ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE
INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE
TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE
CANTABRIA

Trabajo Fin de Grado

EVALUACIÓN AMBIENTAL DE LA IMPLEMENTACIÓN DE CAPTURA Y UTILIZACIÓN ELECTROQUÍMICA DE CO_2 EN UNA PLANTA CEMENTERA

(Environmental assessment of the implementation of CO_2 capture and electrochemical use in a cement plant)

Para acceder al Título de

Graduada en Ingeniería Química

Autor: María González Marcos

TÍTULO	Evaluación ambiental de la implementación de captura y utilización electroquímica de CO_2 en una planta cementera		
AUTOR	Maria Gonzalez Marcos		
DIRECTOR/CODIRECTOR	Marta Rumayor Villamil /Javier Fernandez Gonzalez		
TITULACIÓN	Grado en Ingenieria Quimica	**FECHA**	22/06/2021

PLABRAS CLAVE

Análisis de ciclo de vida (ACV), descarbonización, huella de carbono, sector del cemento, captura y utilización de CO_2 (CUC), reducción electroquímica (RE).

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El cambio climático es una realidad que se expresa en todo el planeta a través del ascenso de las temperaturas medias, la subida del nivel del mar o el deshielo en el Ártico, y sus consecuencias pueden ser devastadoras si no se reduce drásticamente la dependencia de los combustibles fósiles y las emisiones de gases de efecto invernadero (GEIs).

La industria del cemento está considerada como un sector difícil de descarbonizar, ya que aparte del consumo de energía (calor y electricidad), también se generan emisiones directas de dióxido de carbono (CO_2) en su proceso de producción.
Las opciones de descarbonización para este sector son menos evidentes y los desafíos son mayores por lo que su transición a emisiones cero está todavía relativamente inexplorada. En este proyecto, se plantea la opción de descarbonizar el sector del cemento mediante el empleo de tecnologías de captura y utilización de CO_2 (CUC o CCU por su término en inglés, *Carbon Capture and Utilization)*, que consisten en capturar y convertir el CO_2 emitido en un producto de valor añadido como el metanol (CH_3OH) con el fin de reducir la huella de carbono del proceso contribuyendo a la economía circular y a la mitigación del cambio climático.

El objetivo de este proyecto consiste en analizar el impacto ambiental (en huella de carbono) de la integración de tecnologías CUC en una planta cementera para valorizar las emisiones directas de CO_2 en metanol empleando la tecnología emergente de reducción electroquímica (RE). Para ello se desarrolla un modelo de caja negra del proceso integrado y se emplea la herramienta del análisis de ciclo de vida (ACV).

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Se han analizado varios escenarios considerando distintos métodos de captura de CO_2 (empleando la tecnología convencional de absorción con monoetanolamina (MEA) y la tecnología emergente de separación con membranas), y se ha concluido que el proceso de captura con membranas genera menor huella de carbono debido al ahorro de calor respecto a la tecnología convencional de absorción con MEA. Esta huella de carbono puede reducirse aún más aplicando ciertas mejoras al proceso CUC, como el empleo de electricidad proveniente de energía eólica o la electrificación del calor consumido en la purificación del metanol y el consumo de calor de la planta de cemento. Respecto a la huella del proceso convencional (1181 kg CO_2 eq. por tonelada de cemento), implementando la tecnología CUC llegan a alcanzarse valores de huella de carbono del orden de -540 kg CO_2 eq. por tonelada de cemento en el caso más optimista y 1807 kg CO_2 eq. por tonelada de cemento en el caso más pesimista. Esto es un planteamiento futuro a medio plazo, inviable a día de hoy, pero que prometería reducir significativamente las emisiones de CO_2 de procesos industriales bajo ciertas condiciones. Sin embargo, el proyecto presenta limitaciones que deberían abordarse en trabajo futuro, ya que solo se estudia la categoría de impacto ambiental de la huella de carbono, además de haberse considerado condiciones óptimas de voltaje, densidad de corriente y eficiencia Faradaica para el proceso de RE.

Los conocimientos adquiridos en este estudio pueden ser de ayuda en la implementación sostenible de tecnologías CUC en procesos de fabricación intensivos en energía o sectores difíciles de descarbonizar.

REFERENCIAS

Cambio climático | Greenpeace España. (2021). Recuperado 19 Mayo 2021, de https://es.greenpeace.org/es/trabajamos-en/cambio-climatico/

Qué es el cambio climático. (2021). Recuperado 19 Mayo 2021, de https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/que-es-el-cambio-climatico-y-como-nos-afecta/

Rumayor, M., Dominguez-Ramos, A., & Irabien, A. (2020). Toward the Decarbonization of Hard-To-Abate Sectors: A Case Study of the Soda Ash Production. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, *8*(32), 11956–11966. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c01598

TITLE	Environmental assessment of the implementation of CO_2 capture and electrochemical use in a cement plant		
AUTHOR	Maria Gonzalez Marcos		
DIRECTOR/CO-DIRECTOR	Marta Rumayor Villamil /Javier Fernandez Gonzalez		
TITULATION	Degree in Chemical Engineering	**DATE**	22//06/2021

KEYWORDS

Life cycle analysis (LCA), decarbonization, carbon footprint, cement sector, CCU technologies, CO_2 capture, electrochemical reduction (ER).

SCOPE

Climate change is already a reality that is expressed throughout the planet through the rise in average temperatures, the rise in sea level or the thaw in the Arctic and its consequences can be devastating if dependence on fossil fuels and greenhouse gas emissions are not drastically reduced.

The cement industry is considered a difficult sector to decarbonize, since apart from energy consumption (heat and electricity); direct emissions of carbon dioxide (CO_2) are also generated in its production process.

The decarbonisation options for this sector are less obvious and the challenges are greater, so their transition to zero emissions is still relatively unexplored. This project proposes the option of decarbonizing the cement sector through the use of CCU (carbon capture and utilization) technologies, which consists of capturing and converting the CO_2 emitted into a value-added product such as methanol (CH_3OH) in order to reduce the carbon footprint of the process, contributing to the circular economy and the mitigation of climate change.

The objective of this project is to analyze the environmental impact (in carbon footprint) of the integration of CCU technologies in a cement plant to value direct CO_2 emissions to produce methanol using the emerging technology of electrochemical reduction (ER); a black-box model of the integrated process is developed and Life Cycle Analysis (LCA) tool is used to get it.

RESULTS AND CONCLUSIONS

Several scenarios have been analyzed considering different CO_2 capture methods (using conventional monoethalonamine absorption technology (MEA) and emerging membrane separation technology), and it has been concluded that membrane capture process generates a lower carbon footprint due to the heat savings requires by conventional MEA absorption technology. This carbon footprint can be further reduced by applying certain improvements to the CCU process, such as the use of electricity from wind energy or the electrification of the heat consumed in the purification of methanol and the heat consumption of the cement plant. In comparison to the conventional process (1181 kg CO_2 eq per t of ccement), implementing the CCU process could be reaching values of carbon footprint in the order of -540 kg CO_2 eq per ton of cement. in the most optimistic case and 1807 kg CO_2 eq. per ton of cement in the most pessimistic case. This is a future perspective in the medium term, not feasible nowadays, but with a promising perspective to reduce the industrial CO_2 emissions under proper conditions. However, the project has limitations that should be addressed in future work, like it only studies the environmental impact category of carbon footprint, or thatoptimal conditions of voltage, current density and Faradaic efficiency have been considered for the ER process.

The knowledge acquired from this study can be helpful in the sustainable implementation of CCU technologies in energy-intensive manufacturing processes or sectors that are difficult to descarbonize.

REFERENCES

Cambio climático | Greenpeace España. (2021). Retrieved 19 May 2021, from https://es.greenpeace.org/es/trabajamos-en/cambio-climatico/

Qué es el cambio climático. (2021). Retrieved 19 May 2021, from https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/que-es-el-cambio-climatico-y-como-nos-afecta/

Rumayor, M., Dominguez-Ramos, A., & Irabien, A. (2020). Toward the Decarbonization of Hard-To-Abate Sectors: A Case Study of the Soda Ash Production. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, *8*(32), 11956–11966. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN 1

1.1 PROBLEMÁTICA CAMBIO CLIMÁTICO 1

1.2. MARCO REGULADOR 2

1.3. SECTOR DEL CEMENTO 3

1.4. DESCARBONIZACIÓN DEL SECTOR CEMENTO 5

1.5. DESCARBONIZACIÓN DEL SECTOR CEMENTO MEDIANTE TECNOLOGÍAS CUC 7

1.5.1. Captura de CO_2 7

1.5.2. Utilización del CO_2 9

1.5.3. Reducción electroquímica de CO_2 10

1.6. HERRAMIENTAS DE SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL 14

1.6.1. Inicios del ACV 15

1.6.2. Aplicaciones del Análisis de Ciclo de Vida 15

2. OBJETIVOS 16

3. METODOLOGÍA 17

3.1. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE ACV 17

3.1.1. Definición de objetivo y alcance 18

3.1.2. Análisis del inventario de ciclo de vida 20

3.1.3. Evaluación del impacto de ciclo de vida 22

3.1.4. Interpretación del ciclo de vida 22

3.2. DESCRIPCIÓN DE LOS ESCENARIOS 22

3.2.1. Escenario A (cementera) 23

3.2.2. Escenario B (Cementera + Captura MEA + RE) 23

3.2.3. Escenario C (Cementera + captura membranas + RE) 25

3.3. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD 26

3.4. SOFTWARE 28

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS 28

4.1. EVALUACIÓN DEL CASO BASE: ESCENARIO 0 29

4.2. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD: MEJORAS 30

5. CONCLUSIONES 36

6. LIMITACIONES 38

BIBLIOGRAFÍA 39

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Reacciones de semicelda para la RE de CO_2 procedente de [22]. 11
Tabla 2. Inventario de los distintos escenarios por unidad de cemento. 21
Tabla 3. Casos de estudio aplicados a cada escenario. 27
Tabla 4. Factores de emisión de electricidades provenientes de distintas fuentes 27
Tabla 5. Huella de carbono para todos los escenarios y casos de estudio por unidad funcional (1 t cemento) 34

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Efecto invernadero natural procedente de [5]. 2
Figura 2. Esquema del proceso de fabricación de cemento procedente de [14]. 4
Figura 3. Reducciones globales de emisiones de CO_2 entre 2020 y 2050 según la estrategia empleada procedente de [14]. 7
Figura 4. Nivel de madurez actual de las tecnologías de captura de CO_2 en el sector del cemento procedente de [16]. 9
Figura 5. Desarrollo de tecnologías de conversión catalítica de CO_2 en período de 5 a 70 años procedente de [21]. 10
Figura 6. Esquema simplificado de un sistema de reducción electroquímica de CO_2 procedente de [23]. 10
Figura 7. Proceso de síntesis de CH_3OH en una sola etapa procedente de [27]. 13
Figura 8. Marco para el ACV basado en ISO 14040 2006 procedente de [34]. 18
Figura 9. Límites del sistema del proceso planta cementera 23
Figura 10. Límites del sistema del proceso cementera + CUC MEA. 25
Figura 11. Límites del sistema del proceso cementera + CUC membranas. 26
Figura 12. Huella de carbono en el caso de estudio 0 para los procesos de cementera, captura y RE. 29
Figura 13. Huella de carbono en los distintos escenarios para el caso de estudio 0. 30
Figura 14. Huella de carbono en los distintos escenarios para el caso de estudio 1. 31
Figura 15. Comparativa huella de carbono en la planta cementera en el caso de estudio 0 y en el caso de estudio 2. 32
Figura 16. Huella de carbono en los distintos escenarios para el caso de estudio 3. 33
Figura 17. Aumento y disminución de la huella de carbono en los distintos casos de estudio para el escenario A. 34
Figura 18. Aumento y disminución de la huella de carbono en los distintos casos de estudio para el escenario B. 35

ÍNDICE DE TABLAS ANEXO

Tabla A1. Inventario cementera procedente de [15] por unidad de cemento. 1
Tabla A2. Inventario captura CO_2 con MEA por unidad de CO_2 de entrada procedente de [19] 2
Tabla A3. Inventario captura de CO_2 con membranas por unidad de CO_2 de entrada procedente de [19]. 3
Tabla A4. Inventario RE por unidad de metanol procedente de [7] 4

Tabla A5. Factores de emisión por unidad de cemento..... 5
Tabla A6. Impacto ambiental escenario A, caso de estudio 1..... 6
Tabla A7. Impacto ambiental escenario B, caso de estudio 1..... 7
Tabla A8. Impacto ambiental escenario C, caso de estudio 1..... 8
Tabla A9. Entradas técnicas en el proceso de RE procedente de [7] 9

1. INTRODUCCIÓN

1.1 PROBLEMÁTICA CAMBIO CLIMÁTICO

El cambio climático se puede definir como la variación global del clima de la Tierra.[1] El clima de la Tierra no es estático, sino que ha cambiado a través de la historia. El efecto invernadero también es un proceso que ocurre de manera natural en la Tierra por el cual la atmósfera es capaz de retener parte del calor del sol pudiendo así mantener unas condiciones compatibles con la vida, puesto que, de no existir este fenómeno, la temperatura media del planeta sería de 18 °C bajo cero aproximadamente.[2] Pese a ser un proceso natural, la tendencia al calentamiento actual es en su mayoría consecuencia de la actividad humana y avanza a gran velocidad.[3] Se estima que las actividades humanas han causado que la temperatura del planeta incremente 1 °C aproximadamente por encima de los niveles preindustriales.[3] Es posible que llegue a aumentar 1.5 °C entre 2030 y 2052 si continúa elevándose al ritmo actual.[3]

El ciclo del carbono, que es el intercambio del CO_2 entre biosfera, geosfera, hidrosfera y la atmósfera, se ha mantenido en equilibrio durante miles de años. El problema del calentamiento global, originado en parte por el efecto invernadero, se produce cuando las actividades del ser humano rompen este equilibrio debido al aumento de emisiones de gases de efecto invernadero (GEIs).[2] Como consecuencia de esto, la atmósfera retiene más calor del necesario, lo cual da lugar a un aumento global de la temperatura en todo el planeta. Este aumento de temperatura es el llamado calentamiento global.[2]

En la atmósfera de la Tierra, los principales GEIs son el vapor de agua (H_2O), el dióxido de carbono (CO_2), el óxido nitroso (N_2O), el metano (CH_4) y el ozono (O_3). Existen también una serie de GEIs creados íntegramente por el ser humano, como los halocarbonos y otras sustancias con contenido de cloro y bromo, regulados por el Protocolo de Montreal como el hexafluoruro de azufre (SF_6), los hidrofluorocarbonos (HFC) y los perfluorocarbonos (PFC).[4] Los GEIs están clasificados en directos e indirectos:

GEIs Directos: Son gases que contribuyen al efecto invernadero tal como son emitidos a la atmósfera. A este grupo pertenecen el CO_2, CH_4, N_2O y los compuestos halogenados.[4]

GEIs Indirectos: Son precursores de ozono troposférico, además de contaminantes del aire ambiente de carácter local y en la atmósfera se transforman a gases de efecto invernadero directo. A este grupo pertenecen los óxidos de nitrógeno, los compuestos orgánicos volátiles diferentes del metano y el monóxido de carbono.[4]

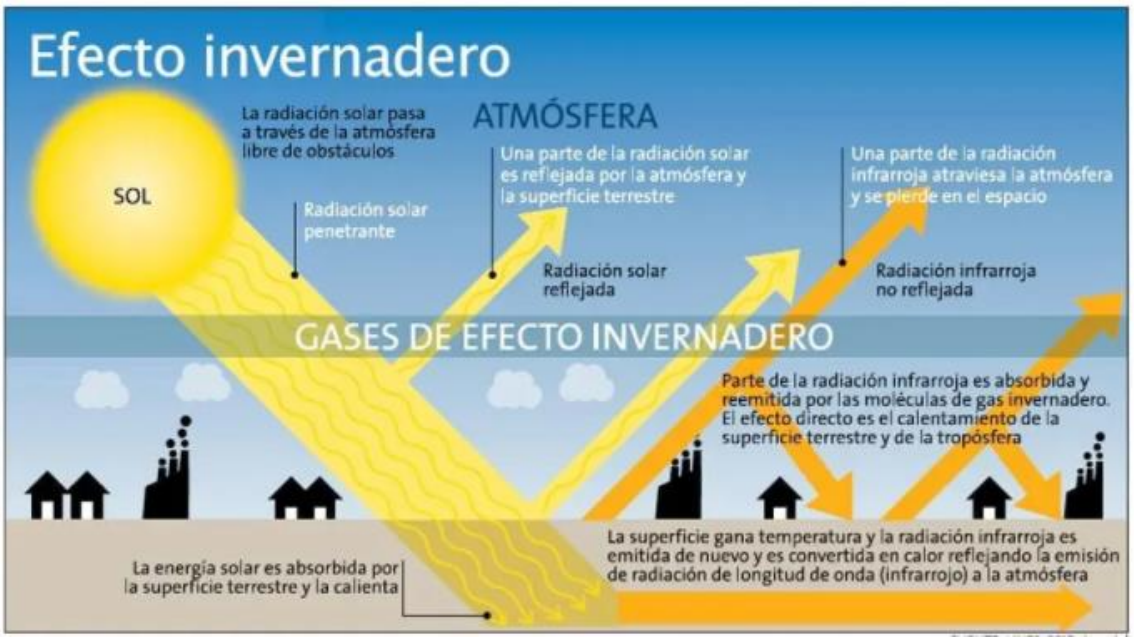

Figura 1. Efecto invernadero natural procedente de [5].

El calentamiento actual está ocurriendo aproximadamente diez veces más rápido que la tasa promedio de calentamiento que se dio tras las épocas glaciales.[6] Después de la última Edad de Hielo, el CO_2 producido por la actividad humana está aumentando a una velocidad más de 250 veces mayor que el proveniente de fuentes naturales. [6]

Las industrias con uso intensivo de energía son unos de los principales emisores de carbono. La producción de acero, la petroquímica, el cemento, la cerámica, el vidrio, el papel y la alimentación son los sectores que mayor cantidad de CO_2 emiten.[7] Estos sectores son responsables de alrededor del 64% del total de las emisiones industriales en la UE.[7]

1.2. MARCO REGULADOR

En 1972 tuvo lugar la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente en Estocolmo centrando la atención internacional en temas medioambientales como la

degradación ambiental y la contaminación transfronteriza.[8] Años más tarde, en 1992, se celebró en Río de Janeiro la Conferencia de las Naciones Unidas del Medio Ambiente y Desarrollo, también conocida como "Cumbre de la Tierra".[9] Los objetivos fundamentales de dicha conferencia fueron lograr un equilibrio entre las necesidades económicas, sociales y ambientales de las generaciones presentes y futuras y sentar las bases para una asociación mundial entre los países desarrollados y los países en vías de desarrollo.[10]A partir de este momento se comenzaron a desarrollar diferentes políticas medioambientales, entre las que cabe destacar la Directiva 16/2002/CE de Prevención y Control Integrado de la Contaminación conocida como IPPC, (de su término en inglés *Integrated Prevention of Pollution Control*), cuyo fin es proteger el medio ambiente en su conjunto mediante la minimización de las emisiones contaminantes a la atmósfera, las aguas y los suelos, así como los residuos procedentes de instalaciones industriales y agrarias.[9]

Más tarde, en diciembre de 2015, se celebró el Acuerdo de París siendo el primer acuerdo universal y jurídicamente vinculante sobre el cambio climático.[11] Dicho acuerdo establece un marco global para evitar un cambio climático peligroso manteniendo el calentamiento global por debajo de los 2 °C y prosiguiendo los esfuerzos para limitarlo a 1,5 °C.[11]

Posteriormente, el Parlamento Europeo fijó el objetivo de cero emisiones netas de gases de efecto invernadero para 2050 en su resolución sobre el cambio climático en marzo de 2019 y la resolución sobre el Pacto Verde Europeo en enero de 2020.[12] El Pacto Verde Europeo *("Green Deal"* en inglés) es un paquete de medidas que van desde la reducción ambiciosa de las emisiones de gases de efecto invernadero para 2050 hasta la inversión en investigación e innovación de vanguardia y la preservación del medio ambiente natural de Europa.[12]

1.3. SECTOR DEL CEMENTO

Los cementos son conglomerantes hidráulicos, materiales artificiales de naturaleza inorgánica y minera, que finamente molidos y amasados con agua forman pastas que fraguan y endurecen a causa de las reacciones de hidrólisis e hidratación de sus constituyentes, dando lugar a productos hidratados mecánicamente resistentes y

estables, tanto al aire libre como debajo del agua.[13]

Hay cuatro procesos para la fabricación del cemento: proceso seco, semiseco, semihúmedo y húmedo.[13] Todos tienen fases comunes y la principal diferencia entre ellos es que en unos se utiliza agua y en otros no. Las fases de fabricación de cemento son la extracción de materiales, la molienda de los materiales, la prehomogeneización y homogeneización y finalmente la elaboración del clínker.[13]

En la Figura 2 se muestra el proceso de fabricación de cemento con un horno de proceso seco con precalcinador y precalentador ciclónico multietapa.[14]

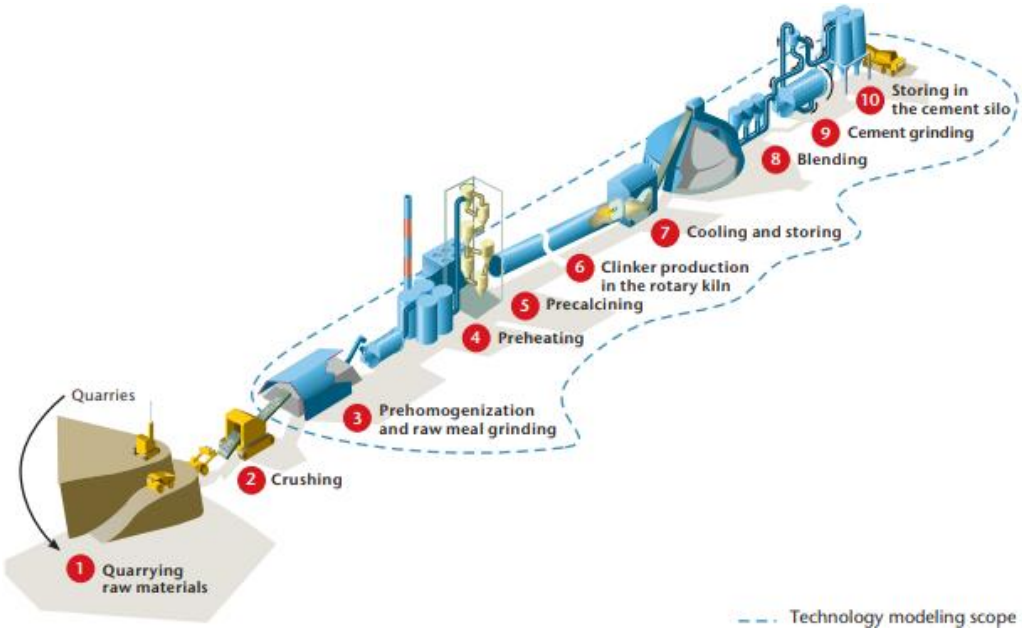

Figura 2. Esquema del proceso de fabricación de cemento procedente de [14].

La producción mundial de cemento ha crecido de manera constante desde 1950, con un aumento de la producción en los países en desarrollo; particularmente en Asia a partir de la década de 1990.[15] La producción mundial de cemento alcanzó 4,2 Gt en 2019.

El principal país productor de cemento en la actualidad es China representando un 55% de la producción total de cemento a nivel mundial, seguida por la India que representa un 8% de dicha producción.[16]

Se espera que el mercado crezca en las próximas décadas hasta el 12-23% para 2050, como resultado del aumento de la población mundial y las tendencias de urbanización,

junto con las necesidades de desarrollo de la infraestructura.[16]

La Asociación Europea del Cemento (CEMBUREAU) con sede en Bruselas es la organización representativa de la industria del cemento en Europa.[17] Dicha Asociación actúa como portavoz de la industria del cemento ante las instituciones de la UE y otras autoridades públicas, y comunica los puntos de vista de la industria sobre todos los temas y desarrollos políticos relacionados con cuestiones técnicas, ambientales, energéticas, de salud y seguridad de los empleados y de sostenibilidad.[18]

Para 2050, el sector del cemento tiene como objetivo lograr la neutralidad de carbono a lo largo de la cadena de valor (clínker, cemento, hormigón, construcción y (re)carbonatación).[17]

1.4. DESCARBONIZACIÓN DEL SECTOR CEMENTO

El sector del cemento es el tercer mayor consumidor de energía industrial y el segundo mayor emisor de CO_2 industrial a nivel mundial. El aumento de la población mundial y los patrones de urbanización, junto con las necesidades de desarrollo de infraestructura, aumentan la demanda de cemento y hormigón así como la presión para acelerar las acciones que consigan reducir la huella de carbono de este sector.[14] China, India y la Unión Europea son los principales productores de cemento que ya han adoptado medidas al respecto.[16] Sin lugar a duda, la descarbonización de este sector será necesaria a escala mundial en las próximas décadas.

La Agencia Internacional de Energía (IEA) ha proporcionado una actualización de la Hoja de ruta de descarbonización del sector del cemento en la que se contemplan distintas estrategias para reducir las emisiones de carbono hasta 2050 como:[14]

- Mejorar la eficiencia energética: consiste en la implementación de tecnologías de vanguardia existentes en nuevas plantas de cemento y modernización de las instalaciones existentes para mejorar los niveles de rendimiento energético cuando sea viable económicamente.[14] Se estima que las mejoras de eficiencia energética proporcionarán un ahorro del 12% en 2050 respecto a las actuales

emisiones directas de CO_2 de la producción global de cemento.[14]

- Cambiar a combustibles alternativos (combustibles que son menos intensivos en carbono que los convencionales): como por ejemplo el hidrógeno procedente de electrolisis del agua, o promoviendo el uso de biomasa y materiales de deshecho como combustibles en hornos de cemento para compensar el consumo de combustibles fósiles intensivos en carbono.[14] Los desechos incluyen desechos biogénicos y no biogénicos que de otra forman serían enviados a vertederos, quemados en incineradores o destruidos de forma incorrecta. Las mejoras de eficiencia energética podrían suponer un ahorro equivalente al 42% en 2050 respecto de las actuales emisiones directas de CO_2 de la producción global de cemento.[14]

- Reducir la proporción de clínker a cemento: consiste en aumentar el uso de materiales mezclados y el mercado de cementos mezclados, para disminuir la cantidad de clínker necesaria por tonelada de cemento o por metro cúbico de hormigón producido.[14] Se ha estimado que reducir la proporción Clinker-cemento podría proporcionar un ahorro equivalente al 128% de las emisiones directas de CO_2 actuales de la producción global de cemento.[14]

- Usar tecnologías emergentes e innovadoras: como la implementación de tecnologías de captura y utilización de CO_2 (CUC), la descarbonización de la generación de electricidad y calor mediante la adopción de tecnologías de recuperación de excesos, o la captura y almacenamiento o secuestro de carbono (CCS).[14] Las tecnologías emergentes e innovadoras proporcionarían un ahorro equivalente al 166% de las emisiones directas de CO_2 actuales de la producción global de cemento.[14]

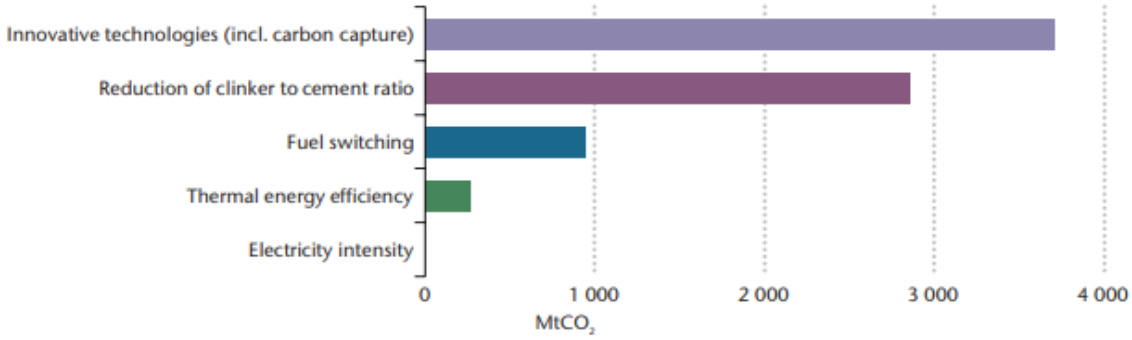

Figura 3. Reducciones globales de emisiones de CO_2 entre 2020 y 2050 según la estrategia empleada procedente de [14].

1.5. DESCARBONIZACIÓN DEL SECTOR CEMENTO MEDIANTE TECNOLOGÍAS CUC

Las tecnologías CUC son técnicas de captura y utilización de CO_2 que consisten en capturar dióxido de carbono y valorizarlo, dándole un uso diferente al almacenamiento. Estas tecnologías pueden ofrecer una respuesta al reto global de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero de importantes emisores fijos industriales. Sin embargo, tienen impactos ambientales debidos al consumo de recursos en forma de materiales y energía, así como a la formación de subproductos químicos. Todos estos aspectos deben tenerse en cuenta para evaluar y comparar la sostenibilidad ambiental real de los procesos de captura de CO_2.[19]

1.5.1. Captura de CO_2

Según el IPPC se distinguen cuatro tipos diferentes de tecnologías de captura de CO_2: post-combustión, pre-combustión, oxicombustión y separación industrial.[16]

- Pre-combustión: el combustible debe transformarse para tener un bajo o nulo contenido en carbono. En el proceso se obtiene H_2 que queda disponible para su combustión en turbinas de gas, y CO_2, que se captura para su posterior almacenamiento.[20] La reducción del CO_2 por métodos de pre-combustión está limitada en la producción del cemento, ya que en este sector el 65% de las emisiones directas de CO_2 se originan en la reacción en el horno (kiln) de la caliza ($CaCO_3$) (que al quemarse, produce cal (CaO) y CO_2), Siendo el 35% restante

procedente de los combustibles.[16] La caliza es una de las materias primas del proceso; por lo tanto, cambiando solamente los combustibles (en este caso coque y gas natural) no se consiguen los objetivos de reducción de CO_2. El uso de hidrógeno verde (producido mediante electrolisis del agua usando electricidad renovable) podría ser una buena opción para sustituir parte de estos combustibles fósiles, pero las emisiones directas de la reacción de la caliza en el horno seguirían existiendo, solo se evitarían las emisiones indirectas del coque, gas natural, etc.[14]

- Oxicombustión parcial y total: la combustión se realiza en presencia de oxígeno puro o con una mezcla muy enriquecida en oxígeno. El resultado es un gas efluente con alto contenido en CO_2 que se captura mediante técnicas de separación. La limitación principal de esta tecnología es que necesita oxígeno prácticamente puro por lo que normalmente es necesario realizar cambios en la infraestructura del proceso. El problema se presenta en plantas en funcionamiento ya que serían necesarios procesos de reingeniería.[14]

- Post-combustión: se trata de técnicas que se aplican al final del proceso de combustión. El objetivo es separar el CO_2 diluido en los gases de combustión del resto de componentes del gas mediante técnicas de separación de gases como membranas, absorción química o física, ciclos de calcinación-carbonatación etc.[20] Es la mejor opción en plantas en funcionamiento ya que no requiere modificaciones en el proceso, por lo que se aplicarán este tipo de tecnologías a la planta cementera planteada en este proyecto.[14]

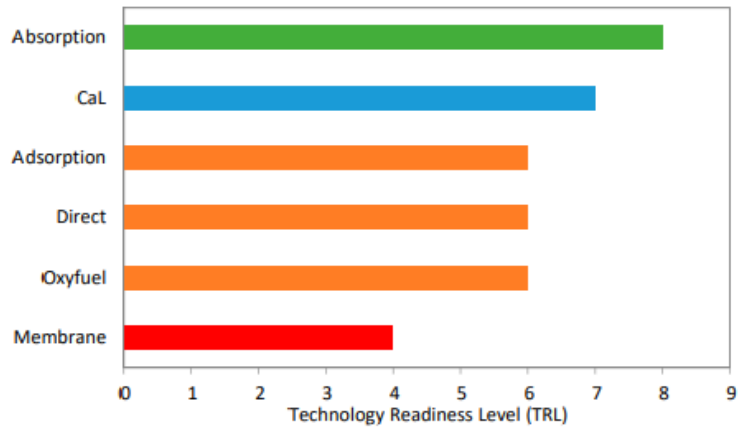

Figura 4. Nivel de madurez actual de las tecnologías de captura de CO_2 en el sector del cemento procedente de [16].

1.5.2. Utilización del CO_2

En la actualidad existen una gran cantidad de tecnologías emergentes que tienen como objetivo reciclar CO_2. Van desde las que actualmente están en fase de demostración y se acercan a la comercialización, como la reducción electrocatalítica, hasta las tecnologías que se están explorando en el entorno del laboratorio, como la reducción fotocatalítica, la polimerización de CO_2 y los biohíbridos, hasta las que solo se están imaginando, como las tecnologías de máquinas moleculares.[21]

La utilización del CO_2 en aplicaciones a gran escala se puede dividir en tres categorías:[20]

- Utilización directa o tecnológica para el tratamiento de alimentos, limpieza en seco o tratamiento de aguas residuales.
- Utilización biológica, de manera que el CO_2 se fija en biomasa para su posterior utilización para la producción de biocombustibles.
- Utilización química del CO_2 para la producción de urea, metanol etc.

La Figura 5 muestra una línea de tiempo para la realización a gran escala de algunas tecnologías de conversión catalítica de CO_2 que tienen distinto grado de madurez; algunas están cerca de su comercialización, otras existen a escala de laboratorio, y otras aún no se han probado científicamente.[21]

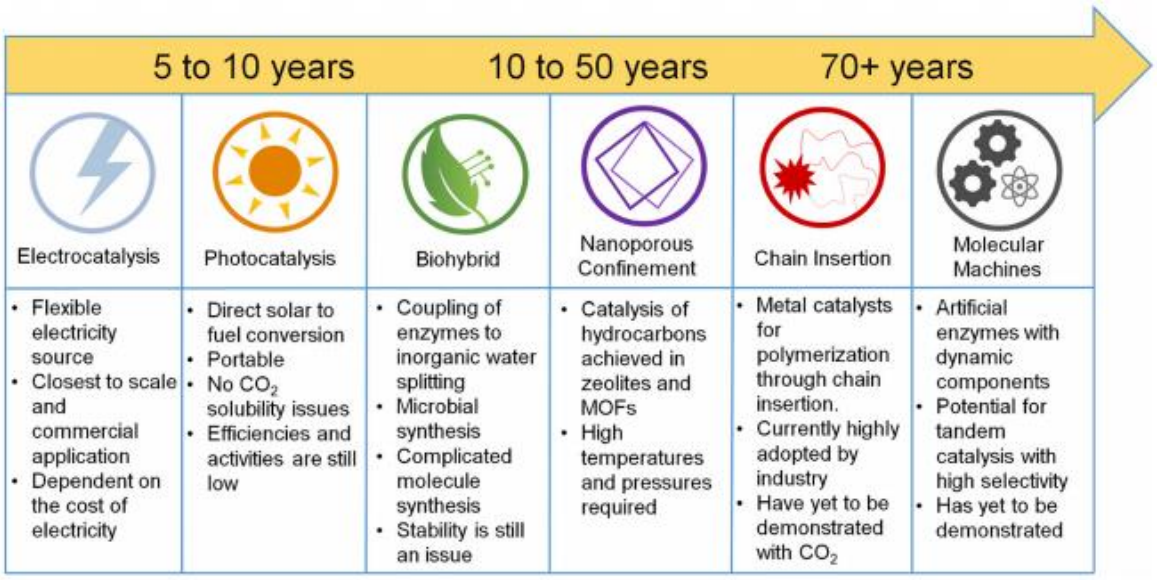

Figura 5. Desarrollo de tecnologías de conversión catalítica de CO_2 en período de 5 a 70 años procedente de [21].

1.5.3. Reducción electroquímica de CO_2

Una de las rutas emergentes más prometedoras es la reducción electroquímica (RE) de CO_2. La tecnología RE consiste en la conversión de CO_2 en productos útiles tales como metano (CH_4), metanol (CH_3OH) o ácido fórmico (HCOOH), entre otros.[22]

La Figura 6 muestra un esquema simplificado del funcionamiento de este tipo de procesos.[23]

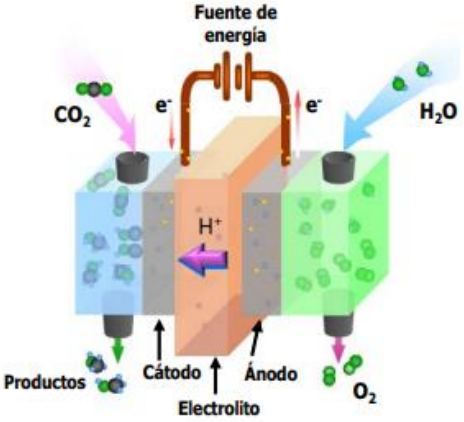

Figura 6. Esquema simplificado de un sistema de reducción electroquímica de CO_2 procedente de [23].

Este tipo de sistemas están formados por dos electrodos, cátodo y ánodo, sobre los que se aplica un voltaje determinado, normalmente por debajo de 2 V a 298 K de

temperatura y presión atmosférica.[22]

Estos compartimentos suelen separarse entre sí (celdas divididas) mediante la utilización de un electrolito sólido (generalmente se emplea una membrana de intercambio catiónico).[23] Normalmente se emplean disoluciones acuosas como electrolitos en los compartimentos anódico y catódico.[23] El compartimento catódico se alimenta con agua y CO_2, y se forma el producto de conversión (CH_4, CH_3OH, HCOOH, etc.) y otros compuestos en reacciones parásitas, como el hidrógeno (H_2); mientras que en el compartimento anódico se produce la electrólisis del agua (generación de oxígeno (O_2)) a partir de la disolución acuosa utilizada como anolito.[23]

La eficiencia de este proceso puede mejorarse mediante la selección de un material electrocatalítico adecuado (en el cátodo), incrementando la presión de entrada de CO_2 o aplicando diferentes configuraciones de reactor.[23] Los materiales de cátodo más utilizados para obtener ácido fórmico como producto son Hg, In, Pb y Sn ya que son metales con un alto sobrepotencial de hidrógeno, es decir, una densidad de corriente de intercambio baja para la reacción de reducción de agua a hidrógeno.[22] El cobre (Cu), el oro (Au) y la plata (Ag) también se emplean frecuentemente para otros productos.

Hay diversos productos que pueden obtenerse mediante el uso de esta tecnología como monóxido de carbono (CO), ácido fórmico (HCOOH), formaldehído (CH_2O), metanol (CH_3OH), metano (CH_4), etileno (C_2H_4), etanol (C_2H_5OH) y ácido oxálico ($H_2C_2O_4$), dependiendo del número de electrones intercambiados, como muestra la Tabla 1, incluyendo el potencial estándar de reducción (E^o vs. SHE) en cada caso a pH>7.[22]

Tabla 1. Reacciones de semicelda para la RE de CO_2 procedente de [22].

Reaction		E° [V][a]
a	$2CO_2 + 2H^+ + 2e^- \leftrightarrow H_2C_2O_4$	−0.475
b	$CO_2 + 2H^+ + 2e^- \leftrightarrow HCOOH$	−0.199
c	$CO_2 + 2H^+ + 2e^- \leftrightarrow CO + H_2O$	−0.109
d	$CO_2 + 4H^+ + 4e^- \leftrightarrow HCHO + H_2O$	−0.071
e	$CO_2 + 6H^+ + 6e^- \leftrightarrow CH_3OH + H_2O$	+0.030
f	$CO_2 + 8H^+ + 8e^- \leftrightarrow CH_4 + 2H_2O$	+0.169

Todas las reacciones de la Tabla 1 están disponibles para su potencial aplicación, sin

embargo, las reacciones b y c, es decir; la reducción del CO_2 al HCOOH y al CO, respectivamente, tienen mayores posibilidades de desarrollo práctico a medio plazo. [22]

Actualmente, las principales desventajas que limitan la aplicación de esta tecnología son los altos requerimientos energéticos para llevar a cabo la conversión de CO_2 y las limitaciones de mercado.[22] Además, las bajas velocidades de reacción para la RE de CO_2, las bajas eficiencias del proceso, y las limitaciones del transporte de materia, son aspectos que deben ser abordados para que esta tecnología se pueda aplicar a escala industrial.[22] Para soportar el coste de capital, es habitual operar reactores de electrosíntesis industriales a densidades de corriente geométricas por encima de 1 kA/m^2, con al menos el 50% de eficiencia para el producto requerido.[22]

Este proyecto se centra en la conversión de CO_2 a metanol (CH_3OH), que es un *"commodity"* utilizado ampliamente como disolvente, anticongelante y como materia prima para la industria química. Además, se utiliza para la producción de diversos productos y materiales químicos como resinas, fibras sintéticas, plásticos y adhesivos. Entre sus usos principales destacan los siguientes:[24]

- Formaldehído: En este campo, las aplicaciones principales son las resinas que se utilizan especialmente en la industria maderera.[24]
- Combustibles: Las principales aplicaciones son la síntesis de MTBE/TAME, mejoradores octánicos para naftas y combustibles ecológicos a base de metanol (DM85).[24] A largo plazo, el metanol puede convertirse en una fuente de hidrógeno para pilas de combustible utilizadas en el transporte (en desarrollo).[25]
- Ácido acético: Se utiliza principalmente para la producción de vinil-acetato, materia prima para resinas, anhídrido acético y ésteres acéticos que se usan para la fabricación de celulosa acética y pinturas.[24]
- Metil Metacrilato: Se emplea para la producción de resinas acrílicas y látex acrílicos para la industria automotriz y de la construcción.[24]

Hoy en día siguen surgiendo nuevas aplicaciones como motores de turbina que usan CH_3OH, combustible biodiesel, celdas de combustible de CH_3OH directas etc.[26] Los usos más recientes para el CH_3OH se pueden encontrar en el sector agrícola.[25] Además, puede utilizarse como fuente de carbono para la producción de una proteína unicelular (SCP)

para su uso como suplemento de la alimentación animal.[25] Sin embargo, la producción de SCP no es comercialmente práctica en este momento, en comparación con otras fuentes de proteína convencionales.[25] La desnitrificación de aguas residuales en plantas de tratamiento ofrece otro uso potencial para el CH_3OH aunque no se espera que crezca considerablemente, ya que existen otros métodos para la eliminación de nitrógeno disponibles en el mercado.[25]

La producción actual de CH_3OH a nivel mundial es del orden de 34.4 millones de toneladas métricas por año.[25] Existen más de 90 plantas de CH_3OH en todo el mundo con una capacidad de producción total de más de 75 millones de toneladas métricas. Cada día se utilizan más de 100000 toneladas de CH_3OH como materia prima en la industria química o en el transporte. La industria global de CH_3OH genera 36000 millones de dólares y crea más de 100000 puestos de trabajo en todo el mundo.[26]

Para producir CH_3OH existen cuatro posibles rutas, siendo la más prometedora a largo plazo la RE directa en una etapa, ya que es la ruta con menor TRL (nivel de madurez tecnológica) pero con mejores posibilidades de intensificar el proceso e integrarse con la red eléctrica.[27] La Figura 7 muestra el diagrama de proceso para el proceso de síntesis de CH_3OH en una sola etapa. [27]

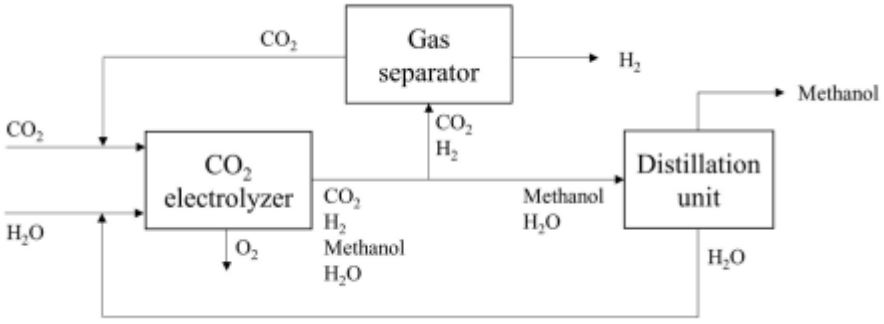

Figura 7. Proceso de síntesis de CH_3OH en una sola etapa procedente de [27].

El CO_2 del sistema de captura se convierte directamente en CH_3OH en un electrolizador de CO_2 a temperatura ambiente y presión atmosférica. En este escenario, el contenido de energía, carbono e hidrógeno del CH_3OH proviene de energía, CO_2 y agua.[27]
La electricidad consumida por el proceso se divide parcialmente en: electricidad final

distribuida a la red; energía para el proceso de captura (incluida la captura, desorción y compresión); y energía para el proceso de RE.[28] Alternativamente, la electricidad necesaria en el proceso de RE también puede ser suministrada por PV o energía eólica.[28] Se necesita una unidad separadora de gas/líquido para completar la separación de la corriente de salida del cátodo en una corriente de gas (CO_2 y H_2) y una corriente líquida (CH_3OH, sales y agua).[28] Se requiere también un proceso de destilación para aumentar la concentración del producto de interés hasta la concentración de mercado (en este caso CH_3OH al 99.7%).[28] El H_2 separado se recupera como un producto secundario (puro) y el O_2 puro es obtenido como producto principal de la reacción anódica y separado de la corriente de agua mediante una unidad de separación gas / líquido.[28] El agua que sale de la unidad de destilación se recircula a la celda electroquímica.[28]

1.6. HERRAMIENTAS DE SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL

Para alcanzar la sostenibilidad en los sectores industriales y servicios es necesario hacer uso de herramientas de sostenibilidad. Estas herramientas cuantifican impactos ambientales, sociales y económicos y dan bases uniformes y transparentes para evaluar alternativas. Entre las herramientas de sostenibilidad destacan:[29]

• Análisis de riesgos: se utiliza para caracterizar los efectos negativos en la salud humana y los efectos ecológicos adversos.

• Análisis de ciclo de vida (ACV).

• Análisis coste-beneficio: consiste en evaluar los beneficios netos de decisiones alternativas. Evalúa el cambio del bienestar de cada individuo, medido en unidades monetarias.

• Evaluación de los servicios de los ecosistemas: son bienes y servicios que contribuyen al bienestar humano y que son generados por procesos del ecosistema. El indicador está en unidades monetarias.

• Modelos de evaluación integrados: Un ejemplo es Global Change Assessment Model (GCAM), que reúne los modelos de activos y modelos económicos para evaluar los beneficios y coste de las energías alternativas y opciones de políticas de cambio

climático.

• Análisis de impactos sostenibilidad: se utiliza para analizar los efectos de un proyecto en los pilares económicos, sociales y ambientales de la sostenibilidad.

1.6.1. Inicios del ACV

En las últimas décadas la sociedad ha sufrido un gran desarrollo tecnológico, lo que ha provocado que el medio ambiente haya sufrido cambios acarreando diferentes problemas ambientales. Por ello, en los últimos años, se ha ido desarrollando una conciencia ambiental con la que se pone fin a la idea de que los recursos naturales son infinitos e introduciendo el término de desarrollo sostenible.[9]

Entre los años 60 y 70 surgieron también múltiples herramientas de gestión y análisis ambiental, siendo una de las más destacables el Análisis de Ciclo de Vida (ACV).[9]

El ACV es una herramienta que estudia y evalúa el impacto ambiental de un producto o servicio durante todas las etapas de su existencia "análisis de la cuna a la tumba", estableciendo un balance ambiental con el objetivo de conseguir un desarrollo sostenible.[30] Esta herramienta se desarrolló en Estados Unidos y casi simultáneamente en Europa. El primer ACV fue un estudio encargado por la compañía Coca-Cola en 1969 al Midwest Research Institute (MRI), cuyo fin era disminuir el consumo de recursos y así conseguir reducir las emisiones al ambiente. En Europa, la mayor parte del desarrollo metodológico en la aplicación del ACV se dio en los años noventa.[9]

1.6.2. Aplicaciones del Análisis de Ciclo de Vida

El ACV tiene dos objetivos principales: cuantificar y evaluar las funciones medioambientales de un producto o proceso y, de esta manera, ayudar a la entidad decisoria a elegir entre las diferentes alternativas y proporcionar una base para valorar la capacidad de mejora del rendimiento del sistema en el medio ambiente.[9]

Entre las aplicaciones del ACV destacan:

- Comparación funcional de productos equivalentes.[31]
- Desarrollo de programas de investigación.[31]
- Herramienta para colaborar en el desarrollo de legislación y políticas

ambientales.[31]

- Establecer criterios de valoración de productos en los programas de ecoetiquetado.[31]
- Evaluación de distintas alternativas de gestión de residuos.[31]
- Detección de necesidades de investigación y establecimiento de prioridades de actuación.[31]
- Optimización de productos o procesos, diseño e innovación.[9]
- Identificación de las oportunidades de mejora ambiental.[9]
- Informe medioambiental y marketing.[9]

El ACV es un método que se aplica mayoritariamente a estudios referidos a sistemas existentes en el mercado; sin embargo, también se emplea en tecnologías emergentes que buscan conseguir una sociedad más sostenible mediante nuevos sistemas tecnológicos cuya sostenibilidad aún debe demostrarse.[32] Estas tecnologías a menudo solo funcionan a escala de laboratorio o piloto, y los datos de proceso también están disponibles solo a estas escalas, y no a escalas de mercado.[32] Un ejemplo de ello sobre el que ya existen estudios como el de Nabil *"Evaluación comparativa del ciclo de vida de la mejora electroquímica de CO_2 a combustibles y materias primas"* [33] o Adnan *"Evaluación comparativa tecnoeconómica y del ciclo de vida de vías de síntesis de potencia a metanol"* [27] es el proceso de RE de CO_2.

2. OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es evaluar las posibilidades de descarbonización de la industria del cemento mediante la evaluación del impacto ambiental, en términos de huella de carbono, de integrar CUC en la producción de cemento y determinar qué opciones de captura y conversión de CO_2 por RE presentan un mejor perfil ambiental.

Para ello se plantean los siguientes objetivos parciales:

- Planteamiento de los límites del sistema y escenarios a evaluar.
- Obtención del inventario detallado para cada escenario. Resolución de los balances de materia y energía para cada etapa de CUC acoplada a la producción de cemento con diferentes tecnologías de captura.

- Evaluación de impacto ambiental mediante ACV del proceso de cemento integrado con CUC en términos de huella de carbono para generar metanol como producto de RE de CO_2.
- Estudio de sensibilidad de distintas alternativas que reduzcan el impacto ambiental contribuyendo a la circularidad de la economía y mitigación del cambio climático.

3. METODOLOGÍA

El impacto ambiental de la integración de CUC en la producción de cemento se ha evaluado mediante la metodología ACV calculando la huella de carbono de tres escenarios distintos con el fin de determinar cuál de ellos es más favorable ambientalmente:

- Escenario A: planta cementera (caso de referencia).
- Escenario B: planta cementera + captura con MEA + RE.
- Escenario C: planta cementera + captura con membranas + RE.

3.1. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE ACV

El desarrollo de un ACV, de acuerdo a la norma UNE-EN ISO 14040, debe seguir las etapas mostradas en la Figura 8.[31]

1. Definición del objetivo y el alcance.
2. Análisis del inventario del ciclo de vida (ICV).
3. Evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV).
4. Interpretación del Ciclo de vida.

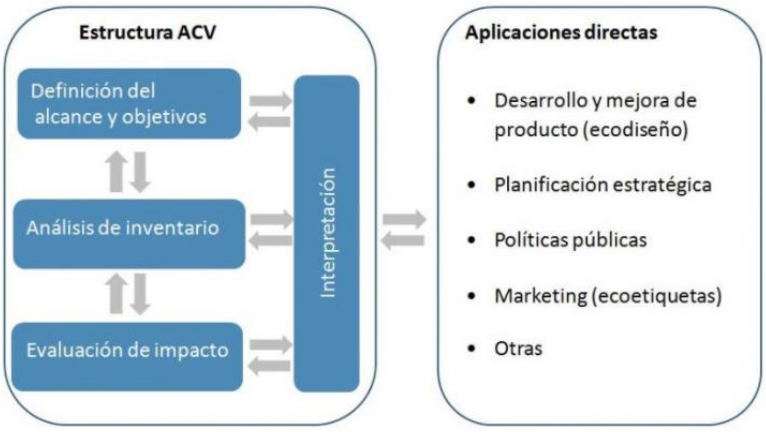

Figura 8. Marco para el ACV basado en ISO 14040 2006 procedente de [34]

La categoría de impacto ambiental estudiada en este proyecto es el calentamiento global con factor de caracterización denominado Potencial de Calentamiento Global (PCG o GWP por su término en inglés, *Global Warming Potential*). La unidad de referencia es masa de CO_2 equivalente y mide la totalidad de GEI emitidos por efecto directo o indirecto provenientes de la extracción, procesado y distribución de los materiales y energía consumidos en el proceso (cementera y CCU), así como las emisiones directas del proceso. Aunque existen otras categorías de impacto importantes como consumo de recursos, toxicidad humana, huella hídrica etc., la huella de carbono es el indicador principal para el desarrollo tecnológico de CUC cuyo primer requerimiento de viabilidad a medio-largo plazo es reducir las emisiones de CO_2.

A nivel científico, para realizar una evaluación de impacto de ciclo de vida existen distintas metodologías de aplicación, en este proyecto se ha empleado la metodología CML2001. CML 2001 agrupa los resultados en categorías de impacto por temáticas, como los impactos que proceden de mecanismos comunes (cambio climático), y es uno de los métodos más utilizados.[35]

3.1.1. Definición de objetivo y alcance

El primer paso en el desarrollo de un ACV es la definición de los objetivos del estudio. Se debe especificar las razones que impulsaron el trabajo y la información que se espera obtener como resultado.[34]

Definición del objetivo

El objetivo principal del estudio consiste en evaluar el impacto ambiental de integrar la captura y utilización de CO_2 en la producción de cemento y determinar qué opciones de captura y RE presentan un mejor perfil ambiental, con la intención de concluir qué proceso sería más conveniente emplear en la práctica para la descarbonización a medio-largo plazo del sector del cemento.

Además, para definir el alcance del sistema se debe considerar:

- Función del sistema.
- Unidad funcional: se refiere a la base de cálculo sobre la cual se efectuarán los balances de materias y energía.[34]
- Límites del sistema: Se debe identificar el conjunto de procesos unitarios o subsistemas que permiten producir el producto en estudio.[34] Definir los límites del sistema determina cuáles son las etapas que se van a considerar en el estudio del proceso, así como las entradas y salidas del mismo.

Alcance del estudio

Función del sistema

Disminuir las emisiones de CO_2 al medio ambiente en una planta cementera capturándolas y transformándolas en un producto de interés como el CH_3OH con el fin de reducir la huella de carbono y el impacto ambiental, contribuyendo a la economía circular y a la mitigación del cambio climático.

Unidad funcional

Se ha tomado como unidad funcional una tonelada (1 t) de cemento producido, por lo que todas las entradas y salidas del sistema están referidas a esta unidad.

Límites del sistema

Este estudio queda limitado desde el momento en el que se extraen las materias primas y energía, entran a la planta, hasta que se fabrica el producto deseado (cemento en el escenario A, y adicionalmente metanol en los escenarios B y C).

Quedan fuera del estudio el transporte de los productos, su uso y fin de ciclo de vida.[9]

Los ACV se pueden abordar desde distintos puntos de vista; en este proyecto todas las entradas al proceso son emisiones indirectas que se estudian de la cuna a la puerta, excepto las emisiones de CO_2 que se consideran emisiones directas y se estudian de la puerta a la puerta. Cuando el alcance del sistema se limita a las entradas/ salidas desde que se obtienen las materias primas hasta que el producto se pone en el marcado (a la salida de la planta de fabricación/montaje), se le denomina como "de la cuna a la puerta" (o en inglés *"Cradle to gate"*).[35] Cuando solo se tienen en cuenta las entradas/salidas del sistema productivo (procesos de fabricación), se le llama "de la puerta a la puerta" (o en inglés "gate to gate").[35]

3.1.2. Análisis del inventario de ciclo de vida

El análisis de inventario implica la recopilación de los datos de cada unidad del sistema (cementera y CUC) con el fin de cuantificar las entradas y salidas de materia y energía del sistema estudiado.

Después se procede a la validación de los datos y a su relación con los procesos unitarios y con el flujo de referencia de la unidad funcional (1 t de cemento).[9]

La recopilación de los datos del inventario es probablemente el aspecto que presenta mayor dificultad a la hora de realizar un ACV. Los datos utilizados fueron recogidos de diferentes fuentes, y datan desde el año 2006 hasta el 2017. Dichos datos se muestran en las Tablas A1, A2, A3 y A4 del Anexo.

Los datos de las entradas (materias primas y consumos de energía) y salidas del inventario (productos obtenidos, residuos y emisiones generadas) encontrados en la bibliografía tienen que relacionarse con la unidad funcional del proceso (1 t cemento). Estos cálculos se han realizado utilizando la hoja de cálculo de Excel.

Para el caso de los inventarios de captura con MEA y membranas, hay que tener en cuenta que los datos del inventario de la bibliografía están en unidades de masa o energía por tonelada de CO_2 de entrada y hay que relacionarlo primero con toneladas de CO_2 de salida, para finalmente enlazarlo con toneladas de cemento.

Para el caso de RE, los datos del inventario se han obtenido de un modelo matemático

que describe el proceso RE y ha sido desarrollado en el grupo de investigación DePRO. Estos datos se encuentran en unidades de masa y energía por kg de CH_3OH, que también se relacionan posteriormente con la unidad funcional.

La Tabla 2 muestra un resumen de los datos del inventario de cada escenario y sus unidades.

Tabla 2. Inventario de los distintos escenarios por unidad de cemento.

	ESCENARIO A	ESCENARIO B	ESCENARIO C	UNIDADES
ENTRADAS				
MATERIAS PRIMAS				
Caliza,arcilla,pizarra…	1270	1270	1270	kg/t
Yeso, anhidrita	50	50	50	kg/t
Adiciones minerales	140	140	140	kg/t
Ceniza, escoria…	150	150	150	kg/t
Coque	79	79	79	kg/t
Aire	2605	2605	2605	kg/t
Agua	176	1788	1776	kg/t
MEA	0	1	0	kg/t
Soda caustica	0	0.081	0	kg/t
Carbón activado	0	0.047	0	kg/t
CO_2	0	611	611	kg/t
KOH	0	3	2.6	kg/t
N_2	0	0	2146.3	kg/t
O_2	0	0	84.3	kg/t
Ar	0	0	35.8	kg/t
ENERGÍA				
Energía térmica (calor)	25300	34786	32636	MJ/t
Electricidad	120	15079	15486	kWh/t
SALIDAS				
PRODUCTOS				
Cemento	1000	1000	1000	kg
CO_2	0	611	611	kg/t
Metanol	0	432	432	kg/t
SUBPRODUCTOS				
H_2	0	95	95	kg/t
O_2	0	1415	1415	kg/t
EMISIONES				
NO_x(como NO_2)	2	2	2	kg/t
SO_2	9	9	9	kg/t
CO	2	2	2	kg/t

CO_2	672	41	41	kg/t
O_2	389	475	473	kg/t
N_2	1975	4127	4121	kg/t
H_2O	132	3269	3211	kg/t
Ar	0	37	43	kg/t
MEA	0	0.04	0	kg/t
Aminas	0	2	0	kg/t

3.1.3. Evaluación del impacto de ciclo de vida

Una vez que se dispone de los datos de inventario, se lleva a cabo la fase de Evaluación de Ciclo de Vida (EICV) para poder evaluar la importancia de los potenciales impactos ambientales generados por las entradas y salidas del sistema.[9] Como se ha indicado anteriormente, el indicador ambiental utilizado en este proyecto es la huella de carbono que pretende reflejar la totalidad de gases de efecto invernadero (GEI) emitidos por efecto directo (en este caso emisiones de CO_2) o indirecto (el resto de componentes del inventario) para producir una tonelada de cemento. El indicador se mide en unidades de masa de CO_2 equivalente (kg CO_2 eq.). Para ello, la cantidad de cada sustancia emitida se debe multiplicar por su correspondiente factor de emisión para obtener valores con unidades equivalentes que puedan ser sumados para obtener la contribución de sustancias del inventario a esa categoría de impacto.

3.1.4. Interpretación del ciclo de vida

Esta etapa incluye la combinación de los resultados de las dos etapas anteriores, con la finalidad de extraer conclusiones y recomendaciones que permitan la toma de decisiones de acuerdo a los objetivos y alcance del estudio.[31] Se obtendrá información sobre qué etapas del proceso generan mayor impacto ambiental con el fin de buscar posibles alternativas que disminuyan la huella de carbono.

3.2. DESCRIPCIÓN DE LOS ESCENARIOS

En este proyecto se ha evaluado el impacto ambiental, en términos de huella de carbono, de tres escenarios distintos. El primero de ellos es una planta cementera, que es el escenario de referencia a través del cual se plantean otros dos escenarios que difieren entre ellos fundamentalmente en la tecnología de captura de CO_2 empleada. A

este proceso de captura, le sigue un proceso de conversión de CO_2 a CH_3OH mediante RE. Para el proceso de RE se han considerado condiciones optimistas que todavía no se han alcanzado en la actualidad ya que la tecnología se encuentra en escala de laboratorio. Estas condiciones optimistas, basadas en trabajos de la literatura, incluyen el uso de un voltaje bajo, y una elevada densidad de corriente y eficiencia Faradaica para el producto de interés como puede observarse en la Tabla A9 del Anexo.[7] El impacto en la huella de carbono de los materiales de la infraestructura no se considera ya que se asume que duran el tiempo total de vida útil de la planta (>20 años).

Con el estudio de los distintos escenarios se pretende determinar qué escenario es más favorable ambientalmente y qué opciones se pueden plantear para reducir el impacto ambiental producido por la planta cementera.

3.2.1. Escenario A (Cementera)

La cementera es el caso base a partir del cual se desarrollan los otros dos escenarios estudiados añadiendo al proceso inicial, etapas de captura y posterior RE de CO_2 empleando distintas tecnologías.

El objetivo principal de la planta cementera es producir cemento a partir de las materias primas y energía consumidas a la entrada del proceso. Entre las emisiones del proceso destaca el CO_2, N_2, O_2 Y SO_2 como puede verse en la Tabla A1 del Anexo.

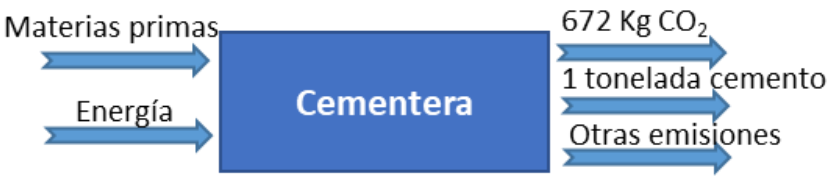

Figura 9. Límites del sistema del proceso planta cementera

3.2.2. Escenario B (Cementera + Captura MEA + RE)

Al caso base de la planta cementera se le añaden tecnologías CUC con el fin de capturar y convertir el CO_2 en CH_3OH, para evitar emitirlo a la atmósfera. El CH_3OH es considerado como una carga evitada, restando la huella de carbono del CH_3OH producido por el proceso convencional a partir del reformado de gas natural (0.497 kg CO_2/kg CH_3OH).

En este escenario, se utiliza una tecnología de captura de postcombustión que consiste en utilizar un compuesto químico orgánico llamado monoetalonamina (MEA) para capturar parte del CO_2 emitido en el proceso de producción de cemento. La eficiencia de captura con MEA es del 90%.[19]

La absorción química a través de una solución de MEA es el método más investigado para la captura de CO_2 y está implementado a escala industrial en algunas plantas de combustión.[19] Consiste en hacer que pasen los gases a través de una solución de aminas (MEA) a contracorriente que absorbe el CO_2 de una manera selectiva.[20] El sistema de absorción consta principalmente de dos columnas de destilación, el absorbedor y el separador.[19] La MEA se emplea en un rango de temperaturas de entre 40 y 60 °C y su uso es óptimo para el tratamiento de gases a baja presión.[20]

Es necesario minimizar los contenidos de N_2 y NO_x para evitar la degradación del disolvente. En cualquier caso, el disolvente se debe reemplazar cada cierto tiempo, lo cual encarece el proceso.[20]

El proceso de absorción con MEA requiere de consumo de energía y electricidad. Como materias primas se necesitan, además de la solución de MEA, carbones activados para absorber los productos de degradación de MEA y sosa cáustica (NaOH) para promover la regeneración de MEA a partir de sales termoestables en el recuperador.[19] Las emisiones principales del proceso de recuperación de MEA son CO_2, N_2, O_2, SO_2 y restos de MEA entre otros (Tabla A2 Anexo) .

Algunas de las ventajas de utilizar MEA como absorbente químico son su alta alcalinidad y facilidad de recuperación. Entre las desventajas, el principal problema es la formación de productos de reacción irreversible que provoca pérdidas de MEA en los procesos. Otro inconveniente es su elevado calor de reacción con el CO_2 que conlleva mayor demanda energética en la regeneración. Además, la presión de vapor relativamente alta de la MEA provoca pérdidas por evaporación significativas, particularmente en las operaciones de baja presión, aunque esto se soluciona con un lavado de los gases purificados.

Por último, la MEA es más corrosiva que otras especies, especialmente si se sobrepasa

del 20% de concentración en disolución. Esto limita su efectividad para casos en los que la presión parcial de CO_2 sea elevada. Existen sistemas de inhibición de la corrosión que son eficaces y permiten usar concentraciones de MEA en torno al 30%.[36]

Como se mencionó anteriormente, el inventario de la utilización del CO_2 y purificación de productos se obtuvo del modelo matemático desarrollado en el grupo de investigación. Los consumos de energía y balances de materia de estas unidades se resumen en la Tabla A4 bajo los parámetros utilizados de la Tabla A9. Algunos de estos consumos como el de la destilación fueron obtenidos a partir de simulaciones en Aspen Plus, mientras otros se obtuvieron a partir de correlaciones de la literatura y modelos de caja negra.

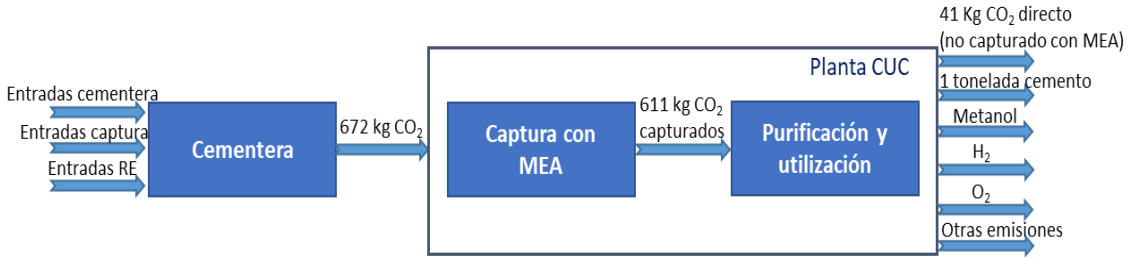

Figura 10. Límites del sistema del proceso cementera + CUC MEA.

3.2.3. Escenario C (Cementera + Captura membranas + RE)

En este escenario se le agrega a la planta cementera otra técnica de postcombustión que consiste en el empleo de membranas con el fin de capturar el CO_2.

Se basa en la interacción física o química de los gases con el material de la membrana, provocando que un gas pase a través de ella más rápido que otro. Este proceso se utiliza para la captura de altas concentraciones de CO_2 en gas natural a alta presión.[20]

En general, las membranas no tienen una elevada capacidad de separación, por este motivo se necesitan varias etapas o la recirculación de los humos para la adecuada separación de los gases, aumentando la complejidad del sistema, el consumo energético y los costes. La eficiencia de captura asumida es del 90%.[19]

La productividad de la membrana viene determinada por tres factores principales:[20]

- Diferente presión parcial a través de la membrana.
- Espesor de la membrana.
- Superficie de la membrana.

Las limitaciones principales del sistema son su gran gasto de energía y el menor porcentaje de captura de CO_2 frente a otras tecnologías.[37] Esto indica que el sistema no está muy desarrollado y las membranas más eficientes aún no se han encontrado, pero es un sistema prometedor debido a las ventajas que presenta entre las que se encuentran:[37]

- Bajo coste de instalación y costes de explotación muy reducidos, ya que no es necesaria energía externa y los gastos de mantenimiento son mínimos.[20]
- Al no utilizar ningún tipo de agente químico, no es necesario gestionar ningún tipo de residuo.[20]
- Permite variaciones en la composición del flujo de gas y del volumen de este.[20]
- Permite variaciones del sistema o un incremento gradual de su capacidad.[20]
- Los flujos de gas y líquido son independientes, lo que evita problemas en las columnas ya sea de inundación o espumado.[37]
- No se necesita un lavado posterior al absorbente para recuperar líquido de absorción.
- La operación se realiza a condiciones termodinámicamente óptimas. [37]

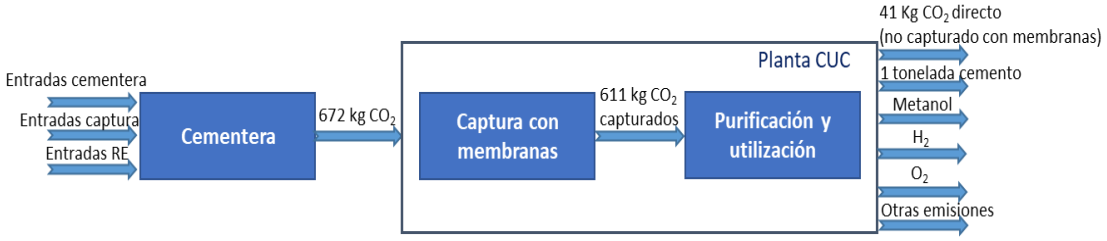

Figura 11. Límites del sistema del proceso cementera + CUC membranas.

3.3. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Después del realizar el estudio del ACV a los tres escenarios definidos anteriormente, se desarrolla un análisis de sensibilidad aplicando una serie de mejoras con el fin de disminuir aún más el impacto ambiental del proceso. Cada una de estas mejoras aparecen en la Tabla 3 denominadas como como casos de estudio, debajo del escenario en el que se aplica cada una.

Tabla 3. Casos de estudio aplicados a cada escenario.

	ESCENARIO A (Cementera)	**ESCENARIO B** (Cementera + CUC MEA)	**ESCENARIO C** (Cementera + CUC membranas)
Caso de estudio 0	Caso base cementera	No hay comercialización de subproductos	
Caso de estudio 1		Hay comercialización de subproductos	
Caso de estudio 2	Cementera electrificada		
Caso de estudio 3		Caso de estudio 1 + Caso de estudio 3 + electricidad captura y RE de energía eólica + energía térmica de caldera eléctrica	

Varias de las posibles mejoras consisten en utilizar electricidad que provenga de una fuente de energía renovable, en vez de electricidad de red, y dentro de ellas, se escoge aquella que tenga menor factor de emisión dentro de la lista de procesos de la base de datos de GaBi.

La Tabla 4 muestra que la electricidad que genera menor impacto ambiental en términos de huella de carbono es la proveniente de energía eólica.

Tabla 4. Factores de emisión de electricidades provenientes de distintas fuentes

	Factor de emisión PCG CML 100 (kg CO_2/u)
Electricidad de energía eólica	0.01059
Electricidad de energía solar	0.05247
Electricidad de energía fotovoltaica	0.07018
Electricidad de red	0.57025
Electricidad proveniente de biogas	3.998

Si en el estudio de la huella de carbono se tiene en cuenta la comercialización de los subproductos (H_2 y O_2), esta disminuye considerablemente ya que estos se consideran como emisiones evitadas.

Otra posible alternativa, consiste en plantear la opción de electrificar la planta cementera mediante la utilización de electricidad proveniente de energías renovables y considerando que el calor de la energía térmica consumida proviene de una caldera eléctrica.

Finalmente, el último caso de estudio consiste en aplicar todas las posibles mejoras planteadas además de considerar que el calor de la energía térmica del proceso de RE

proviene de una caldera eléctrica industrial que es alimentada con electricidad renovable y agua con el fin de calcular cuánto se consigue reducir el impacto ambiental respecto al proceso inicial (caso de estudio 0).
Una vez tomadas las medidas expuestas se recalcula el valor de la huella de carbono para todos los escenarios.

3.4. SOFTWARE

Para el estudio de ACV en este proyecto, se emplean principalmente la herramienta de Excel, el software openLCA y la base de datos GaBi.

Para utilizar openLCA se crea una nueva base de datos dentro del programa y se importan la base de datos de GaBi y los métodos de impacto. El programa se utiliza para buscar el factor de impacto del proceso que más se asemeje a las características de los distintos productos o compuestos del inventario. La mayoría de los procesos incluyen información sobre el país de referencia (en abreviatura: ES, FR, GB, NL…) o si es una media europea o mundial (EU-28, GLO).
Se escoge el factor de impacto del proceso elegido para el método de impacto "*CML2001-Jan.2016, Global Warming Potential (GWP 100 years)"* medido en unidades de CO_2 eq.
Es muy importante que la unidad funcional del proceso de GaBi coincida con la unidad funcional utilizada en el inventario, de no ser así, se adapta el factor de impacto a la unidad del inventario. Todos los cálculos intermedios se realizan con Excel, así como los diagramas de barras expuestos en los resultados.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación, se muestran los resultados obtenidos tras realizar el ACV a los distintos escenarios y casos de estudio mencionados anteriormente. Una vez calculada la huella de carbono de todos los escenarios y casos de estudio, resulta sencillo comparar el impacto ambiental entre ellos ya que tienen las mismas unidades (kg CO_2 eq.); por lo que se podrá concluir qué escenario y caso de estudio presenta un mejor perfil ambiental de cara a intentar implementarlo en las plantas cementeras en un futuro a

medio plazo.

4.1. EVALUACIÓN DEL CASO BASE: ESCENARIO 0

La Figura 12 muestra la huella de carbono, utilizando la categoría de impacto PCG, de los distintos escenarios para el caso de estudio 0. En el escenario A; la planta cementera genera una huella de carbono elevada. De los 1181 kg CO_2 eq. originados, 672 kg CO_2 eq. se deben a las emisiones directas de CO_2. Agregando etapas de captura y RE, las emisiones directas de CO_2 consiguen reducirse a 41 kg CO_2 eq. Tras incorporar tecnologías CUC al proceso, la etapa de RE pasa a ser la que mayor impacto ambiental genera seguida de la planta cementera y finalmente, del proceso de captura de CO_2, siendo mayor la huella de carbono generada en el proceso de captura con MEA que con membranas.

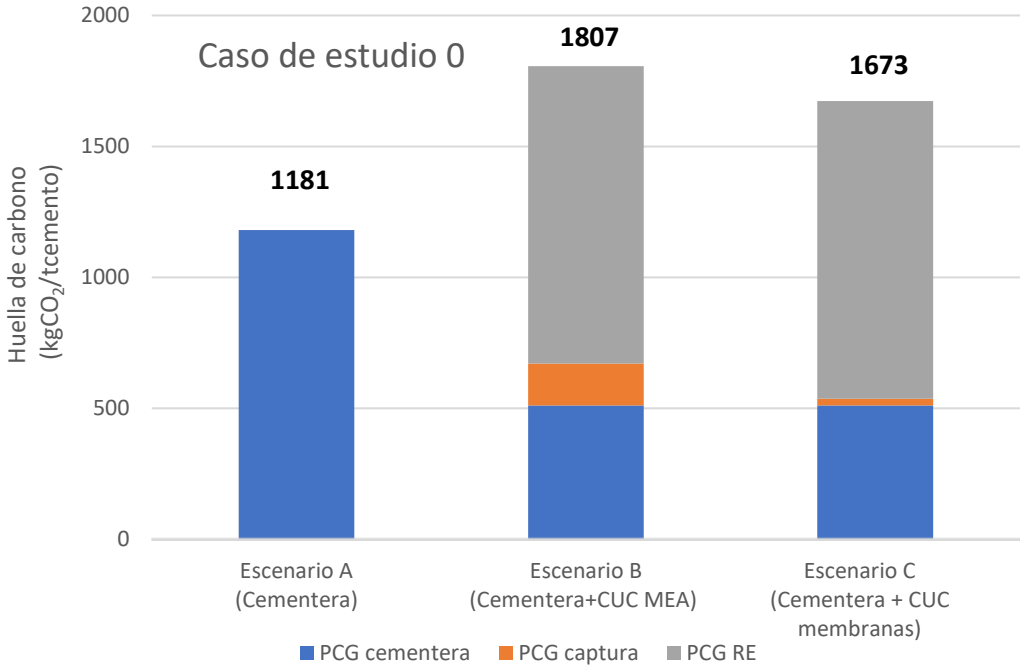

Figura 12. Huella de carbono en el caso de estudio 0 para los procesos de cementera, captura y RE.

Si se realiza un análisis del caso de estudio 0, en el que no se considera la comercialización de subproductos, la huella de carbono mayor será generada por el escenario B (1807 kg CO_2 eq.) seguida del escenario C (1673 kg CO_2 eq.). El motivo principal por el que la captura con MEA genera mayor impacto ambiental que la captura con membranas es el consumo de energía térmica de un escenario frente a otro, ya que

las membranas no requieren este tipo de energía. Tanto en el escenario B como C, la electricidad y energía térmica consumidas en el proceso de RE originan un gran impacto. El hecho de convertir el CO_2 en un producto de interés como el CH_3OH mediante RE también consigue reducir la huella de carbono del proceso ya que las emisiones generadas por el CH_3OH son consideradas como emisiones evitadas.

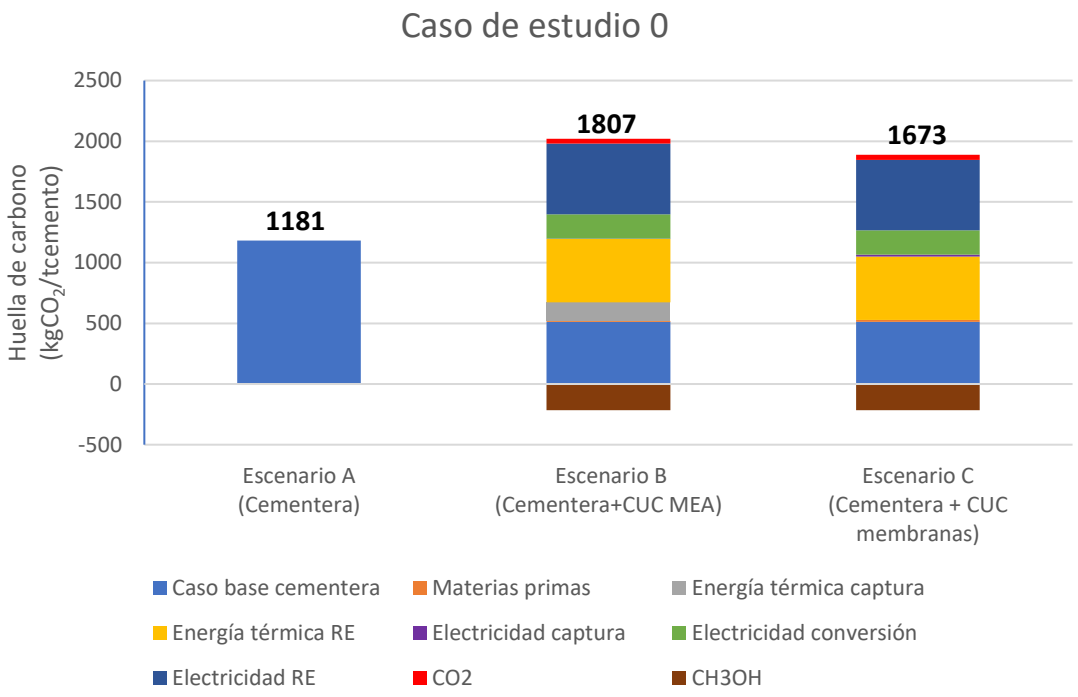

Figura 13. Huella de carbono en los distintos escenarios para el caso de estudio 0.

4.2. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD: MEJORAS

La gráfica adjunta (Figura 14) representa el caso de estudio 1 en el que se comercializan los subproductos (H_2 y O_2). Si además de considerar la comercialización del CH_3OH, se considera la comercialización de los subproductos; la huella de carbono se reduce notablemente respecto al caso de estudio 0. En el escenario B se generan 1012 kg CO_2 eq. en el caso de estudio 1 frente a 1807 kg CO_2 eq. en el caso de estudio 0 y 878 kg CO_2 eq. frente a 1672 kg CO_2 eq. para el escenario A. El O_2 es el subproducto que más consigue reducir el impacto ambiental del proceso. Al igual que en el caso de estudio 0, la energía térmica y la electricidad consumidas en el proceso de RE son las etapas que mayor huella de carbono producen.

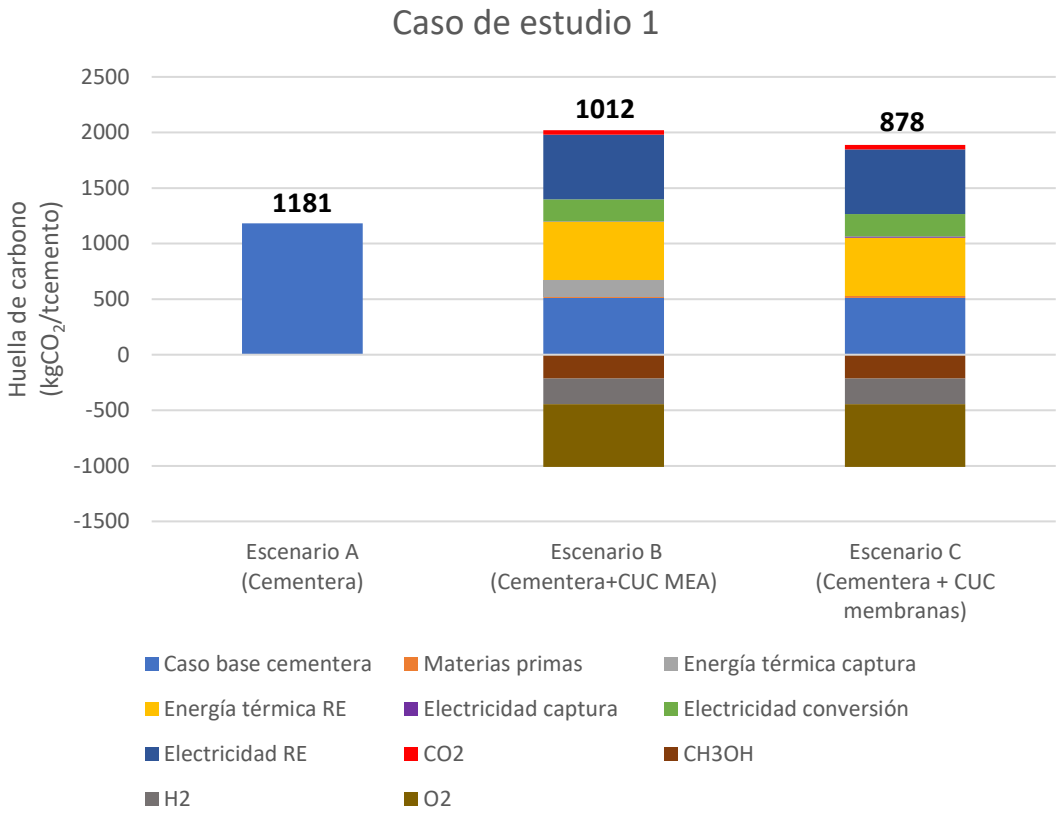

Figura 14. Huella de carbono en los distintos escenarios para el caso de estudio 1.

En el caso de estudio 2, se electrifica la planta cementera sustituyendo la electricidad de red por electricidad proveniente de energías renovables, concretamente, proveniente de energía solar, y considerando que el calor de la energía térmica consumida por el proceso proviene de una caldera eléctrica alimentada por una fuente de energía renovable solar. Estas medidas ayudan a disminuir el impacto ambiental del proceso. La Figura 15, compara la huella de carbono generada por el caso de estudio 0 de la planta cementera (1181 kg CO_2 eq.) con la huella de carbono tras electrificar la planta cementera (902 kg CO_2 eq.). El CO_2 emitido es el más contribuyente a la huella de carbono ya que en este caso no se captura ni se convierte a metanol.

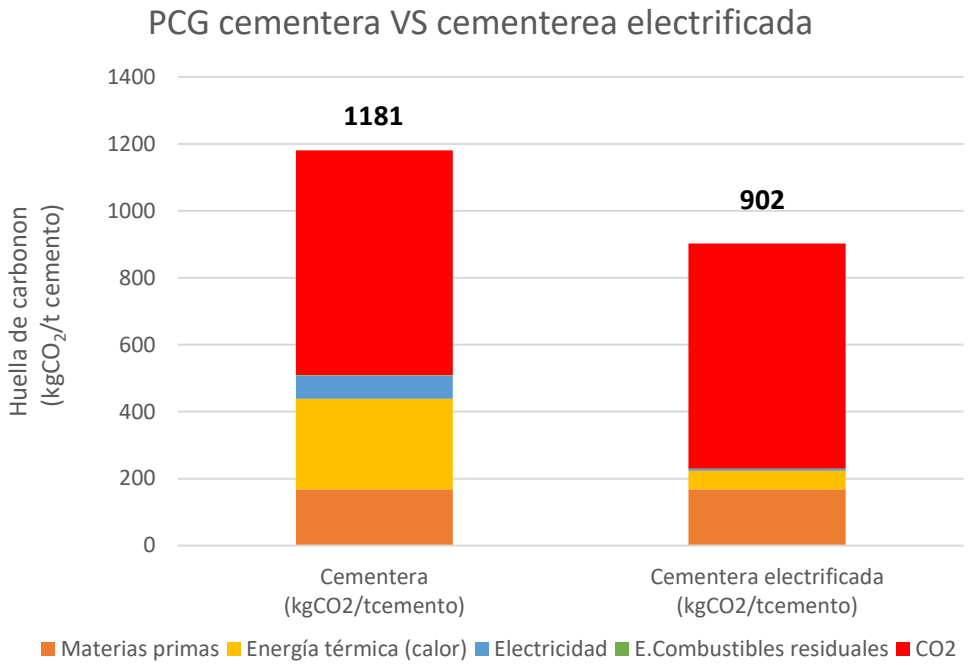

Figura 15. Comparativa huella de carbono en la planta cementera en el caso de estudio 0 y en el caso de estudio 2.

A lo largo del análisis de los distintos casos de estudio se ha comprobado, que, por lo general, la electricidad y energía térmica del proceso de RE son las etapas que mayor impacto ambiental generan; por ello, se plantea la opción de sustituir la electricidad proveniente de energía solar por otra fuente de energía con menor impacto ambiental como la eólica, así como considerar que la energía térmica del proceso proviene de una caldera eléctrica alimentada con energía eólica también.

La Figura 16, representa el caso de estudio 3 en el que se aplican las mejoras planteadas en el caso de estudio 1 y 2; es decir, se considera la comercialización de subproductos y se electrifica la planta cementera y, además, se añaden otras mejoras como utilizar electricidad de RE y captura que provenga de una fuente de energía renovable eólica ya que es la que menos impacto genera, en vez de energía solar que es la empleada en los casos de estudio anteriores. Una vez aplicadas estas medidas, la planta cementera es la etapa que más contribuye al impacto ambiental. Sin embargo, empleando todas las posibles mejoras planteadas en los casos de estudio, las huellas de carbono generadas en los escenarios B y C se reducen tanto que llegan a ser negativas. Este valor negativo significa que las emisiones netas, desde el enfoque de la cuna a la puerta o *cradle-to-*

gate, darían un proceso neutro en carbono.

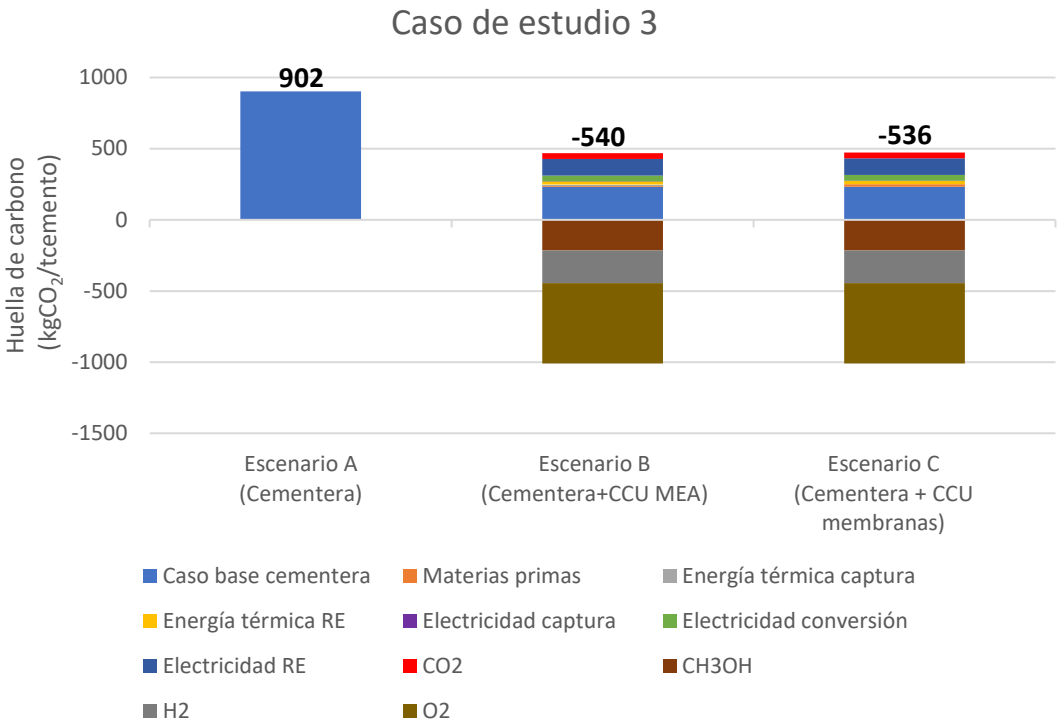

Figura 16. Huella de carbono en los distintos escenarios para el caso de estudio 3.

A la vista de todos los casos de estudio, el proceso de captura con membranas presenta un mejor perfil ambiental que la captura con MEA; sin embargo, empleando las nuevas medidas del caso de estudio 3, la captura con MEA pasa a generar menor huella de carbono que con membranas, aunque la diferencia es mínima.

Todos los casos de estudio planteados hacen referencia a un planteamiento futuro sobre la descarbonización del cemento en un futuro a medio plazo; es decir, no se corresponden con la situación actual de este sector. El caso 3 describe un proceso ideal con emisiones reducidas.

La Tabla 5 muestra un resumen de los resultados del impacto ambiental generado en todos los escenarios y casos de estudio evaluados.

Tabla 5. Huella de carbono para todos los escenarios y casos de estudio por unidad funcional (1 t cemento)

	ESCENARIO A	ESCENARIO B	ESCENARIO C	UNIDADES	CATEGORÍA DE IMPACTO
CASO ESTUDIO 0	1181	1807	1673	kg CO_2 eq	Potencial de calentamiento global (PCG)
CASO ESTUDIO 1	1181	1012	878		
CASO ESTUDIO 2	902	1528	1382		
CASO ESTUDIO 3	902	-540	-536		

Como puede observarse en la Tabla 5, es posible reducir notablemente la huella de carbono respecto del caso de estudio base (caso de estudio 0) implementando una serie de mejoras; siendo la opción más favorable la del caso de estudio 3, llegando a obtener un valor negativo de kg de CO_2 eq. emitidos para el escenario B y C.

Las Figuras 17 y 18 muestran gráficamente el aumento y disminución de la huella de carbono (en kg CO_2 eq.) de los distintos casos de estudio frente al caso de estudio 0 para el escenario A y B ya que el escenario C presenta un comportamiento muy similar al B.

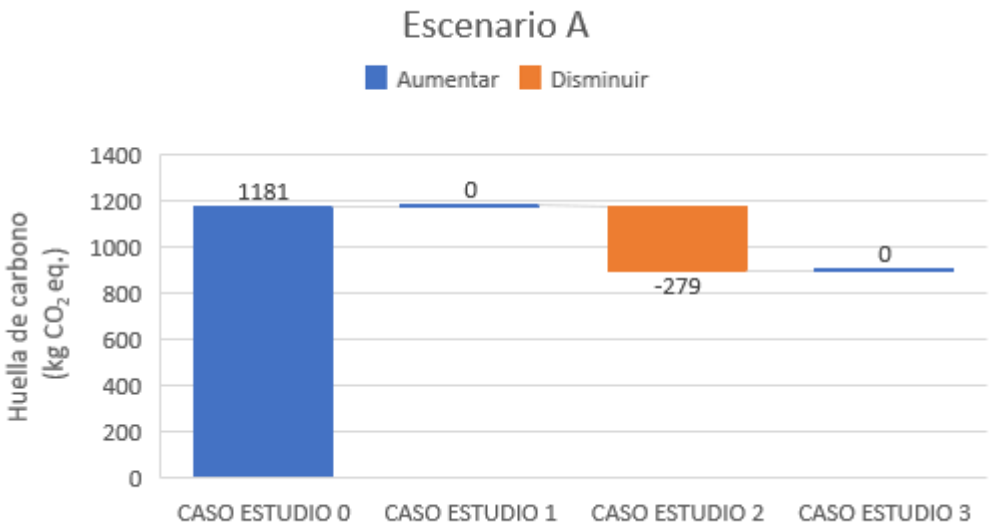

Figura 17. Aumento y disminución de la huella de carbono en los distintos casos de estudio para el escenario A.

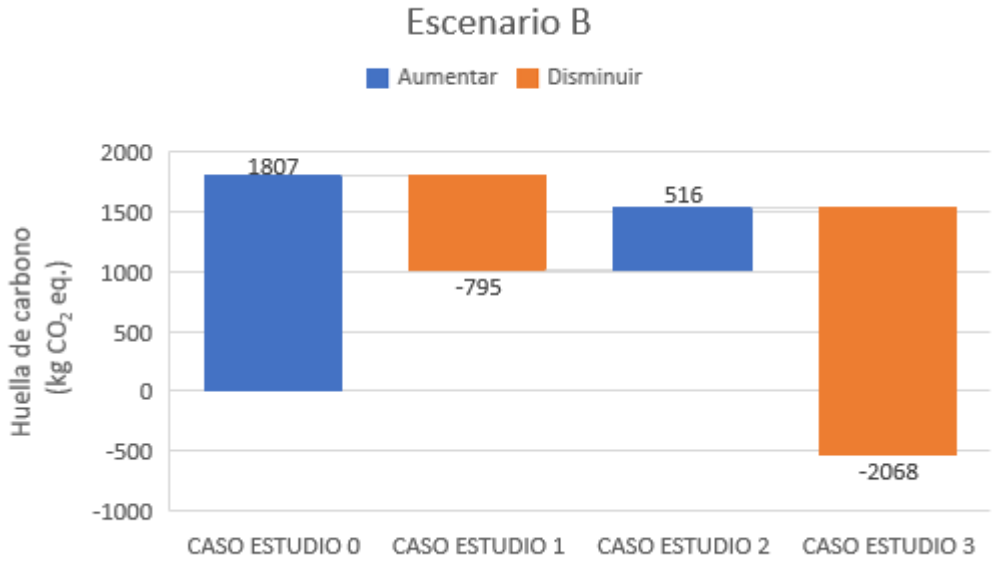

Figura 18. Aumento y disminución de la huella de carbono en los distintos casos de estudio para el escenario B.

5. CONCLUSIONES

El cambio climático es una realidad que se expresa en todo el planeta y sus consecuencias pueden ser devastadoras si no se reducen drásticamente la dependencia de los combustibles fósiles y las emisiones de gases de efecto invernadero. El sector del cemento se encuentra entre los mayores consumidores de energía industrial y mayores emisores de CO_2 industrial a nivel mundial, por lo que su descarbonización será necesaria en las próximas décadas. Para conseguirlo; se plantea el uso de tecnologías CUC para capturar y convertir el CO_2 en metanol mediante RE, y se realiza el ACV a distintos escenarios y casos de estudio intentando determinar cuál de ellos presenta un mejor perfil ambiental concluyendo:

- El método de ACV puede emplearse para estudiar tecnologías emergentes que buscan alcanzar una sociedad más sostenible mediante nuevos sistemas tecnológicos cuya sostenibilidad aún debe demostrarse.
- Las emisiones directas de CO_2 por tonelada de producto pueden reducirse desde 672 kg CO_2 eq. a 41 kg CO_2 eq. si se agregan tecnologías CUC al caso base de la planta cementera.
- Dentro de las distintas etapas del proceso integrado con CUC, la RE es la que mayor impacto ambiental genera, seguida de la planta cementera y finalmente, del proceso de captura de CO_2.
- El consumo de energía térmica y electricidad en el proceso de RE genera un gran impacto ambiental.
- En general, el uso de membranas como tecnología de captura genera menor impacto ambiental que el uso de MEA debido a que no consumen energía térmica.
- Considerar la venta de subproductos (caso estudio 1) reduce significativamente la huella de carbono, especialmente debido al O_2 que genera un gran impacto ambiental considerado como emisiones evitadas.
- Electrificar la cementera (caso de estudio 2) no consigue disminuir notablemente la huella de carbono generada.
- El caso de estudio 3 se consideran todas las posibles mejoras planteadas en los casos de estudio anteriores; además de emplear electricidad proveniente de

energía renovable eólica y considerar que la energía térmica proviene de una caldera eléctrica. Este es un caso ideal en el que la huella de carbono se reduce tanto que se convierte en negativa para el escenario B y C. Esos valores de huella de carbono (-540 kg CO_2 eq. para el escenario B) y (-536 kg CO_2 eq. para el escenario C) representan el caso más favorable. Por lo general, aunque se apliquen mejoras al proceso, no se conseguirá reducir tanto la huella de carbono, sino que esta alcanzará valores dentro del rango del caso de estudio 1, 2 y 3. Estos valores por tonelada de cemento son:

- Entre 1181 kg CO_2 eq. y 902 kg CO_2 eq. para el escenario A.
- Entre 1528 kg CO_2 eq. y -538 para el kg CO_2 eq. escenario B.
- Entre 1328 kg CO_2 eq. y -536 kg CO_2 eq. para el escenario C.

6. LIMITACIONES

El proyecto plantea la posibilidad de descarbonizar el sector cemento mediante tecnologías CUC, reduciendo así su huella de carbono. Esto es un planteamiento futuro a medio plazo, inviable a día de hoy. Para ello se han realizado ACV a distintos escenarios y casos de estudio considerando condiciones favorables por lo que los resultados obtenidos son optimistas pero tal vez no demasiado realistas. Es por eso que el proyecto plantea algunas limitaciones que deberían abordarse en trabajo futuro:

- Existen numerosas categorías de impacto importantes como el consumo de recursos, la toxicidad humana, la huella hídrica, etc. Sin embargo, la huella de carbono es el indicador principal para el desarrollo tecnológico de CUC cuyo primer requerimiento de viabilidad a medio-largo plazo es reducir las emisiones de CO_2. Es por eso por lo que en el proyecto se estudia solo esta categoría de impacto ambiental, ya que de momento la tecnología está en desarrollo, y la huella de carbono es el mejor indicador ambiental para el objetivo propuesto, que es reducir el CO_2.
- En el caso de estudio 1 y 3 se ha considerado que se vende toda la cantidad de subproductos generada; lo cual reduce mucho el impacto ambiental. Sin embargo, considerar que se comercializa todo el O_2 y H_2 es demasiado optimista dado el esfuerzo de introducirse en nuevos mercados, posibles limitaciones económicas, y el reducido mercado de O_2.
- Además de metanol, el CO_2 capturado se puede convertir en otros productos mediante RE como ácido fórmico, etanol, monóxido de carbono, formaldehído y ácido oxálico. Estas rutas no se han estudiado en el proyecto.
- Para el proceso de RE se han considerado condiciones óptimas que todavía no se han alcanzado en la actualidad ya que la tecnología se encuentra en escala de laboratorio. Estas condiciones optimistas, basadas en trabajos de la literatura, incluyen el uso de un voltaje bajo, y una elevada densidad de corriente y eficiencia Faradaica para el producto de interés. Además, el impacto en la huella de carbono de los materiales de la infraestructura no se considera ya que se asume que duran el tiempo total de vida útil de la planta (>20 años).

BIBLIOGRAFÍA

1. Arrhenius S. On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. *London, Edinburgh, Dublin Philos Mag J Sci*. 41:237–276. https://doi.org/10.1080/14786449608620846
2. Pérez Burgos, S. Septiembre de 2019. *Análisis comparativo sobre la adaptación al cambio climático en Europa y España*.Díaz Simal, P. (dir.). Losada Rodríguez, I.J. (dir.). Trabajo fin de Máster, Universidad de Cantabria.
3. Summary for Policymakers — Global Warming of 1.5 ºC. (2021). Recuperado el 26 Mayo 2021, de https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/spm/
4. Benavides H.O. Información técnica sobre Gases de Efecto Invernadero y el cambio climático. *Ideam*. Publicado online 2007:1-102. doi:IDEAM–METEO/008-2007
5. Portillo, G. (2021). Efecto invernadero: Qué es este fenómeno y cómo funciona. Recuperado 19 Mayo 2021. de https://www.meteorologiaenred.com/efecto-invernadero.html
6. NASA. Cambio climático: ¿Cómo sabemos lo que sabemos? – Climate Change: Vital Signs of the Planet. La evidencia científica sobre el calentamiento del sistema climático es inequívoca. Publicado 2021. Recuperado el 19 Mayo, 2021 de https://climate.nasa.gov/evidencia/
7. Rumayor M., Dominguez-Ramos A., Irabien A.. Toward the Decarbonization of Hard-To-Abate Sectors: A Case Study of the Soda Ash Production. *ACS Sustain Chem Eng*. 2020;8(32):11956-11966. doi:10.1021/acssuschemeng.0c01598
8. ONU. Naciones Unidas: Cumbre De Johannesburgo 2002. 4 De Septiembre.
9. Torre Torre, N. Julio de 2013. *Análisis de ciclo de vida (ACV) de incineración de residuos sólidos urbanos (RSU)*. Trabajo fin de Grado, Universidad de Cantabria
10. ONU. Naciones Unidas. Cumbre para la Tierra + 5. *Periodo Extraordin Ses la Asam Gen para el Exam y la Evaluación la Apl del Programa 21*. Publicado online 1997:1-9.
11. European Commission. Acuerdo de París | Acción por el Clima. Polices, information and services. Acciones de la UE. Publicado 2015. Recuperado el 28 Mayo, 2021 de

https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris

12. Climate strategies & targets - Climate Action - European Commission. (2021). Recuperado el 24 Mayo 2021 de https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies
13. Ramón Martínez, A. Noviembre de 2014. *Estudio del sector cementero a nivel mundial y nacional , con particularización de una empresa cementera situada en la Comunidad Valenciana.* Tormo Sevilla, E. (dir.). Gómez de Barreda, C. (dir.). Trabajo fin de Grado, Universidad Politécnica de Valencia.
14. IEA. Agencia Internacional de la Energía. Technology Roadmap for Cement. *Int Energy Agency,*. Publicado online 2018:66.
15. JRC. Joint Research Centre. *BAT Document for the Production of Cement*.; 2013. doi:10.2788/12850
16. Plaza M.G., Martínez S., Rubiera F. CO_2 Capture, Use, and Storage in the Cement Industry: State of the Art and Expectations. *Energies*. 2020;13(21):5692. doi:10.3390/en13215692
17. CEMBUREAU. The European Cement Association. Who Are We? (2021). Recuperado el 20 mayo de 2021, de https://cembureau.eu/about-us/who-are-we/
18. Suisscontac. ¿Quienes somos? Fundación de cooperación suiza para el desarrollo técnico Colombia. Recuperado el 21 Mayo, 2021 de www.swisscontact.org.co
19. Giordano L., Roizard D., Favre E. Life cycle assessment of post-combustion CO_2 capture: A comparison between membrane separation and chemical absorption processes. *Int J Greenh Gas Control*. 2018;68(May 2017):146-163. doi:10.1016/j.ijggc.2017.11.008
20. Muñoz C.B., Peris P.M., Rodríguez J.D.R. *Estado Del Arte de Las Tecnologías de Captura y Almacenamiento de CO_2*. 2011. http://ficem.org/CIC-descargas/espania/Estado-del-arte-de-las-tecnologias-de-captura-y-almacenamiento-de-CO2-en-la-industria-del-cemento.pdf
21. Bushuyev O.S., De Luna P., Dinh C.T., et al. What Should We Make with CO_2 and How Can We Make It? *Joule*. 2018;2(5):825-832. doi:10.1016/j.joule.2017.09.003
22. Oloman C., Li H. Electrochemical Processing of Carbon Dioxide. *ChemSusChem*. 2008;1(5):385-391. doi:10.1002/cssc.200800015
23. Merino García I. 2018. *" Electrorreducción de Dióxido de Carbono En Fase Gas*

Para La Producción de Hidrocarburos " Irabien Gulías, A. (dir.). Albo Sánchez, J. (dir.). Tesis doctoral, Universidad de Cantabria.

24. Metanol U. Se teme lo que no se conoce. Publicado online 2003:56-58.
25. Guillén Aragón, S. 2013. *Estudio de la sensibilidad de la columna de purificación T-200 de una planta de producción de metanol de 365000 Tn/año*. Hernández Fernández, F.J. Trabajo fin de carrera, Universidad Politécnica de Cartagena.
26. Bustos Rojas, N. Gómez Herrera, M. Abril de 2014. *Metanol como alternativa para la generación de combustibles limpios.* Sotelo boyás, R. (dir.). Tesis, Escuela Superior de Ingeniería química ye industrias extractivas.
27. Adnan M.A., Kibria M.G. Comparative techno-economic and life-cycle assessment of power-to-methanol synthesis pathways. *Appl Energy*. 2020;278(July):115614. doi:10.1016/j.apenergy.2020.115614
28. Dominguez-Ramos A., Singh B., Zhang X., Hertwich E.G., Irabien A. Global warming footprint of the electrochemical reduction of carbon dioxide to formate. *J Clean Prod*. 2015;104:148-155. doi:10.1016/j.jclepro.2013.11.046
29. Sostenible IQ. Resumen tecnologías electrolisis ¿ Qué tecnología tiene un menor impacto ambiental ? Publicado online 2018:1-23.
30. Dynamyca. 2010. Formulación de plan maestro de movilidad para Bogotá, que incluye ordenamiento para estacionamientos.
31. Leiva E.H. Análisis de Ciclo de Vida. Publicado online 2016:43. doi:10.13140/RG.2.1.2207.3689
32. Cucurachi S., Van Der Giesen C., Guinée J. Ex-ante LCA of Emerging Technologies. *Procedia CIRP*. 2018;69(May):463-468. doi:10.1016/j.procir.2017.11.005
33. Kibria Nabil S., McCoy S., Kibria M.G. Comparative life cycle assessment of electrochemical upgrading of CO_2 to fuels and feedstocks. *Green Chem*. 2021;23(2):867-880. doi:10.1039/d0gc02831b
34. Fullana i Palmer P. Análisis del Ciclo de Vida de un TAM Wilmotte. Published online 1999:1-14.
35. Ihobe, Sociedad Pública de Gestión Ambiental. Análisis de Ciclo de vida y Huella de Carbono. Dos maneras de medir el impacto ambiental de un producto. 19 de noviembre de 2019

36. Luis A. Capítulo 3: Captura de CO_2 en postcombustión: absorción, 47-65.

37. Electrica DDEI, Torres C. Tecnologías de captura y secuestro de CO_2. Publicado online 2008.

38. Cetinkaya E., Dincer I., Naterer G.F. Life cycle assessment of various hydrogen production methods. *Int J Hydrogen Energy*. 2012;37(3):2071-2080. doi:10.1016/j.ijhydene.2011.10.064

39. City of Winnipeg. Emission factors in kg CO_2-equivalent per unit. *WSTP South End Plant Process Sel Rep*. Publicado online 2011. https://www.winnipeg.ca/finance/findata/matmgt/documents/2012/682-2012/682-2012_Appendix_H-WSTP_South_End_Plant_Process_Selection_Report/Appendix%207.pdf

ANEXOS

Las tablas siguientes muestran los datos del inventario y sus respectivas unidades para el caso de la cementera, la captura de CO_2 Con MEA, la captura de CO_2 con membranas y el proceso de RE.

Tabla A1. Inventario cementera procedente de [15] por unidad de cemento.

INVENTARIO CEMENTERA				
Entradas	**Unidad**	**Media**	**Máx.**	**Mín.**
Materias primas				
Caliza,arcilla,pizarra…	kg/t	1270		
Yeso, anhidrita	kg/t	50		
Adiciones minerales	kg/t	140		
Ceniza, escoria…	kg/t	150		
Coque	kg/t	79		
Aire	kg/t	2605		
H_2O	l/t	175.5	280	71
Energía				
Energía térmica (calor)	MJ/t	3800	5200	2400
Electricidad	kWh/t	120	150	90
Combustibles residuales	MJ/kg	21.5	40	3
Salidas	**Unidad**	**Media**	**Máx.**	**Mín.**
Productos				
Cemento	t	1		
Emisiones gaseosas				
NO_X(como NO_2)	kg/t	2	3.74	0.26
SO_2	kg/t	9		8.90
Polvo	kg/t	0.21	0.42	0.0005
CO	kg/t	2.02	3.68	0.37
CO_2	kg/t	672		
TOC/VOC	kg/t	0.056	0.11	0.0018
HF	kg/t	0.00093	0.0018	0.000017
HCl	kg/t	0.018	0.037	0.000037
PCDD/PCDF	kg/t	2.51E-10	5.02E-10	2.21E-14
O_2	kg/t	389		
N_2	kg/t	1975		
Emisiones líquidas				
H_2O	kg/t	132		
Emisiones solidas				
Metales	kg/t	0.0037	0.0074	0
Polvo	ng I-EQT/kg	6.7	96	
Clinker	ng I-EQT/kg	1.24	13	

Tabla A2. Inventario captura CO_2 con MEA por unidad de CO_2 de entrada procedente de [19]

INVENTARIO CAPTURA (MEA)		
Entradas	**Unidad**	**Media**
Materias primas		
MEA	kg/tCO2 in	1.44
Soda caustica	kg/tCO2 in	0.12
Carbon activado	kg/tCO2 in	0.07
H_2O	kg/tCO2 in	18.1
CO_2	kg/tCO2 in	1099.9
Energía		
Reboiler	GJ/tCO2 in	3.2
Energia MEA	kWh/tCO2 in	33.8
Energia cp CO_2	kWh/tCO2 in	64.5
Salidas	**Unidad**	**Media**
Productos		
CO_2 capturado	kg	1000
Emisiones gaseosas		
CO_2	kg/tCO2 in	99.9
H_2O	kg/tCO2 in	87.5
Ar	kg/tCO2 in	54.8
N_2	kg/tCO2 in	3202.2
O_2	kg/tCO2 in	128.3
MEA	kg/tCO2 in	0.06
NH_3	kg/tCO2 in	0.03
Formaldehído	kg/tCO2 in	0.0002
Acetaldehído	kg/tCO2 in	0.00015
Emisiones sólidas		
Aminas	kg/tCO2 in	2.9

Tabla A3. Inventario captura de CO_2 con membranas por unidad de CO_2 de entrada procedente de [19]

INVENTARIO CAPTURA (Membranas)				
Entradas	**Unidad**	**Media**	**Max**	**Min**
Materias primas				
H_2O	kg/tCO2 in	0.01	0.03	0
N_2	kg/tCO2 in	3194	3196	3192
O_2	kg/tCO2 in	125	127	124
Ar	kg/tCO2 in	53	54	52
CO_2	kg/tCO2 in	1100		
Energía				
Emb	kWh/tCO2 in	313	410	230
Ecp, CO_2	kWh/tCO2 in	77	77	77
Salidas	**Unidad**	**Media**	**Max**	**Min**
Productos				
CO_2	kg	1000		
Emisiones gaseosas				
CO_2	kg/tCO2 in	100	100	100
H_2O	kg/tCO2 in	0.01	0.03	0
N_2	kg/tCO2 in	3194	3196	3192
O_2	kg/tCO2 in	125	127	124
Ar	kg/tCO2 in	53	54	52

Tabla A4. Inventario RE por unidad de metanol procedente de [7]

INVENTARIO ELECTRORREDUCCIÓN		
Entradas	**Unidad**	**Media**
Materias primas		
H_2O	kg/kg	3.7
KOH	kg/kg	5.97E-03
CO_2	kg/kg	1.4
Energía		
RE	kWh/kg	26
Rec. carbonatos	kWh/kg	5.1
Separación gases	kWh/kg	0.97
Destilación	kWh/kg	0
Compresión	kWh/kg	2.8
Bombeo	kWh/kg	0.0013
Calor	MJ/kg	17
Salidas	**Unidad**	**Media**
Productos		
CH_3OH	kg	1
Subproductos		
H_2	kg/kg	0.22
O_2	kg/kg	3.3
Emisiones gaseosas		
CO_2	kg/kg	0.095
Emisiones líquidas		
H_2O	kg/kg	7.1

La Tabla A5 muestra la media europea de los factores de emisión correspondientes a cada componente del inventario, extraídos la mayoría de ellos de la lista de procesos de la Base de datos de GaBi.

Tabla A5. Factores de emisión por unidad de cemento

Nombre identificativo	País	Factor emisión PCG CML 100 (kg CO_2/u)	Unidad	Referencia
Electricity grid mix	EU-28	0.57025	kwh/t cement	Base datos GaBi
Thermal energy from heavy fuel oil	EU-28	0.08867	MJ/t cement	Base datos GaBi
Limestone	EU-28	0.01443	kg/t cement	Base datos GaBi
Gypsum	EU-28	0.22427	kg/t cement	Base datos GaBi
Reinforced plaster	EU-28	0.43619	kg/t cement	Base datos GaBi
Coke	EU-28	0.92007	kg/t cement	Base datos GaBi
Water (desalinated; deionised)	EU-28	0.00167	l/t cement	Base datos GaBi
Heat (steam) from natural gas	EU-28	0.07123	MJ/t cement	Base datos GaBi
Caustic soda	EU-28	1.189	kg/t cement	Base datos GaBi
Carbon activated	DE	0.00014	kg/t cement	Base datos GaBi
Electricity from solar thermal	EU-28	0.05247	kwh/tcement	Base datos GaBi
Process steam from biogas 90%	EU-28	0.00052887	GJ/tcement	Base datos GaBi
Thermal energy from biogas	EU-28	0.47599	kwh/tcemento	Base datos GaBi
Electricity from wind power	EU-28	0.01059	kwh/tcemento	Base datos GaBi
Thermal energy from natural gas	EU-28	0.06767	MJ/t cement	Base datos GaBi
Oxygen (liquid)	EU-28	0.39925	kg/t cement	Base datos GaBi
Oxygen (gaseous)	EU-29	0.14264	kg/t cement	Base datos GaBi
Methanol production	EU-28	0.497	kg/t cement	EFDB[a]
H_2 production water electrolysis	EU-28	2.412	kg/t cement	[38]
KOH	EU-28	1.94	kg/t cement	[39]

[a] Emission factor database del IPCC

Las tablas adjuntas (Tabla A6-Tabla A8) muestran el cálculo de la huella de carbono en kg CO_2 eq. para los escenarios A ,B y C del caso de estudio 1 ; es decir, considerando la comercialización de subproductos.

Tabla A6. Impacto ambiental escenario A, caso de estudio 1.

	ANÁLISIS DE IMPACTO CEMENTERA			
	Proceso	Cuna a puerta	Puerta a puerta	Total
Nombre identificativo		**PCG (kg CO_2/FU)**	**PCG (kg CO_2/FU)**	**GWP (kg CO_2/FU)**
Limestone	Cementera	18	0	18
Gypsum	Cementera	11	0	11
Mineral	Cementera	65	0	65
Coke	Cementera	73	0	73
Water	Cementera	0.29	0	0.29
Electricity grid mix	Cementera	68	0	68
Air	Cementera	0	0	0
Heat (steam) natural gas	Cementera	271	0	271
Thermal energy from (HFO)	Cementera	1.9	0	1.9
Ash,slag,filler	Cementera	0	0	0
NO_x	Cementera	0	0	0
CO_2	Cementera	0	672	672
Total		509	672	**1181**

Tabla A7. Impacto ambiental escenario B, caso de estudio 1.

	ANÁLISIS IMPACTO CAPTURA CO2 CON MEA +RE			
	Proceso	Cuna a puerta	Puerta a puerta	Total
Nombre identificativo		**GWP (kg CO_2/FU)**	**GWP (kg CO_2/FU)**	**GWP (kg CO_2/FU)**
Limestone	Cementera	18	0	18
Gypsum	Cementera	11	0	11
Mineral	Cementera	65	0	65
Coke	Cementera	73	0	73
Water	Cementera	3	0	3
KOH	RE	5	0	5
Electricity RE	RE	581	0	581
Electricity capture	Captura	3	0	3.5
Electricity conversion	RE	200	0	200
Electricity Distillation	RE	0	0	0
Heat	RE	523	0	523
MEA	Captura	3	0	3
Activated carbon	Captura	0	0	0
Caustic soda	Captura	0.1	0	0.1
CO_2	RE	0	41	41
Electricity grid mix	Cementera	68	0	68
Air	Cementera	0	0	0
Heat (steam) natural gas	Cementera	271	0	271
Heat (steam) natural gas	Captura	153	0	153
Thermal energy from HFO	Cementera	1.9	0	1.9
Ash,slag,filler	Cementera	0	0	0
Methanol	RE	-215	0	-215
H_2	RE	-230	0	-230
O_2	RE	-565	0	-565
Total		971	41	**1012**

Tabla A8. Impacto ambiental escenario C, caso de estudio 1.

	ANÁLSIIS DE IMPACTO CAPTURA CO_2 CON MEMEBRANAS + RE			
	Proceso	Cuna a puerta	Puerta a puerta	Total
Nombre identificativo		**PCG (kg CO_2/FU)**	**PCG (kg CO_2/FU)**	**PCG (kg CO_2/FU)**
Limestone	Cementera	18	0	18
Gypsum	Cementera	11	0	11
Mineral	Cementera	65	0	65
Coke	Cementera	73	0	73
Water	Cementera	3	0	3
KOH	RE	5	0	5
Electricity RE	RE	581	0	581
Electricity capture	Captura	14	0	14
Electricity conversion	RE	200	0	200
Electricity distillation	RE	0	0	0
Heat distillation	RE	523	0	523
N_2	Captura	0	0	0
O_2	Captura	12	0	12
Ar	Captura	0	0	0
Electricity grid mix EU-28	Cementera	68	0	68
Air	Cementera	0	0	0
Heat (steam) natural gas	Cementera	271	0	271
Thermal energy from (HFO)	Cementera	1.9	0	1.9
Ash,slag,filler	Cementera	0	0	0
CO_2	RE	0	41	41
Methanol	RE	-215	0	-215
H_2	RE	-230	0	-230
O_2	RE	-565	0	-565
Total		825	41	**878**

La tabla adjunta (Tabla A9) muestra las condiciones de voltaje, densidad de corriente y eficiencia Faradaica para el producto deseado entre otras características para el proceso de RE, así como de los materiales de la infraestructura.

Tabla A9. Entradas técnicas en el proceso de RE procedente de [7]

Parámetros	**Valor**	**Unidad**
Escenario	Futuro	
Producto principal, P1	CH_3OH	
Densidad de corriente	693	mA/cm^2
Voltaje de la celda	2.34	V
Eficiencia faradaica H_2	54.3%	%
Eficiencia faradaica CH_3OH	45.7%	%
Conversión por paso de CO_2	50.0%	%
Concentración del producto P1	40%	%wt
Tiempo de vida planta	20.00	años
Tiempo de vida cátodo	3.00	años
Tiempo de vida ánodo	7.00	años
Tiempo de vida membrana	10.00	años
Sal catolito	KOH	-
Sal anolito	KOH	-