10%. Sin embargo, no se puede encontrar mucha investigación científica para validar estas cifras. Esto se supone que es debido a la heterogeneidad de la industria (petro)química.

Para las plantas de cemento, la utilización de calor residual está limitada por la baja demanda de calor en los otros procesos de las fábricas. El análisis Pinch para una planta moderna en Croacia indica que el consumo de energía podría reducirse en un 14% [60]. Valores similares se presentan para la industria cementera en China [61]. Suponiendo instalaciones BAT en Europa, se puede lograr un potencial de reducción de CO<sub>2</sub> de alrededor del 6% [62]. Los datos publicados por Benhelal et al. [63] sugieren que son factibles hasta un 8% de las reducciones de CO<sub>2</sub> para las plantas existentes, pero el calor residual recuperado tendría que ser proporcionado parcialmente a consumidores externos de calor. Esta opción también se presenta en un informe de la European Cement Research Academy [21], lo que sugiere que las emisiones de la calefacción urbana podrían reducirse en 4-11 kg de CO<sub>2</sub>/t. Se pueden lograr mejores tasas de recuperación mediante la instalación de ciclos Rankine con fluido orgánico (ORCs) y el uso de calor residual para generar electricidad para terceros [64]. Mientras que la literatura revisada indica potenciales de descarbonización en el rango de hasta el 8%, las publicaciones de hoja de ruta limitan los potenciales al uso de calor residual para aplicaciones eléctricas.

En la industria de pasta y papel, los procesos de secado son los mayores emisores de calor residual. Laurijssen et al. [65] muestran que es factible una reducción del consumo de energía primaria de un 15% para fábricas de papel si se utilizan secadoras de múltiples cilindros más eficientes. Esta tecnología se utiliza actualmente para hasta un 90% de la producción de papel. Un estudio de caso de una fábrica integrada de pasta y papel en Turquía alega que se puede lograr un 16% de ahorro de energía mediante una mejor recuperación del calor [66]. Estas cifras se traducen en una reducción de



---

emisiones de entre 12 y 13%<sup>1</sup>. Estos valores están dentro del intervalo de potenciales indicados en la Tabla 4.

Para la industria de la cerámica, las publicaciones científicas confirman el bajo nivel del potencial de reducción. Los valores oscilan entre menos de 2% [67], en el caso de la producción de baldosas de cerámica, hasta aproximadamente el 4% para las industrias del cemento y de cerámica en España [68]. Otro enfoque para maximizar la utilización de calor residual se menciona por Fleiter et al. [34]. El calor residual podría secar los productos finales y hacer el secador prescindible. La demanda de energía podría reducirse hasta un 30%, la reducción de las emisiones en un 8%. Esta cifra corresponde a la estimación más alta que se encuentra en las publicaciones revisadas por la Tarea 1 (Figura 1).

Las publicaciones de hojas de ruta son vagas sobre otras opciones de recuperación para el sector de vidrio. Según British Glass [24] la mitad de todo el calor residual ya se recupera. Sólo restan los potenciales de recuperación de calor residual por debajo de 500 °C. Hay tecnologías termoeléctricas novedosas podrían permitir su recuperación, pero las publicaciones científicas que evalúan este potencial son escasas y antiguas. Basándose en pruebas de laboratorio, Bauer [69] estima una posible reducción de CO<sub>2</sub> de 6% usando termo-fotovoltaica. Una opción para utilizar el calor residual recuperado es la instalación de precalentadores. Diferentes fuentes afirman que es probable un ahorro de energía y una reducción de emisiones de hasta un 15% [70], [71].

*En todos los sectores revisados las emisiones se pueden reducir en el intervalo de alrededor de un 5%. Se requiere un rediseño de los flujos de recuperación y equipos estandarizados como nuevos intercambiadores de calor. La recuperación de calor podría ofrecer potenciales de reducción más altas, pero las cifras presentadas en la literatura se basan principalmente en evaluaciones teóricas.*

## 4.2 Hornos

Los procesos de alta temperatura son esenciales para los sectores de la siderurgia y los minerales no metálicos. Se requieren diseños mejorados de hornos para la producción de acero, cemento, cerámica y vidrio para reducir la huella de carbono de estos sectores. Las publicaciones revisadas para la Tarea 1 (Figura 1) estiman que se puede lograr una reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> como se indica en la Tabla 5.

---

<sup>1</sup> Por razones de simplificación la fabricación de papel química (66% de la producción en la UE) con secadores de varios cilindros (90% de utilización) se ha asumido como representativa para toda la industria.

Tabla 5: Potenciales reducciones de las emisiones por sector por medio de hornos mejorados

|                             |   | Siderurgia      | Cemento         | Cerámica       | Vidrio         |
|-----------------------------|---|-----------------|-----------------|----------------|----------------|
| [21]                        | European Cement Research Academy (2017) |                 | 5%              |                |                |
| [19]                        | WSP y DNV GL (2015)                     |                 | 3%              | 80%            | 100%           |
| [24]                        | British Glass (2014)                    |                 |                 |                | Alto           |
| [16]                        | EUROFER (2013)                          | 20 a 48%        |                 |                |                |
| [38]                        | Haydock y Napp (2013)                   | 5 - 50% de *    |                 |                | 100%           |
| [36]                        | IPCC (2014)                             | 20 - 50% *      |                 |                |                |
| [20]                        | Croezen y Korteland (2010)              | De 5 - 20% *    | 9%              |                |                |
| [44]                        | Schorcht et al. (2013)                  |                 | 10%             |                |                |
| <b>Fuentes adicionales:</b> |   | <b>17 a 43%</b> | <b>10 - 20%</b> | <b>3 - 50%</b> | <b>4 - 80%</b> |

Las innovaciones en la industria de la siderurgia se refieren principalmente a la mejora del diseño de hornos BF. La reducción de las emisiones de la ruta EAF está vinculada a la descarbonización del suministro de electricidad, mientras que la ruta BF, utilizada para la fabricación de acero primario, depende del carbón como portador de energía. Dos proyectos desarrollados dentro del programa ULCOS pueden reducir las emisiones de fabricación de acero primario. Mediante los hornos Hlsarna se puede lograr una reducción de las emisiones de 20%. Un piloto está en funcionamiento en los Países Bajos [72]. ULCORED sin CCS puede reducir las emisiones hasta en un 50% [73]. En el proceso de reducción directa (DRI) en combinación con hornos eléctricos de arco (EAF) para fundición se utiliza el gas natural se utiliza como un agente reductor en lugar de coque. Otras iniciativas no europeas persiguen la reducción de emisiones mediante la mejora del rendimiento de los hornos con conceptos similares [74]. Estas cifras corresponden con datos publicados en las hojas de ruta revisadas. Teniendo en cuenta las actuales tasas de producción de acero primario y secundario en Europa [75] y su intensidad energética [76], estas dos tecnologías podrían reducir las emisiones del sector entre el 17% y el 43%.

Los nuevos hornos de lecho fluidizado son la innovación más mencionada para los hornos de cemento. En plantas piloto japonesas se emite un 10% menos de emisiones que en los hornos rotatorios modernos [77]. Croezen y Korteland [20] afirman que la instalación de hornos BAT por sí misma podrían reducir las emisiones del sector en Europa un 9%. Aproximadamente el 90% de la industria del cemento en Europa utiliza hornos secos rotativos y de múltiples etapas. El 10% restante se produce en hornos húmedos y semi-húmedos [25]. Esto limita el número de plantas que pueden alcanzar mejoras importantes mediante la instalación de hornos BAT. Según Lindig-Niklaus [78], los nuevos diseños de hornos con capacidades de pre-calentamiento mejoradas podrían emitir 20% menos emisiones que los diseños BAT. Múltiples hojas de ruta proponen la oxicomustión. Debido a la elevada intensidad energética de los procesos de generación de oxígeno, múltiples fuentes suscitan la preocupación de que su utilización contrarresta las posibles ganancias de eficiencia [4]. La oxicomustión también cambia las características de combustión y crea cargas adicionales al horno [79].

La electrificación parcial de los hornos es una opción para la industria cerámica. Las pruebas de laboratorio han demostrado que el calentamiento por microondas puede reducir las emisiones relacionadas con el proceso en más de un 50% [80]. Los nuevos diseños de hornos operarían con quemadores recuperativos o de impulsos. Agrafiotis y Tsoutsos [81] defienden que el consumo de combustible podría reducirse entre un 10% y un 30%. Publicaciones recientes de los proveedores de equipos sugieren que los quemadores de pulso son comercialmente competitivos hoy en día [82]. Para España, el consumo de energía se puede reducir un 5% con la sustitución de los hornos intermitentes restantes por hornos continuos [83]. La evolución del diseño del horno actual puede reducir las emisiones de entre el 3% y el 50%.

Para la industria del vidrio, la electrificación completa de los hornos se considera como una opción factible en múltiples hojas de ruta. La fusión de plasma es el enfoque más prometedor. Un piloto que debería obtener una alta capacidad de producción se enfrentó a dificultades para lograr los objetivos con respecto al consumo de energía y rendimiento, pero mostró que la electrificación completa es alcanzable [84]. Yao et al. [85] compararon quemadores basados en fusión de plasma con arcos eléctricos y quemadores de oxicomustión. Una fábrica de vidrio en los Países Bajos ha realizado un proyecto piloto de quemadores de oxicomustión en operación desde 2019 (OPTIMELT)[86]. Los quemadores plasmáticos alcanzaron las mejores propiedades del producto final, pero los autores sugieren una solución híbrida debido a la baja eficiencia térmica de la fusión de plasma. El consumo de energía y las emisiones podrían reducirse disminuyendo el tamaño de los tanques de fusión de vidrio. Beerkens [70] sugiere que una reducción del tamaño del tanque en un 50% requiere el 85% de la energía de entrada por tonelada de vidrio. Los prototipos han demostrado que la fusión de combustión sumergida, disparando quemadores dentro de la cámara de fusión, puede reducir la huella de carbono de la fabricación de vidrio [87]. Según Masanet [88] la fusión de combustión sumergida puede ahorrar entre 5% y 7,5% de combustible en comparación con los hornos BAT. La fusión de vidrio consume entre el 75% y el 80% de la energía utilizada en plantas de vidrio. Considerando las emisiones en la industria del vidrio [34], se supone que la mejora de la tecnología de horno puede reducir las emisiones del sector entre 4% y 80%. Estas cifras son significativamente más bajas que las indicadas en publicaciones de hojas de ruta.

*Reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> de hornos requiere nuevos diseños de hornos en todos los sectores. Las innovaciones que podrían resultar en la electrificación parcial o total se consideran factibles para todos los sectores examinados excepto para el sector cemento. Dado que las tecnologías para una electrificación de los procesos no están disponibles comercialmente hasta ahora, muchas fuentes apuntan a tecnologías transitorias con un potencial significativamente menor de reducción de emisiones.*

### 4.3 La captura y almacenamiento de carbono (CCS)

Una de las tecnologías más mencionadas para descarbonizar la industria es la captura y el almacenamiento de CO<sub>2</sub>. En lugar de tratar de limitar las emisiones de CO<sub>2</sub> causadas por procesos de producción, los gases emitidos se extraen de los gases de escape. Su aplicación a los procesos industriales depende de las características específicas de los gases de escape de la industria. El método preferido de captura es diferente para cada sector, porque la eficiencia de las diferentes tecnologías de captura está relacionada con la composición de gases de escape. Es una de las opciones más mencionadas de reducción para las industrias de cemento, (petro)química, papel y pasta y la siderurgia (Tabla 6).

Tabla 6: Reducción de las emisiones potenciales por sector por medio de la tecnología CCS

|                                 | Siderurgia     | (Petro)química  | Cemento        | Papel y pasta    |
|---------------------------------|----------------|-----------------|----------------|------------------|
| [26] Samadi et al. (2016)       |                | 33 - 90% de     |                |                  |
| [30] Carbon Market Watch (2016) |                |                 | 80%            |                  |
| [42] Chan y Kantamaneni (2015)  |                | 100%            |                |                  |
| [19] WSP y DNV GL (2015)        | 50 - 80%       | 80 - 100% de    | 90%            |                  |
| [46] Napp et al. (2014)         |                |                 | 80%            |                  |
| [16] EUROFER (2013)             | 80 a 98%       |                 |                |                  |
| [38] Haydock y Napp (2013)      | 50 - 60%       |                 | 60 - 80%       |                  |
| [35] Remus et al. (2013)        | 75%            |                 |                |                  |
| [20] Croezen y Korteland (2010) | 52 - 80%       |                 | 89%            | 100%             |
| [43] Åhman et al. (2012)        | 65 - 80%       |                 |                | 100%             |
| [17] CEMBUREAU (2013)           |                |                 | 80%            |                  |
| <b>Fuentes adicionales:</b>     | <b>60- 90%</b> | <b>80 - 95%</b> | <b>52 -90%</b> | <b>90 - 100%</b> |

En el contexto europeo, los esfuerzos de investigación en el campo de CCS para la siderurgia se agrupan en el programa ULCOS. El CCS con el reciclaje de gases ("Top Gas Recycling") puede reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> de una planta de acero en un 60% [89], el gas de escape purificado de los proyectos Hlsarna y ULCORED en un 80%, y en combinación con procesos de electrólisis, hasta el 98% [16]. Hay tecnologías similares que se investigan en Asia y los Estados Unidos [90]. La modernización de las plantas existentes con CCS no alcanza los niveles de captura del proyecto ULCOS [91]. Los diseños BAT no están optimizados con respecto a la captura de CO<sub>2</sub>. Tomando en cuenta que la mayoría de las publicaciones y las hojas de ruta se refieren a los objetivos del programa ULCOS, las estimaciones publicadas en las fuentes revisadas son muy similares.

El CCS es una opción ampliamente mencionada para la industria (petro)química. Ya se han implementado algunos proyectos con CCS a escala comercial [92]. Markewitz et al. [93] revisaron los principales métodos de captura que permiten una eficiencia de captura de entre el 80% y el 95%. Los gases capturados se pueden utilizar para producir polímeros [94], u otros productos químicos [95]. Las estimaciones en hojas de ruta para

---

La descarbonización del sector se sitúan en un rango muy amplio, desde la reducción parcial que se alcanza con instalaciones en hornos existentes (33%), hasta la reducción de emisiones de 100%. Debido a las limitaciones técnicas una reducción de emisiones a cero sólo puede considerarse un valor teórico.

La alta pureza de los gases de escape y la falta de alternativas para reducir las emisiones de los procesos de producción hacen que la industria del cemento sea un candidato probable para la tecnología CCS. "Calcium looping", un proceso de circuito con el carbonato de calcio como absorbente de CO<sub>2</sub>, es la tecnología clave para facilitar la captura a un coste mínimo. Las hojas de ruta estiman que la eficiencia de captura puede estar entre el 80% y el 90%. Los proyectos piloto en Taiwán [96] y Alemania [97] alcanzaron tasas de captura de 85% y 90%. Diferentes estudios estiman que las tasas de captura que son económicamente viables se sitúan entre el 52% y el 84% [98], [99]. Por tanto, en la práctica las tasas de captura podrían ser más bajas de lo que mencionan las hojas de ruta.

La producción de la pasta y del papel podría ser libre de carbono gracias al CCS. La utilización de biomasa neutra de carbono como portador de energía y la captura de CO<sub>2</sub> mediante la gasificación del licor negro reduce las emisiones netas de una planta piloto en Suecia a menos de cero [100]. El CO<sub>2</sub> de la biomasa que ya es neutra en carbono se almacena. Se asume una eficiencia de captura del 90% para la gasificación del licor negro [101]. En comparación con otros sectores, la captura de carbono en la industria de la pasta y del papel se puede realizar con bajos costes adicionales [102]. La ubicación remota de muchas plantas y los altos costos relacionados con el transporte de gases capturados a instalaciones de almacenamiento son obstáculos para su implementación [103].

*La utilización de la tecnología CCS ha sido ampliamente investigada para los sectores analizados. En la práctica, el CCS como una solución "end-of-pipe" solamente es factible en la industria de cemento y la industria de pasta y papel. El rediseño del proceso industrial es necesario si los gases de escape no alcanzan altos niveles de concentración de CO<sub>2</sub>. Los altos costes y cuestiones sin resolver en relación con el almacenamiento dificultan su comercialización. En caso de la captura de carbono en el sector de cemento, que es una de las opciones más baratas [104], los costes adicionales de la energía por la captura suponen hasta una 70% adicional a los costes totales de producción. Como consecuencia, se ha visto poco avance con respecto a la introducción de CCS a gran escala [105].*

#### 4.4 Biomasa y residuos de origen biológico

En comparación con otros combustibles y materias primas, la biomasa se regenera y se renueva de forma natural, siempre que se gestione de manera sostenible. La combustión de biomasa contribuye a un aumento de carbono atmosférico en el corto plazo, pero a largo plazo la biomasa puede tener un balance neto cero de emisiones si las emisiones del procesamiento y transporte se compensan con la captura de CO<sub>2</sub> mediante la fotosíntesis [106]. En cualquier caso, se requieren grandes esfuerzos para garantizar que la biomasa sea cuasi neutra en emisiones. Para facilitar la comparabilidad entre los diferentes sectores y tecnologías se supone que son alcanzables las emisiones netas cero para la biomasa. Las altas tasas de utilización de biomasa son las áreas más mencionadas con respecto a la reducción de emisiones en la industria de cemento, la pasta y el papel, la alimentación y la cerámica (Tabla 7).

Tabla 7: Reducción de las emisiones potenciales por sector por medio de biomasa y residuos de origen biológico

|                                 | Cemento    | Papel y pasta                | Cerámica             | Alimentación              |
|---------------------------------|------------|------------------------------|----------------------|---------------------------|
| [15] Brolin et al. (2017)       |            | 97% (que se logra en Suecia) |                      |                           |
| [19] WSP y DNV GL (2015)        | 30%        | 100%                         | 29%                  | 90%                       |
| [38] Haydock y Napp (2013)      |            |                              | 28%                  |                           |
| [18] Cerame-Unie (2012)         |            |                              | 30%                  |                           |
| [43] Åhman et al. (2012)        | 50%        |                              |                      |                           |
| [51] CEPI (2011)                |            | 50% (alcanzado en la UE)     |                      |                           |
| [20] Croezen y Korteland (2010) | 35%        |                              |                      |                           |
| <b>Fuentes adicionales:</b>     | <b>24%</b> | <b>-</b>                     | <b>64% (teórico)</b> | <b>7 - 100% (teórico)</b> |

Casi cualquier material combustible puede ser utilizado en los hornos de cemento. Por el alto porcentaje de los costes totales dedicados a la energía, el principal criterio para la elección del combustible es su precio. Y, por otro lado, el uso exclusivo de combustibles de origen biológico puede reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> del sector en un 50%. La mitad de las emisiones se originan de la transformación química de la caliza y no se ven afectadas por un cambio de combustible. La biomasa ya se utiliza ampliamente por la producción de cemento en Europa, con cuotas entre 7% en Grecia y el 85% en los Países Bajos [107]. Se estima que el potencial de reducción de emisiones restantes es del 24% [108].

En gran parte, tanto las materias primas como los productos finales de la industria de la pasta y del papel son biomasa. En 2016, la tasa de biomasa en el consumo total de combustible del sector en Europa fue del 57,7%, con un 52,3% de la demanda neta de electricidad cubierta por las instalaciones de cogeneración [109]. En Suecia, el 97% de las emisiones está relacionado con el uso de la biomasa y sólo el 3% es de combustibles fósiles [15]. Una producción basada 100% en biomasa puede alcanzarse utilizando BAT. Teniendo en cuenta el aumento de las tasas de reciclaje y el posible exceso de combustible de residuos una opción para el futuro de la industria es la de una bio-

---

refinería que produce gas de síntesis a partir de biomasa [110]. Múltiples estudios evalúan la viabilidad de este concepto [103]. En todo caso, es preciso abordar las preguntas pendientes con respecto a la neutralidad de carbono de la provisión de biomasa, por ejemplo, transporte, u otros aspectos como la disponibilidad y capacidad de almacenamiento.

La industria de la cerámica utiliza hornos de gas natural. La transición completa hacia combustibles de origen biológico no es posible sin hornos nuevos [111]. Se podría lograr una reducción de emisiones del 64%, dado que el 80% del combustible en las plantas de cerámica se utiliza en el horno [18], y los hornos actuales permiten la sustitución del 80% del gas natural por gas de síntesis de base biológica [38]. Los datos publicados en hojas de ruta indican un potencial de descarbonización del 28% a 30%. Pero, teniendo en cuenta las diferentes propiedades del gas de síntesis de base biológica en comparación con el gas natural, la utilización de elevadas cuotas de gas de síntesis en instalaciones actuales reduce la eficiencia de los quemadores [112].

Todas las materias primas y los productos finales de la industria de alimentos y bebidas son de biomasa. Los residuos y el exceso de producción pueden servir como portador de energía. La digestión anaerobia puede transformar residuos con contenido húmedo superior al 60% en biogás sin pretratamiento [113] y con una eficiencia de conversión máxima del 80% [114]. Para el caso de Suiza, Beretta et al. [115] muestran que dos tercios de las pérdidas en la industria de procesamiento de alimentos son inevitables. Actualmente tales residuos biológicos se utilizan como alimentación como piensos. Utilizando los factores de conversión presentados por Bancos [116] la transformación de estos residuos en biogás podría reducir las emisiones del sector en más de un 7%. Los pilotos, como el concepto de una cervecería verde [117], demuestran que algunos procesos de producción de alimentos pueden cubrir toda su demanda de energía térmica mediante el uso de biogás producido a partir de los flujos de residuos relacionados con los procesos de producción.

*La biomasa puede desempeñar un papel importante en la descarbonización de la industria del cemento. Puede servir como combustible con poco pre-tratamiento requerido. Independientemente de los límites con respecto a la disponibilidad de la biomasa y la capacidades restringidas de la extensión de la producción [118], el uso de flujos internos de residuos de origen biológico puede jugar un papel importante en la descarbonización de los sectores con materia prima de base biológica, en particular en la industria alimentaria y de pasta y papel.*



#### 4.5 La provisión de calor de proceso

Todas las IIEs utilizan procesos que requieren calor de proceso como una entrada. En los sectores con múltiples pasos de proceso como la industria de la alimentación y la industria de la pasta y del papel, las mejoras de la eficiencia para la provisión y la gestión de calor de proceso es una de las opciones más mencionadas para reducir las emisiones (Tabla 8). En esta sección, se discuten varias opciones aparte de cogeneración.

*Tabla 8: Reducción de las emisiones potenciales por sector por medio de la provisión de calor de proceso*

|                             | Papel de pasta     | Alimentación                |
|-----------------------------|--------------------|-----------------------------|
| [14] Berenschot (2017)      |                    | La electrificación de calor |
| [15] Brolin et al. (2017)   | 100% (de calderas) |                             |
| [19] WSP y DNV GL (2015)    |                    | 100% (suministro de calor)  |
| [38] Haydock y Napp (2013)  | 2%                 |                             |
| [31] JRC (2013)             |                    | La electrificación de calor |
| [43] Åhman et al. (2012)    |                    | La electrificación de calor |
| <b>Fuentes adicionales:</b> | <b>&lt;29%</b>     | <b>&lt;57%</b>              |

En la industria de la pasta y del papel, el suministro de calor del proceso es uno de los principales consumidores de combustibles fósiles. Para la industria taiwanesa, el 29,8% del consumo de combustible en la fábrica de papel proviene de la operación de calderas para el suministro de vapor [119]. En un estudio sobre la industria de la pasta y del papel de los EE.UU. de Miller et al. [32] se indica que dedican aproximadamente el 30% del consumo de todo el sector a la producción de vapor y calor de proceso. Teniendo en cuenta que la cogeneración ya juega un papel importante en la industria, el impacto de posibles innovaciones de calderas o de nuevas bombas de calor es difícil de estimar. Según las publicaciones de hojas de ruta, las opciones de descarbonización se sitúan en un amplio margen que incluye el remplazamiento de calderas existentes que resultaría en una reducción de combustible en el rango de 2% hasta la plena electrificación de calor. Según una publicación sobre los flujos de energía en la industria de la pasta y del papel en el Reino Unido [120] se estima que la electrificación del calor puede reducir las emisiones hasta un 29%.

Las calderas de gas natural son la fuente principal de vapor en la industria alimentaria, pero los sistemas de cogeneración se presentan como una alternativa valiosa [31]. Los procesos se caracterizan por rangos de baja temperatura. Los datos para la industria alimentaria francesa muestran que se requiere casi todo el calor para temperaturas inferiores a 140 °C [121]. Las hojas de ruta sugieren nuevas tecnologías electro-térmicas, especialmente bombas de calor, para proporcionar el calor requerido en los procesos de producción. Un estudio de las tecnologías novedosas y emergentes para la elaboración de alimentos sitúa en primer las bombas de calor antes que otras tecnologías electromagnéticas [122]. Las bombas de calor pueden reducir el consumo de combustible para los procesos en la industria lechera en más de un 40% [123]. En el



caso de España, el calor de proceso requiere un 37% del consumo total de energía en la industria de alimentación, con toda esta energía proporcionado por combustibles fósiles [68]. La electrificación de la provisión de calor puede reducir las emisiones relacionadas con estos procesos térmicos. Wang [124] estima que el 57% del combustible fósil utilizado en el procesamiento alimentario se utiliza para la producción de vapor. La electrificación del suministro de vapor puede reducir las emisiones en un 57%.

*En ambas industrias revisadas se requiere mucha energía para calderas que proporcionan el calor de proceso. Las bombas de calor son la opción más mencionada para electrificar el suministro de calor del proceso en el sector de alimentación, mientras que esta tecnología es menos señalada para la industria de la pasta y del papel. El rango de temperatura en ambas industrias es inferior a 200°C. En teoría, las bombas de calor se pueden utilizar para electrificar el suministro de calor en ambos sectores [125]. Las reducciones de las emisiones futuras pueden estar en un rango de mejoras incrementales de las tecnologías existentes hasta una electrificación completa de suministro de calor.*

#### 4.6 Materias primas alternativas

Las operaciones de minería, pre-tratamiento y procesamiento tienen huellas de carbono distintas para los diferentes tipos de materia prima. Las materias primas alternativas no-biológicas podrían reducir las emisiones de proceso en la industria del cemento y cerámica. Un cambio de las materias primas causa una reducción de las temperaturas del proceso y/o reduce las emisiones específicas de los materiales. Las publicaciones revisadas para la Tarea 1 (Figura 1) indican los potenciales de descarbonización resumidos en Tabla 9.

Tabla 9: Reducción de las emisiones potenciales por sector por medio de alternativas materias primas

|                                 | Cemento            | Cerámico |
|---------------------------------|--------------------|----------|
| [14] Berenschot (2017)          |                    |          |
| [15] Brolin et al. (2017)       |                    |          |
| [19] WSP y DNV GL (2015)        |                    | 10%      |
| [38] Haydock y Napp (2013)      | 50%                |          |
| [31] JRC (2013)                 |                    |          |
| [20] Croezen y Korteland (2010) | 50%                |          |
| [30] Carbon Market Watch (2016) | 30%                |          |
| [34] Fleiter et al. (2013)      | 50%                |          |
| [17] CEMBUREAU (2013)           | 4%                 |          |
| <b>Fuentes adicionales:</b>     | <b>&lt;4 - 30%</b> | <b>-</b> |

El material de base para el clínker de cemento es la piedra caliza. Supone hasta un 95% de la materia prima y su procesamiento es responsable de aproximadamente un 50% de las emisiones del sector [17]. El CO<sub>2</sub> es un producto secundario de la transformación química del clínker de cemento dentro del horno. Mediante la sustitución del clínker las

emisiones pueden reducirse. El grado de descarbonización depende de la tasa de sustitución. En las publicaciones revisadas de hoja de ruta, las estimaciones sobre el potencial de descarbonización varían. Una tasa de clínker de 70% resulta en una reducción de las emisiones del 4%. Las tasas de reducción para nuevos materiales de clínker se estimaron en un 30% para BCSAF ("Belite Calcium Sulfo-Aluminate Ferrite") y hasta 50% para Celitement o cemento a base de magnesio. Estas estimaciones están en línea con los estudios científicos recientemente publicados. Según Kim et al. (2013) se han logrado reducciones de hasta el 7% mediante la variación de la proporción de aditivos. El BCSAF requiere una temperatura del horno 200 °C más baja. Esto resulta en la reducción de emisiones de entre el 20% y el 30% según la información del fabricante [127]. Se pueden alcanzar ahorros adicionales si las escorias de horno, un subproducto de las plantas de acero, se utilizan como materia prima para la industria del cemento [128]. Como alternativa se discute el reciclaje de cemento con los pilotos en operación en Japón [129] y los Países Bajos [127]. La reducción de emisiones es limitada (menos del 4%), porque las etapas adicionales que se requieren para el proceso de reciclaje tienen un consumo elevado de energía.

En la industria cerámica las emisiones que están relacionadas con el tipo de materia prima que se utiliza son más bajas. En lugar de reemplazar materias primas se pueden añadir los residuos sólidos como chatarra de vidrio, lodos de papel y otros aditivos orgánicos e inorgánicos durante el proceso de fabricación. Aunque el impacto de la utilización de residuos sobre el balance de CO<sub>2</sub> es más de carácter indirecto, algunos aditivos permiten temperaturas del horno inferiores y así reducir la intensidad energética de los procesos. En escala de laboratorio se ha demostrado que para la producción de baldosas de cerámica el uso de vidrio residual puede reducir la temperatura del horno de 1250°C a 1000°C [130]. Una reducción de temperaturas del horno en el sector de la cerámica roja también se puede conseguir por medio de aditivos de origen residual [131]. Basándose en pruebas de laboratorio Sveda et al. [132] estiman que un nuevo aditivo que contiene condensados de aldehído reduce las emisiones de CO<sub>2</sub> de la producción de ladrillos en un 60%. Los aditivos inorgánicos pueden empeorar la plasticidad de los materiales cerámicos mientras que los aditivos orgánicos como residuos biológicos aumentan las emisiones del proceso [133]. En la literatura científica y las publicaciones de hojas de ruta se encuentra poca información sobre la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> correspondiente. Una reducción de 10% que está indicado en [19] sigue siendo la única estimación disponible.

*Los sustitutos de clínker pueden ayudar en reducir las emisiones de manera significativa en la industria del cemento, pero es posible que sean necesarios nuevos diseños de procesos. Tanto para el sector de cerámica y el de cemento se espera que nuevos aditivos o pequeños cambios en la composición de la materia prima resulten en mejoras incrementales con respecto a la intensidad de emisiones de producción.*

## 4.7 Electrólisis y producción de hidrógeno

Las técnicas de separación electroquímicas como la electrólisis no requieren excesivas cantidades de energía térmica. Así, la electrólisis en combinación con electricidad de cero emisiones se presenta como una alternativa al uso de hornos para diferentes IIE. Potencialmente la electrólisis, que es el estado de arte para la producción de aluminio, zinc o níquel, se podría utilizar para la fabricación de acero y para la producción de hidrógeno.

ULOLYSIS y ULCWIN son dos diferentes tecnologías de electrólisis para la fabricación de acero neutro en carbono. Actualmente la investigación está en la fase de laboratorio [134]. Ambas tecnologías se mencionan en múltiples hojas de ruta como alternativas con baja probabilidad de introducción hasta 2050 (Tabla 10). ULCOLYSIS requiere temperaturas de hasta 1600°C. ULCOWIN opera a 110°C [135]. El potencial máximo de descarbonización de ambas tecnologías se cuantifica en un 98%. Teniendo en cuenta la tasa de producción de acero primaria en Europa [75] y su intensidad energética [76] la huella de carbono de la industria disminuiría en un 84% si se utilizara la electrólisis. La EAF continuaría siendo utilizada para la fabricación de acero secundario.

Tabla 10: Reducción de las emisiones potenciales por sector por medio de electrólisis

|                                 | <u>La siderurgia</u> | <u>Intersectorial</u> |
|---------------------------------|----------------------|-----------------------|
| [19] WSP y DNV GL (2015)        | 80%                  |                       |
| [20] Croezen y Korteland (2010) | 100%                 |                       |
| [16] EUROFER (2013)             | 30%                  |                       |
| [34] Fleiter et al. (2013)      | 100%                 |                       |
| [35] Remus et al. (2013)        | <98%                 |                       |
| <b>Fuentes adicionales:</b>     | <b>84-98%</b>        | <b>100%</b>           |

El hidrógeno puede sustituir el uso de fuentes fósiles como combustible en muchos procesos de producción sin la necesidad de un cambio profundo de los procesos de producción industrial y podría ayudar a reducir las emisiones de todas las IIE aún más. Quemar hidrógeno no emite CO<sub>2</sub>. El gran reto del hidrógeno es la intensidad energética de su proceso de producción. Hoy en día, el hidrógeno se produce utilizando gas natural, emitiendo 11,9 t CO<sub>2</sub>/t de hidrógeno producido [136]. En su informe publicado recientemente, el World Energy Council evalúa la competitividad del hidrógeno frente al gas natural. Sus previsiones anticipan una mejora de la intensidad energética de 55 kWh/kg a 50 kWh/kg y así lo consideran competitivo con la captura de CO<sub>2</sub> en 2030 [137]. Si se utiliza la infraestructura existente de transporte de gas natural, el hidrógeno podría ser un sustituto para el gas natural, pero neutro en carbono. Muchos estudios, como [138], muestran que esta transición es factible, aunque todavía se tienen que considerar y resolver varios retos de gran tamaño.

## 4.8 La cogeneración (CHP)

La cogeneración, la producción combinada de energía y calor, no es una tecnología novedosa y es BAT en diversas industrias. La penetración en los estados miembros de la UE varía considerablemente debido a diferentes regulaciones y regímenes de ayudas fiscales [139]. Según las hojas de ruta los avances tecnológicos y los potenciales no explotados son clave para los sectores de la cerámica, la alimentación y (petro)química (Tabla 11).

Tabla 11: Reducción de las emisiones potenciales por sector por medio de CHP

|                                | (Petro)química | Cerámica   | Alimentación |
|--------------------------------|----------------|------------|--------------|
| [42] Chan y Kantamaneni (2015) |                |            | 10%          |
| [19] WSP y DNV GL (2015)       |                | 15%        | 11%          |
| [31] JRC (2013)                |                |            | 10%          |
| Fuentes adicionales:           | <2%            | De 5 - 10% | 5 - 15% de   |

Los datos públicos no permiten una clara diferenciación entre los equipos actualmente instalados y la capacidad restante en la industria (petro)química. Se han reportado altos niveles de penetración para los sectores en el Reino Unido [140], Alemania [141] y Austria [142]. Saygin et al. [143] estima altos potenciales para la industria, pero los datos de referencia citados tienen 15 años de edad [144]. Según los últimos datos de la asociación de la industria europea la intensidad de energía del sector disminuyó un 59,7% desde 1990 [145]. En 2015 la intensidad de energía del sector fue más de un 20% menor que en 2005. Según Boulamanti y Moya [146] hay 22 GW de capacidad de cogeneración instalados en el sector europeo de (petro)química con estimaciones sobre un potencial adicional de 2.750 MW. Así, las instalaciones adicionales solamente podrían reducir las emisiones del sector en menos de un 2% en comparación con la intensidad actual.

Los potenciales adicionales para el sector de alimentación dependen de la tasa de penetración actual de CHP. Las estimaciones para Italia sugieren que más del 15% del calor utilizado en el sector se suministra por la cogeneración [147], mientras que los datos para Austria indican que la penetración de la cogeneración en la industria de alimentación está cerca de su máximo [142]. Los casos de estudio para la industria alimentaria [148] demuestran que la instalación de co- y trigeneración, que incluye la refrigeración, puede reducir la demanda de energía primaria y las emisiones aún más. El potencial es mayor que lo indicado en las hojas de ruta. Las reducciones de CO<sub>2</sub> de hasta el 40% para una almazara de aceite de oliva en España [149] y el 30% para unas panaderías industriales en Polonia [150] se consideran factibles suponiendo el mix energético actual. La instalación de nuevos ORCs para aplicaciones que requieren calor de baja temperatura puede aumentar la eficiencia de los sistemas de cogeneración aún más [151]. Teniendo en cuenta la penetración de la cogeneración en Europa y las tasas de penetración nacional presentadas por Tudoroiu-Lakavice [152] los autores estiman

que instalaciones adicionales de cogeneración en la industria podrían reducir las emisiones entre 5% y 15%.

Múltiples hojas de ruta europeas suponen que la cogeneración jugará un papel importante en la reducción de las emisiones en la industria cerámica. En los países del sur de Europa el potencial de reducción adicional es limitado debido a la amplia implantación de sistemas de cogeneración en el sector durante la década de 1990. Los fabricantes españoles, portugueses e italianos, que representan más del 50% de la producción cerámica en Europea [153] utilizan CHP [154]. La sustitución de las instalaciones existentes con nuevas plantas de cogeneración puede mejorar la eficiencia. Según Suttor [141] la cogeneración se utiliza mucho en la industria alemana de cerámica. Nuevos diseños de hornos con capacidades integradas de cogeneración como el desarrollado por el proyecto DREAM podrían reducir las emisiones de estas plantas hasta en un 20% [155]. La renovación de una planta sin CHP con un sistema BAT reduce el consumo de energía primaria en un 10% [83]. Además, serían probables avances adicionales si estuvieran disponibles a un coste competitivo los nuevos ciclos Rankine que utilizan calor residual [156]. Basados en los datos disponibles sobre la penetración de la tecnología en Europa parece probable que las emisiones del sector se puedan disminuir entre 5% y 10%.

*La cerámica y la producción alimentaria son sectores con una alta demanda de calor y de electricidad, por lo que la cogeneración es una opción viable. Para ambos sectores, la instalación de un sistema de cogeneración reduce el consumo de combustibles fósiles y así las emisiones. La falta de información sobre la penetración de la cogeneración en ambos sectores en los estados miembros de la UE dificulta la estimación del potencial no explotado. El potencial mínimo de reducción para ambos sectores se calcula suponiendo una penetración de CHP de 50% en la actualidad. Para el sector (petro)químico se supone una alta penetración CHP, haciendo que las reducciones adicionales sean difíciles de lograr.*

#### **4.9 Hornos industriales**

Los procesos de calentamiento, cocción o secado son necesarios en todos los sectores de la IIE. Para el alcance de esta revisión los hornos industriales se definen como procesos con aplicación directa de calor por debajo de 500°C. Según las publicaciones revisadas para la Tarea 1 (Figura 1), las aplicaciones de temperaturas tan medias y bajas son especialmente relevantes para la industria de la pasta y del papel y el sector alimentario (Tabla 12).

Tabla 12: Reducción de las emisiones potenciales por sector por medio de los hornos industriales

|                             |                            | Papel ya pasta                            | Alimentación                            |
|-----------------------------|----------------------------|---|---|
| [19]                        | WSP y DNV GL (2015)        | 5 - 50% de (dependiendo de la tecnología) | 5-63%<br>(Dependiendo de la tecnología) |
| [20]                        | Croezen y Korteland (2010) | 10 - 60% (dependiendo de la tecnología)   |   |
| [14]                        | Berenschot (2017)          | 70% (electrificación completa)            |   |
| [38]                        | Haydock y Napp (2013)      |   | 70% (calentamiento óhmico para hornos)  |
| <b>Fuentes adicionales:</b> |                            | <b>5 - 10%</b>                            | <b>5 - 15%</b>                          |

El secado es el proceso más intensivo en energía en la fabricación de papel, que representa el 50% del consumo de energía [157] y el 70% del uso de combustibles fósiles [34]. En las hojas de ruta se analizan múltiples tecnologías novedosas para el secado de papel. El secado por impulsos es un concepto que fue desarrollado en la década de las 1970. La investigación sobre la tecnología sigue en curso en Suecia. Su potencial está limitado para la producción de papel fino. Eso dificulta la aplicación en gran escala [158]. La subida de la temperatura del proceso con secado por vapor, el aumento del punto de rocío en la campana o la instalación de una caja de vapor pueden reducir el consumo de energía. Laurijssen et al. [157] muestra que el consumo total de energía y por lo tanto las emisiones de la fábrica de papel se puede reducir en un 15%. Esto requeriría una subida de la temperatura del secado, utilizando calor residual en equipos de pre-calentamiento y el mejor control del proceso. Según Fleiter et al. [159] nuevas técnicas de secado pueden reducir las emisiones alrededor de 4%. Los rangos de temperatura entre 100°C - 200°C hacen que la cocción y el secado sean candidatos para la electrificación. Según la Asociación Europea del sector el secado por infrarrojos puede reducir las emisiones de la industria europea en 1-2 MtCO<sub>2</sub> el año hasta 2050 [51]. La electrificación completa de los procesos de secado puede reducir las emisiones hasta en un 70%.

Para la industria alimentaria, el camino principal hacia la descarbonización es la electrificación de los procesos de cocción a baja temperatura. Las tecnologías de la calefacción eléctrica son las principales tecnologías emergentes para el procesado de alimentos [122]. Suponiendo que el consumo de energía térmica en el sector de procesamiento de alimentos en España, según Aranda-Usón et al. [68], sea representativa para los otros estados miembros de la UE, la electrificación de los hornos reduciría la huella de carbono hasta en un 37%.

*Para la industria alimentaria y la industria de la pasta y del papel las aplicaciones de calor directo a menos de 500°C de temperatura son las principales emisoras de CO<sub>2</sub>. La electrificación se presenta como la alternativa principal para reducir la dependencia de los combustibles fósiles. Dado que los intervalos de temperatura en el sector de pasta y papel son significativamente mayores que en el sector de alimentos, la electrificación de los equipos existentes es menos atractiva para este sector. Sin embargo, las tasas elevadas del consumo de combustibles fósiles para aplicaciones de secado en la industria de la pasta y del papel, resultan en un potencial teórico mayor que para el sector de*

alimentación. La electrificación de la industria alimentaria está cerca de comercializarse y muchos proyectos pilotos están en curso.

#### 4.10 Procesos catalíticos y la separación de membrana

La mayoría de los productos químicos son gaseosos o líquidos. Esto distingue a los productos finales y tecnologías de producción en la industria (petro)química de la mayoría de las otras industrias. Hoy en día, la destilación de líquidos utilizando catalizadores es el BAT. Pero podrían utilizarse en su lugar nuevas membranas y reducir el consumo de calor a un mínimo. En esta sección se contrasta el potencial de reducción de estas tecnologías para la industria (petro)química. Las membranas también pueden sustituir a los métodos de separación que se utilizan actualmente en la industria de alimentación y por eso también se ha incluido en esta revisión (Tabla 13).

Tabla 13: Reducción de las emisiones potenciales por sector por medio de las nuevas tecnologías catalíticas y membranas

|                      |                       | (Petro)químico                                   | Alimentación |
|----------------------|-----------------------|--|--------------|
| [26]                 | Samadi et al. (2016)  | 0 - 33% de (destilación)<br>66 -100% (membranas) |              |
| [19]                 | WSP y DNV GL (2015)   | 2 - 15% de                                       | 19%          |
| [38]                 | Haydock y Napp (2013) | 33% (destilación)                                |              |
| Fuentes adicionales: |                       | 5-45%  | -            |

Los procesos de separación y de craqueo representan aproximadamente el 50% de las emisiones de proceso de la industria (petro)química [160]. Los nuevos catalizadores pueden reducir la temperatura de reacción para la destilación y la separación. Esta alternativa ha sido ampliamente mencionada en hojas de ruta, pero no se encuentra mucha investigación sobre los últimos avances científicos. Rahimpour et al. [161] revisaron el desarrollo de nuevos catalizadores para la producción de nafta durante los últimos 50 años, con el avance más reciente datado en el inicio de los años 2000. Las cifras de Rafiqul et al. [162] indican que los nuevos catalizadores para la producción de amoníaco pueden reducir la demanda de energía y las emisiones de CO<sub>2</sub> en unos pocos puntos porcentuales. Las medidas presentadas por Chan y Kantamaneni [42] muestran cómo el consumo de energía del sector se podría reducir en un 5% gracias a nuevos catalizadores.

Para lograr una reducción importante de emisiones en la industria, los procesos catalíticos necesitan ser reemplazados por membranas. Esto significa un cambio de la separación térmica de productos químicos a nuevos procesos de separación mecánicos. En comparación con los procesos de separación térmica, la separación basada en membrana requiere un 90% menos de energía [163]. Según varias publicaciones las nano-membranas son la clave para lograr los objetivos de la descarbonización. Esta nueva tecnología se encuentra todavía en las primeras fases de investigación y no están disponibles comercialmente. Las aplicaciones actuales están limitadas por las bajas purzas que se pueden lograr [164]. La destilación por membrana (MD) o la destilación



híbrida es una combinación de membrana y la tecnología de destilación. Caballero et al. [165] muestran que para la separación de sustancias casi ideales, como el procesado en el sector (petro)químico, son posibles potenciales de ahorro de energía de hasta 30% en comparación con la destilación. La energía se utiliza en forma de presión en vez de calor. La eficiencia energética de aplicaciones MD con temperaturas más bajas como de ósmosis inversa puede ser mejorada significativamente si se combina con procesos de recuperación de calor [166]. Los avances para el proceso de separación tienen el potencial de reducir las emisiones del sector entre un 5% y un 45%. Las opciones de reducción como mejores catalizadores, MD y la plena aplicación de la tecnología de membranas ofrecen múltiples posibilidades para reducir la intensidad de CO<sub>2</sub> de la industria.

Los avances en la tecnología de membrana también pueden reducir el consumo de calor y así la intensidad energética del sector de procesamiento de alimentos. Varios autores como Cassano [167] discuten las ventajas de la aplicación de la tecnología de membranas a gran escala en la industria alimentaria. Muchas aplicaciones todavía se encuentran en fase piloto o de laboratorio [168]. La información disponible no permite la cuantificación del potencial de reducción para el sector. Las aplicaciones son demasiado específicas para los procesos de las diferentes rutas de producción.

## V. La descarbonización industrial en el horizonte 2050

Las opciones para reducir las emisiones de carbono dentro de los diferentes sectores, su preparación tecnológica, y su impacto en la huella de carbono, suponen una colección diversa de soluciones técnicas. La Sección 4 muestra que las hojas de ruta y la literatura científica favorecen distintas áreas de potenciales de reducción para las diferentes industrias. En esta sección, los resultados de esta revisión se analizan y contrastan. Se presentan cinco conclusiones principales sobre el proceso de la descarbonización industrial hasta 2050, cada uno de ellas indicando las brechas de conocimiento que la investigación científica debe abordar.

### 5.1 La optimización de procesos con equipos estandarizados

Los procesos principales de las diferentes IIEs están hechos a medida para la fabricación de materias primas específicas. Las mejoras incrementales en la eficiencia de los equipamientos específicos de los procesos, como columnas de destilación, hornos y rutas de secado son probables, pero las innovaciones siguen siendo específicas para cada sector. En la industria del cemento, los recalentadores adicionales / precalcinadores pueden mejorar la eficiencia en el caso de que no se hayan instalado hornos de múltiples etapas. Los catalizadores novedosos pueden mejorar los procesos de destilación, y el rediseño de los hornos puede reducir las emisiones de la siderurgia. Existen ciertas sinergias intersectoriales de nuevos equipos para los procesos de calefacción de baja temperatura y procesos auxiliares. Equipos como los intercambiadores de calor, bombas de calor o calderas (híbridas) están estandarizados



---

para rangos de temperatura medio-bajo y pueden ser una opción efectiva para reducir la huella de carbono de todo el sector industrial. Los avances en áreas como la recuperación de calor, el suministro de calor o el control de procesos no pueden descarbonizar la industria por completo, pero permitirán reducir las emisiones sin necesidad de cambiar las rutas de producción de los sectores que se utilizan actualmente. El papel de los equipos estandarizados en la descarbonización de ambas las industrias intensivas de energía e industrias no intensivas debe ser evaluado más. Es importante entender cuánto y hasta cuando la IIE puede reducir sus emisiones manteniendo los diseños actuales de proceso principales y la mejora de eficiencia con equipos estandarizados.

## **5.2 Las tecnologías innovadoras son claves para la descarbonización**

La optimización de los procesos de producción actuales no reducirá las emisiones suficientemente. Son necesarias innovaciones radicales en todos los sectores analizados. La electrólisis podría permitir la descarbonización profunda de la industria de la siderurgia. La electrificación de los procesos del secado y del calentamiento es clave para las industrias de la pasta y del papel, de la alimentación y del vidrio. Para la industria del cemento, el CCS y las materias primas alternativas ofrecen los potenciales más altos de reducción de emisiones. Las nuevas membranas y la captura del carbono se mencionan para la industria (petro)química. Una alta proporción de biomasa podría ser la solución para el sector de la cerámica. La mayoría de estas soluciones son específicas por cada sector y las tecnologías no están listas para el mercado. Una comparación de los impactos individuales de las nuevas tecnologías en los diferentes sectores presentados en la Tabla 1 muestra que se pueden identificar cuatro áreas tecnológicas claves: nuevas tecnologías de membrana, la producción de acero que sea neutra en carbono, materiales alternativos al clínker en la industria del cemento, y CCS (Figura 5).

Cada una de estas tecnologías por sí mismas podría reducir las emisiones industriales entre un 8% y hasta más del 20% si se aplican en los sectores analizados. A día de hoy, la aplicación de estas tecnologías en escala comercial no es factible. Las tecnologías de producción de acero neutro en carbono y de membranas todavía se encuentran en fases tempranas de investigación. Ningún material alternativo para la producción de cemento es más competitivo que el clínker a base de piedra caliza. La captura de carbono se ha implementado en escala piloto, pero los costes operativos y la incertidumbre con respecto al almacenamiento previenen su implementación en toda la industria entre 2030 y 2050 [104]. La viabilidad comercial de las tecnologías de membrana y la electrólisis es poco probable hasta 2040 [19]. La pregunta que hay que responder es si se requiere intensificar el apoyo público y fiscal para las tecnologías claves, de cara a acelerar su penetración y la transición industrial.

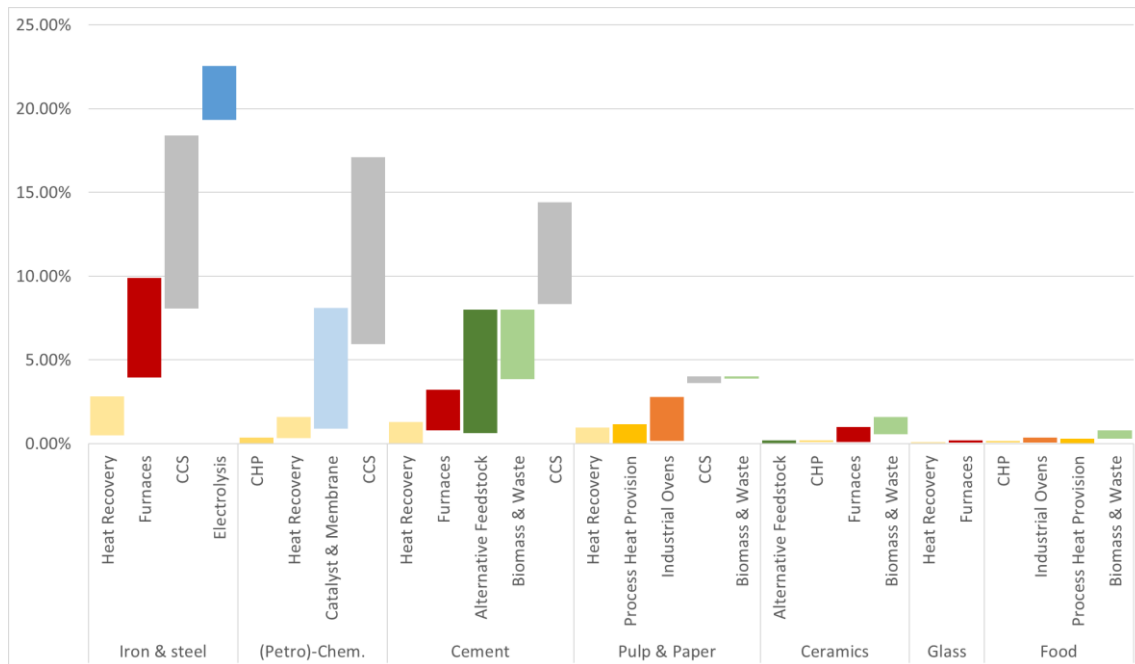


Figura. 5. La reducción de las emisiones de CO2 industriales totales a través de las principales opciones de reducción en cada industria (valores basados en rangos máximos y mínimos derivados de la sección 4 y multiplicado por las emisiones de cada sector en la Tabla 1)

### 5.3 La preparación tecnológica y los ciclos de inversión

Muchas de las opciones revisadas de reducción tienen en común que la viabilidad comercial no se espera hasta 2030. En este contexto, la velocidad con la que las instalaciones existentes se reemplazan por las nuevas tecnologías es un factor importante para la evaluación de las opciones para la descarbonización industrial. La IIE puede ser caracterizada por la longevidad de sus equipos de proceso. La sustitución y renovación de tecnologías de proceso existentes depende de la vida útil restante de los equipos actualmente instalados, sus costes operativos y los costes previstos para las nuevas tecnologías. Según Vellinga [169] los ciclos de innovación son de 5 años para las soluciones de fin de tubería ("end-of-pipe"), de 10 hasta 15 años para cambios de procesos y de productos, y de más de 20 años para los cambios con respecto a todo el sistema de producción. De todas las áreas de reducción de emisiones revisadas, sólo el CCS, la biomasa y el uso de residuos, materias primas alternativas y la utilización de combustibles sostenibles como el hidrógeno se pueden considerar como innovaciones de entrada ("front-end") o del fin de tubería ("end-of-pipe"). El análisis presentado en las Secciones 4.3, 4.4, 4.6 y 4.7 muestra que las innovaciones relacionadas con CCS, biomasa, residuos, materias primas alternativas e hidrógeno a menudo requieren un rediseño de los procesos de producción y no serán implementadas a corto plazo. Solamente las mejoras de la provisión de calor auxiliar, la recuperación y la reutilización de calor no implican cambios en el sistema de producción. La penetración de mercado de nuevas soluciones comercialmente competitivas en estas áreas se llevará a cabo de

forma incremental en un horizonte de tiempo a medio plazo. Las innovaciones radicales comentadas en la Sección 5.2 implican una transformación completa de los sistemas de producción. Su implementación por todo el sector va a suceder durante un horizonte temporal de 20 años y sólo después que la tecnología está disponible a precios de inversión competitivos. Algunos equipos tienen una vida económica de 40 a 50 años [4]. Si se sustituyen estos equipos hoy en día seguirán en operación hasta post-2050 si los costes de oportunidad para instalaciones alternativas no justifican el reemplazo prematuro. Esta dependencia de la trayectoria de las tecnologías tiene que ser considerada en la formulación refinada de los objetivos de descarbonización y el diseño de políticas destinadas para una descarbonización industrial hasta 2050.

#### **5.4 La incertidumbre del potencial de reducción de emisiones**

Las características de las potenciales tecnologías futuras se basan en supuestos actuales con respecto a su aplicabilidad y sus eficiencias operativas. Esto da lugar a grandes incertidumbres con respecto al posible potencial mínimo y máximo de descarbonización que se puede lograr en todos los sectores. La Figura 6 muestra el potencial de reducción mínimo/máximo específico para cada sector según todos los hallazgos dentro de cada una de las áreas de reducción revisadas. Los rangos representan valores que están entre las mejoras por la instalación de tecnología BAT hasta máximos potenciales teóricos. Para la industria del vidrio, por ejemplo, el impacto de los nuevos diseños de hornos en la descarbonización varía entre el 4% y el 80% (Tabla 5). Algunas publicaciones se refieren solamente a pequeñas mejoras de la tecnología actual del horno, cuando otras publicaciones esperan la electrificación completa del proceso de producción. También existen áreas de incertidumbre para las áreas con potenciales de reducción que solamente incluyen tecnología BAT. La cogeneración, por ejemplo, es una tecnología madura que solamente cuenta con una reducción adicional de las emisiones intersectoriales entre 0,3% y 0,8% para los sectores industriales revisados. El potencial máximo es más de dos veces mayor que el potencial mínimo. La fuente principal de esta incertidumbre es la falta de conocimiento con respecto a la penetración actual de la tecnología dentro de los sectores analizados. Tales incertidumbres están presentes para la recuperación de calor, el suministro de calor de procesos, la utilización de la biomasa y el diseño de hornos BAT. Un mejor conocimiento de la situación actual sobre el estado tecnológico es esencial para evaluar las posibles mejoras de las mejores técnicas actuales y tecnologías novedosas.

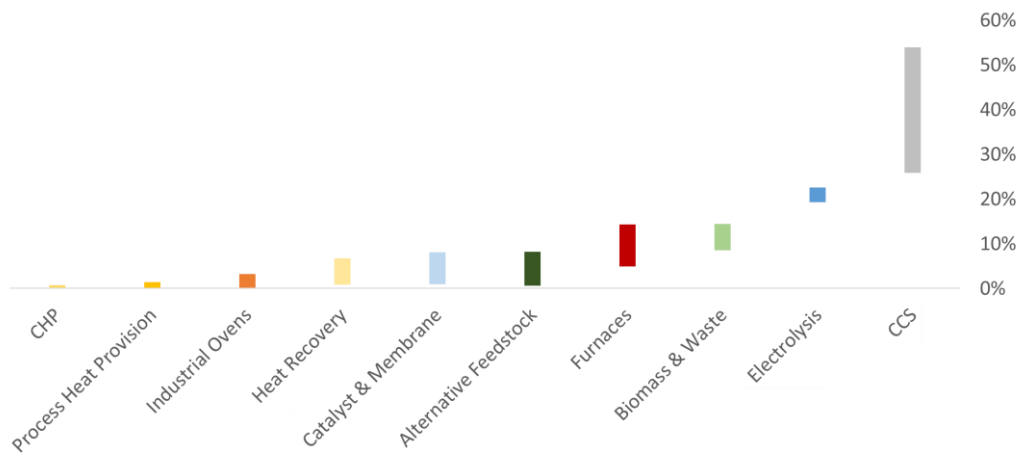


Figura. 6. Principales opciones de reducción en todas las industrias revisadas y su potencial min / máx para la descarbonización industrial total (el peso de sectores como se muestra en la Tabla 1 se multiplica por los potenciales identificados en la Sección 4)

## 5.5 Implicaciones intersectoriales de las innovaciones

Las tecnologías presentadas en esta revisión se contrastan con respecto a su capacidad para sectores específicos de la industria. En algunos casos, las opciones de mitigación para el sector industrial requieren el desarrollo de infraestructuras externas, y otras opciones de mitigación ayudan a reducir las emisiones intersectoriales en lugar de la huella de carbono de un sector específico. La tecnología CCS solamente es factible si existe la infraestructura de transporte y del almacenamiento. Así, será más probable que sea económicamente factible dentro de los conglomerados industriales con una infraestructura de transporte compartido, que para plantas aisladas construidas en las proximidades de las fuentes y minas de sus materias primas. Los procesos que utilizan hidrógeno en lugar de combustibles fósiles exigen el desarrollo de una economía basada en el hidrógeno. El uso de hidrógeno se presenta como el nuevo elemento esencial de la descarbonización de procesos industriales, cuando anteriormente la captura y el almacenamiento de CO<sub>2</sub> había dominado la discusión sobre la descarbonización de las industrias con pocas posibilidades tecnológicas de reducción de emisiones como el sector de cemento. Los costes muy elevados de la captura de CO<sub>2</sub> y la pregunta sin resolver sobre la viabilidad del almacenamiento subterráneo son las barreras principales para la introducción de esta tecnología. Un ejemplo para el uso de hidrógeno en la IIE que se presentó en esta revisión es la fabricación del acero neutro en carbono a través de DRI. En la evaluación de hojas de ruta hacia la descarbonización que incluyen CCS, la electrificación o la economía de hidrógeno se tienen que considerar como transformaciones de sistemas. Mientras que los procesos electrificados solamente serán neutros en carbono cuando la electricidad se genere por fuentes renovables y así solamente requerirá la extensión de un sistema existente, la red de transporte de electricidad, tanto el CCS como la economía del hidrógeno hacen necesarios nuevos

sistemas de distribución, transporte y almacenamiento. Teniendo en cuenta que tanto el CCS como el hidrógeno son alternativas que pueden contribuir a la descarbonización manteniendo los procesos actuales de producción, se pueden considerar hasta un cierto grado como procesos competitivos. El peso de las ventajas y las desventajas de ambas tecnologías decidirá su futura implementación, coexistencia y competencia. Otro aspecto que será relevante en el caso de las tecnologías de recuperación de calor es que el calor residual que se recupere pueda ser proporcionado a consumidores externos sin efectos directos en la huella de carbono del propio sector industrial. Usar el calor residual de los hornos de cemento para generar electricidad puede reducir las emisiones de carbono intersectoriales. Sin embargo, la electricidad generada no será neutra en carbono si se utilizan combustibles fósiles en el horno. Tales interdependencias a través de toda la economía necesitan ser reconocidas en la evaluación de las hojas de ruta hacia la descarbonización.

## **VI. Conclusiones y perspectivas**

En esta revisión, se han identificado y analizado diferentes áreas de reducción de las emisiones para la industria intensiva en energía. Contrastando las innovaciones discutidas en las publicaciones de hojas de ruta para las diferentes industrias, se puede concluir que hay poco consenso acerca de cómo se lograría la descarbonización profunda de la IIE. Las principales áreas de reducción de emisiones en todos los sectores se han revisado y se han contrastado con la literatura científica. Los resultados presentados en la Sección 5 permiten las siguientes conclusiones.

Sí, existen tecnologías estandarizadas e intersectoriales para aplicaciones auxiliares e procesos de calor de baja temperatura. Pero las mejoras y la electrificación de estas áreas no serán suficientes para reducir las emisiones industriales de CO<sub>2</sub> a los niveles requeridos. Se necesitan otras tecnologías avanzadas para lograr una profunda descarbonización de la IIE. Claves son especialmente la aparición de la tecnología de membranas en la industria (petro)química, la producción de acero neutro en carbono, materias primas alternativas para la producción de cemento, y la captura y el almacenamiento de carbono (CCS), mientras que la economía de hidrógeno se ofrece como alternativa al último para todos los sectores. Ninguna de estas tecnologías está comercialmente ya disponible y su comercialización no se espera hasta 2030 o más tarde. Teniendo en cuenta y reconociendo los largos ciclos de innovación dentro de la industria, la transición completa hasta 2050 es dudosa. Son clave pues las políticas diseñadas para fomentar estas tecnologías, para acelerar su desarrollo e implementación, que es esencial para alcanzar los objetivos de reducción de CO<sub>2</sub>. Es necesario un mejor entendimiento del potencial de descarbonización esperable por las nuevas tecnologías y el status quo tecnológico actual en toda la industria para el diseño de dichas políticas. Se requiere más investigación para entender cómo la descarbonización de la industria afecta a la transformación de otros sectores de la economía y su huella de carbono. Los modelos y simulaciones utilizados para la

---

formulación de políticas deben tener en cuenta estas interacciones intersectoriales para capturar el impacto total de la descarbonización profunda de la IIE.

## **PARTE 2:**

# **EL COSTE ASOCIADO A LA TRANSICION DE LAS INDUSTRIAS INTENSIVAS EN ENERGIA**

## I. Introducción

Existen varias razones para cambiar o renovar los equipos en las plantas industriales. Los equipos se cambian por fallos mecánicos, cuando han llegado al fin de su vida útil, por mantenimiento preventivo o cuando nuevas tecnologías más eficientes no permiten una operación económica de la tecnología actual. En esta sección se presenta una primera evaluación de los costes de tecnologías innovadoras en los procesos de producción de las industrias de materias primas. Se evalúa la información disponible en la literatura con respecto a los costes operativos y los costes de instalación para las tecnologías claves que permitirían la descarbonización de las industrias del cemento, la siderurgia, petroquímica con respecto a la producción de plásticos, y papel. Adicionalmente se revisa el conocimiento actual sobre el futuro coste del hidrógeno que puede sustituir a los combustibles fósiles en varias industrias. Las industrias de materiales básicos que ya consumen energía eléctrica, como la producción de aluminio, no se han tenido en cuenta para esta evaluación, ya que se supone que la descarbonización del sector eléctrico también permitirá la descarbonización de estos sectores. Se debe tener en cuenta que todos los datos económicos presentado en esta sección están basados en supuestos de otros estudios. Y que siempre sería posible que materiales o tecnologías innovadores modificaran la demanda de algunas materias primas de una manera que no somos capaz de anticipar hoy en día. Los datos económicos están basados en fuentes revisadas por Gerres (2019) y fuentes adicionales para estimar los factores económicos [170].

## II. Cemento

La planta tipo para la producción de cemento en Europa tiene una capacidad de 1 Millón de toneladas al año. Las nuevas instalaciones cuestan entre 150-200 €M para la capacidad indicada y producen 2,92 GJ/t de cemento. Las emisiones se pueden reducir por el cambio de hornos y la implementación de CCS, el uso de biomasa, y medidas para limitar el uso de clínker.

Todas las tecnologías claves de bajas emisiones dirigidas a la captura de emisiones de carbono (véase *Tabla 1*) tienen en común que las inversiones son entre un 50% y un 150% más altas que para la planta tipo con tecnología BAT actual. Además, todas las tecnologías CCS requieren hasta el doble de energía para capturar los gases residuales. La subida de costes de operación e instalación hace necesario que el coste asociado a las emisiones de carbono o su prevención deba ser remunerado. El coste de reducción asociado a las tecnologías de CCS debe estar entre 50 y 165 €/tCO<sub>2</sub>. Para todos los procesos de captura se espera una significativa subida del consumo energético de la producción de cemento. Las tecnologías que permiten CCS serían comercializadas durante los años 2020 y 2030.

Dos alternativas al CCS son el uso de biomasa como combustible y nuevos cementos que no requieren altas tasas de clínker. La biomasa es una alternativa que es relativamente



barata. Se requieren pocas o ningunas inversiones en las plantas actuales. Los costes de reducción son relativamente bajos y con la industria de cemento completamente integrada en el ETS la utilización de biomasa en el sector debería subir en los años que vienen. Sin embargo, el impacto de la biomasa en la descarbonización de la producción del cemento es limitado. Las impurezas y especialmente las emisiones de sulfatos no permiten reducir las emisiones más que aproximadamente un 30%. Adicionalmente se puede reducir la tasa de clínker que es la causa de la mayoría de las emisiones del sector. El clínker es clave por las características de cemento, su durabilidad y longevidad, y por eso es poco factible reducir mucho la tasa de clínker. Su potencial para la descarbonización es limitado.

Tabla 1: Evaluación económica de innovaciones para la producción de cemento

|   | Tecnología                              | Inversiones             | Emisiones                      | Energía                            | Disponibilidad                            | Coste de reducción <sup>2</sup>         | Fuentes                       |
|---|---|-------------------------|--------------------------------|------------------------------------|---|---|-------------------------------|
| Planta tipo                               | Horno de múltiples etapas (1 Mt/a)      | 150-200 €M              | 1 - 1.25 tCO <sub>2</sub> /t   | 3.78 GJ/t (UE)<br>2.92 GJ/t (BAT)  | disponible                                |   | [17], [19], [21], [44], [171] |
| Hornos                                    | Horno de combustible oxigenado (nuevo)  | 300-360 €M              | - 0.8 tCO <sub>2</sub> /t      | + 0.5-1.0 GJ/t (electricidad)      | > 2020                                    | 15-77 €/tCO <sub>2</sub>                | [17], [63], [99], [172]-[174] |
| Hornos                                    | Horno de combustible oxigenado (re-fit) | 100-150 €M              | - 0.5 tCO <sub>2</sub> /t      | + 0.5-1.0 GJ/t (electricidad)      | >2020                                     |   | [17], [63], [99], [172]-[174] |
| Captura y almacenamiento de carbono (CCS) | Circuito de calcio (re-fit)             | 50 - 200 €M             | - 0.5 tCO <sub>2</sub> /t      | + 2.0 - 5.5 GJ/t                   | >2030                                     | aprox. 50 €/tCO <sub>2</sub>            | [99], [175]                   |
| Captura y almacenamiento de carbono (CCS) | Post-combustión (re-fit)                | 100-300 €M              | - 0.5-0.9 tCO <sub>2</sub> /t  | + 3.6-5.4 GJ/t                     | >2030                                     | 88-165 €/tCO <sub>2</sub>               | [17], [63], [99], [174]       |
| Biomasa y residuos de origen biológico    | Uso de biomasa                          | 0 - 15 €M               | -0.31-0.35 tCO <sub>2</sub> /t | -                                  | disponible                                | 7-27 €/tCO <sub>2</sub> (por +38% OPEX) | [19], [20], [38]              |
| Materias primas alternativas              | Reducción de tasa de clínker            | (nueva planta)          | -0.31-0.50 tCO <sub>2</sub> /t | temperaturas de procesos más bajas | disponible (aplicaciones limitadas) >2040 | 25-30 €/tCO <sub>2</sub>                | [38], [176]                   |
| Materias primas alternativas              | Materias alternativas                   | 0-0.3 M€ o nueva planta | -0.50-0.66 tCO <sub>2</sub> /t |                                    |   | [19], [176]                             |                               |

La producción y el uso de otras materias en lugar del clínker, como por ejemplo el cemento basado en magnesio, pueden bajar las emisiones sectoriales significativamente. Su potencial y el coste asociado con su producción son completamente desconocidos porque las posibles alternativas todavía están en desarrollo, en la fase de investigación básica. Su competitividad a gran escala no se espera antes del año 2040. Por el momento, el CCS se presenta como la única tecnología con rangos de costes conocidos que permite bajar las emisiones del sector significativamente (Figura 1).

<sup>2</sup> En esta y las tablas siguientes, los costes de reducción indican el coste adicional en €/tCO<sub>2</sub> que se requiere para que la tecnología sea competitiva con los procesos actuales de producción ambos con respecto a costes de inversión y operación. Los valores son indicativos dado que los costes operativos dependen de los supuestos para los futuros costes de energía usado en los diferentes estudios citados.

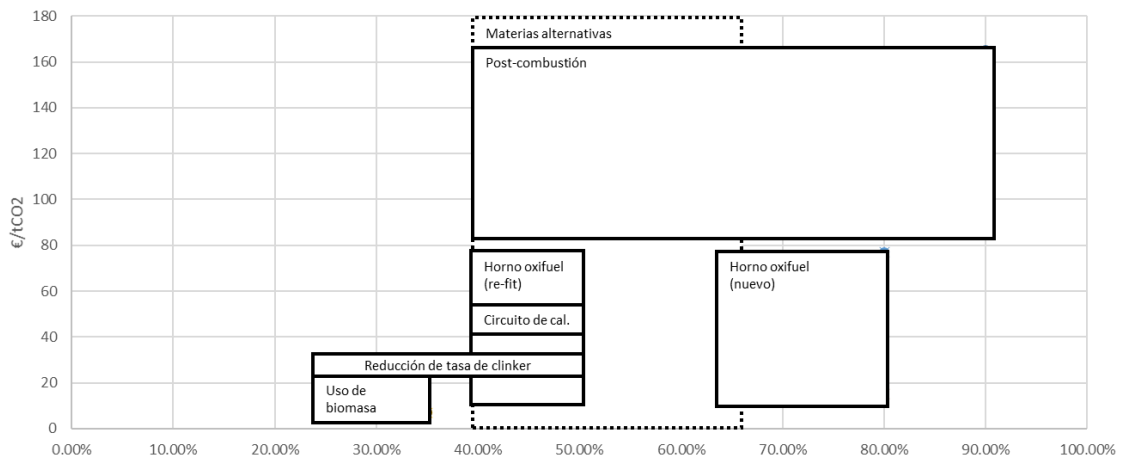


Figura 1: Costes y tasas de reducción para diferentes innovaciones en la industria de cemento

### III. Siderurgia

En el caso de la siderurgia el gran reto es la descarbonización de la producción de acero primario que hoy en día se produce a base de coque. Las plantas integradas de acero primario en Europa son relativamente antiguas y la construcción de nuevas instalaciones (BAT) es intensiva en capital, con costes de instalación alrededor de 460-490 €/t de capacidad instalada. En la siderurgia tanto las nuevas rutas de producción como CCS permitirían bajar las emisiones significativamente.

Los procesos de producción alternativos que pueden reducir las emisiones a medio plazo son los nuevos hornos Hlsarna y la combinación de hornos de arco eléctrico (EAF) con una reducción directa (DRI) del acero con gas natural o hidrógeno (véase Tabla 2). En ambas tecnologías se puede asumir que los costes de inversión son parecidos o menores que para la planta integrada. En caso de Hlsarna el número de etapas del proceso de producción se reduce significativamente. Ambas rutas siguen usando fuentes fósiles como combustible. Esto resulta en que su potencial de descarbonización se encuentra entre el 20% y el 50%. Ambas tecnologías requieren menos energía que la típica planta integrada BAT. En caso de la tecnología EAF-DRI el coste de reducción se situaría entre 34 – 64 €/tCO<sub>2</sub> y se presenta como la tecnología más económica. Si se utiliza hidrógeno en vez de gas natural para la reducción directa se pueden alcanzar tasas más altas de descarbonización. Esto requiere que el coste de hidrógeno sea parecido al coste de gas natural y que sea producido utilizando energía de bajas emisiones. Ya existen plantas piloto para ambas tecnologías y su implementación a nivel competitivo se puede esperar en los años 2020s y 2030s.

La captura de CO<sub>2</sub> se puede aplicar tanto a los procesos de producción existentes como a los nuevos como Hlsarna. La eficiencia de la captura y su coste depende de si la tecnología se instala en plantas existentes (retrofitting) o se integra en el diseño de nuevas plantas y hornos. El coste de reducción de emisiones se encuentra en el rango entre 50 y 100 €/tCO<sub>2</sub> (Figura 2). Con nuevos diseños integrados se pueden evitar hasta

un 80% de las emisiones, mientras que las modificaciones de las plantas existentes no alcanzan esas tasas tan altas de descarbonización. Su comercialización en los años 2020 o 2030 es probable.

Tabla 2: Evaluación económica de innovaciones para la producción de cemento

|   | Tecnología                                 | Inversiones                               | Emisiones  | Energía                                     | Disponibilidad   | Coste de reducción                         | Fuentes                  |
|---|--|---|--|---|--|--|--------------------------|
| Planta tipo                               | Alto horno (0.5-5 Mt/a)                    | 460 -490 €/t de capacidad                 | 1.3 tCO <sub>2</sub> /t                              | 21 GJ/t (EU)                                | disponible   |  | [16], [42], [55], [177]  |
| Planta tipo                               | Horno de arco eléctrico (EAF) (< 0.4 Mt/a) | 205 €/t de capacidad                      | 0.5 tCO <sub>2</sub> /t UEmix 2010                   | 16.7 GJ/t (BAT)                             | disponible   |  | [16], [42], [177]        |
| Hornos                                    | EAF-DRI (sin CCS)                          | 460 €/t de capacidad (CH <sub>4</sub> )   | -40-50% (CH <sub>4</sub> )<br>-80% (H <sub>2</sub> ) | 10 GJ/t (CH <sub>4</sub> ) + 4.1 GJ/t (EAF) | disponible (CH <sub>4</sub> ) > 2035 (H <sub>2</sub> ) | 34-62 €/tCO <sub>2</sub> (H <sub>2</sub> ) | [16], [34], [55], [178]  |
| Hornos                                    | Hlsarna (sin CCS)                          | (demo) 1250 €/t 110-300 €/t de capacidad  | -20%<br>- 80% (con CCS)                              | -20%  | > 2030   |  | [16], [20], [55], [72]   |
| Captura y almacenamiento de carbono (CCS) | CCS (post-combustión)                      |   | - 30-65%   | + 0.7 - 4.7 GJ/t                            | disponible   | 65 - 100 (o más) €/tCO <sub>2</sub>        | [91], [99], [174], [179] |
| Captura y almacenamiento de carbono (CCS) | Top Gas Recycling (re-fit)                 |   | -10-25%<br>-60% (sin/<br>con CCS)                    | -21-25%                                     | > 2020   | 60- 90 €/tCO <sub>2</sub>                  | [16], [35], [89], [99]   |
| Electrólisis                              | ULCOWIN ULCOLYSIS<br>SIDERWIN              | coste de planta + 0.5 GW planta eléctrica | -87-98 % (elec. cero emisiones)                      | 16.7 GJ/t (energía eléctrica)               | >2040  |  | [16], [35], [180]        |

La producción de acero a base de electrolisis puede facilitar la producción de acero con emisiones cuasi nulas. La tecnología todavía se encuentra en las primeras fases del desarrollo y por eso una estimación de los futuros costes de implementación no es factible. Su consumo energético sería parecido a lo de los procesos actuales, pero tiene que ser provisto en forma de energía eléctrica. Esta tecnología sería una opción para la descarbonización a largo plazo, después de 2040.

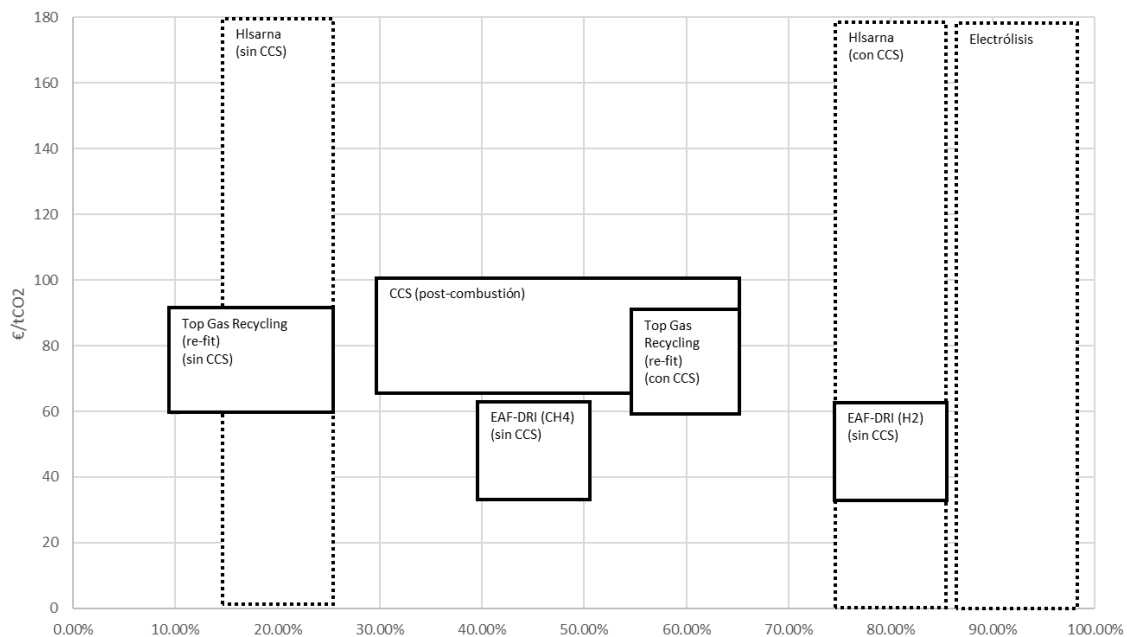


Figura 2: Costes y tasas de reducción para diferentes innovaciones en la siderurgia

## IV. Plástico y petroquímica

La petroquímica es una industria que fabrica distintos productos químicos utilizando diferentes procesos de producción. Un grupo de productos importantes son los plásticos. La revisión económica de la descarbonización sectorial se enfoca en la producción de plástico a base de etileno como proceso de ejemplo. La producción de plástico es intensiva en emisiones de CO<sub>2</sub> y genera entre 1.8 – 2,0 t/tCO<sub>2</sub> por tonelada producida. La etapa de producción más intensiva en emisiones es el craqueo de nafta. La nafta también sirve como materia prima para otros productos químicos. Además de con la captura de CO<sub>2</sub>, las emisiones pueden reducirse a un mínimo mediante el craqueo catalítico, el uso de membranas o sistemas híbridos.

El uso de nuevos catalizadores en los procesos de destilación y craqueo permitiría bajar las temperaturas requeridas y minimizar la demanda energética de los procesos. Los nuevos catalizadores se pueden aplicar en los procesos existentes sin inversiones adicionales en el equipo de producción, pero su potencial para bajar las emisiones de la producción es limitado. Como se refiere a catalizadores todavía en desarrollo, su disponibilidad no se espera hasta 2030. El coste asociado a la reducción de emisiones, entre 20-40 €/tCO<sub>2</sub>, sería relativamente bajo.

Las membranas pueden sustituir los procesos de altas temperaturas como el craqueo y la destilación. Las materias primas se separarán por aplicación de altas presiones que se generarían mediante equipos eléctricos. Las nuevas nanomembranas todavía están en desarrollo y el coste de esta tecnología es completamente desconocido. En general, se asume que la implementación de sistemas híbridos (craqueo/destilación + membranas) y membranas innovadoras puede bajar las emisiones entre un 30 y un 90% (Tabla 3). Por el estado preliminar de la investigación, no se espera que la tecnología sea competitiva a gran escala hasta 2040.

Tabla 3: Evaluación económica de innovaciones para la producción de productos petroquímicos

|   | Tecnología                             | Inversiones                                 | Emisiones                                | Energía  | Disponibilidad | Coste de reducción          | Fuentes                       |
|---|--|---|--|--|----------------|-----------------------------|-------------------------------|
| Planta tipo                                     | Craqueo de nafta (0.25-0.75 Mt/a)      |   | 0.85 tCO <sub>2</sub> /t                 | 12.2 GJ/t (EU)<br>12.0 GJ/t (BAT)                            | disponible     |                             | [146], [160],<br>[181], [182] |
|   | Etileno (como producto del craqueo)    | 1531-1800 €/t de capacidad                  | 1.8-2.0 tCO <sub>2</sub> /t              | 15.4 - 21.3 GJ/t   | disponible     | 15-77 €/tCO <sub>2</sub>    |                               |
| Captura y almacenamiento de carbono (CCS)       | Post-combustión de craqueo (etileno)   | 300-400 €/t (nuevo)<br>400-800 €/t (re-fit) | <100% (proceso)<br>> 50% (planta)        | (criogénico)<br>-1.6 GJ/t (imp. vapor)<br><b>+ 10.4 GJ/t</b> |                | 50 -100 €/tCO <sub>2</sub>  | [29], [38], [49], [99], [183] |
| Procesos catalíticos y separación por membranas | Craqueo con catalizadores              | <i>falta de información</i>                 | <i>por cambio del consumo energético</i> | < 15%  | > 2030         | 20 -40 €/tCO <sub>2</sub>   | [19], [49], [163]             |
| Procesos catalíticos y separación por membranas | Membranas (en todos procesos químicos) | <i>falta de información</i>                 | <i>por cambio del consumo energético</i> | < 30% (híbrido)<br>< 90% (membranas)                         | >2030          | <i>falta de información</i> | [19], [163]                   |

Si no se desarrollan materias alternativas al plástico que pueden limitar las emisiones asociadas al proceso de producción, la captura de CO<sub>2</sub> se plantea como una opción clave para bajar las emisiones sectoriales. El coste asociado al CCS en el sector petroquímico es parecido a los rangos en la siderurgia y las estimaciones se encuentran entre 50 y 100

€/tCO<sub>2</sub>. Los costes de inversión asociados a la captura serían entre 300-400 €/t por capacidad instalada en las nuevas plantas y entre 400 – 800 €/t para modificaciones de plantas existentes, suponiendo unos costes adicionales de entre 20 y 40%. Su disponibilidad competitiva se espera en los años 2030. La eficiencia de la captura depende del alcance en que se aplique. Si solamente se considera el proceso de craqueo la eficiencia de captura es de cerca del 100%. En caso que se evalúen las emisiones totales de, por ejemplo, la producción de plástico, se podrían evitar aproximadamente el 50% de las emisiones (Figura 3).

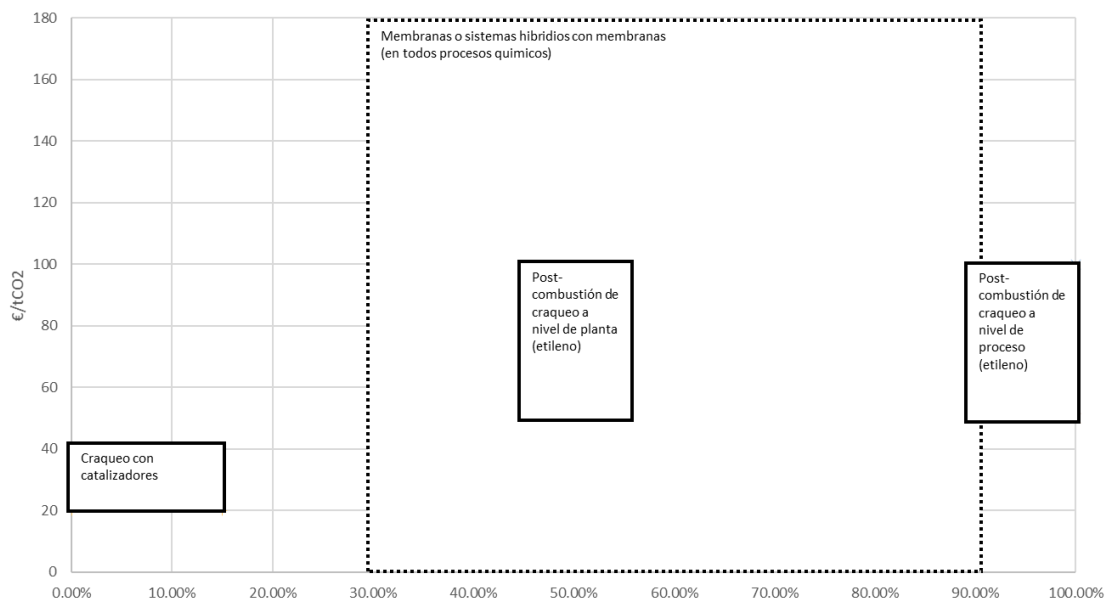


Figura 3: Costes y tasas de reducción por diferentes innovaciones por la industria petroquímica

## V. Papel y pasta

La producción de papel siempre se considera como una industria que puede alcanzar emisiones casi nulas más fácilmente que otras industrias porque tanto su materia prima como gran parte de sus combustibles son de origen biológico-orgánico. En la siguiente tabla se evalúan diferentes opciones para bajar las emisiones directas de la producción de papel y los costes asociados. Gracias a estas medidas la industria de papel podría alcanzar emisiones netas negativas y beneficiarse de los mercados ETS al vender sus derechos de emisiones sobrantes.

Por la pureza de sus gases residuales, especialmente cuando se aplica la gasificación de leñas negras, la captura de CO<sub>2</sub> es más económica en las plantas integradas de papel que en otras industrias. El CCS sería factible con costes de reducción de emisiones en el rango de 25 y 93 €/tCO<sub>2</sub> (Tabla 4). El coste de inversión estaría entre el 25% y el 60% de los costes de una planta nueva. La gasificación de las leñas negras y recuperación en forma de energía eléctrica sin CCS ya está disponible a nivel comercial. Se espera que el CCS sea competitivo a partir de los años 2020 o 2030. El concepto de una bio-refinería puede

incluir la gasificación de leñas negras. Ya hay bio-refinerías en operación, para las que se menciona que el coste de reducción de emisiones llegaría hasta 35 €/tCO<sub>2</sub>.

Tabla 4: Evaluación económica de innovaciones para la producción de papel y pasta

|   | Tecnología  | Inversiones                 | Emisiones  | Energía                              | Disponibilidad | Coste de reducción  | Fuentes                                 |
|---|---|-----------------------------|--|--------------------------------------|----------------|---|---|
| Planta tipo                               | Planta integrada de 1.3 – 1.45 Mt/a (pulpa y papel) | 800 - 2000 €/t de capacidad | 0.4 tCO <sub>2</sub> /t (EU)<br>0.8 tCO <sub>2</sub> /t (global) | < 6 GJ/t (BAT)<br>12.6-17 GJ/t (EU)  | disponible     |   | [20], [184]–[186]                       |
| Captura y almacenamiento de carbono (CCS) | CCS (y gasificación de leñas negras)                | 500- 1300 €/t de capacidad  | -<90% (-25% solamente gasificación)                              | > 20 % (consumo de vapor) +3.1 MJ/kg | 2020-2030      | 25 - 93 €/CO <sub>2</sub> t<br>11-14 €/CO <sub>2</sub> t (gas. líquido negro) | [19], [102], [103], [185], [187], [188] |
| Biomasa y residuos de origen biológico    | Bio-refinería (re-fit)                              | 560 - 1200 €/t de capacidad | - <100 % (con biomasa / elec. cero emisiones)                    | > de planta tipo                     | disponible     | < 35 €/tCO <sub>2</sub>   | [103], [185], [189], [190]              |
| Provisión de calor de proceso             | Electrificación de calor (re-fit)                   | falta de información        | -30% (integrado)<br>- 67% (papel)                                | -2-12%                               | > 2030         | falta de información  | [38], [51], [185], [191]                |

Por el rango de temperaturas considerablemente bajo en muchos procesos también se considera la electrificación parcial con tecnologías como bombas de calor o hornos de microondas. Se supone que hasta un 30% de las emisiones en una fábrica integrada y un 67% de las emisiones en una fábrica de papel serían evitables de esta forma. No se encuentran estudios detallados sobre el coste asociado a la electrificación parcial de la industria y para muchos equipos la electrificación no se espera antes del año 2030. En combinación con conceptos como lo de la bio-refinería la electrificación puede resultar en una situación en la cual las fábricas de papel serían proveedores de electricidad y ofrecerían servicios de flexibilidad por su respuesta a la demanda. En la *Figura 1* se resumen las eficiencias y costes asociados con las tecnologías claves para bajar las emisiones de la industria.

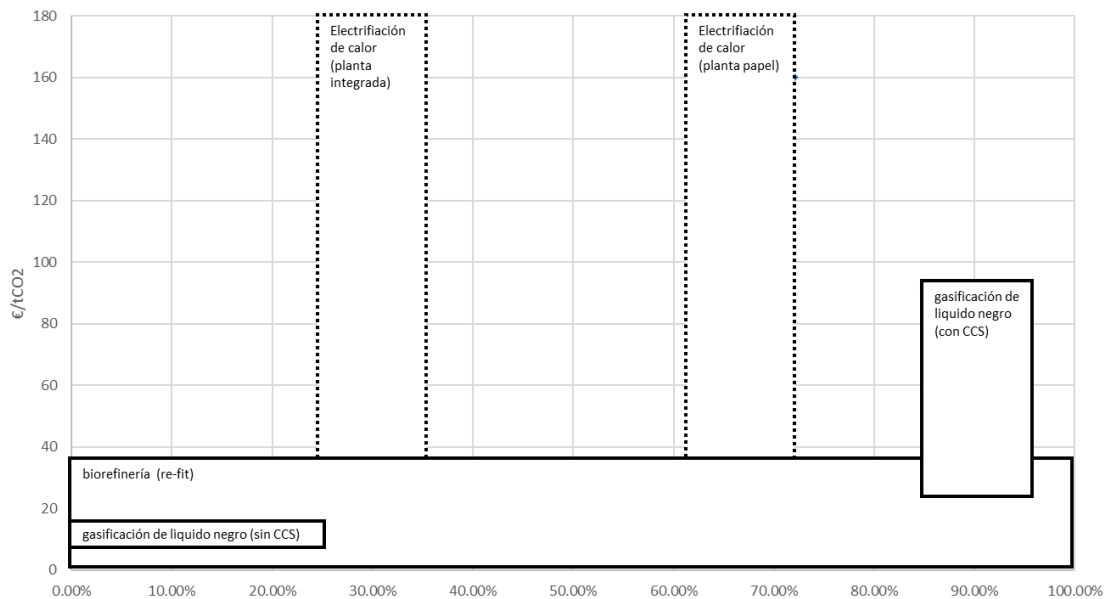


Figura 4: Costes y tasas de reducción por diferentes innovaciones por la industria de papel

## VI. Hidrógeno

Un combustible alternativo que se puede producir sin niveles de emisiones significativos y que en caso de algunas industrias no requiere profundos cambios de los procesos de producción es el hidrógeno. Para evaluar su rol en la descarbonización industrial se debe establecer un coste de referencia que haga económicamente rentable su aplicación en procesos de combustión.

El método actual para producir hidrógeno se basa en la transformación de gas natural. Sin captura de CO<sub>2</sub> la producción del hidrógeno azul/gris emite entre 7,5-9 tCO<sub>2</sub>/t durante el proceso de producción. El hidrógeno solamente permite una bajada de emisiones de procesos si se utiliza hidrógeno verde (es decir, producido con electrolisis alimentada por energías renovables). Actualmente el coste de la instalación de nuevos sistemas de electrolisis para la producción de hidrógeno verde es aproximadamente dos veces el del hidrógeno azul/gris. Se espera que en 2030 el hidrógeno se pueda producir a un precio de 2-3 €/kgH<sub>2</sub> con un coste de reducción de emisiones de 50€/tCO<sub>2</sub>. Este precio debería servir como una referencia para futuros estudios sobre la competitividad del hidrógeno en las industrias con uso intensivo de energía en España.

Tabla 5: Evaluación económica de la producción de hidrógeno

|           | Tecnología          | Inversiones                                       | Emisiones  | Energía                             | Disponibilidad | Coste de reducción <sup>3</sup>                    | Fuentes               |
|-----------|---------------------|---|--|-------------------------------------|----------------|--|-----------------------|
| Hidrógeno | Hidrógeno azul/gris | 350-450 €/kW (sin CCS)<br>900-1300 €/kW (con CCS) | 7.5-9 tCO <sub>2</sub> /t (sin CCS)<br>< 0.4 tCO <sub>2</sub> /t (con CCS) | 62.5 kWh/kg (carbón o gas natural)  | Disponible     | 1.5-3.5 €/kg (sin CCS)<br>> 15 €/kg (con CCS)      | [192]–[195]           |
|           | Hidrógeno verde     | >1000 €/kW (hoy)<br>300 €/kW (2030)               | < 100 %  | 55 kWh/kg (hoy)<br>50 kWh/kg (2030) | Disponible     | 2-3 €/kgH <sub>2</sub> y<br>>50 €/tCO <sub>2</sub> | [138],<br>[196]–[198] |

<sup>3</sup> Coste final de la producción de hidrogeno en €/kg.





---

## Referencias

- [1] European Commission, "A Clean Planet for all A European strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy," European Commission, Brussels, COM(2018) 773 final, Nov. 2018.
- [2] P. Buckley and P.-W. Lemmens, "State of the EU Emissions Trading System 2017," Sandbag Climate Campaign CIC, 2017.
- [3] P. Capros, L. Höglund-Isaksson, S. Frank, and H. Witzke, "EU Reference Scenario 2016 Energy, transport and GHG emissions Trends to 2050," European Commission, E3M - Lab, Jul. 2017.
- [4] G. Habert, C. Billard, P. Rossi, C. Chen, and N. Roussel, "Cement production technology improvement compared to factor 4 objectives," *Cement and Concrete Research*, vol. 40, no. 5, pp. 820–826, May 2010.
- [5] R. van Laar and D. Corus, "Modern blast furnace design," *Millenium Steel 2016*, pp. 35–40, 2016.
- [6] D. Jones, M. Dufour, and J. Gaventa, "Europe's Declining Gas Demand - Trends and Facts on European Gas Consumption," E3G, 2015.
- [7] K. Neuhoff *et al.*, "Modernization and innovation in the materials sector: Lessons from steel and cement," *DIW Economic Bulletin*, vol. 5, no. 28/29, pp. 387–395, 2015.
- [8] P. Anderson and M. L. Tushman, "Technological discontinuities and dominant designs: A cyclical model of technological change," *Administrative science quarterly*, vol. 35, no. 4, pp. 604–633, 1990.
- [9] K. Neuhoff *et al.*, "Innovation and use policies required to realize investment and emission reductions in the materials sector," 2017.
- [10] European Commission, "A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050," *European Commission*, 2011.
- [11] Umweltbundesamt, "Germany in 2050 – a greenhouse gas-neutral country," Umweltbundesamt, Berlin, 2014.
- [12] S. Pye, G. Anandarajah, B. Fais, C. McGlade, and N. Strachan, "Pathways to Deep Decarbonization in the United Kingdom," IDDRI, SDSN, UCL Energy Institute, 2015.

- 
- [13] J. Williams, B. Haley, and R. Jones, "Policy Implications of Deep Decarbonization in the United States," Deep Decarbonization Pathways Project, Energy and Environmental Economics, Inc, 2015.
- [14] Berenschot, "Electrification in the Dutch process industry," Berenschot, Utrecht, 2017.
- [15] M. Brolin, J. Fahnestock, and J. Rootzen, *Industry's Electrification and Role in the Future Electricity System: A Strategic Innovation Agenda*. 2017.
- [16] EUROFER, "A Steel Roadmap for a Low Carbon Europe 2050," The European Steel Association, 2013.
- [17] CEMBUREAU, "The role of Cement in the 2050 Low Carbon Economy," The European Cement Association, 2013.
- [18] Cerame-Unie, "Paving the way to 2050 - the Ceramic Industry Roadmap," The European Ceramic Industry Association, 2012.
- [19] WSP and DNV GL, "Industrial Decarbonisation & Energy Efficiency Roadmaps to 2050," Department of Energy and Climate Change (DECC), 2015.
- [20] H. Croezen and M. Korteland, "A long-term view of CO<sub>2</sub> efficient manufacturing in the European region," CE Delft, 2010.
- [21] European Cement Research Academy, "Development of State of the Art-Techniques in Cement Manufacturing: Trying to Look Ahead," European Cement Research Academy, Cement Sustainability Initiative, Düsseldorf, Geneva, 2017.
- [22] P. Barthe, M. Chaugny, S. Roudier, and L. Delgado-Sancho, *Best available techniques (BAT) reference document for the refining of mineral oil and gas industrial emissions: Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (integrated pollution prevention and control)*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2015.
- [23] S. Baldwin *et al.*, *Quadrennial Technology Review 2015*. U.S. Department of Energy, 2015.
- [24] British Glass, "A Clear Future - UK Glass manufacturing sector decarbonisation roadmap to 2050," British Glass, Mar. 2014.
- [25] T. Wyns and M. Axelson, "The Final Frontier – Decarbonising Europe's energy intensive industries," Institute for European Studies, Vrije Universiteit Brussel, 2016.

- 
- [26] S. Samadi *et al.*, "Decarbonization Pathways for the Industrial Cluster of the Port of Rotterdam," Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy, Port of Rotterdam, 2016.
- [27] M. Suhr *et al.*, *Best available techniques (BAT) reference document for the production of pulp, paper and board*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2015.
- [28] S. Brueske, C. Kramer, and A. Fisher, "Bandwidth Study on Energy Use and Potential Energy Saving Opportunities in US Chemical Manufacturing," U.S. Department of Energy, 2015.
- [29] CEFIC, "European chemistry for growth - Unlocking a competitive, low carbon and energy efficient future," European Chemical Industry Council, 2013.
- [30] Carbon Market Watch, "The climate friendly transition of Europe's Energy Intensive Industries," May 2016.
- [31] JRC, *Best available techniques (BAT) reference document for Food, Drink and Milk Industries DRAFT 01/2017*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2013.
- [32] T. Miller, C. Kramer, and A. Fisher, "Bandwidth Study on Energy Use and Potential Energy Saving Opportunities in US Pulp and Paper Manufacturing," U.S. Department of Energy, 2015.
- [33] K. van Kranenburg, E. Schols, H. Gelevert, R. de Kler, Y. van Delft, and M. Weeda, "Empowering the Chemical Industry - Opportunities for Electrification," TNO, ECN, Topsector Chemie, Ministerie van Economische Zaken, 2016.
- [34] T. Fleiter, B. Schlomann, and W. Eichhammer, Eds., *Energieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen industrieller Prozesstechnologien: Einsparpotenziale, Hemmnisse und Instrumente*. Stuttgart: Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung, 2013.
- [35] R. Remus, M. A. Aguado Monsonet, S. Roudier, and L. Delgado Sancho, "Best available techniques (BAT) reference document for iron and steel production industrial emissions directive 2010/75/EU (integrated pollution prevention and control)," Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2013.
- [36] IPCC, *Climate change 2014: mitigation of climate change: Working Group III contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, 2014.

- 
- [37] M. Åhman and L. J. Nilsson, "Decarbonizing Industry in the EU: Climate, Trade and Industrial Policy Strategies," in *Decarbonization in the European Union*, Springer, 2015, pp. 92–114.
- [38] H. Haydock and T. Napp, "Decarbonisation of heat in industry - a review of research evidence," Department of Energy & Climate Change (UK), Ricardo-AEA, Ricardo-AEA/R/ED58571, Jul. 2013.
- [39] B. M. Scalet, M. Garcia Muñoz, A. Q. Sissa, S. Roudier, and L. Delgado Sancho, *Best available techniques (BAT) reference document for the manufacture of glass: industrial emissions Directive 2010/75/EU: integrated pollution prevention and control*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2013.
- [40] C. Gellings, "Program on Technology Innovation: Industrial Electrotechnology Development Opportunities," Electric Power Research Institute (EPRI), 2009.
- [41] Glass for Europe, "Europe's flat glass industry in a competitive low carbon economy," Glass for Europe, Brussels, 2013.
- [42] Y. Chan and R. Kantamaneni, "Study on energy Efficiency and Energy Saving Potential in Industry and on Possible Policy Mechanisms," ICF Consulting Limited, 2015.
- [43] M. Åhman, A. Nikoleris, and L. J. Nilsson, "Decarbonising Industry in Sweden," *IMES/EES report no 77*, vol. 77, 2012.
- [44] F. Schorcht, I. Kourti, B. M. Scalet, S. Roudier, and L. Delgado-Sancho, *Best available techniques (BAT) reference document for the production of cement, lime and magnesium oxide: Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (integrated pollution prevention and control)*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2013.
- [45] McKinsey&Company, "Pathways to a low carbon economy," McKinsey&Company, 2009.
- [46] T. A. Napp, A. Gambhir, T. P. Hills, N. Florin, and P. S. Fennell, "A review of the technologies, economics and policy instruments for decarbonising energy-intensive manufacturing industries," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 30, pp. 616–640, Feb. 2014.
- [47] N. Pardo-Garcia, K. Vatopoulos, A. Krook-Riekkola, A. Perez-Lopez, and L. Olsen, *Best available technologies for the heat and cooling market in the European Union*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2012.

- 
- [48] FoodDrinkEurope, "Environmental Sustainability Vision towards 2030," FoodDrinkEurope, Brussels, 2012.
- [49] T. Brown, A. Gambhir, N. Florin, and P. Fenell, "Reducing CO2 emissions from heavy industry: a review of technologies and considerations for policy makers," *Grantham Institute for Climate Change Briefing paper*, vol. 7, 2012.
- [50] JRC, "Reference Document on Best Available Techniques in the Ceramic Manufacturing Industry," Publications Office of the European Union, 2007.
- [51] CEPI, "The Forest Fibre Industry: 2050 Roadmap to a low-carbon bio-economy," Confederation of European Paper Industries, 2011.
- [52] European Copper Institute, "Copper's Contribution to a low-carbon Future - a plan to decarbonise Europe by 25 percent," European Copper Institute, 2014.
- [53] E. Gutenberg, *Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre - Band 1: Die Produktion*, vol. 1. Springer-Verlag, 1951.
- [54] M. P. Groover, *Fundamentals of Modern Manufacturing - Materials, Processes, and Systems*, 4th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2010.
- [55] N. Pardo and J. A. Moya, "Prospective scenarios on energy efficiency and CO2 emissions in the European Iron & Steel industry," *Energy*, vol. 54, pp. 113–128, Jun. 2013.
- [56] A. Hasanbeigi, M. Arens, and L. Price, "Alternative emerging ironmaking technologies for energy-efficiency and carbon dioxide emissions reduction: A technical review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 33, no. Supplement C, pp. 645–658, May 2014.
- [57] P. Argenta and M. Bianchi-Ferri, "The EAF technology evolution and the Consteel® system," *La metallurgia italiana*, vol. 1, p. 2005, 2005.
- [58] M. McBrien, A. C. Serrenho, and J. M. Allwood, "Potential for energy savings by heat recovery in an integrated steel supply chain," *Applied Thermal Engineering*, vol. 103, pp. 592–606, Jun. 2016.
- [59] R. Schaper, "Projektsteckbrief Salzgitter Flachstahl GmbH: Leuchtturm energieeffiziente Abwärmenutzung," *Deutsche Energie-Agentur (dena) - Initiative EnergieEffizienz Private Haushalte*, 2017. [Online]. Available: <http://www.abwaerme-leuchtturm.de/leuchttuerme/salzgitter-flachstahl-gmbh/>. [Accessed: 09-Apr-2018].

- 
- [60] S. Boldyryev, H. Mikulčić, Z. Mohorović, M. Vujanović, G. Krajačić, and N. Duić, "The improved heat integration of cement production under limited process conditions: A case study for Croatia," *Applied Thermal Engineering*, vol. 105, pp. 839–848, Jul. 2016.
- [61] A. Hasanbeigi, W. Morrow, E. Masanet, J. Sathaye, and T. Xu, "Energy efficiency improvement and CO<sub>2</sub> emission reduction opportunities in the cement industry in China," *Energy Policy*, vol. 57, pp. 287–297, Jun. 2013.
- [62] E. Gartner and K. Quillin, "Low-CO<sub>2</sub> cements based on calcium sulfoaluminates," *Sustainability in the Cement and Concrete Industry, Norwegian Cement Association, September*, vol. 16, pp. 95–105, 2007.
- [63] E. Benhelal, G. Zahedi, E. Shamsaei, and A. Bahadori, "Global strategies and potentials to curb CO<sub>2</sub> emissions in cement industry," *Journal of Cleaner Production*, vol. 51, pp. 142–161, Jul. 2013.
- [64] S. Karellas, A.-D. Leontaritis, G. Panousis, E. Bellos, and E. Kakaras, "Energetic and exergetic analysis of waste heat recovery systems in the cement industry," *Energy*, vol. 58, pp. 147–156, Sep. 2013.
- [65] J. Laurijssen, M. Marsidi, A. Westenbroek, E. Worrell, and A. Faaij, "Paper and biomass for energy?," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 54, no. 12, pp. 1208–1218, Oct. 2010.
- [66] Z. Utlu and O. Kincay, "An assessment of a pulp and paper mill through energy and exergy analyses," *Energy*, vol. 57, pp. 565–573, Aug. 2013.
- [67] V. Ibáñez-Forés, M. D. Bovea, and A. Azapagic, "Assessing the sustainability of Best Available Techniques (BAT): methodology and application in the ceramic tiles industry," *Journal of Cleaner Production*, vol. 51, pp. 162–176, Jul. 2013.
- [68] A. Aranda-Usón, G. Ferreira, M. D. Mainar-Toledo, S. Scarpellini, and E. Llera Sastresa, "Energy consumption analysis of Spanish food and drink, textile, chemical and non-metallic mineral products sectors," *Energy*, vol. 42, no. 1, pp. 477–485, Jun. 2012.
- [69] T. Bauer, "The Potential of Thermophotovoltaic Heat Recovery for the Glass Industry," in *AIP Conference Proceedings*, Rome (Italy), 2003, vol. 653, pp. 101–110.
- [70] R. Beerkens, "Analysis of elementary process steps in industrial glass melting tanks—some ideas on innovations in industrial glass melting," *Ceramics—Silikaty*, vol. 52, no. 4, pp. 206–217, 2008.

- 
- [71] I. Dolianitis *et al.*, "Waste heat recovery at the glass industry with the intervention of batch and cullet preheating," *Thermal Science*, vol. 20, no. 4, pp. 1245–1258, 2016.
- [72] TATA Steel, "Hlsarna: game changer in the steel industry," Tata Steel, 2017.
- [73] K. Knop, M. Hallin, and E. Burström, "ULCORED SP 12 concept for minimized CO 2 emission," *Revue de Métallurgie–International Journal of Metallurgy*, vol. 106, no. 10, pp. 419–421, 2009.
- [74] J. G. Mathieson, H. Rogers, M. Somerville, P. Ridgeway, and S. Jahanshahi, "Use of biomass in the iron and steel industry—an Australian perspective," *EECR-METEC InSteelCon*, 2011.
- [75] World Steel Association, *Steel Statistical Yearbook 2016*. World Steel Association, 2016.
- [76] E. Worrell, L. Price, M. Neelis, C. Galitsky, and N. Zhou, *World best practice energy intensity values for selected industrial sectors*. Lawrence Berkeley National Laboratory, 2007.
- [77] JCoal, "Clean Coal Technology (CCT) in Japan - Fluidized-bed Advanced Cement Kiln System (FAKS)," Japan Coal and Energy Center, 2007.
- [78] M. Lindig-Niklaus, "New furnace design solution breaks the 3 gigajoule per ton benchmark limit," in *77th Conference on Glass Problems*, Columbus, OH, 2016.
- [79] C. E. Baukal, *Oxygen-enhanced combustion*, 2nd ed. Boca Raton: CRC press, 2013.
- [80] H. S. Shulman, M. Fall, and S. Allan, "Microwave assist technology for product improvement and energy efficiency," in *4th Korea/Japan International Symposium on Material Science and Resources Recycling*, 2007.
- [81] C. Agrafiotis and T. Tsoutsos, "Energy saving technologies in the European ceramic sector: a systematic review," *Applied Thermal Engineering*, vol. 21, no. 12, pp. 1231–1249, Agosto 2001.
- [82] R. González, "Pulse Firing: An Optimal Solution for Firing Ceramics," *Ceramic Industry*, 03-Aug-2015. [Online]. Available: The global technical potential of bio-energy. [Accessed: 20-Feb-2018].
- [83] I. Zabalza Bribián, A. Valero Capilla, and A. Aranda Usón, "Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential," *Building and Environment*, vol. 46, no. 5, pp. 1133–1140, May 2011.



- 
- [84] S. Parker *et al.*, "High intensity plasma glass melter project," U.S. Department of Energy Energy Efficiency and Renewable Energy, Plasmelt Glass Technologies, LLC, Oct. 2006.
- [85] Y. Yao *et al.*, "An innovative energy-saving in-flight melting technology and its application to glass production," *Sci Technol Adv Mater*, vol. 9, no. 2, Jul. 2008.
- [86] F. Schuurmanns, J. de Diego, M. van Valburg, and E. Sperry, "Operation data from OPTIMELT™ Heat Recovery System on a Tableware Glass Furnace at Libbey Leerdam," presented at the Furnace Solutions, Staffordshire, 14-Jun-2019.
- [87] Rue David and Brown John T., "Submerged Combustion Melting of Glass," *International Journal of Applied Glass Science*, vol. 2, no. 4, pp. 262–274, 2011.
- [88] E. Masanet, "Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the Glass Industry," *Lawrence Berkeley National Laboratory*, 2008.
- [89] J. van der Stel, G. Louwarse, D. Sert, A. Hirsch, N. Eklund, and M. Pettersson, "Top gas recycling blast furnace developments for 'green' and sustainable ironmaking," *Ironmaking & Steelmaking*, vol. 40, no. 7, pp. 483–489, Oct. 2013.
- [90] S. Jahanshahi, J. G. Mathieson, and H. Reimink, "Low Emission Steelmaking," *Journal of Sustainable Metallurgy*, vol. 2, no. 3, pp. 185–190, Sep. 2016.
- [91] A. Arasto, E. Tsupari, J. Kärki, M. Sihvonen, and J. Lilja, "Costs and Potential of Carbon Capture and Storage at an Integrated Steel Mill," *Energy Procedia*, vol. 37, no. Supplement C, pp. 7117–7124, Enero 2013.
- [92] J. Gale, T. Dixon, B. Beck, and M. Haines, "What have we learnt to date from large-scale CCS projects?," presented at the Climate Change Congress, Copenhagen, 03-Oct-2009.
- [93] P. Markewitz *et al.*, "Worldwide innovations in the development of carbon capture technologies and the utilization of CO<sub>2</sub>," *Energy & Environmental Science*, vol. 5, no. 6, p. 7281, 2012.
- [94] L. Mennicken, A. Janz, and S. Roth, "The German R&D Program for CO<sub>2</sub> Utilization—Innovations for a Green Economy," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 23, no. 11, pp. 11386–11392, Jun. 2016.
- [95] M. Takht Ravanchi and S. Sahebdehfar, "Carbon dioxide capture and utilization in petrochemical industry: potentials and challenges," *Applied Petrochemical Research*, vol. 4, no. 1, pp. 63–77, May 2014.



- 
- [96] M.-H. Chang *et al.*, "Design and Experimental Testing of a 1.9MWth Calcium Looping Pilot Plant," *Energy Procedia*, vol. 63, pp. 2100–2108, 2014.
- [97] J. Ströhle, M. Junk, J. Kremer, A. Galloy, and B. Epple, "Carbonate looping experiments in a 1MWth pilot plant and model validation," *Fuel*, vol. 127, pp. 13–22, Jul. 2014.
- [98] D. J. Barker, S. A. Turner, P. A. Napier-Moore, M. Clark, and J. E. Davison, "CO<sub>2</sub> Capture in the Cement Industry," *Energy Procedia*, vol. 1, no. 1, pp. 87–94, Feb. 2009.
- [99] T. Kuramochi, A. Ramírez, W. Turkenburg, and A. Faaij, "Comparative assessment of CO<sub>2</sub> capture technologies for carbon-intensive industrial processes," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 38, no. 1, pp. 87–112, Feb. 2012.
- [100] M. R. Naqvi, "Analysing performance of bio-refinery systems by integrating black liquor gasification with chemical pulp mills," KTH Royal Institute of Technology, 2012.
- [101] J. Jönsson and T. Berntsson, "Analysing the potential for implementation of CCS within the European pulp and paper industry," *Energy*, vol. 44, no. 1, pp. 641–648, Aug. 2012.
- [102] E. T. de F. Ferreira and J. A. P. Balestieri, "Black liquor gasification combined cycle with CO<sub>2</sub> capture – Technical and economic analysis," *Applied Thermal Engineering*, vol. 75, no. Supplement C, pp. 371–383, Jan. 2015.
- [103] K. Pettersson and S. Harvey, "Comparison of black liquor gasification with other pulping biorefinery concepts – Systems analysis of economic performance and CO<sub>2</sub> emissions," *Energy*, vol. 37, no. 1, pp. 136–153, Jan. 2012.
- [104] D. Leeson, N. Mac Dowell, N. Shah, C. Petit, and P. S. Fennell, "A Techno-economic analysis and systematic review of carbon capture and storage (CCS) applied to the iron and steel, cement, oil refining and pulp and paper industries, as well as other high purity sources," *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 61, pp. 71–84, Jun. 2017.
- [105] M. E. Boot-Handford *et al.*, "Carbon capture and storage update," *Energy Environ. Sci.*, vol. 7, no. 1, pp. 130–189, 2014.
- [106] R. A. Sedjo, "Carbon Neutrality and Bioenergy: A Zero-Sum Game?," 2011.
- [107] OFICEMEN, "Anuario del sector cementero español 2015," Agrupación de Fabricantes de Cemento de España, 2016.

- 
- [108] L. Barcelo, J. Kline, G. Walenta, and E. Gartner, "Cement and carbon emissions," *Materials and structures*, vol. 47, no. 6, pp. 1055–1065, 2014.
- [109] CEPI, "Key statistics 2016: European pulp & paper industry," Confederation of European Paper Industries, 2017.
- [110] IEA, "Tracking Clean Energy Progress 2017," International Energy Agency, Paris, 2017.
- [111] M. Cavazzuti, M. Corticelli, A. Nuccio, and B. Zauli, "Cfd analysis of a syngas-fired burner for ceramic industrial roller kiln," vol. 7, no. 4, pp. 533–543, Nov. 2013.
- [112] J. Duclos, O. Guerrini, B. Marchand, P. Buchet, and M. Perrin, "Towards green gases solutions for industry," in *International Gas Union Research Conference (IGRC), Copenhagen, Denmark, 2014*.
- [113] L. Appels *et al.*, "Anaerobic digestion in global bio-energy production: Potential and research challenges," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 9, pp. 4295–4301, Dec. 2011.
- [114] G. M. Hall and J. Howe, "Energy from waste and the food processing industry," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 90, no. 3, pp. 203–212, May 2012.
- [115] C. Beretta, F. Stoessel, U. Baier, and S. Hellweg, "Quantifying food losses and the potential for reduction in Switzerland," *Waste Management*, vol. 33, no. 3, pp. 764–773, Mar. 2013.
- [116] C. Banks, "Optimising anaerobic digestion," presented at the Evaluating the Potential Digestion to provide Energy and Soil amendment, University of Reading, 25-Mar-2009.
- [117] B. Muster-Slawitsch, W. Weiss, H. Schnitzer, and C. Brunner, "The green brewery concept - Energy efficiency and the use of renewable energy sources in breweries," *Applied Thermal Engineering*, Jun. 2011.
- [118] H. Haberl, T. Beringer, S. C. Bhattacharya, K.-H. Erb, and M. Hoogwijk, "The global technical potential of bio-energy in 2050 considering sustainability constraints," *Current Opinion in Environmental Sustainability*, vol. 2, no. 5–6, pp. 394–403, Dec. 2010.
- [119] G.-B. Hong, C.-M. Ma, H.-W. Chen, K.-J. Chuang, C.-T. Chang, and T.-L. Su, "Energy flow analysis in pulp and paper industry," *Energy*, vol. 36, no. 5, pp. 3063–3068, May 2011.

- 
- [120] P. W. Griffin, G. P. Hammond, and J. B. Norman, "Industrial decarbonisation of the pulp and paper sector: A UK perspective," *Applied Thermal Engineering*, vol. 134, pp. 152–162, Apr. 2018.
- [121] A. Hita, G. Seck, A. Djemaa, and G. Guerassimoff, "Assessment of the potential of heat recovery in food and drink industry by the use of TIMES model," in *ECEEE 2011*, 2011, pp. 735–743.
- [122] C. Jermann, T. Koutchma, E. Margas, C. Leadley, and V. Ros-Polski, "Mapping trends in novel and emerging food processing technologies around the world," *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, vol. 31, pp. 14–27, Oct. 2015.
- [123] H. Becker, F. Maréchal, and A. Vuillermoz, "Process integration and opportunities for heat pumps in industrial processes," *International Journal of Thermodynamics*, vol. 14, no. EPFL-ARTICLE-163637, pp. 59–70, 2011.
- [124] L. Wang, "Energy efficiency technologies for sustainable food processing," *Energy Efficiency*, vol. 7, no. 5, pp. 791–810, Oct. 2014.
- [125] S. Wolf, J. Lambauer, M. Blesl, U. Fahl, and A. Voß, "Industrial heat pumps in Germany: Potentials, technological development and market barriers," in *Proceedings of the ECEEE*, 2012, pp. 543–550.
- [126] T. Kim, S. Tae, and S. Roh, "Assessment of the CO<sub>2</sub> emission and cost reduction performance of a low-carbon-emission concrete mix design using an optimal mix design system," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 25, pp. 729–741, Sep. 2013.
- [127] M. M. van Lieshout, "Update Prioritering handelings-perspectieven verduurzaming betonketen 2015," CE Delft, 2015.
- [128] J. Davidovits, *Geopolymer chemistry and applications*, 3. ed. Saint-Quentin: Inst. Géopolymère, 2011.
- [129] H. Shima, H. Tateyashiki, R. Matsushashi, and Y. Yoshida, "An advanced concrete recycling technology and its applicability assessment through input-output analysis," *Journal of advanced concrete technology*, vol. 3, no. 1, pp. 53–67, 2005.
- [130] F. Andreola, L. Barbieri, I. Lancellotti, C. Leonelli, and T. Manfredini, "Recycling of industrial wastes in ceramic manufacturing: State of art and glass case studies," *Ceramics International*, vol. 42, no. 12, pp. 13333–13338, Sep. 2016.
- [131] C. M. F. Vieira and S. N. Monteiro, "Incorporation of solid wastes in red ceramics: an updated review," *Matéria (Rio de Janeiro)*, vol. 14, pp. 881–905, 2009.

- 
- [132] M. ŠVEDA, R. SOKOLÁŘ, B. JANÍK, and Z. ŠTEFUNKOVÁ, "Reducing CO2 Emissions in the Production of Porous Fired Clay Bricks.," *Materials Science / Medziagotyra*, vol. 23, no. 2, pp. 139–143, Jun. 2017.
- [133] I. Demir, *Effect of organic residues addition on the technological properties of clay bricks*, vol. 28. 2008.
- [134] ULCOS, "UlcOS - ULCOWIN - Alkaline Electrolysis," 2008. [Online]. Available: <http://www.ulcos.org/en/research/electrolysis.php>. [Accessed: 07-Sep-2017].
- [135] M. Goel and M. Sudhakar, *Carbon Utilization: Applications for the Energy Industry*. Springer, 2017.
- [136] P. L. Spath and M. K. Mann, "Life cycle assessment of hydrogen production via natural gas steam reforming," National Renewable Energy Lab., Golden, CO (US), 2000.
- [137] "Hydrogen - Industry as Catalyst," World Energy Council Netherlands, Tilburg (NL), 2018.
- [138] "The Future of Hydrogen," IEA, Jun. 2019.
- [139] CODE2, "European Cogeneration Roadmap," CODE 2 Cogeneration Observatory and Dissemination Europe, Jan. 2015.
- [140] COGEN, "Press Release: CHP helps the chemical sector to lower energy bills and reduce CO2 emissions." COGEN Europe, 03-Jul-2013.
- [141] W. Suttor, "Neue Chancen mit Kraft-Wärme-Kopplung in der Industrie," Bundesverband Kraft-Wärme-Kopplung e.V., 2011.
- [142] R. Büchele *et al.*, "Bewertung des Potenzials für den Einsatz der hocheffizienten KWK und effizienter Fernwärme- und Fernkälteversorgung," *TU Wien und Ecofys, Wien*, 2015.
- [143] D. Saygin, M. K. Patel, E. Worrell, C. Tam, and D. J. Gielen, "Potential of best practice technology to improve energy efficiency in the global chemical and petrochemical sector," *Energy*, vol. 36, no. 9, pp. 5779–5790, Sep. 2011.
- [144] IEA, *Tracking industrial energy efficiency and CO2 emissions*. Paris: International Energy Agency, 2007.
- [145] CEFIC, "Facts & Figures 2017 of the European chemical industry," European Chemical Industry Council, 2017.

- 
- [146] A. Boulamanti and J. A. Moya, "Energy efficiency and GHG emissions: Prospective scenarios for the Chemical and Petrochemical Industry," Publications Office of the European Union, 2017.
- [147] N. Destro, A. Stoppato, A. Benato, and F. Schiro, "EU energy policies achievement by industries in decentralized areas," *E3S Web of Conferences*, vol. 22, p. 00035, 2017.
- [148] V. Bianco, M. De Rosa, F. Scarpa, and L. A. Tagliafico, "Implementation of a cogeneration plant for a food processing facility. A case study," *Applied Thermal Engineering*, vol. 102, pp. 500–512, 2016.
- [149] A. R. Celma, F. C. Blázquez, and F. López-Rodríguez, "Feasibility analysis of CHP in an olive processing industry," *Journal of Cleaner Production*, vol. 42, pp. 52–57, 2013.
- [150] S. Meyers, B. Schmitt, M. Chester-Jones, and B. Sturm, "Energy efficiency, carbon emissions, and measures towards their improvement in the food and beverage sector for six European countries," *Energy*, vol. 104, pp. 266–283, Jun. 2016.
- [151] R. Law, A. Harvey, and D. Reay, "Opportunities for low-grade heat recovery in the UK food processing industry," *Applied Thermal Engineering*, vol. 53, no. 2, pp. 188–196, May 2013.
- [152] A. Tudoroiu-Lakavicić, "COGEN Europe National Snapshot Survey," Jožef Stefan Institute, Ljubljana, 22-Mar-2016.
- [153] EUROSTAT, "Prodcom - Statistics by Product," *Eurostat - Your key to European statistics*, 2018. [Online]. Available: <http://ec.europa.eu/eurostat/web/prodcom>. [Accessed: 26-Jan-2018].
- [154] R. Batier, "The cogeneration in the EU ceramic industry," presented at the COGEN Europe Annual Conference 2013, Brussels, 18-Apr-2013.
- [155] F. Gabriele, "DREAM - Design for energy and REsource efficiency in cerAMic kilns," 2016.
- [156] B. Peris, J. Navarro-Esbrí, F. Molés, and A. Mota-Babiloni, "Experimental study of an ORC (organic Rankine cycle) for low grade waste heat recovery in a ceramic industry," *Energy*, vol. 85, pp. 534–542, Jun. 2015.
- [157] J. Laurijssen, F. J. De Gram, E. Worrell, and A. Faaij, "Optimizing the energy efficiency of conventional multi-cylinder dryers in the paper industry," *Energy*, vol. 35, no. 9, pp. 3738–3750, Sep. 2010.

- 
- [158] M. Lucisano, "Impulse technology to rise like a phoenix," <http://www.innventia.com>, 15-Feb-2016. [Online]. Available: <http://www.innventia.com/en/About-us/Paper-blog/Dates/2016/Februari/Impulse-technology-to-rise-like-a-phoenix--/>. [Accessed: 28-Sep-2017].
- [159] T. Fleiter, D. Fehrenbach, E. Worrell, and W. Eichhammer, "Energy efficiency in the German pulp and paper industry? A model-based assessment of saving potentials," *Energy*, vol. 40, no. 1, pp. 84–99, Apr. 2012.
- [160] A. M. Bazzanella and F. Ausfelder, "Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry," DECHEMA, Frankfurt a.M., 2017.
- [161] M. R. Rahimpour, M. Jafari, and D. Iranshahi, "Progress in catalytic naphtha reforming process: A review," *Applied Energy*, vol. 109, pp. 79–93, Sep. 2013.
- [162] I. Rafiqul, C. Weber, B. Lehmann, and A. Voss, "Energy efficiency improvements in ammonia production—perspectives and uncertainties," *Energy*, vol. 30, no. 13, pp. 2487–2504, Oct. 2005.
- [163] D. S. Sholl and R. P. Lively, "Seven chemical separations: to change the world: purifying mixtures without using heat would lower global energy use, emissions and pollution—and open up new routes to resources," *Nature*, vol. 532, no. 7600, pp. 435–438, 2016.
- [164] D. F. Sanders *et al.*, "Energy-efficient polymeric gas separation membranes for a sustainable future: A review," *Polymer*, vol. 54, no. 18, pp. 4729–4761, 2013.
- [165] J. A. Caballero, I. E. Grossmann, M. Keyvani, and E. S. Lenz, "Design of hybrid distillation- vapor membrane separation systems," *Industrial & engineering chemistry research*, vol. 48, no. 20, pp. 9151–9162, 2009.
- [166] P. Wang and T.-S. Chung, "Recent advances in membrane distillation processes: Membrane development, configuration design and application exploring," *Journal of Membrane Science*, vol. 474, pp. 39–56, Jan. 2015.
- [167] A. Cassano, "Integrated Membrane Processes in the Food Industry," *Integrated Membrane Systems and Processes*, p. 35, 2015.
- [168] A. Alkudhiri, N. Darwish, and N. Hilal, "Membrane distillation: A comprehensive review," *Desalination*, vol. 287, pp. 2–18, Feb. 2012.
- [169] P. Vellinga, *Industrial transformation project, IT: science plan*. IHDP, 1999.

- 
- [170] T. Gerres, J. P. Chaves Ávila, P. L. Llamas, and T. G. San Román, "A review of cross-sector decarbonisation potentials in the European energy intensive industry," *Journal of Cleaner Production*, vol. 210, pp. 585–601, Feb. 2019.
- [171] A. Osama, "Benchmarking Report Cement Sector," United Nations Industrial Development Organization (UNIDO), 2014.
- [172] Christoph Beumelburg, "Breakthrough technology for carbon capture," *HeidelbergCement*, 21-Apr-2016. [Online]. Available: <https://www.heidelbergcement.com/en/leilac-research-project>. [Accessed: 02-Aug-2019].
- [173] M. Ditaranto and J. Bakken, "Study of a full scale oxy-fuel cement rotary kiln," *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 83, pp. 166–175, Apr. 2019.
- [174] D. Leeson, N. Mac Dowell, N. Shah, C. Petit, and P. S. Fennell, "A Techno-economic analysis and systematic review of carbon capture and storage (CCS) applied to the iron and steel, cement, oil refining and pulp and paper industries, as well as other high purity sources," *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 61, pp. 71–84, Jun. 2017.
- [175] E. De Lena *et al.*, "Techno-economic analysis of calcium looping processes for low CO<sub>2</sub> emission cement plants," *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 82, pp. 244–260, Mar. 2019.
- [176] M. M. van Lieshout, "Update Prioritering handelings-perspectieven verduurzaming betonketen 2015," CE Delft, 2015.
- [177] L. Nigel and D. R. di Valdalbero, "European Steel - The Wind of Change - Energy in Future Steelmaking Steel in the Energy Market Applications Greening European Steel," Directorate-General for Research and Innovation, European Commission, Luxembuerg, 2018.
- [178] V. Vogl, M. Åhman, and L. J. Nilsson, "Assessment of hydrogen direct reduction for fossil-free steelmaking," *Journal of Cleaner Production*, vol. 203, pp. 736–745, Dec. 2018.
- [179] H. Mandova *et al.*, "Achieving carbon-neutral iron and steelmaking in Europe through the deployment of bioenergy with carbon capture and storage," *Journal of Cleaner Production*, vol. 218, pp. 118–129, May 2019.
- [180] "SIDERWIN-Project Presentation - WEB\_v0.1.pdf," 24-Jul-2019. [Online]. Available: [https://siderwin-spire.eu/sites/template.drupal.pulsartecnalia.com/files/documents/SIDERWIN-Project%20Presentation%20-%20WEB\\_v0.1.pdf](https://siderwin-spire.eu/sites/template.drupal.pulsartecnalia.com/files/documents/SIDERWIN-Project%20Presentation%20-%20WEB_v0.1.pdf). [Accessed: 24-Jul-2019].



- 
- [181] IEA, "The Future of Petrochemicals - Methodological Annex," International Energy Agency, Oct. 2018.
- [182] D. Seddon, "Chemical Economics - Cracking Operations," Duncan Seddon & Associates, Jan. 2015.
- [183] H. Naims, "Economics of carbon dioxide capture and utilization—a supply and demand perspective," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 23, no. 22, pp. 22226–22241, Nov. 2016.
- [184] M. Hagberg Börjesson and E. O. Ahlgren, "IEA ETSAP - Technology Brief I07 - Pulp and Paper Industry," 2015.
- [185] J. A. Mora and C. C. Pavel, "Energy efficiency and GHG emissions: Prospective scenarios for the pulp and paper industry," Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2018.
- [186] CEPI, "Key statistics 2016: European pulp & paper industry," Confederation of European Paper Industries, 2017.
- [187] K. Kuparinen, E. Vakkilainen, and T. Tynjälä, "Biomass-based carbon capture and utilization in kraft pulp mills," *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, Jan. 2019.
- [188] K. Onarheim, S. Santos, P. Kangas, and V. Hankalin, "Performance and cost of CCS in the pulp and paper industry part 2: Economic feasibility of amine-based post-combustion CO<sub>2</sub> capture," *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 66, pp. 60–75, Nov. 2017.
- [189] M. Moshkelani, M. Marinova, M. Perrier, and J. Paris, "The forest biorefinery and its implementation in the pulp and paper industry: Energy overview," *Applied Thermal Engineering*, vol. 50, no. 2, pp. 1427–1436, Feb. 2013.
- [190] Q. Dang, W. Hu, M. Rover, R. C. Brown, and M. M. Wright, "Economics of biofuels and bioproducts from an integrated pyrolysis biorefinery: Economics of Biofuels and Bioproducts from an Integrated Pyrolysis Biorefinery," *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, vol. 10, no. 6, pp. 790–803, Nov. 2016.
- [191] S. Stenström, "Drying of paper: A review 2000–2018," *Drying Technology*, pp. 1–21, Apr. 2019.
- [192] Y. Khojasteh Salkuyeh, B. A. Saville, and H. L. MacLean, "Techno-economic analysis and life cycle assessment of hydrogen production from natural gas using current and emerging technologies," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 30, pp. 18894–18909, Jul. 2017.



- 
- [193] Y. Wang and S. Zhang, "Economic assessment of selected hydrogen production methods: A review," *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, vol. 12, no. 11, pp. 1022–1029, Nov. 2017.
- [194] J. Adolf *et al.*, "Energy of the Future? Sustainable Mobility through Fuel Cells and H<sub>2</sub>," Shell Deutschland Oil GmbH, Wuppertal Institut, Hamburg, 2017.
- [195] P. Burmistrz, T. Chmielniak, L. Czepirski, and M. Gazda-Grzywacz, "Carbon footprint of the hydrogen production process utilizing subbituminous coal and lignite gasification," *Journal of Cleaner Production*, vol. 139, pp. 858–865, Dec. 2016.
- [196] "Hydrogen - Industry as Catalyst," World Energy Council Netherlands, Tilburg (NL), 2018.
- [197] G. Glenk and S. Reichelstein, "Economics of converting renewable power to hydrogen," *Nature Energy*, Feb. 2019.
- [198] F. Tahir *et al.*, "Towards fossil-free energy in 2050," Cambridge Econometrics, Element Energy, Mar. 2019.







Santa Cruz de Marcenado, 26  
28015 Madrid  
Tel +34 91 542 28 00  
Fax + 34 91 542 31 76  
[secretaria.tecnica@iit.comillas.edu](mailto:secretaria.tecnica@iit.comillas.edu)  
[www.iit.comillas.edu](http://www.iit.comillas.edu)