



industriales
etsii

Escuela Técnica
Superior
de Ingeniería
Industrial

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Industrial

Estrategias para reducir las emisiones de CO₂ en la producción de materiales de construcción

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

Autor: Ana Cánovas Cabrera
Director: Ramón Francisco Pamies Porras
Codirector: Susana García Sanfélix
Pilar Hidalgo Torrano



Universidad
Politécnica
de Cartagena

Cartagena, 9 de septiembre de 2021

AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIA

A mis directores del TFG, Ramón Pamies y Susana García, por su profesionalidad y apoyo incondicional, que sin su ayuda no hubiera sido posible la correcta realización de este trabajo. Pero, sobre todo, por la confianza que depositaron en mí desde el minuto uno. A mi codirectora, y a su vez directora de prácticas, Pilar Hidalgo, por la oportunidad que me ofreció de poder trabajar con ella, por orientarme y ayudarme en mi primera experiencia laboral. Gracias por tu predisposición y dedicación.

A Miguel, por su apoyo incondicional durante toda la etapa universitaria, por la confianza y cariño transmitida en todo momento.

Y por último y más importante a toda mi familia, por su cariño y apoyo durante todos estos años. En especial, gracias a mis padres y mi hermana por estar en los momentos más difíciles. Sin ellos no hubiese sido posible llegar hasta aquí.

Índice

1. Introducción	9
1.1 Motivaciones del estudio.....	9
1.2 Cambio climático.....	10
1.3 Tecnologías de captura y almacenamiento de CO ₂	16
1.4 Industria cementera	21
2. Objetivos.....	30
3. Análisis de la tecnología de captura de CO ₂	31
3.1 Descripción detallada del sistema de captura.....	31
3.2 Técnicas para aumentar el volumen de CO ₂	41
4. Usos del CO ₂ capturado por la microturbina en materiales de construcción y otros productos.....	51
4.1. Proceso de inyección de CO ₂ en el hormigón: tecnología CarbonCure.	52
4.2 Tecnología CarbiCrete	63
4.3. Proceso CarbonBuilt	65
4.4. Tecnología Solidia.....	66
4.5 Orbix.....	67
4.6. Proceso Carbon8	73
5. Implementación de tecnologías específicas para un caso concreto	75
6. Resumen y conclusiones.....	81
7. Bibliografía.....	84

Índice de figuras

Figura 1.2.1 Cambio de la temperatura de la superficie global en relación con las temperaturas promedio de 1951-1980 [3].	11
Figura 1.2.2: Extensión mensual promedio del hielo marino de Ártico cada septiembre desde 1979, derivada de observaciones satélites [3].	11
Figura 1.2.3 Cambio en el nivel del mar desde 1993 según lo observado por satélites [3].	12
Figura 1.2.4: Niveles de CO ₂ medidos en el Observatorio Manua Loa, Hawaii, con el ciclo estacional promedio eliminado [3].	12
Figura 1.2.5: Emisiones mundiales de CO ₂ relacionadas con la energía, 1900-2020 [6].	13
Figura 1.2.6: Emisiones directas de CO ₂ de la industria en el escenario de desarrollo sostenible, 2000-2030 [8].	14
Figura 1.2.7: Emisiones de CO ₂ por sector, España 1990-2018 [10].	15
Figura 1.3.1: Planta piloto de captura de CO ₂ de Elcogás [12].	17
Figura 1.3.2: Esquema tecnologías de captura de CO ₂ [12].	18
Figura 1.3.3: Construcción de un gaseoducto de transporte. Cortesía de Enagás [14].	19
Figura 1.3.4: Instalaciones CCUS a gran escala en todo el mundo en funcionamiento y en desarrollo, 2010-2020 [16].	21
Figura 1.4.1: Esquema proceso de fabricación del cemento [21].	23
Figura 1.4.2: Producción mundial de cemento y energía fósil hasta 2016 [22].	24
Figura 1.4.3: Producción mundial de cemento, 2010-2019 [24].	25
Figura 1.4.4: Proceso de captura de CO ₂ mediante absorción química con amina [25].	26
Figura 1.4.5: Microturbina Capstone [26].	27
Figura 1.4.6: Vista frontal [26].	28
Figura 1.4.7: Vista trasera [26].	28
Figura 1.4.8: Elementos del sistema de la microturbina C200 y el sistema de aceite térmico [25].	29

Figura 3.1.1: Componentes funcionales de la microturbina C200 [27].	32
Figura 3.1.2: Ciclo de Brayton (Real: azul e Ideal: negro) [28].	33
Figura 3.1.3: Ciclo regenerativo de la microturbina [28].	34
Figura 3.1.4: Componentes mecánicos microturbina CAPSTONE C200 [27].	35
Figura 3.1.5: Única pieza móvil (eje del turbogenerador) [29].	35
Figura 3.1.6: Localización cojinetes de aire en el eje del turbogenerador [30].	36
Figura 3.1.7: Dimensionado de los cojinetes de aire patentados [31].	36
Figura 3.1.8: Localización de los cojinetes de aire [31].	37
Figura 3.1.9: Estructura de la microturbina Capstone [32].	38
Figura 3.1.10: Independiente (Modo isla); Conectada a la red eléctrica externa; Modo dual [30].	39
Figura 3.1.11: Generación eléctrica de la microturbina [30].	39
Figura 3.1.12: Módulo de recuperación de energía (HRM) [30].	40
Figura 3.1.13: Proceso de recuperación de calor en la microturbina para producir agua caliente [30].	41
Figura 3.2.1: Eficiencias eléctricas para diferentes ciclos en los casos de ciclo combinado de gas natural y captura y almacenamiento de carbono [25].	43
Figura 3.2.2: Esquema de un ciclo combinado de gas natural con captura de CO ₂ y recirculación de gases [25].	45
Figura 3.2.3: Turbina de gas de ciclo abierto simple [34].	46
Figura 3.2.4: HRSG típico tamaño grande [35].	47
Figura 3.2.5: Partes de la turbina de vapor [37].	47
Figura 3.2.6: Fábrica de Lafarge-Holcim en Carboneras [39].	48
Figura 3.2.7: Fábrica de Lafarge-Holcim en Carboneras (España) [40].	49
Figura 4.1.1: Caja de control y caja de válvulas conectado al tanque de CO ₂ presurizado [49].	54
Figura 4.1.2: Resultados de la prueba ASTM C403 [50].	55
Figura 4.1.3: Asentamiento del hormigón [50].	56
Figura 4.1.4: Contenido de aire en el hormigón [50].	56
Figura 4.1.5: El pH de la solución [50].	57

Figura 4.1.6: Resultados del ensayo de permeabilidad rápida al cloro (ASTM C1202) a los 28 días [50].	57
Figura 4.1.7: Resultados de la resistividad superficial (AASHTO T358) [50].	58
Figura 4.1.8: Resultados de la corrosión total (ASTM G109) [50].	58
Figura 4.1.9: Resultados del potencial de media célula (ASTM C876) [50].	59
Figura 4.1.10: Resultados de la prueba ASTM C157 [50].	59
Figura 4.1.11: Resultados de la prueba ASTM C779 [50].	60
Figura 4.1.12: Durabilidad de congelación-descongelación [50].	61
Figura 4.1.13: Características del aire ocluido del hormigón elaborado con CO ₂ [50].	61
Figura 4.1.14: Ganancias de resistencia en las etapas temprana y tardía [49].	62
Figura 4.1.15: Influencia del CO ₂ en las resistencias a la compresión [49].	62
Figura 4.2.1: Cámara de absorción especializada. Proceso de curado con CO ₂ [54].	64
Figura 4.4.1: Composición del hormigón y cemento producido por Solidia [56].	66
Figura 4.4.2: Procesos de obtención del hormigón de cemento Portland y hormigón Solidia [56].	67
Figura 4.5.1: Carbinox [59].	69
Figura 4.5.2: Fillinox [60].	69
Figura 4.5.3: Stinox [61].	70
Figura 4.5.4: Piedra Azul SprimontBlue [62].	71
Figura 4.5.5: Caliza [63].	71
Figura 4.5.6: Bloques Orbix [64].	72
Figura 4.5.7: Arenisca / Grès [65].	73
Figura 4.6.1: Contenedor de CO ₂ en una planta de cemento [67].	74
Figura 5.1: Trayecto Lafarge-Holcim-Cementos La Cruz [39].	76
Figura 5.2: CEMEX, San Vicente del Raspeig- Cementos La Cruz [39].	77
Figura 5.3: Planta de Cementos La Cruz (Murcia) [39].	78

Índice de tablas

Tabla 1.2.1: Producción mundial en el primer trimestre de 2020 [7].	13
Tabla 4.2.1: Resumen ventajas de CMU de CarbiCrete [52].	65

Glosario

CaCO ₃	
Carbonato de calcio	52
CCS	
Carbon, capture & Storage	51
CCUS	
Captura, utilización y almacenamiento de carbono	20
Carbon, capture, use & storage	51
CH ₄	
Metano	10
CMU	
Unidades de mampostería de hormigón	63
CO	
Monóxido de carbono.....	37
CO ₂	
Dióxido de carbono	9
COMP	
Compresor	45
CRH	
Grupo líder mundial de materiales de construcción.....	74
EFC	
Ciclo de turbina de gas con combustión externa	42
EGR	
Recirculación de gases de escape	42
EvGT	
Humidificación en la turbina de gas	41
GEI	
Gases de efecto invernadero	9
HRM	
Módulo de recuperación de energía	40
HRSG	
Generador de vapor de recuperación de calor	41
Intercambiador de calor	44
MEA	
Monoetanolamina.....	25

N ₂ O	
Óxido nitroso	10
NO ₂	
Dióxido de nitrógeno	37
OFICEMEN	
Agrupación de fabricantes de cemento de España	9
RCDs	
Residuos de construcción y demolición	51
RSUs	
Residuos sólidos urbanos	51
SCMs	
Materiales cementantes suplementarios	51
S-EGR	
Reciclaje selectivo de gases de escape con una membrana	42
SFC	
Ciclo de turbina de gas con combustión suplementaria.....	41
TOHR	
Sistema de recuperación de calor de aceite térmico	29
UCLA	
Universidad de California, Los Ángeles	65
XPRIZE	
Organización sin fines de lucro que diseña y gestiona concursos públicos destinados a fomentar el desarrollo tecnológico.....	65

1. Introducción

1.1 Motivaciones del estudio

El presente trabajo “Estrategias para reducir las emisiones de CO₂ en la producción de materiales de construcción” surgió para dar respuesta a la gran problemática que supone actualmente el aumento considerable de los niveles de CO₂ en la atmósfera, conllevando diversos problemas climáticos. En relación con dichos problemas climáticos, es fundamental el problema de la acumulación de los gases de efecto invernadero (GEI). Esta preocupación relacionada con los GEI ha sido motivo de diversos estudios, desarrollándose diferentes tecnologías que reducen de manera notable las emisiones de CO₂ y que, en los últimos años, han tenido una gran demanda. Dichas emisiones de CO₂ proceden de numerosas fuentes, pero se ha observado que uno de los grandes contribuyentes es la industria cementera, siendo responsable de alrededor del 7-8% de todas las emisiones industriales de CO₂. Las dos fuentes principales de emisiones de CO₂ durante la producción del cemento son, por una parte, la calcinación generada por el calentamiento de las materias primas en el horno teniendo lugar la descarbonatación de la piedra caliza. Dicha reacción química origina el 60-65 % de las emisiones de CO₂ (emisiones de proceso). El resto de las emisiones proceden de los combustibles necesarios para calentar el horno (emisiones de combustión).

Esta preocupación ha generado una sinergia entre dos grupos de investigación, el Departamento de Ingeniería Mecánica, Materiales y Fabricación de la Universidad Politécnica de Cartagena y el grupo de Tecnología de Materiales de Østfold University College, y una empresa privada, Cementos La Cruz (Murcia). Esta unión ha posibilitado el desarrollo de un proceso de transferencia tecnológica entre las diversas instituciones. Dicha transferencia sería desde los dos grupos de investigación a la empresa, en donde la empresa se tiene que ir adaptando a los distintos requisitos derivados del inicio de un nuevo proyecto con el fin de mejorar el desarrollo de su actividad.

Actualmente, la industria cementera española se ha fijado como objetivo para 2030 disminuir un 43 % las emisiones generadas durante todo el proceso. Esto se ve reflejado en la “Hoja de ruta de la industria cementera española para alcanzar la neutralidad climática en 2050” expuesta por la Agrupación de fabricantes de cemento de España (OFICEMEN) [1]. En relación con el objetivo marcado, Cementos La Cruz mantiene constante su compromiso con el medio ambiente, incorporando un plan estratégico de innovación. Entre los proyectos más recientes, cabe destacar el estudio de nuevos productos que poseen la particularidad de ser descontaminantes, resilientes y a su vez, presentar un diseño ‘ecoeficaz’. Dichos productos tienen como objetivo principal

contribuir con diferentes soluciones tecnológicas para los principales retos relacionados con el cambio climático y la transformación hacia una economía circular. Asimismo, otra de las investigaciones que han llevado a cabo es el desarrollo de nuevos productos basados en materiales cementantes con baja huella de carbono, geopolímeros, dando lugar a productos que ofrecen unas ventajas técnicas relevantes respecto a los productos convencionales [2].

1.2 Cambio climático

El cambio climático es una emergencia global a la que se enfrenta la humanidad. Su presencia es evidente debido a la variabilidad de las condiciones atmosféricas analizadas globalmente desde la década de 1950. Algunos efectos que lo demuestran son el aumento de la temperatura global, produciéndose un aumento de 1.02 °C desde 1880. El año 2020 registró los mismos datos que 2016 siendo el año más cálido desde que empezó el mantenimiento de registros en 1880 (figura 1.2.1). Otro de los fenómenos a destacar es la disminución del hielo Ártico, siendo cada vez más considerable. Actualmente, el hielo marino Ártico está reduciéndose a una tasa de 13.1 % por década (figura 1.2.2). Otro de los factores más preocupantes es el aumento del nivel del mar promedio global siendo aproximadamente de 178 mm en los últimos 100 años (figura 1.2.3) [3].

Una vez mencionados los efectos más destacados, cabe recalcar una de las principales causas de dichos fenómenos que es el aumento de la concentración de los gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera. Los GEI principales son el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄), el óxido nitroso (N₂O) y los halocarbonos (SF₆, CFC) [4].

Desde hace casi dos siglos, la actividad humana ha incrementado la concentración atmosférica de CO₂ en prácticamente el 50 % por encima de los niveles preindustriales encontrados desde mediados del siglo XIX. Estas cifras son mayores de lo que hubiera ocurrido de forma natural durante un tiempo de 20.000 años, desde el Último Máximo Glacial hasta 1850, se ha pasado de 185 ppm a 280 ppm (figura 1.2.4). Si no se tuviera en cuenta la intervención humana, la cantidad de CO₂ se mantendría constante en todos los ecosistemas, con posibles variaciones estacionales de concentración como consecuencia de la fotosíntesis de las plantas. Las emisiones antrópicas de CO₂ se deben a la quema de combustibles fósiles, la deforestación y el uso intensivo de las

tierras agrícolas [4]. Cuando se habla de emisiones antrópicas se refiere a todas aquellas emisiones generadas por el hombre. Normalmente, se hace una diferenciación dependiendo del sector de actividad o tipo de emisión (fija o móvil) [5].

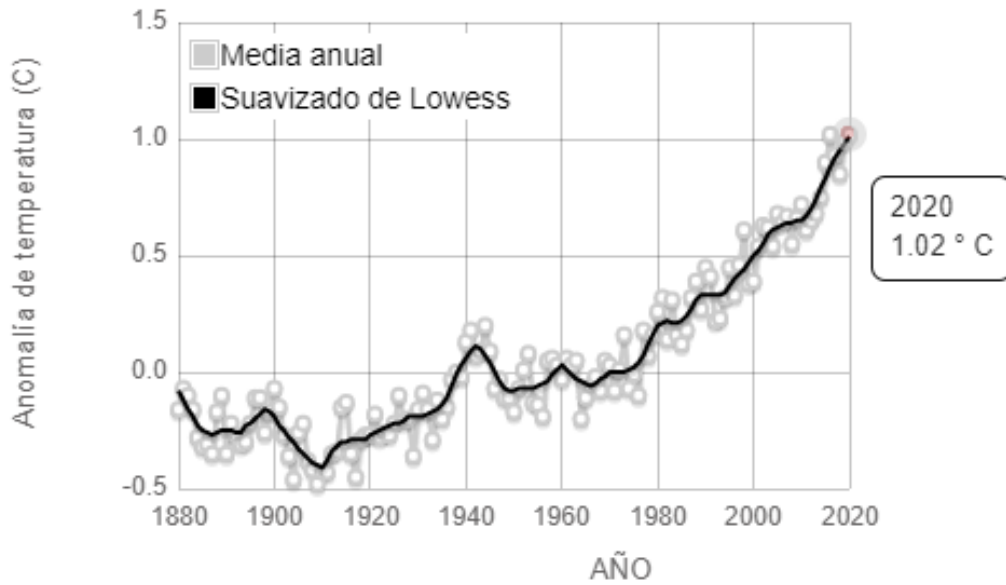


Figura 1.2.1 Cambio de la temperatura de la superficie global en relación con las temperaturas promedio de 1951-1980 [3].

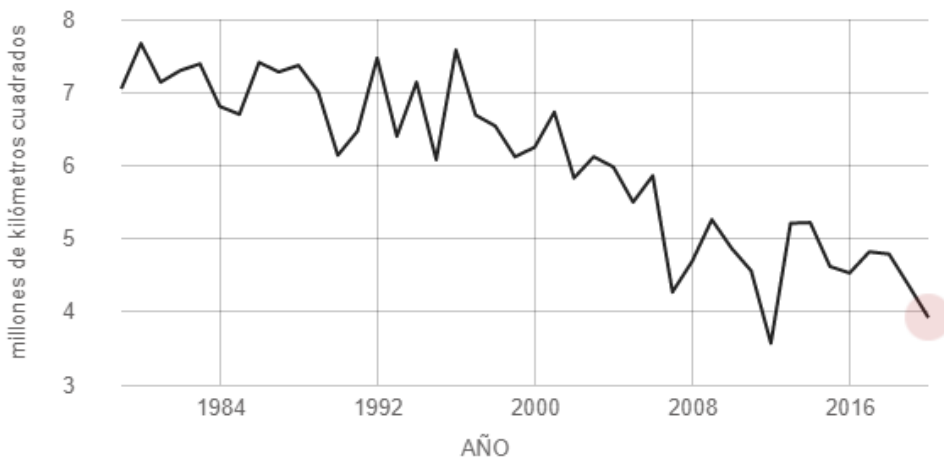


Figura 1.2.2: Extensión mensual promedio del hielo marino de Ártico cada septiembre desde 1979, derivada de observaciones satélites [3].

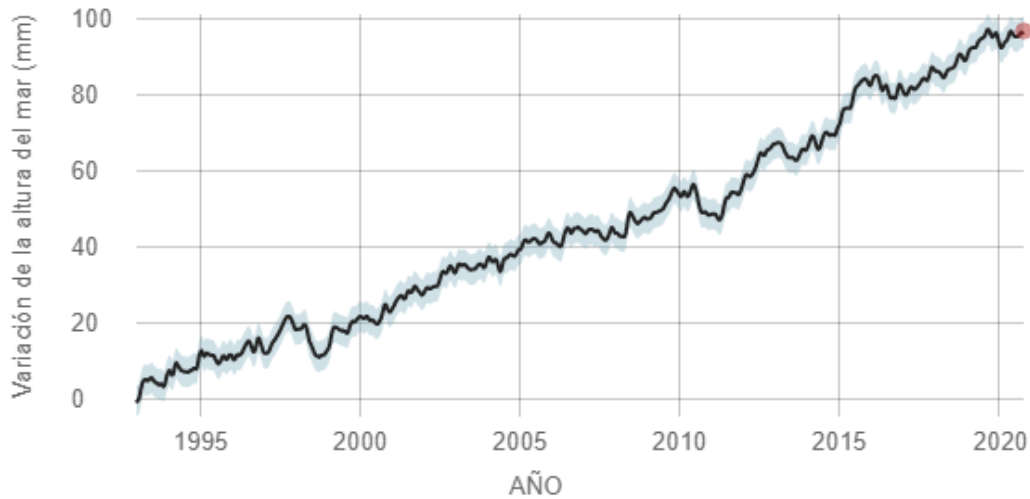


Figura 1.2.3 Cambio en el nivel del mar desde 1993 según lo observado por satélites [3].

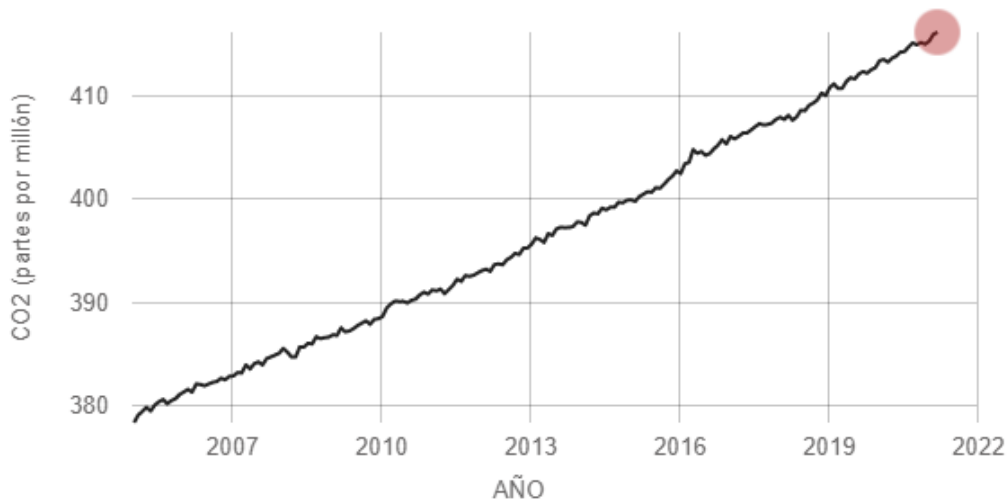


Figura 1.2.4: Niveles de CO₂ medidos en el Observatorio Manua Loa, Hawaii, con el ciclo estacional promedio eliminado [3].

Por otra parte, debido en gran parte a la crisis del Covid-19, se espera que las emisiones globales de CO₂ disminuyan en un 8%, o casi, 2.6 gigatoneladas (Gt), a niveles de hace 10 años. Dicha disminución interanual sería la más grande de la historia, seis veces mayor que la reducción récord anterior de 0.4Gt en 2009, ocasionada por la crisis financiera mundial, y dos veces mayor que el total combinado de todas las reducciones anteriores desde el final de la Segunda Guerra Mundial **[6]**. Este hecho demuestra la importancia de la intervención humana y la actividad industrial en las emisiones de GEI, siendo responsables del aumento considerable de dichas emisiones.

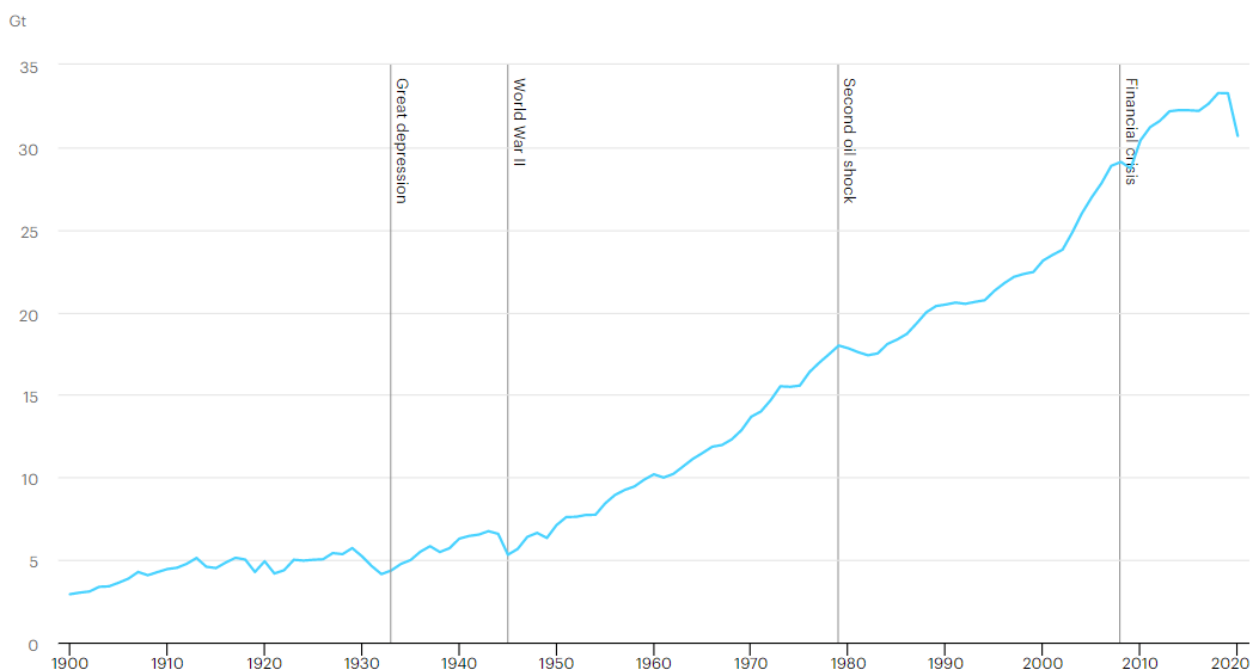


Figura 1.2.5: Emisiones mundiales de CO₂ relacionadas con la energía, 1900-2020 [6].

La crisis del Covid-19 ha sido protagonista de una importante desaceleración de la actividad industrial a nivel mundial. Se proyectaba que el crecimiento de la demanda de ciertos materiales a granel, como el cemento, se desaceleraría en 2020 sin tener en cuenta la crisis, pero debido a la interrupción de la construcción y de las demás actividades ha tenido un fuerte efecto.

En general, la producción industrial fue menor en el primer trimestre de 2020 que en el primer trimestre de 2019 [7].

PRODUCCIÓN PRIMER TRIMESTRE 2020	MUNDO	CHINA	INDIA	EU-28	USA
INDUSTRIA	-5,40%	-9,40%	-3,30%	-5,80%	-2,10%
ACERO	-1,40%	1,20%	-5,30%	-10%	-1%
CEMENTO	-4,40%	-23,90%	-4,90%	-0,50%	7,70%
PETROQUÍMICOS	-2,70%	-5%	-11,70%	-4,40%	-0,20%
FABRICACIÓN	-9,20%	-7,70%	0,50%	-5,60%	-4,30%

Tabla 1.2.1: Producción mundial en el primer trimestre de 2020 [7].

Emisiones de CO₂

Emisiones directas

Las emisiones industriales directas de CO₂, engloba las emisiones de procesos, descendieron un 0.6 % a 8.5 GtCO₂ en 2018 (24% de las emisiones globales), siendo semejante a la tendencia de emisiones de los últimos años. Dicha disminución se dio en las industrias no intensivas de energía [8].

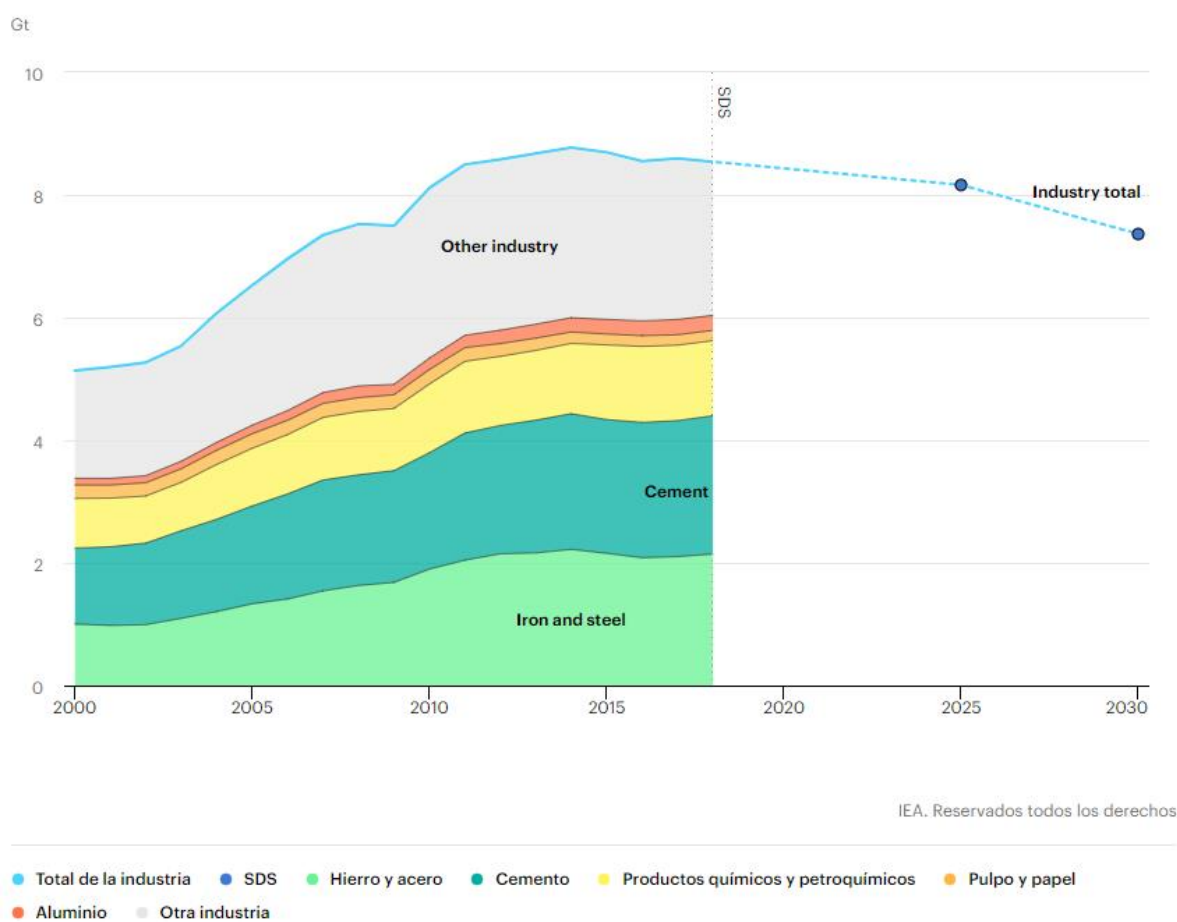


Figura 1.2.6: Emisiones directas de CO₂ de la industria en el escenario de desarrollo sostenible, 2000-2030 [8].

Se estima que en el año 2020 se produjeron 271,5 millones de toneladas de emisiones brutas de CO₂ equivalente, lo que implica una reducción de un 13,7% con respecto al año 2019. Concretamente, disminuyó un 6,4 % respecto a 1990 y un 38,6 % respecto al año 2005. Este descenso se debe al incremento de la generación eléctrica mediante el uso de fuentes de energía renovable y la decadencia en el empleo del carbón.

Asimismo, hay que tener en cuenta las restricciones en la movilidad y actividad relacionadas con la pandemia del Covid-19 que se implantaron.

Si realizamos una clasificación de las emisiones por los diferentes sectores, la mayor cantidad de emisiones se corresponden con transporte siendo responsable del 27,7 % del total en términos de CO₂ equivalente. Tras ello nos encontramos con la industria (21,4 %), la ganadería y agricultura en su conjunto (14,1 %), la generación de electricidad (10,3%), el consumo de combustible en los sectores residencial, comercial e institucional (8,2 %), y los residuos (5,1 %).

Pese a que en 2020 la generación de electricidad disminuyó un 3,6 %, se observó que las emisiones de GEI de este sector sufrieron una disminución mucho más brusca del 34,9 %. Los motivos principales de dicha reducción fueron el aumento del uso de energías renovables en la generación (12,9 % en comparación al año anterior) y la progresiva disminución en el empleo de carbón, ya que supuso una baja de algo más del 60 % con respecto a 2019 [9].

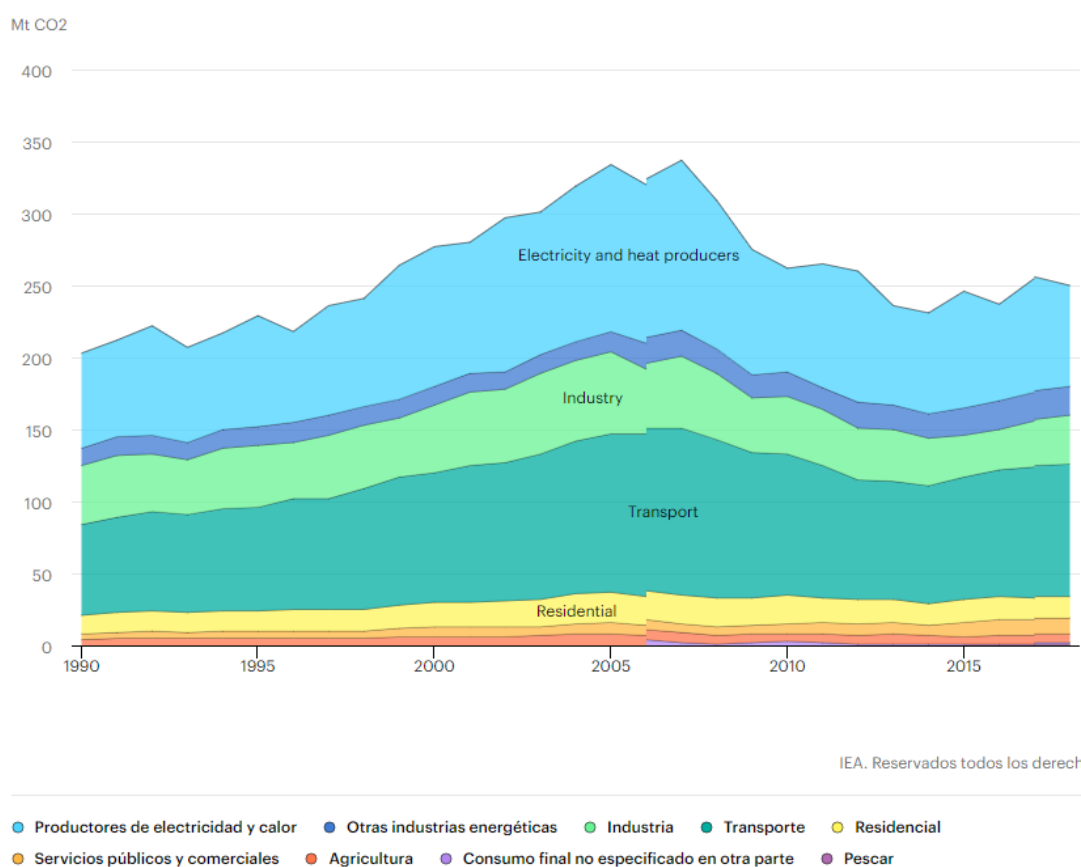


Figura 1.2.7: Emisiones de CO₂ por sector, España 1990-2018 [10].

1.3 Tecnologías de captura y almacenamiento de CO₂

Los informes sobre el cambio climático que han ido apareciendo en los últimos años han provocado la preocupación de las principales potencias mundiales debido al incremento de las emisiones de los gases de efecto invernadero. Es por ello que ha surgido un gran interés en el desarrollo de tecnologías que sean capaces de frenar esta escalada. En recientes investigaciones se han desarrollado nuevos métodos de captura de dióxido de carbono, sobre todo en los sectores industriales de ámbito energético, responsables de la mitad de las emisiones de CO₂ en la UE [11].

La estrategia principal es colocar estos sistemas de captura y almacenamiento de CO₂ (CAC) en aquellos grandes puntos de emisión del gas, y de forma general, suelen implicar una pérdida significativa de eficiencia para el proceso. Dentro de estas tecnologías, el proceso de captura en sí representa en torno al 70 % en términos de coste total suponiendo un gran desafío tecnológico y económico.

En resumen, estos sistemas consisten en la separación del CO₂ producido hasta lograr una corriente de gases con una elevada cantidad de CO₂. Una vez obtenida dicha corriente se inicia, debe ser comprimida para su posterior hasta el lugar donde se realice su almacenamiento definitivo. La captura puede utilizarse en centrales eléctricas de carbón y gas natural, en refinerías, en cementeras o incluso en plantas químicas.

Captura de CO₂

Como se ha dicho anteriormente, la captura de dióxido de carbono se fundamenta en separar este gas del resto que se generan en la combustión. Las industrias en las que mayor cantidad de CO₂ se genera son las refinerías de petróleo, las fábricas de cemento, centrales térmicas e industria siderúrgica. Ya separado, se realiza el transporte e inyección en profundas formaciones geológicas, donde debe mantenerse secuestrado de forma segura durante un tiempo indefinido [12].

Dicha captura es indispensable para llevar a cabo su compresión hasta que se alcancen unas condiciones similares a la del agua líquida para que sea posible la viabilidad técnico-económica de las fases de transporte, almacenamiento y/o aplicaciones [12].



Figura 1.3.1: Planta piloto de captura de CO₂ de Elcogás [12].

Actualmente, este tipo de tecnologías se pueden clasificar en tres grandes grupos: postcombustión, precombustión y oxicomcombustión [12]. Los factores principales que influyen en la elección del procedimiento son la presión del gas, concentración de CO₂ y el tipo de combustible empleado. A continuación, se desarrollarán los detalles que caracterizan a cada uno de estos métodos [11].

Postcombustión: este tipo de tecnologías se disponen en las instalaciones tras la inflamación del combustible. De esta manera se parte de una corriente con baja concentración de dióxido de carbono, pero que tiene un elevado caudal de otros gases de combustión. Por lo tanto, la principal desventaja de estos sistemas es que consumen una cantidad de energía considerable. Estos gases incluyen en su mayor medida nitrógeno del aire que se emplea en dicho proceso. La absorción química es la opción de este tipo que está más próxima a ser comercializada. En este caso, existe un paso de una corriente de gas procedente de la combustión por un sorbente líquido contenido en una columna que capta el CO₂. Consecutivamente, esta corriente regenerada, libera el CO₂ absorbido para las posteriores etapas de transporte y almacenamiento. Una vez que el sorbente líquido queda liberado de CO₂, vuelve al proceso mediante una corriente de recirculación [12].

Precombustión: estos sistemas se sitúan en las instalaciones antes de realizar la combustión del combustible [13]. En este caso se combinan con procesos de

gasificación de carbón / residuos. La gasificación del combustible con oxígeno genera un gas rico en monóxido de carbono e hidrógeno. Posteriormente, el CO se hace reaccionar con agua produciendo más H₂ y más de CO₂. El hidrógeno generado se aprovecha para generar electricidad mediante una turbina, o bien es almacenado para usos posteriores. Por otra parte, el CO₂ se separa para ser transportado y almacenada. La ventaja más destacable de esta opción es que la concentración de CO₂ es mucho mayor antes de la separación y, aparece a presión elevada siendo de utilidad en otros métodos de separación con mayor eficiencia [13].

Oxicombustión: en este tipo de tecnologías, se lleva a cabo la combustión con un comburente con elevada presencia en O₂ y muy bajo contenido de N₂, lo que hace que la cantidad de CO₂ en la corriente de gas resultante sea muy elevada, facilitando el confinamiento [13]. En este caso se requiere que haya producción de oxígeno, al igual que el anterior proceso, y ciertas condiciones que permitan la combustión de manera óptima, pero pese a ello es una tecnología que no debe plantear demasiados impedimentos en la realización práctica [12].

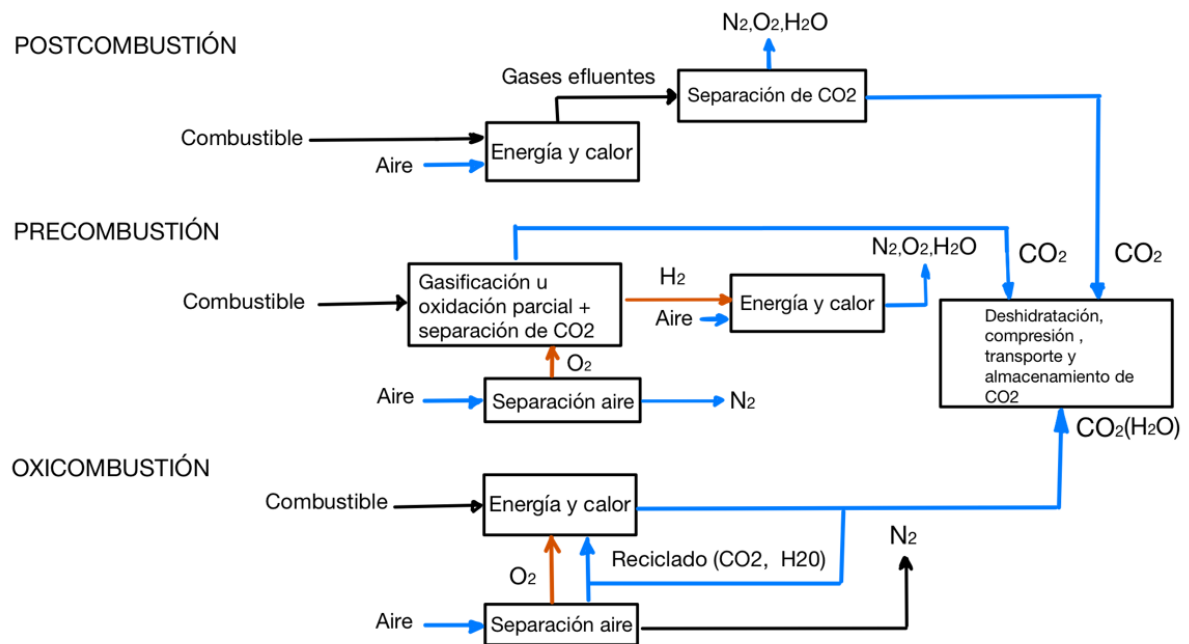


Figura 1.3.2: Esquema tecnologías de captura de CO₂ [12].

Transporte de CO₂

Una vez capturado el CO₂ en el foco emisor y acondicionado a unos parámetros de salida correctos en temperatura, composición y presión, comienza la fase de transporte hasta su almacenamiento.

Posteriormente a la separación de gases generados en la combustión, el CO₂ extraído se comprime hasta que se consiga alcanzar unas condiciones similares a las del estado líquido.

Después, se llevará a cabo su transporte mediante tuberías y, en el caso de que la generación del gas esté alejada del área de almacenamiento, mediante buques.

En la actualidad se dispone de más de 5000 kilómetros de tuberías que transportan dióxido de carbono [14].



Figura 1.3.3: Construcción de un gaseoducto de transporte. Cortesía de Enagás [14].

Almacenamiento de CO₂

Una vez que el CO₂ se ha capturado y transportado llega el momento de la etapa de almacenamiento en unas condiciones parecidas al estado líquido, caracterizadas por su alta densidad frente al CO₂ gaseoso. Con la finalidad de llevar a cabo el almacenamiento en dichas condiciones, el almacenamiento geológico se produce en una formación geológica profunda –superior a 800 metros- y adecuada. Cuando se habla de adecuada se refiere a roca muy porosa y permeable, llamada roca almacén y a su vez, se encuentra recubierta por una roca sello que dificulta su desplazamiento hacia la

superficie, consiguiendo el aislamiento deseado puesto que la roca absorbe el CO₂ líquido en sus poros [15]. El CO₂ inyectado en la formación rocosa calcárea reacciona con los elementos alcalinos o alcalinotérreos de la misma (Ca, Mg, Na, K) formando los carbonatos correspondientes.

Captura, utilización y almacenamiento de carbono (CCUS)

La captura, utilización y almacenamiento de carbono (CCUS) es una destacada tecnología de disminución de emisiones que se pueden aplicar en todo el sistema energético. Las tecnologías CCUS conllevan la captura de CO₂ de la combustión de combustibles o procesos industriales, el transporte de este CO₂ a través de tuberías o barcos, y su uso como recurso para crear productos, servicios valiosos o su almacenamiento permanente a gran profundidad en formaciones geológicas.

Dichas tecnologías CCUS otorgan también la base para la eliminación de carbono o “emisiones negativas” cuando el CO₂ deriva directamente de la atmósfera o de procesos biológicos [16].

El impulso de las CCUS está creciendo de una manera considerable después de años en declive. Se han comunicado planes para más de 30 nuevas instalaciones CCUS integradas desde 2017. Se encuentran en EEUU y la UE la gran mayoría, aunque se están planeando diferentes proyectos en Australia, Corea China, Nueva Zelanda y Oriente Medio. Si dichos proyectos perpetuaran, la cantidad de capacidad global de captura de CO₂ se triplicaría, en torno a los 130Mt por año [16].

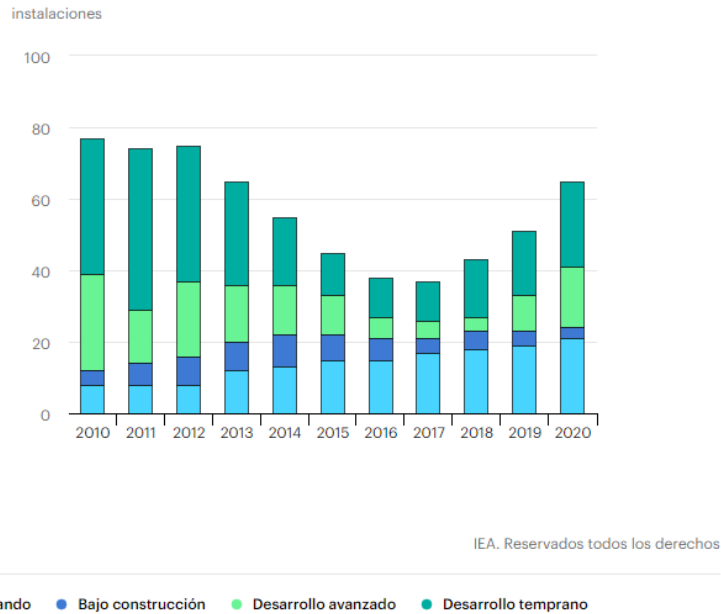


Figura 1.3.4: Instalaciones CCUS a gran escala en todo el mundo en funcionamiento y en desarrollo, 2010-2020 [16].

1.4 Industria cementera

La industria cementera es responsable de alrededor del 5% de todas las emisiones industriales de CO₂. Las dos fuentes principales de emisiones de CO₂ durante la producción del cemento son, por una parte, la calcinación generada por el calentamiento de las materias primas en el horno teniendo lugar la descarbonatación de la piedra caliza. Dicha reacción química origina la mayor parte de las emisiones de CO₂ (entre el 60 y 65 %), generando lo que se conoce como emisiones del proceso. El resto de las emisiones se denominan emisiones de combustión y proceden de los combustibles empleado para calentar el horno [17].

El cemento es un conglomerante hidráulico. Este material de naturaleza inorgánica es finamente molido para posteriormente ser amasado con agua, formando una pasta. Es en este medio en el que ocurre el fenómeno de fraguado o endurecimiento debido a una serie de reacciones y procesos de hidratación y que, una vez endurecido mantiene su resistencia mecánica y estabilidad incluso bajo el agua. Es el conglomerante de mayor uso en la fabricación del hormigón, y, por lo tanto, el más utilizado en el sector de la construcción [18].

Está compuesto principalmente por clínker y yeso. Puede presentar otros tipos de elementos como calizas, cenizas volantes, puzolana natural o escoria de alto horno,

dependiendo de las especificaciones requeridas [18]. La producción de cemento Portland se realiza en base a lo que se conoce como clínker. Este producto se encuentra con una morfología de gránulos o pequeñas bolas, de aproximadamente entre 5 y 25 mm. Los percursores del clínker son la piedra caliza, la arcilla y otros minerales que se calcinan a temperaturas superiores a los 1400 °C en considerables hornos rotatorios. Estos gránulos son triturados y mezclados con diferentes adiciones permitiendo la elaboración de los diferentes tipos de cemento que se utilizarán después en la producción del hormigón [19].

La fabricación del cemento es un proceso complejo debido a que es necesario el control de innumerables reacciones químicas. Dicho proceso productivo se puede dividir en las siguientes fases. Primero, obtener y preparar las materias primas para después extraer y clasificar el material que será triturado hasta conseguir que el tamaño de los gránulos sean los adecuados para el producto de molienda. El material triturado se aglomera en capas semejantes con el fin de ser seleccionadas de manera controlada. La pre-homogeneización posibilita que haya una dosificación apta de los diferentes componentes disminuyendo su variabilidad. Posteriormente, estos materiales se muelen para disminuir su tamaño y ayudar de esta manera a su cocción en el horno. Por una parte, por la parte superior de la torre se introduce la materia prima previamente molida. Ésta desciende mientras que los gases procedentes del horno ascienden a contracorriente precalentando el crudo, alcanzando los 1000°C antes de acceder al horno. A medida que este polvo avanza por el horno, la temperatura va incrementándose hasta alcanzar los 1500°C, originándose el clínker mediante una serie de complicadas reacciones químicas. El horno tiene una llama principal que arde a 2000°C que permite alcanzar la temperatura necesaria a la que las materias primas son cocidas y se produzca el clínker [20].

Al final del horno ocurre la salida del clínker que se introduce en el enfriador, con el fin de enfriar desde de los 1400 °C a 100 °C inyectando aire frío del exterior. El aire producido en dicho dispositivo se introduce de nuevo en el horno favoreciendo de esta manera la combustión y, por consiguiente, mejorando la eficiencia energética del proceso [20].

Para finalizar el proceso, se le añade yeso y otras adiciones al clínker dentro de lo que se conoce como molinos de cemento, que pueden ser de dos tipos: rodillos o bolas. Este último consta de un tubo de gran tamaño que rota sobre sí mismo e incluye bolas de acero en su interior. La trituración del clínker y sus adiciones ocurre al colisionar estas

bolas entre sí cuando durante la rotación del molino, obteniendo el cemento en forma de polvo fino y homogéneo [20].

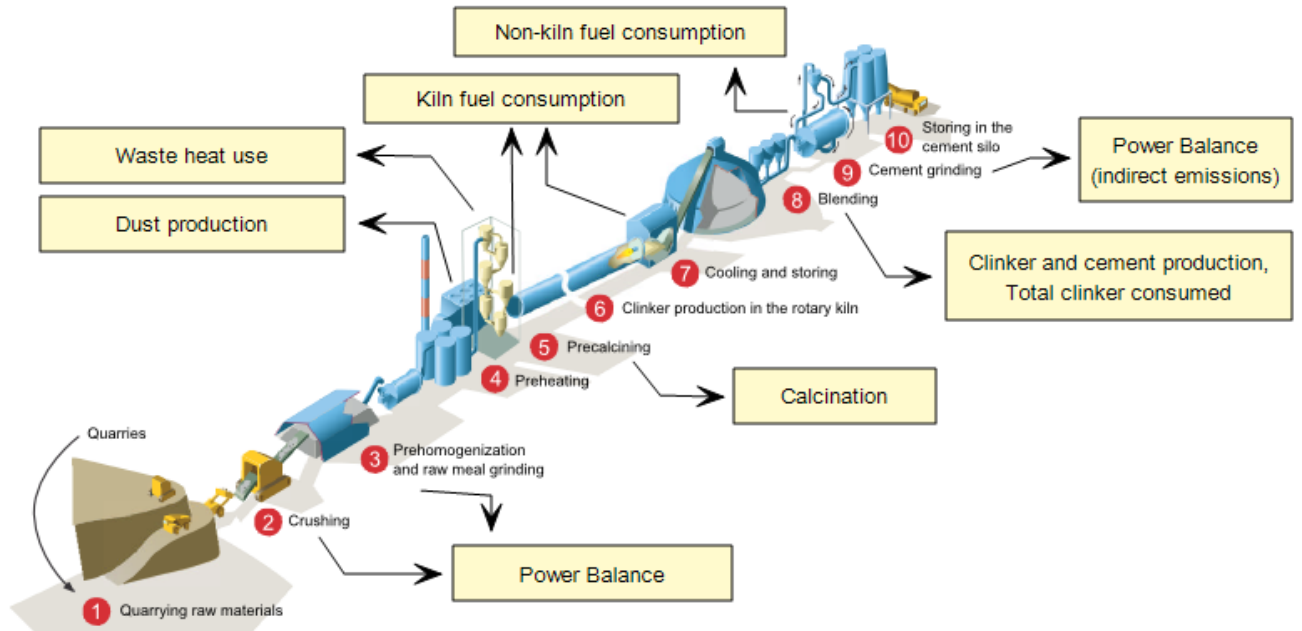


Figura 1.4.1: Esquema proceso de fabricación del cemento [21].

La producción del cemento

Desde la antigüedad, el cemento se ha empleado como material aglutinante. Sin embargo, fue después de la Segunda Guerra Mundial cuando se produjo un incremento en la producción del cemento en todo el mundo, teniendo actualmente niveles de producción mundial de más de media tonelada por persona y año (fig. 1.4.2). La producción del cemento se ha multiplicado por más de 30 veces desde 1950, y cuatro veces desde 1990. Este aumento es debido al progreso que ha experimentado China, en donde se ha multiplicado por 12 la producción del cemento, por lo que en China se originó el 73 % del desarrollo mundial de la producción de cemento [22].

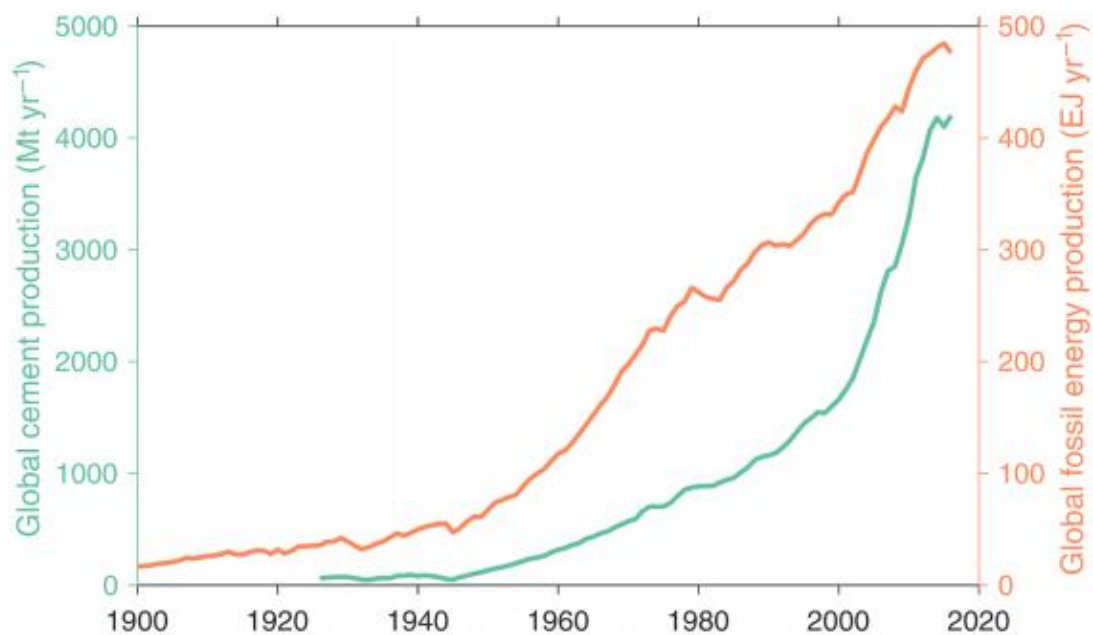


Figura 1.4.2: Producción mundial de cemento y energía fósil hasta 2016 [22].

La producción del cemento es un proceso que necesita una cantidad considerable de energía y recursos. Se precisa alrededor de 1,5 toneladas de materias primas para producir 1 tonelada de cemento. La piedra caliza representa en torno al 85 % en peso de la alimentación cruda, mientras que el resto corresponde a arcilla, es decir, un 13 % en peso, y aditivos como pueden ser, por ejemplo, SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O tienen un porcentaje en peso inferior al 2%. En dicho proceso se emite entre 0.6 y 1 kg de CO_2 por tonelada de cemento, y aproximadamente el 80 % de estas emisiones son producidas en la etapa de calcinación, procediendo el 60% de la descarbonización y el resto de las emisiones proceden del uso del combustible en el calcinador [23].

La demanda de cemento en la industria de la construcción promueve la producción, y por este motivo, es un factor concluyente para el consumo de energía y las emisiones de CO_2 del subsector del cemento. Las estimaciones iniciales proponen que se produjeron 4.1 Gt de cemento a nivel mundial en 2019. El máximo se alcanzó en 2012 con un valor de 4.2 Gt y desde ese momento ha permanecido constante, en torno a 4.1 Gt. El mayor productor de cemento es China, representa aproximadamente del 55 % de la producción mundial, seguido de la India con un 8 % [24].

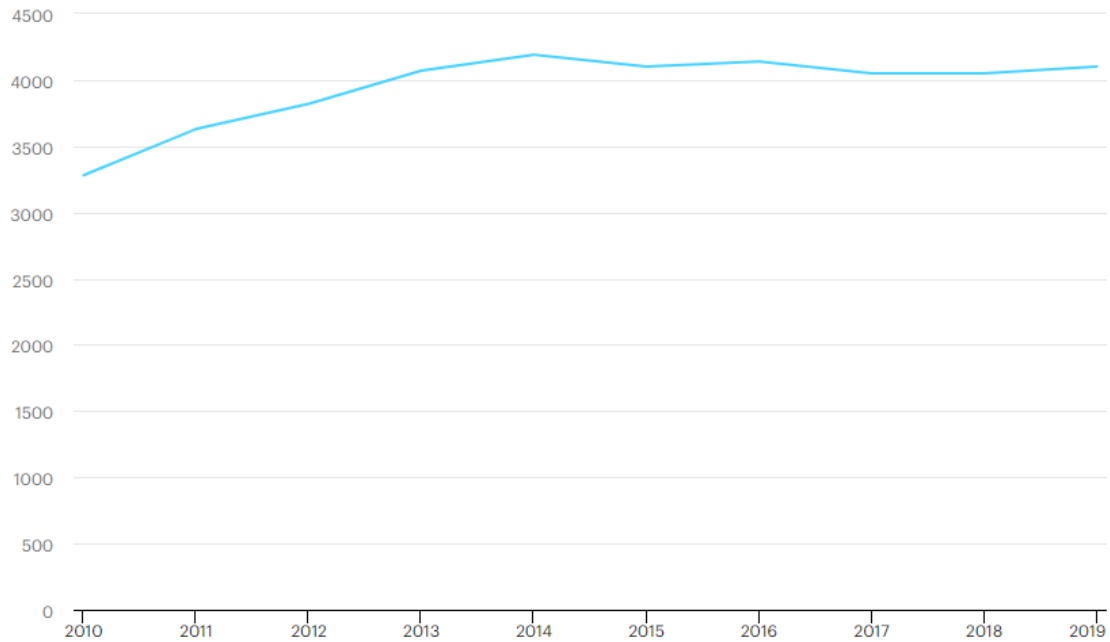


Figura 1.4.3: Producción mundial de cemento, 2010-2019 [24].

Tecnologías para la captación de CO₂ en la industria del cemento.

Actualmente, la tecnología que más ha progresado y que se encuentra implantada en los distintos sistemas de captura de CO₂ es el proceso de absorción química a base de aminas. No obstante, dicha tecnología no tiene por qué ser la opción óptima teniendo en cuenta que las tecnologías alternativas han evolucionado. Una de las principales desventajas que exhibe este proceso es el elevado consumo de energía en el momento de la regeneración, lo que significa una disminución en la eficiencia eléctrica neta del sistema de generación. Este hecho se debe al uso de vapor como fuente de energía.

El proceso de absorción de referencia se fundamenta en una solución acuosa con un contenido de un 30 % en peso de MEA (monoetanolamina) como ingrediente activo. El fundamento primordial es una reacción exotérmica reversible entre una base débil, como, por ejemplo, MEA y un ácido débil como puede ser CO₂ para llevar a cabo la formación de una sal soluble. Primeramente, se tiene que enfriar el gas de combustión del ciclo de energía para entrar en contacto con el solvente MEA teniendo lugar en el absorbedor. Se necesita de un soplador para sobrepasar la caída de presión a través del absorbedor. A continuación, el disolvente se bombea por la columna de absorción en contracorriente a los gases de escape. Dicho disolvente se mezcla químicamente con el CO₂ a unas temperaturas entre 40 °C y 60 °C y se retira por la parte superior de

la columna. Esta corriente se conoce como amina rica debido a que contiene CO_2 capturado. Seguidamente, la amina rica se succiona a la parte superior de la columna superior, en donde se utiliza calor para expulsar CO_2 de la amina. Este calor proviene del vapor extraído del ciclo de energía. La regeneración de la amina se realiza a una temperatura de entre $100\text{ }^\circ\text{C}$ y $140\text{ }^\circ\text{C}$. Se debe tener en cuenta que la presión de regeneración está restringida por la amina que se emplea, como consecuencia de que ésta se degrada con la temperatura. La corriente de gas separada presenta una mezcla de CO_2 y H_2O . Se usa un condensador para recuperar el agua. Posteriormente, el CO_2 se tiene que presurizar para transportarlo [25].

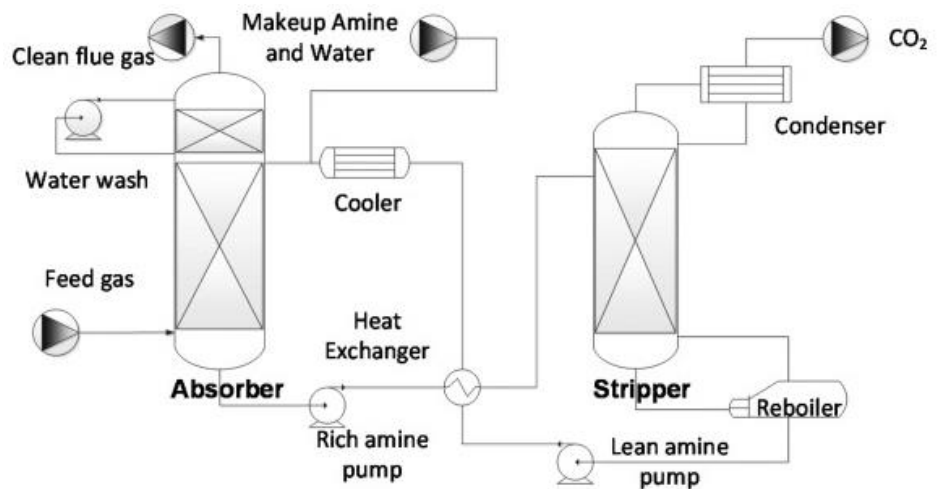


Figura 1.4.4: Proceso de captura de CO_2 mediante absorción química con amina [25].

Conforme al análisis económico llevado a cabo por el Departamento de Energía de Estados Unidos, el proceso estándar de captura de CO_2 mediante postcombustión con amina es una propuesta costosa. El departamento mencionado con anterioridad expuso un sistema de postcombustión, el cual empleaba aminas para capturar el 90 % del CO_2 del gas de combustión presente en una planta de energía de ciclo de gas natural, y se dedujo que se producía un aumento del 45 % en el costo de la electricidad [25].

En este contexto, el objetivo de este trabajo es el análisis de una microturbina de gas acoplada en una planta de captura de CO_2 , en dónde se examinará su diseño y lo eficiente que puede llegar a ser respecto a las demás tecnologías existentes hoy en día [25].

Microturbina Capstone C200

En el presente trabajo, tratamos el caso de estudio en el que se utiliza una microturbina cuya denominación es “Capstone C200”. Se compone de una turbina de gas de un solo eje compuesta de un compresor centrífugo, una turbina axial, un generador de alta velocidad y una cámara de combustión que emplea un intercambiador de calor aire-aire, denominado recuperador. Es capaz de generar una potencia bruta de 200 kW a plena carga en condiciones ISO para aplicaciones combinadas de energía y calor y se pueden alcanzar eficiencias del 70 % [25].

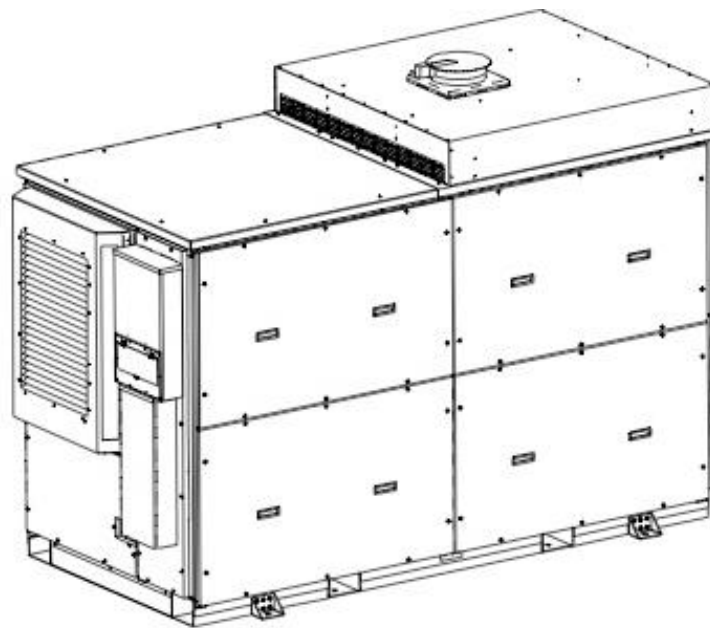


Figura 1.4.5: Microturbina Capstone [26].

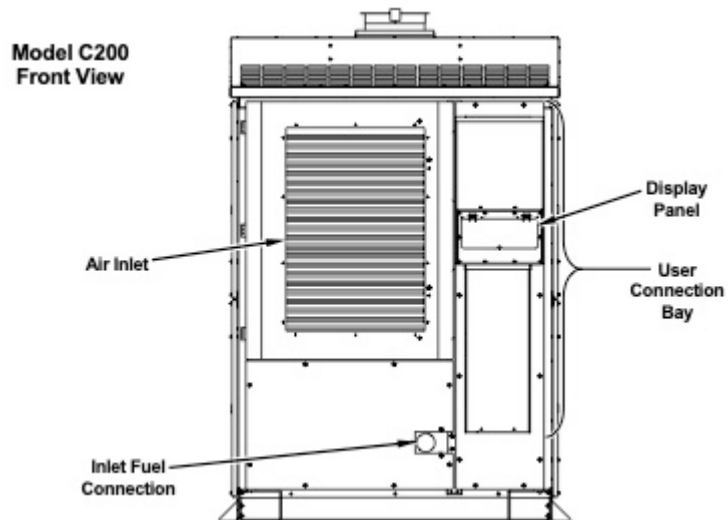


Figura 1.4.6: Vista frontal [26].

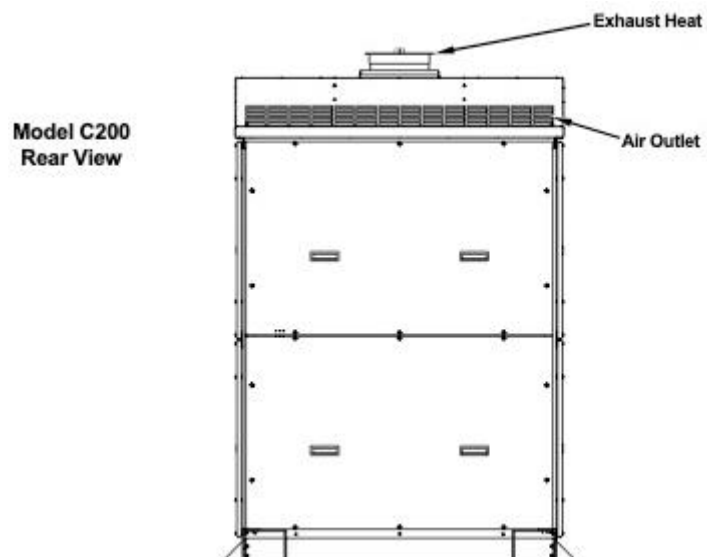


Figura 1.4.7: Vista trasera [26].

Por otra parte, los sistemas de cogeneración fundamentados en una microturbina tienen la posibilidad de usar distintos combustibles. Los componentes esenciales se representan en la fig. 1.4.8:

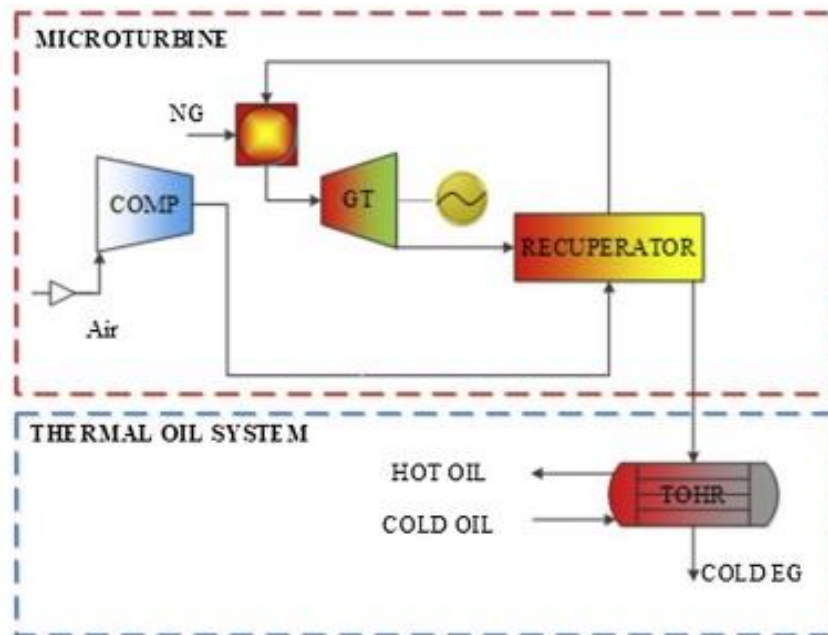


Figura 1.4.8: Elementos del sistema de la microturbina C200 y el sistema de aceite térmico [25].

Dicho sistema tiene la posibilidad de usar como combustible tanto diésel como gas natural y obtiene energía eléctrica mediante la generación de energía originada en la turbina de gas, y a través de un generador eléctrico. La energía eléctrica producida se atenúa en un banco de resistencias eléctricas. Asimismo, la microturbina genera gases de escape a temperaturas elevadas que se emplean en un sistema de recuperación de calor de aceite térmico (TOHR) con la finalidad de usarlo en distintos sistemas de cogeneración con una capacidad para producir de 220 kWt. Una vez cedida la energía procedente de los gases de escape al aceite térmico, la temperatura que presentan los gases de escape más fríos se encuentra en torno a 105-130 °C [25].

2. Objetivos

El principal objetivo de este trabajo es establecer las alternativas tecnológicas para reducir el CO₂ emitido en la producción de materiales de construcción. Posteriormente, se evaluará la viabilidad de dichas alternativas en la industria actual después de haberlas analizado con mayor profundidad.

Como se ha mencionado en el anterior apartado, la industria del cemento provoca entre el 7 y el 8% de las emisiones antropogénicas mundiales de CO₂ y del 5 % de CO₂ generado anualmente en España. Es de suma importancia, el estudio y posterior implantación de las distintas tecnologías de captura y almacenamiento de CO₂ para conseguir un adecuado funcionamiento del proceso y poder reducir parcialmente las emisiones.

El segundo objetivo que se establecerá en dicho trabajo es estudiar cuáles son los posibles usos que se le puede dar al CO₂ una vez que ha sido capturado. Actualmente, el tema de la captura del CO₂ es de suma importancia en todo el mundo debido a las grandes cantidades de CO₂ que se emiten a la atmósfera, y por consiguiente, se están llevando numerosos estudios sobre el proceso de captura, almacenamiento y utilización de este CO₂ en España. Sin embargo, ya hay lugares en el mundo que han desarrollado posibles soluciones tecnológicas de lo más novedosas relacionadas con productos de hormigón prefabricado, y que ya se están comercializando. Éstas se basan en la invención de conglomerantes innovadores con la capacidad de introducir residuos alcalinos valorizados, y en la mayoría de los casos, la utilización del CO₂ 100 % (comercial, puro) en distintos procesos de curado con equipamiento específico. Este trabajo se centrará en la fase de utilización del CO₂ capturado, concretamente, en la empresa “Cementos La Cruz”, en donde se analizará que usos pueden ser los óptimos, teniendo en cuenta las posibles ventajas y desventajas que pueden conllevar, y las diferentes particularidades de dicha empresa.

3. Análisis de la tecnología de captura de CO₂

3.1 Descripción detallada del sistema de captura

La microturbina C200 es un generador de turbina de gas que produce calor y energía eléctrica. Asimismo, emplea una electrónica de potencia desarrollada que produce energía eléctrica trifásica a 400/480 VAC y 50/60 Hz.

Cuenta con controladores microeléctricos, los cuales se sincronizan con la red eléctrica y otorgan una protección a ésta, suprimiendo de esta forma la necesidad de tener equipos de protección adicionales.

Otro aspecto a destacar es el elevado rendimiento eléctrico que tiene la turbina debido a que incorpora un recuperador. Éste es capaz de recuperar el calor procedente de los gases de escape y utilizarlo para precalentar el aire de combustión. Además, el recuperador disminuye la cantidad de combustible de manera considerable [27].

Características principales

A continuación, se exponen las principales características de la microturbina Capstone:

- Presenta un controlador de potencia digital que posee funciones de relé de protección integradas, y proporciona dos opciones de salida: una de corriente alterna síncrona que está incorporada y una salida de corriente alterna autónoma que es opcional.
- El uso de cojinetes de aire hace que no sea necesario el uso de aceite u otros lubricantes líquidos.
- No es imprescindible la utilización de refrigerantes líquidos debido a la presencia del diseño refrigerado por aire de la turbina y el controlador.
- El motor sólo posee una pieza móvil y no tiene correas, engranajes ni accesorios accionados por la turbina.
- Existe un control evolucionado de la combustión haciendo que no haya necesidad de materiales costosos o cerámicas y además produce emisiones muy bajas.
- El recuperador anular integral, es decir, el intercambiador de calor aumenta considerablemente la eficiencia eléctrica.
- La presencia de una tecnología de control digital favorece el control y supervisión [27].

Elementos funcionales

En la figura 3.1.1 se pueden observar los elementos primordiales que conforman el sistema de microturbina Capstone C200.

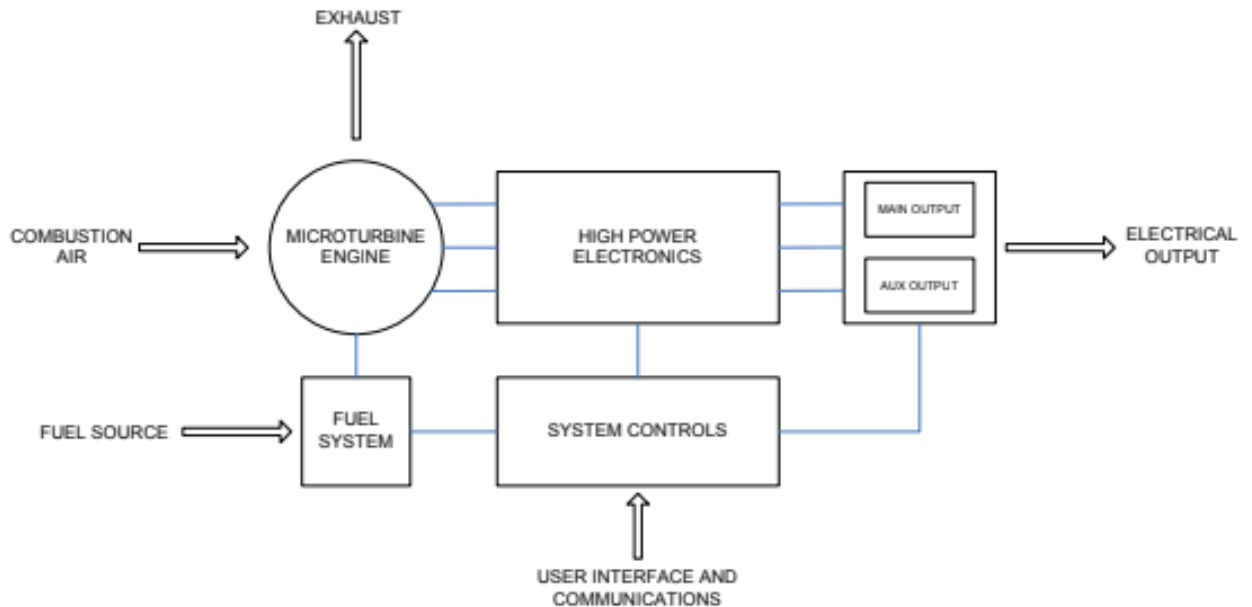


Figura 3.1.1: Componentes funcionales de la microturbina C200 [27].

Primeramente, se tiene el motor, el cual es una turbina de combustión que está compuesta por un compresor, una cámara de combustión, un generador y una turbina. Los elementos giratorios están acoplados en un único eje sustentado por cojinetes de aire que alcanzan una velocidad de rotación de 60,000 rpm. Adicionalmente, cuenta con un generador de imanes permanentes que se refrigera a través del flujo de aire que entra a la microturbina. La salida de éste es de frecuencia y tensión variable de corriente alterna. Aparte, el generador funciona como motor en los ciclos de arranque y enfriamiento.

Posteriormente, la microturbina puede usar de manera eficiente diferentes combustibles gaseosos a base de hidrocarburos en función del modelo. Ésta incorpora un sistema integral de control y distribución de combustible.

Por otra parte, presenta una electrónica de potencia digital que verifica y acondiciona la salida eléctrica de la microturbina. La salida eléctrica tiene dos conexiones de salida eléctrica: una de potencia principal de corriente alterna trifásica pudiendo dar hasta 200 KW, y una salida auxiliar de corriente alterna trifásica pudiendo suministrar hasta 10 kVA antes de que esté libre la potencia principal.

Para concluir, es posible usar el aire de escape que sale de la microturbina que es caliente y limpio para la refrigeración o el calentamiento del proceso y así, aumentar la eficiencia global del sistema. Asimismo, se puede distribuir este aire de escape a cualquier otro dispositivo facilitado por el cliente, como por ejemplo a enfriadores de absorción, pudiendo conseguir agua fría mediante el escape caliente [27].

Parte termodinámica

En relación a la termodinámica, la microturbina se basa en el ciclo de Brayton regenerativo, por lo que el rendimiento eléctrico es superior debido al uso de un recuperador de calor de los gases situado en la salida de la cámara de precombustión. Éste tiene la función de precalentar el aire comburente posterior al compresor. Por lo tanto, se logra que una turbina de 200 kW obtenga un rendimiento del 33 % equiparable a una de un tamaño 100 veces mayor [28].

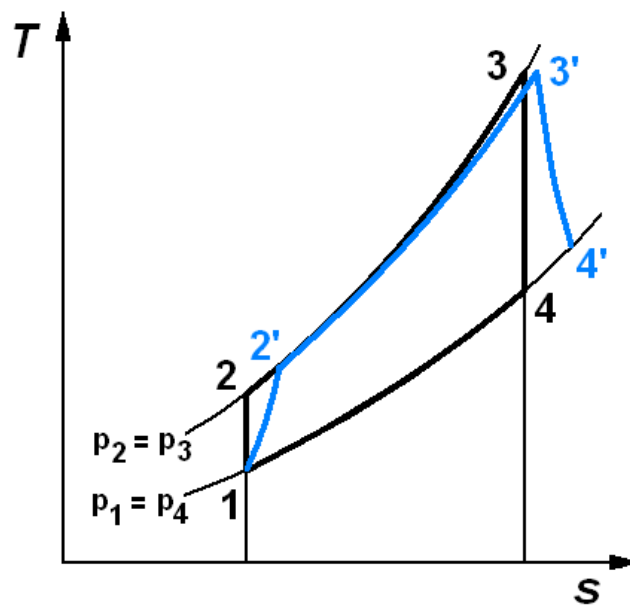


Figura 3.1.2: Ciclo de Brayton (Real: azul e Ideal: negro) [28].

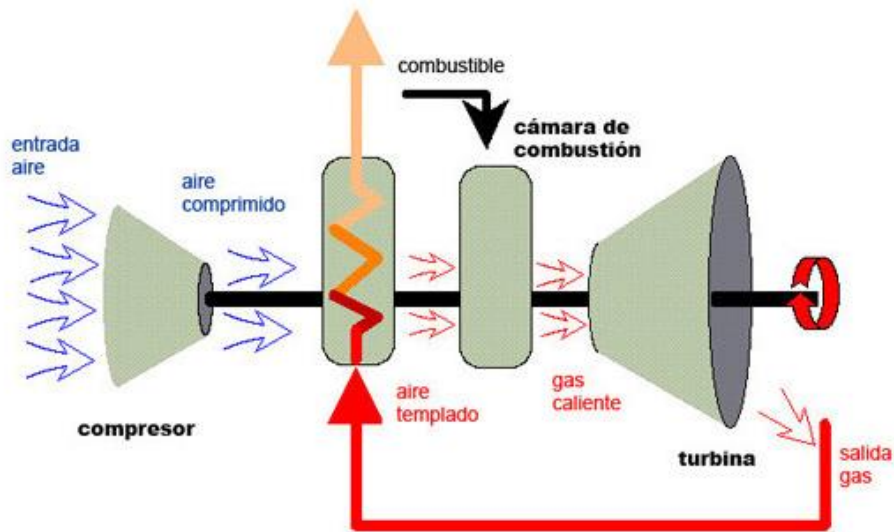


Figura 3.1.3: Ciclo regenerativo de la microturbina [28].

Pese a la disminución de la temperatura de los gases de escape, aún queda más de la mitad de la potencia térmica del combustible que se encuentra en forma de calor, y es utilizable a 300 °C. Todo el calor que se tiene a esta temperatura y en una sola fuente, posibilita su recuperación y sus usos frente a los motores alternativos [28].

Componentes mecánicos principales

En la siguiente imagen se muestran los componentes claves de la microturbina:

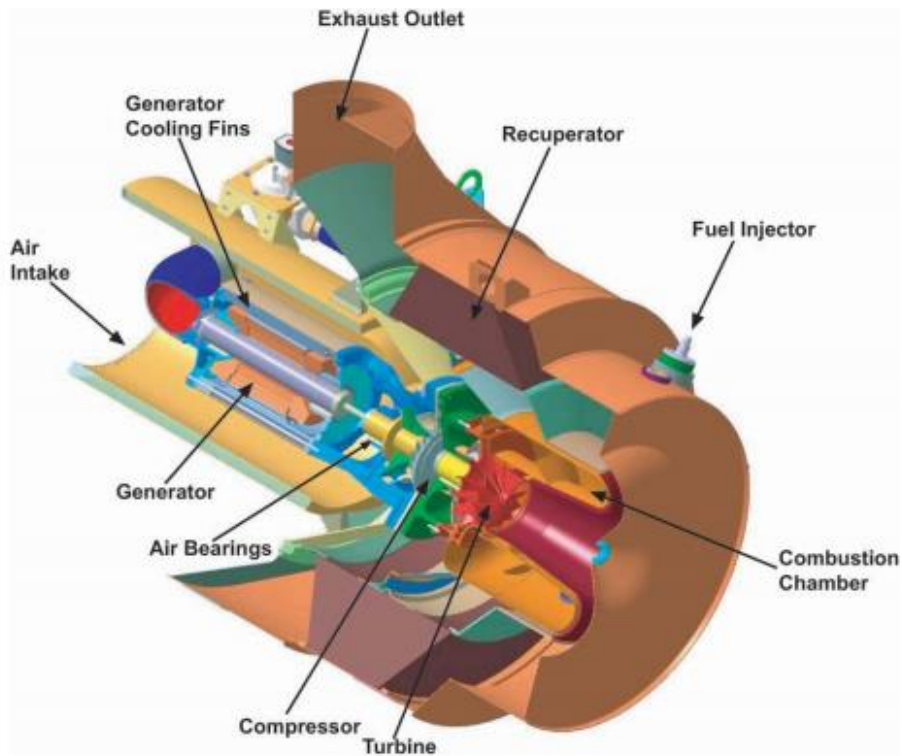


Figura 3.1.4: Componentes mecánicos microturbina CAPSTONE C200 [27].

Cojinetes de aire

La microturbina usa cojinetes de láminas de aire que otorgan numerosas ventajas, como pueden ser: una elevada fiabilidad, mantenimiento reducido y un funcionamiento adecuado. Asimismo, esto posibilita usar un menor número de piezas y la no necesidad de ningún tipo de lubricación líquida para apoyar el grupo giratorio. La película de aire separa el eje de los cojinetes protegiéndolos del desgaste en el momento en el que la microturbina está funcionando [27].



Figura 3.1.5: Única pieza móvil (eje del turbogenerador) [29].

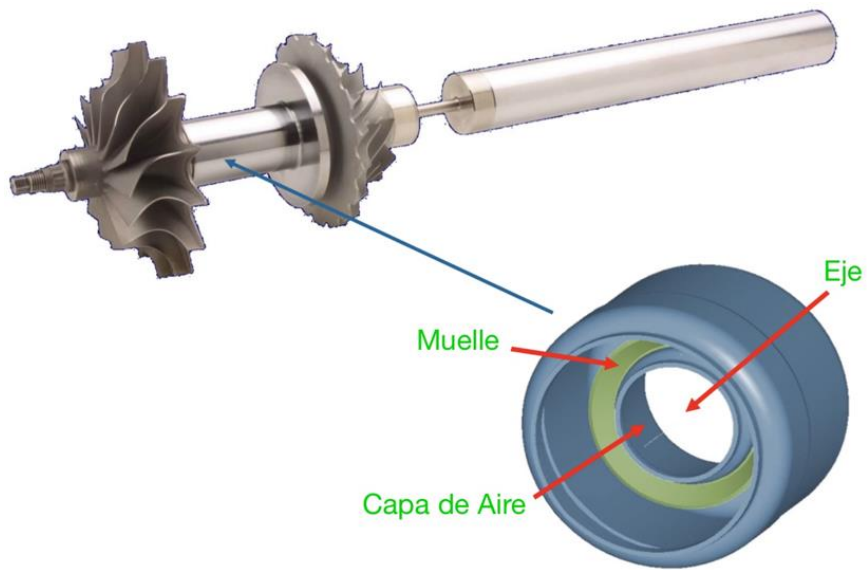


Figura 3.1.6: Localización cojinetes de aire en el eje del turbogenerador [30].

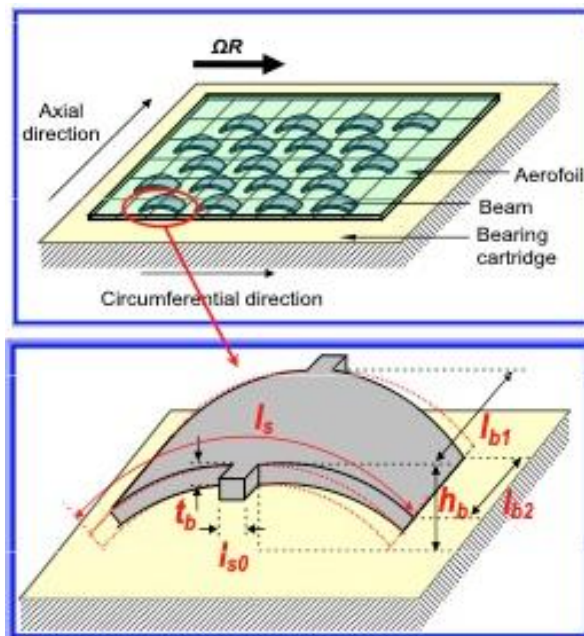


Figura 3.1.7: Dimensionado de los cojinetes de aire patentados [31].

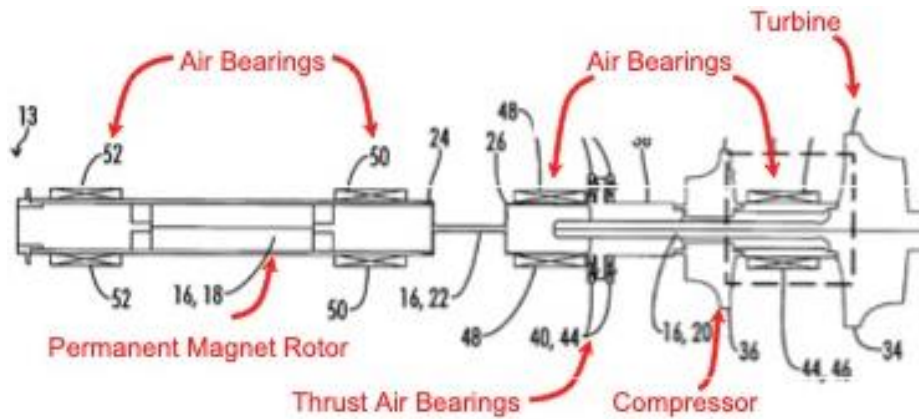


Figura 3.1.8: Localización de los cojinetes de aire [31].

Emisiones

Esta microturbina está planteada para originar emisiones limpias. El escape es limpio y con presencia de oxígeno, alrededor del 18 %. Además, presenta niveles reducidos de contaminantes atmosféricos. Como cualquier tecnología de combustión durante el proceso de inflamación del combustible la microturbina origina emisiones de dióxido de nitrógeno (NO_2) y monóxido de carbono (CO), siendo los niveles de emisión muy bajos [27].

Carcasa

La caja que presenta la microturbina está hecha para su uso en exteriores e interiores [27].



Figura 3.1.9: Estructura de la microturbina Capstone [32].

Opción de modo autónomo o dual

Tiene una opción de modo “dual”, la cual posibilita el funcionamiento con o sin conexión a la red eléctrica. Incorpora dos paquetes de baterías que se usan para el arranque sin asistencia y para la gestión de la carga eléctrica transitoria. Si se encuentra funcionando en modo “autónomo”, el sistema es capaz de alimentar las cargas que se encuentran conectadas a los puntos de ajuste de frecuencia y tensión seleccionados por el beneficiario [27].

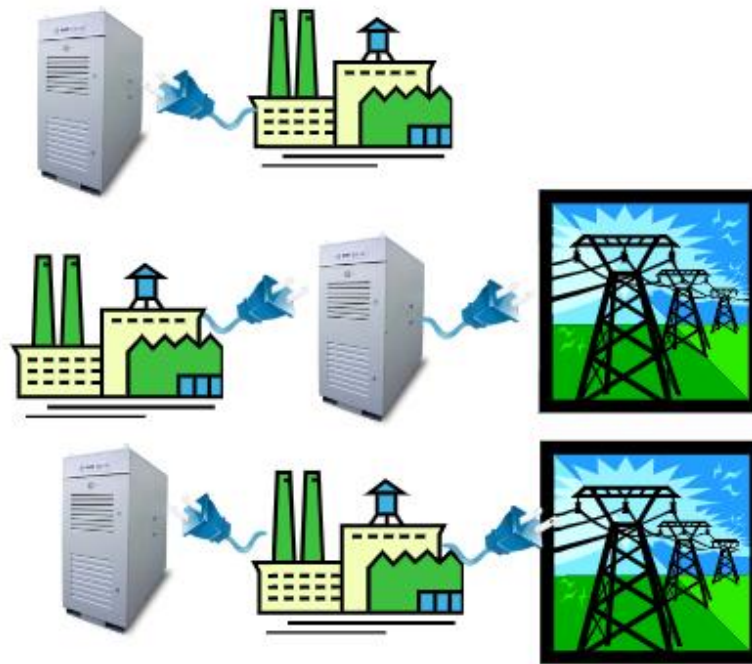


Figura 3.1.10: Independiente (Modo isla); Conectada a la red eléctrica externa; Modo dual [30].

Generación distribuida

La microturbina cuando está conectada a una red eléctrica ocasiona corriente síncrona. Da la posibilidad de generar energía en incrementos pequeños, y este hecho hace que se pueda optimizar la infraestructura presente y disminuir o posponer la necesidad de desarrollar, financiar y fabricar nuevas líneas de transmisión y distribución. Asimismo, proporciona a los consumidores de la compañía eléctrica contrarrestar parte de su consumo de energía de la red [27].

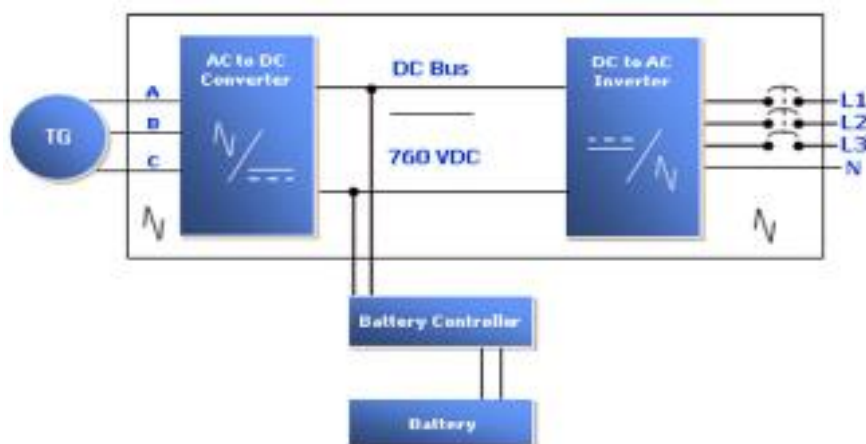


Figura 3.1.11: Generación eléctrica de la microturbina [30].

Módulo de recuperación de energía (HRM)

Tiene como objetivo recuperar el calor procedente del agua caliente. El HRM es un economizador de gases de escape, el cual tiene un controlador de temperatura y desviador de gases de escape. Este controlador nos permite tener información sobre la temperatura a la que sale el agua del intercambiador de calor, y además da al usuario la posibilidad de ajustar la temperatura que desea. Por otro lado, se cuenta con una válvula desviadora de gases de escape que se mueve mediante un controlador. Éste último tiene como función el de conseguir que la temperatura de salida se mantenga constante en el punto de ajuste seleccionado. Tanto el controlador como el actuador pueden estar alimentados por la salida eléctrica auxiliar de la microturbina [27].

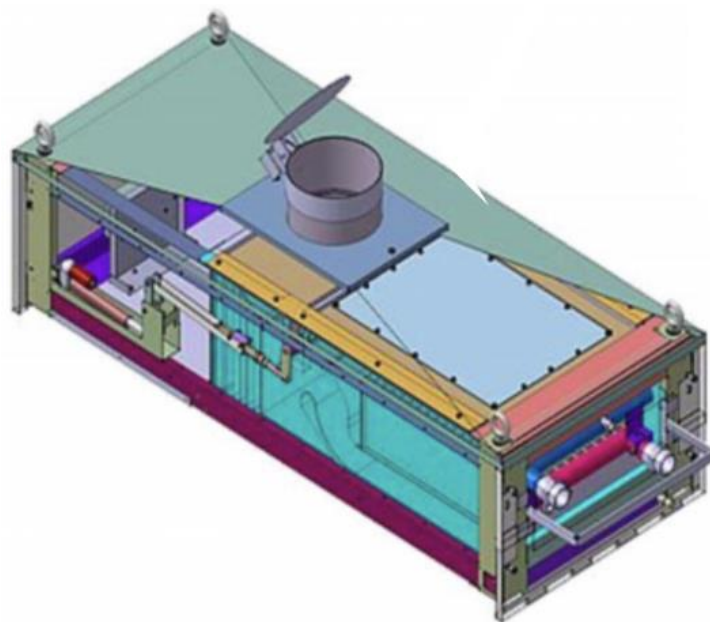


Figura 3.1.12: Módulo de recuperación de energía (HRM) [30].

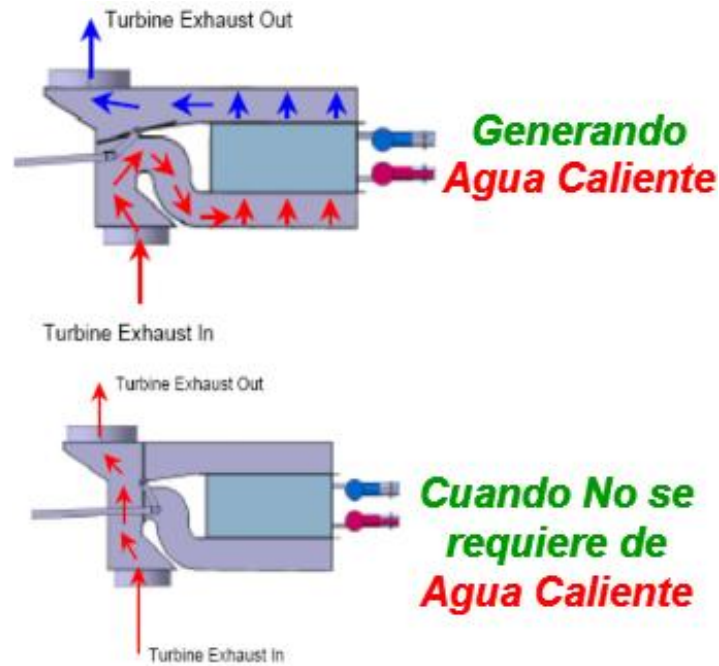


Figura 3.1.13: Proceso de recuperación de calor en la microturbina para producir agua caliente [30].

3.2 Técnicas para aumentar el volumen de CO₂

Coexisten una serie de tecnologías para incrementar el contenido de CO₂ en los gases de escape en un ciclo combinado de gas natural, entre los que destacan:

-Humidificación en la turbina de gas (EvGT): Una parte del aire se sustituye por vapor al meter vapor o agua en el proceso. Debido al hecho de que el vapor se puede desprender fácilmente de los gases de escape mediante condensación, dicha humidificación de la turbina de gas puede presentar una concentración de CO₂ más elevada respecto a un ciclo convencional de turbina de gas, favoreciendo el proceso de captura a través de absorción química.

-Ciclo de turbina de gas con combustión suplementaria (SFC): La existencia de una unidad de combustión secundaria presente en la salida de la turbina de gas es la principal diferencia respecto a un ciclo combinado convencional. Cuando se quema el combustible complementario, los gases de escape se recalientan y se distribuyen al generador de vapor de recuperación de calor (HRSG), cuya función es la de producir vapor para el proceso.

-Recirculación de gases de escape (EGR): Permite incrementar el contenido de CO₂ en la corriente de gas que se introducen en las unidades de absorción química, haciendo que disminuya el caudal volumétrico.

-Reciclaje selectivo de gases de escape con una membrana (S-EGR): En esta tecnología, una parte de los gases de escape que se marchan por el generador de vapor se reciclan de una forma parecida al reciclaje habitual. Pese a esto, en vez de dirigir el gas de combustión reciclado a la admisión del compresor de aire de alimentación, se envía a un lado de un separador de la membrana. El aire transita a contracorriente al gas de combustión en lado opuesto de la membrana. El hecho de que la membrana sea específica para el CO₂ sobre el nitrógeno y el oxígeno permite que el CO₂ se introduzca en la corriente de aire que posteriormente se distribuirá al compresor de alimentación. Este sistema lo que hace es reciclar selectivamente el CO₂ de los gases de combustión en vez de combinar la corriente de aire con los gases de combustión no separados.

-Ciclo de turbina de gas con combustión externa (EFC): En este proceso, los gases de combustible no transcurren por la turbina como si sucede en las turbinas de gas convencionales ya que la mezcla de aire que se comprime y el combustible que se quema en la cámara de combustión y después se expandiría en la turbina. El calor del gas de escape caliente se cede al aire comprimido a través de un intercambiador de calor de contacto indirecto. Otro punto a destacar es la posibilidad de no precisar elevados excesos de aire en la combustión como sería el caso de las turbinas convencionales. Por esta razón, los gases de combustión están menos diluidos, dando volúmenes más bajos con el fin de aplicarlos en un lavador de aminas y, por otra parte, los gases de escape presentan una concentración de CO₂ mayor [25].

Una vez mencionadas las principales tecnologías que posibilitan aumentar la concentración de CO₂ en los gases de escape de un ciclo combinado de gas natural, se llevó a cabo una comparativa para escoger la tecnología más eficaz la implantación in situ.

En la fig. 3.2.1 se presenta un resumen de las eficiencias netas teóricas para el ciclo combinado de gas natural con captura de CO₂ y las distintas tecnologías utilizables mencionadas con anterioridad que tienen como objetivo incrementar el contenido de CO₂ en los gases de escape. Para el ciclo combinado de gas natural se considera una eficiencia de 55.7 %, pero si se introduce un sistema de captura de CO₂ disminuiría la eficiencia a un 47.5 %. Como se puede observar, el caso que presenta una sanción más baja en la eficiencia neta una vez implementado el proceso de captura de CO₂ es la recirculación de gases de escape. Éste presenta una eficiencia del 50.8 %. Le prosigue la tecnología S-EGR con un 43.4%, el EFC con un 42.73 %, el SFC con 41.8% y para terminar el EvGT con un 39.6 %. La tecnología de EGR es la única que muestra una mejora respecto al suceso base con captura de CO₂, produciéndose un aumento de un 2.6 % [25].

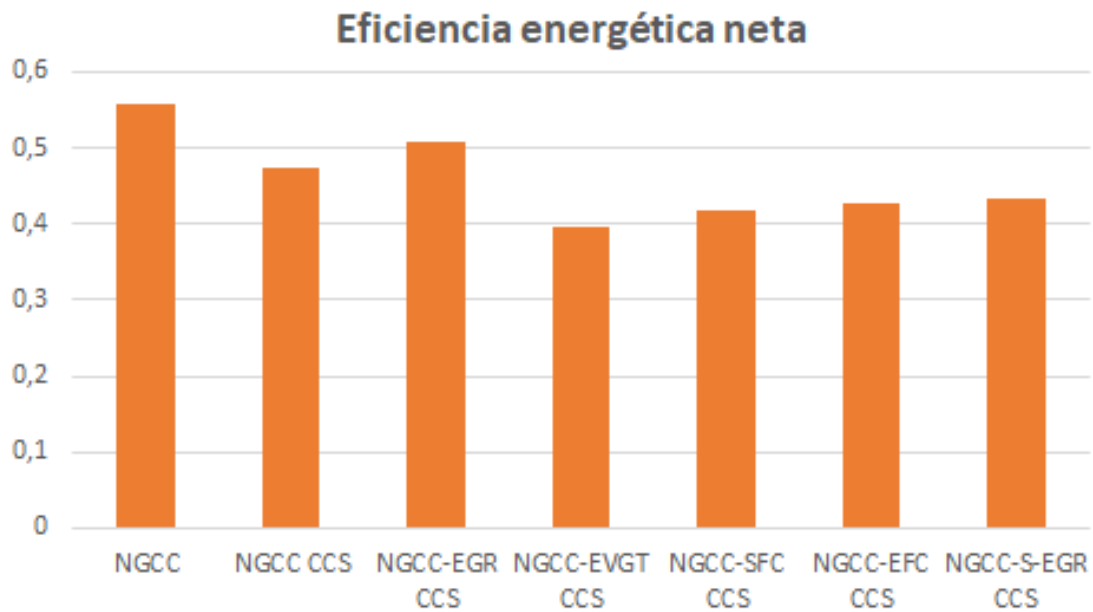


Figura 3.2.1: Eficiencias eléctricas para diferentes ciclos en los casos de ciclo combinado de gas natural y captura y almacenamiento de carbono [25].

A continuación, se explicará el principio de funcionamiento del ciclo combinado de gas natural con captura de CO₂ y recirculación de gases de escape (fig. 3.2.2). Para comenzar el proceso, el aire entra por el compresor centrífugo, aumentando la presión del aire. Posteriormente, pasará por la cámara de combustión, en dónde se llevará a cabo la inyección del combustible, en este caso, será gas natural. Se producirá la

combustión, dando como resultado los productos de la combustión, agua y dióxido de carbono, siempre que la combustión sea completa. En dicha cámara de combustión, los productos experimentan un incremento de temperatura, y la presión sigue aumentando.

Seguidamente, el aire y los productos de la combustión pasarán por la turbina de gas, disminuyendo su presión, y a cambio se moverá el eje compresor-turbina de gas-alternador. El gas caliente que sale de la turbina alimenta al intercambiador de calor (HRSG) con la finalidad de producir vapor, y así, impulsar la turbina de vapor.

Por otra parte, se tiene el ciclo de turbina de vapor. A ésta le entraría vapor sobrecalentado que pasaría al condensador en forma de vapor saturado. Más tarde, habrá una bomba a la que le entrará líquido saturado y se acabaría el ciclo con el intercambiador de calor.

Una vez que situados en el intercambiador de calor, cómo la combustión que se produce no llega a ser completa, existe parte de O_2 disponible en los gases de escape. Este motivo es el que hace que se recirculen hacia la cámara de combustión. Por lo tanto, los gases de escape obtenidos presentan una concentración mayor de CO_2 . Además, el resto de los gases producidos en la cogeneración acabarán en un sistema de captura de CO_2 .

Para finalizar, se puede decir que estamos ante un proceso de cogeneración cuyo objetivo es producir simultáneamente energía eléctrica y calorífica mediante la utilización de la turbina de gas y vapor. La energía eléctrica procede de la turbina de gas, que convierte la energía mecánica de eje en eléctrica, y la energía calorífica se obtiene de la combustión.

Un ciclo combinado de gas natural con captura de CO_2 y recirculación de gases está compuesto principalmente por los siguientes elementos:

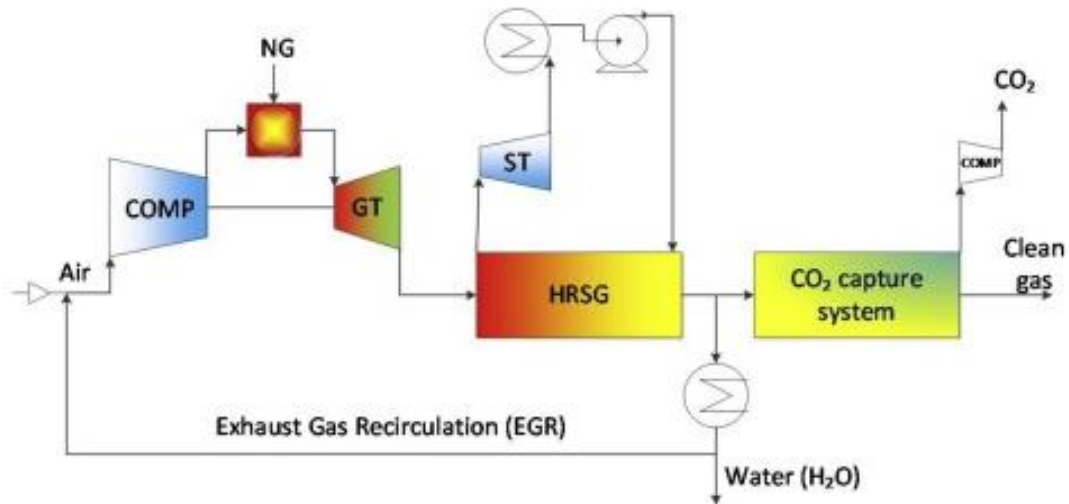


Figura 3.2.2: Esquema de un ciclo combinado de gas natural con captura de CO₂ y recirculación de gases [25].

Compresor (COMP)

Existen distintos tipos de compresores, pero en este caso estamos antes un compresor centrífugo. Éste es de tipo dinámico lo que le diferencia del resto de equipos empleados en máquinas de compresión ya que éstos son de desplazamiento positivo. Usan la fuerza centrífuga con la finalidad de comprimir el aire. Están compuestos por una o más ruedas impulsoras que se sitúan en un eje y se encuentran dentro de una carcasa [33].

Turbina de gas (GT)

Es un motor térmico que incluye una turbina, una cámara de combustión y un compresor colocados en serie, y por lo general, suelen estar acoplados en un mismo eje. Existen diferentes tipos de turbinas de gas, las cuales varían desde una fracción de MW hasta aproximadamente 100 MW. Existen diferentes tipos, fundamentados en las clases siguientes: ciclo abierto que se puede subdividir en turbinas de gas de combustión continua o presión constante y turbinas de gas de combustión explosiva o volumen constante. Y, por otra parte, ciclo cerrado que es muy similar al ciclo abierto de presión constante con la diferencia de que el aire limpio se recircula mediante un sistema de turbina, en donde el calor se proporciona a través de un intercambio de los gases calientes procedentes del horno en un sistema recuperador. La figura 3.2.3 es un esquema en donde se observan las partes esenciales de la turbina de gas de presión constante y ciclo abierto simple [34].

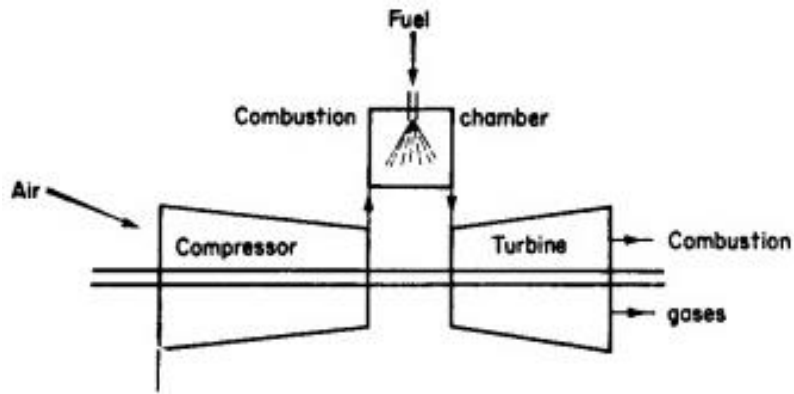


Figura 3.2.3: Turbina de gas de ciclo abierto simple [34].

Generador de vapor de recuperación de calor (HRSG)

Es un elemento que se encuentra a la salida de la turbina de gas, y finaliza en una chimenea, en dónde se liberan a la atmósfera los gases de escape. Por lo general, suele incluir diversos conductos y una carcasa, evaporadores, tambores de vapor que transforman el agua situada en los economizadores en vapor y posteriormente, separan el vapor de agua. También cuenta de sobrecalentadores y recalentadores cuya función es calentar el vapor sobrepasando la saturación, y una pila que se agota a la atmósfera. Asimismo, es necesaria una cantidad considerable de válvulas, controles, tuberías, plataformas y escaleras para ultimar el HRSG. El tamaño del HRSG dependerá de la turbina de gas, de los MW que posea ésta [35].



Figura 3.2.4: HRSG típico tamaño grande [35].

Turbina de Vapor (ST)

Son máquinas que se emplean con el fin de transformar la energía térmica en eléctrica útil o mecánica a través del vapor que fluye sobre las palas, dando lugar a un movimiento giratorio que impulsa el generador de electricidad. Estas máquinas se encuentran de todos los tamaños, desde 50 kW hasta 1300 MW [36].

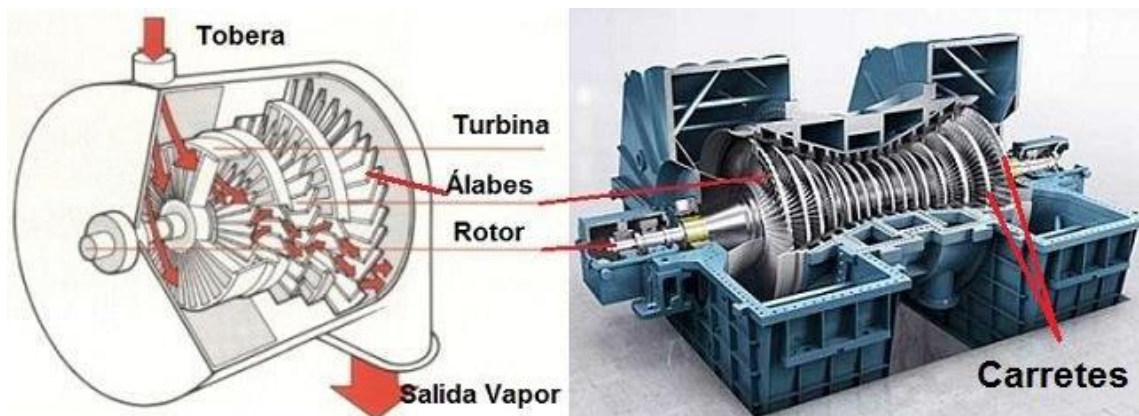


Figura 3.2.5: Partes de la turbina de vapor [37].

Una vez mencionados los principales componentes de un ciclo combinado de gas natural, hay que tener en cuenta que, pese a que los esquemas representados en la figura 1.4.8 y 3.2.2 son distintos, presentan principios operativos parecidos puesto que

se recupera la energía disponible de los gases de escape de la turbina de gas que posteriormente tendrá un uso en procesos termodinámicos en vez de liberarlos a la atmósfera. Por consiguiente, la cantidad de combustible empleado será menor, mejorando de esta forma la eficiencia global del sistema.

Evaluación de un caso práctico.

En el presente estudio, se toma como planta de referencia la fábrica de Lafarge-Holcim España, S.A.U en Carboneras, la cual es una de las cementeras que suministra el clínker a Cementos La Cruz. Esta planta tiene una capacidad de producción de clínker de 1.100.000 t/año, y una capacidad de producción de cemento de 1.500.000 t/año. En cuanto a la cantidad de dióxido de carbono emitido por esta planta, se estima que una tonelada de clínker produce una tonelada de CO_2 , por lo tanto, aproximaremos que se producirán 1.100.000 toneladas de CO_2 anualmente [38]. El objetivo marcado sería el de captar dicha cantidad de CO_2 .

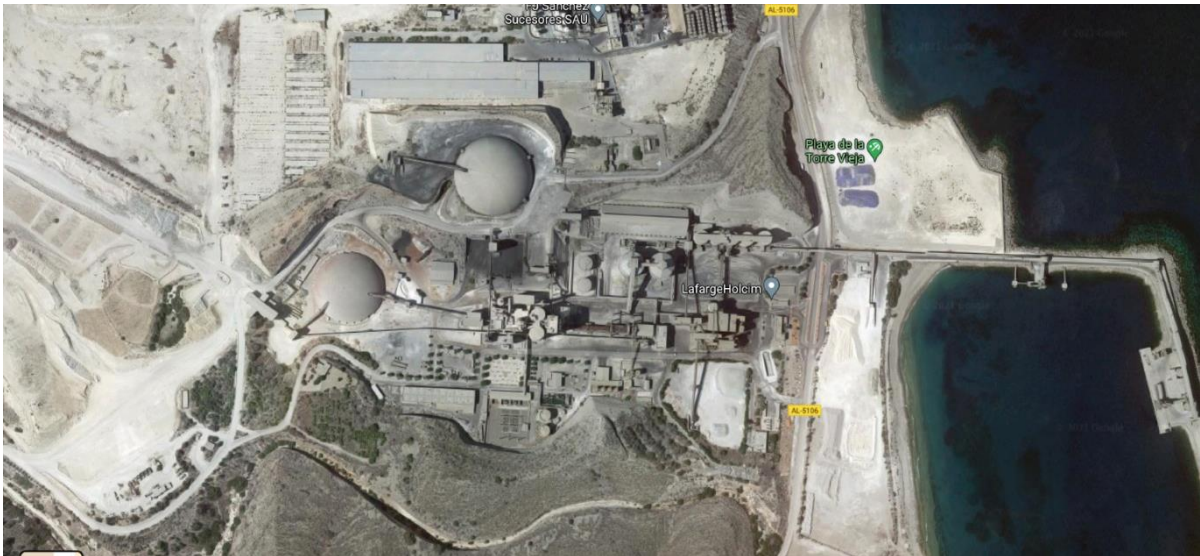


Figura 3.2.6: Fábrica de Lafarge-Holcim en Carboneras [39].



Figura 3.2.7: Fábrica de Lafarge-Holcim en Carboneras (España) [40].

Los diferentes tipos de cementos que se producen en esta fábrica son el CEM I 52,5 R, CEM II 42,5 R y CEM II 32,5 R, cubriendo de esta manera las necesidades de prefabricado, hormigón convencional y cemento ensacado. El CEM I 52,5 R presenta una resistencia elevada, y se recomienda para hormigones y prefabricados. Su composición es principalmente clínker en un 95-100 %, y el resto son adiciones [41]. Por otra parte, se tendría el CEM II 42,5 R, cuya composición en masa es clínker (80-94 %), caliza (6-20 %) y componentes minoritarios (0-5 %) [42]. Para finalizar con la parte de producción, se contaría con CEM II 32,5 R, se dice que es el cemento para los profesionales de la construcción, y presenta una composición de clínker del 65-79 %, caliza en torno a 21-35 % y 0-5% de componentes minoritarios [43].

Una vez que conocemos el producto y las dimensiones de producción de CO₂ de una planta de producción de cemento, podemos hacernos una idea de cuál es la magnitud del problema que se plantea. En este caso planteamos la captación del dióxido de carbono mediante un sistema de cogeneración basado en una microturbina. Las condiciones de trabajo de la turbina, como se ha comentado anteriormente, si ésta funciona a plena carga produce una potencia bruta de 200 kW en condiciones ISO cuando se utiliza en aplicaciones combinadas de calor y energía, y se logran eficiencias

del 70 %, por lo que la microturbina podrá llegar a capturar hasta 770.000 toneladas de CO₂ [25].

De esas 770.000 toneladas de CO₂ capturadas a través de la microturbina, cierta cantidad se podrá utilizar para un proceso secundario como puede ser la inyección de este CO₂ en el hormigón o la elaboración de nuevos productos de construcción a base de este CO₂. Se debe tener en cuenta que no todo el CO₂ capturado se podrá inyectar al hormigón, debido a la presencia de posibles pérdidas durante el proceso de funcionamiento y de transporte del mismo.

En 2020, Lafarge-Holcim firmó un acuerdo con Carbon Clean –líder en la tecnología de captura y separación de CO₂ de bajo coste- y las compañías ECCO₂ y Sistemas de Calor con el fin de desarrollar a gran escala una planta de captura y aprovechamiento de carbono, con sede en la fábrica de Holcim en Carboneras (Almería). El proyecto pretende capturar el CO₂ que se emite durante la producción del cemento que posteriormente se transformaría y reutilizaría. Dicho CO₂ se capturaría de los gases de combustión producidos en la planta y se reciclaría para utilizarlo en el sector agrícola, permitiendo incrementar la producción de cultivos. El método usado se basa en imitar e impulsar la fotosíntesis natural, aumentando de esta forma la eficiencia de las plantaciones al disminuir la proporción de agua y suelo por kg de producción de vegetales. Dicho proyecto está planificado para capturar 50 kta de CO₂ [44].

4. Usos del CO₂ capturado por la microturbina en materiales de construcción y otros productos

La captación de CO₂ es necesaria, pero debido al volumen de gas que se plantea capturar es necesario encontrar procesos industriales a los que incorporarlo para evitar así el problema de su almacenaje como residuo, al igual que ocurre con los residuos de las plantas nucleares. Hoy en día, el CO₂ puede tener diferentes usos, y este hecho depende del proceso llevado a cabo y de la finalidad que se tenga. Primeramente, se tienen las tecnologías CCUS (Carbon Capture Use & Storage), las cuales se han desarrollado frente a las tecnologías basadas en CCS (Carbon Capture & Storage). Éstas buscan el posible uso que puede tener el CO₂ como materia prima con el fin de producir nuevos productos de construcción, como pueden ser hormigones, cementos, prefabricados, etc. Este CO₂ es incrustado en matrices alcalinas y materiales de manera inalterable a través de diferentes tecnologías como la mineralización de carbonatación acelerada, simbolizando un sumidero para el CO₂ [45].

Posteriormente, existe un proceso fundamental denominado mineralización por carbonatación acelerada. Éste origina diversas transformaciones mineralógicas en los materiales alcalinos, lo que deriva a cambios en los agregados Periclasa (MgO) y Portlandita (Ca(OH)₂), al igual que de otros calcio-sulfatos y calcio-silicatos a un carbonato nuevo (MgCO₃, CaCO₃). Dicha transformación consiste en una reacción exotérmica en donde hay un porcentaje de humedad ínfimo. Aparte de lograr la consolidación de ciertos materiales pesados (Cr, Pb, Cu...) y la producción de fases amorfas y geles con aluminio y sílice, se consigue un aumento en la actividad puzolánica (capacidad de un aglomerante de reaccionar con la portlandita o hidróxido de calcio, Ca(OH)₂, dando lugar a fases hidratadas similares a las generadas durante la hidratación del cemento), haciendo que los materiales carbonatados producidos tengan mayor importancia, como son los materiales cementantes suplementarios (SCMs) en la elaboración de los cementos, permitiendo que se sustituyan por el clínker [46]. Coexisten diversos residuos con capacidad de ser carbonatados, como, por ejemplo, cenizas volantes de central térmica, de incineración de biomasa, escorias de incineración de residuos sólidos urbanos (RSUs) y residuos de construcción y demolición (RCDs), que ya han sido utilizados en diferentes pruebas y se ha manifestado la capacidad de captura que presentan de hasta 200-300 g de CO₂ eq/kg muestra. Asimismo, tienen la capacidad de transformarse en nuevos minerales ricos en carbonatos, al igual que de su aplicación como nueva materia prima en materiales de construcción [47], como adiciones y áridos al cemento.

Para concluir, se tiene el procedimiento de curado del hormigón con CO₂. Se puede utilizar como materia prima el CO₂ en el curado de matrices en base cemento y / o en base a materiales alcalinos con capacidad de fortalecerse prontamente, desarrollando las especificaciones mecánicas óptimas de los productos usuales. Los usos en hormigones se pueden hacer sobre una matriz formulada para la elaboración tanto de hormigón prefabricado como de hormigón preparado [28].

4.1. Proceso de inyección de CO₂ en el hormigón: tecnología CarbonCure.

CarbonCure es un proveedor canadiense de tecnología de utilización del CO₂ para la industria global del hormigón [48]. Posibilita a los productores de hormigón disminuir la huella de carbono de sus productos sin afectar a la calidad o el rendimiento. La tecnología CarbonCure inyecta CO₂ al hormigón una vez mezclado, donde se transforma en carbonato de calcio (CaCO₃), mineral sólido. Dicha adición puede acrecentar la resistencia a la compresión del hormigón sin perjudicar a otras propiedades endurecidas o frescas del mismo, posibilitando el uso de menos materiales cementantes, logrando un rendimiento equivalente. CarbonCure cumple con los requisitos de la norma ASTM C494 Tipo S [49].

CarbonCure® confecciona una tecnología que consiste en la introducción de CO₂ capturado por terceros en el hormigón recién mezclado, lo que permite llevar a cabo un hormigón con un rendimiento elevado y más sostenible con una menor huella de carbono, al tiempo que se obtiene una ventaja competitiva.

La tecnología CarbonCure se constituye de dos cajas: la caja de control, la cual es el cerebro de la operación, y la caja de válvulas que se enlaza a un tanque de CO₂ y proporciona una cantidad medida de CO₂ a la mezcla de hormigón. El CO₂ se almacena *in situ* en un tanque presurizado facilitado por empresas de gas industrial.

La caja de control comprueba el rendimiento del sistema de la caja de válvulas en tiempo real y transfiere todos los datos de empleo al Centro de mando de CarbonCure. El software de la caja de control se incorpora adecuadamente con el software de dosificación existente, haciendo que añadir CO₂ a una mezcla sea como añadir un aditivo, lo que implica que no afecte a la dosificación ni al tiempo del ciclo de carga.

Por otra parte, las mangueras de transporte dirigen el CO₂ líquido desde el depósito de suministro hasta la caja de válvulas CarbonCure, que se localiza en la zona de carga de

la planta. La caja de válvulas evalúa y proporciona una cantidad conocida de CO₂ a la mezcla del hormigón que depende del contenido de cemento de la misma.

Posteriormente, se inyecta automáticamente el CO₂ en la mezcla en el momento en el que se ha descargado en torno a la mitad del contenido de cemento y agua. Mientras que el CO₂ líquido se almacena in situ en el depósito, el CO₂ que entra en contacto con el hormigón se halla en estado sólido y gaseoso, semejante al hielo seco o la nieve.

Una vez que sale de la caja de válvulas de CarbonCure se produce un cambio de estado producido por una caída de presión considerable. Posteriormente, el CO₂ entrará en contacto con la mezcla sufriendo una reacción química y se convertirá en un mineral, el carbonato de calcio, que hace que el hormigón sea más resistente.

De este modo, el CO₂ gaseoso susceptible de ser liberado a la atmósfera se transforma en un producto sólido que permanecerá en ese estado incluso si la estructura de hormigón es destruida.

El hormigón que produce CarbonCure no exhibe ningún factor diferenciador en comparación con el hormigón sin CO₂, tanto las propiedades frescas como endurecidas no cambian. Como puede leerse más abajo, otro punto que cabe destacar es que cualquier diseño de mezcla puede amoldarse para incorporar una dosis optimizada de CO₂ y una minoración en el contenido de cemento, sin afectar la resistencia del hormigón. Este hecho supone que se pueda emplear tanto en aplicaciones comerciales como residenciales. Cada metro cúbico de hormigón elaborado con esta tecnología ahorra una media de 17 kilogramos de emisiones de CO₂ a la atmósfera. Por ejemplo, un edificio de una altura media construido con esta tecnología podría ahorrar en torno a 680.000 kilogramos de emisiones de CO₂, lo que corresponde al carbono absorbido por 360 hectáreas de bosque en un año.

Equipamiento

El equipo de CarbonCure se ajusta a plantas de hormigón en una sola vista. Primeramente, se cuenta con la caja de válvulas que se encuentra conectada al tanque de CO₂ almacenado en el sitio y automáticamente inyecta una dosis determinada de CO₂ en el hormigón en el momento de la mezcla. Posteriormente, se sincroniza la caja de control con el software de procesamiento por lotes de la planta. Este hecho hace que añadir CO₂ a una mezcla sea rápido y sencillo **[49]**.



Figura 4.1.1: Caja de control y caja de válvulas conectado al tanque de CO₂ presurizado [49].

Fuente de CO₂

CarbonCure usa CO₂ derivado de emisores industriales. Los proveedores de gas establecidos almacenan, purifican y reparten el CO₂. En las diferentes plantas de hormigón, el CO₂ se encuentra almacenado en tanques presurizados los cuales son rellenados por los proveedores de gas periódicamente [49].

Propiedades no afectadas

El CO₂ mineralizado incrementa la resistencia a la compresión del hormigón hasta en un 10 %. Las propiedades frescas que incluyen asentamiento, tiempo de fraguado, trabajabilidad, bombeabilidad (es decir, la idoneidad de una mezcla de hormigón para ser transportada por bombeo, sin segregaciones ni bloqueos), contenido de aire, temperatura y acabado no se ven perjudicadas. Por otro lado, las propiedades endurecidas como son pH, congelación-descongelación, densidad, color, textura y durabilidad tampoco se ven afectadas [49].

Propiedades frescas

-Tiempo de fraguado

La adición de CO₂ a las mezclas de hormigón no conlleva ningún cambio relevante en el tiempo de fraguado del hormigón en relación con una mezcla de control según la norma ASTM C403. En la figura 4.1.4 se compara el tiempo de fraguado de tres mezclas de hormigón con CO₂ frente a tres muestras de control sin CO₂. Como se observa, el tiempo medio de fraguado final de la mezcla CarbonCure se encuentra dentro de los límites aceptables de esta prueba [50].

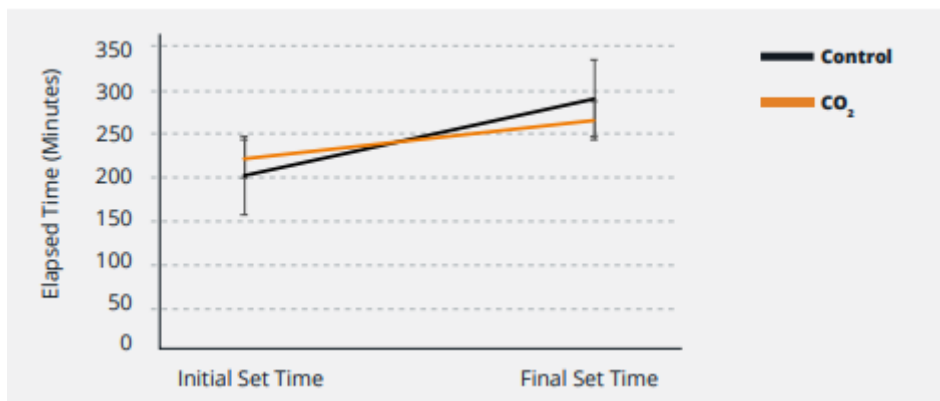


Figura 4.1.2: Resultados de la prueba ASTM C403 [50].

-Trabajabilidad

El hormigón producido mediante la inyección de CO₂ conserva la trabajabilidad deseada. La adición de CO₂ no afecta a la aptitud de los aditivos plastificantes ni a la consistencia entre lotes de la trabajabilidad. En la figura 4.1.6 se observa cómo el asentamiento del hormigón producido con CO₂ es análogo, y se encuentra dentro de los límites de las muestras de hormigón de control [50].

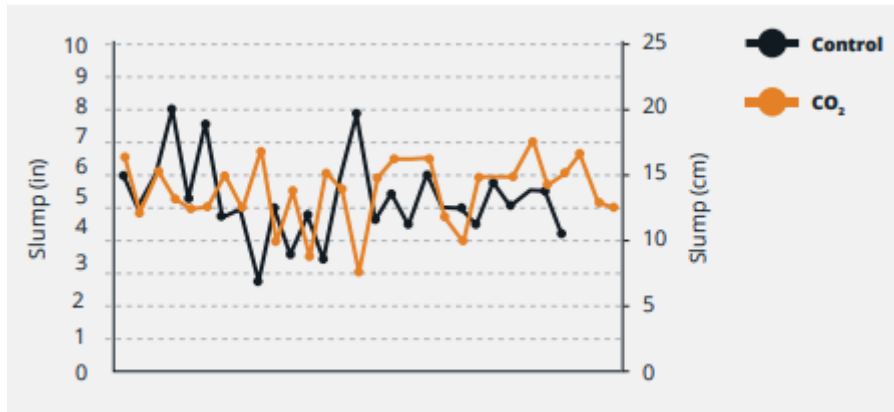


Figura 4.1.3: Asentamiento del hormigón [50].

-Contenido de aire

El hormigón elaborado mediante una inyección de CO₂ y una disminución de cemento conserva el contenido de aire deseado. La adición de CO₂ no cambia ni a la consistencia del aire de un lote a otro ni a la cantidad de aire. En la figura 4.1.7 se muestra cómo el contenido de aire del hormigón producido con CO₂ es idéntico y se encuentra dentro de los límites de las muestras de hormigón de control [50].

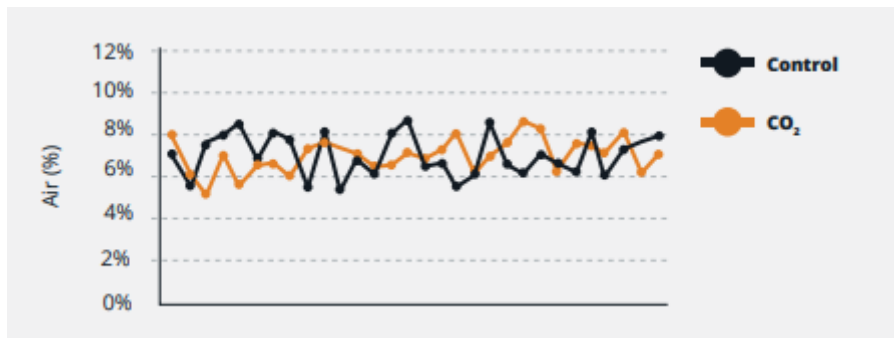


Figura 4.1.4: Contenido de aire en el hormigón [50].

Propiedades endurecidas

-pH

El pH de la solución de los poros del hormigón elaborado con CO₂ es semejante al del hormigón convencional producido con CO₂. El CO₂ inyectado en las mezclas de hormigón mediante la tecnología CarbonCure se transforma rápidamente en carbonato cálcico. Esto último no reduce la formación de hidróxido de calcio mientras se produce

la hidratación posterior, por lo tanto, no se reducen los niveles de alcalinidad y pH de la solución de poros. Se observa en la figura 4.1.8 el pH de la solución de los poros a los 56 días, en donde no se modifica por la adición de CO₂ [50].

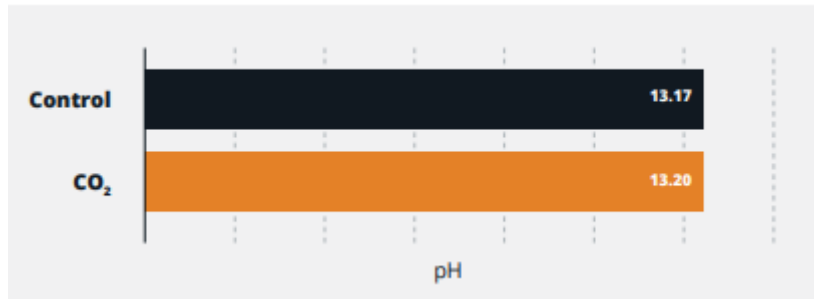


Figura 4.1.5: El pH de la solución [50].

-Penetrabilidad de los iones de cloruro –RCPT y resistividad superficial

Muestras de hormigón dosificadas con CO₂ y una disminución de cemento, según las pruebas de ASTM C1202 y AASHTO T358, indicaron una resistencia a la penetración de iones de cloruro equivalente a las mezclas de hormigón de control. La figura 4.1.9 muestra que el rendimiento del hormigón producido con CO₂ es similar al de una muestra de hormigón de control. Una carga que sobrepasa los 4000 culombios apunta a una elevada penetrabilidad de los cloruros. Sin embargo, si se encuentra entre 2000 y 4000 culombios muestra una penetrabilidad moderada de cloruro. Asimismo, en la figura 4.1.10 se muestra que el rendimiento del hormigón producido con CO₂ es semejante al de una muestra de hormigón de control [50].

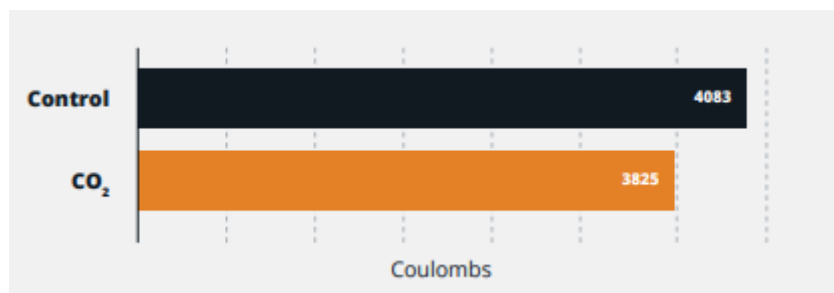


Figura 4.1.6: Resultados del ensayo de permeabilidad rápida al cloro (ASTM C1202) a los 28 días [50].

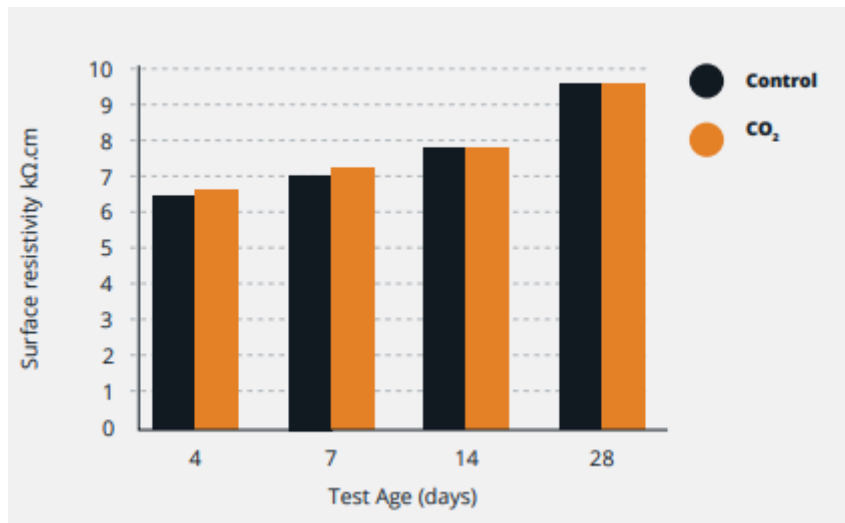


Figura 4.1.7: Resultados de la resistividad superficial (AASHTO T358) [50].

-Resistencia a la corrosión

El comportamiento ante la corrosión del hormigón armado que posee CO₂ ha sido analizado a partir de las pruebas ASTM G019 (corrosión) y ASTM C876 (potencial de media célula). Los resultados mostraron que la adición de CO₂ no afecta al rendimiento de la corrosión del acero de refuerzo. La figura 4.1.11 muestra que el rendimiento del hormigón con CO₂ es análogo o mejor que el de una mezcla de hormigón de control. Teniendo en cuenta los resultados del potencial de media célula se puede apuntar que el rendimiento del hormigón elaborado con CO₂ es equiparable al de una mezcla de hormigón de control, figura 4.1.12 [50].

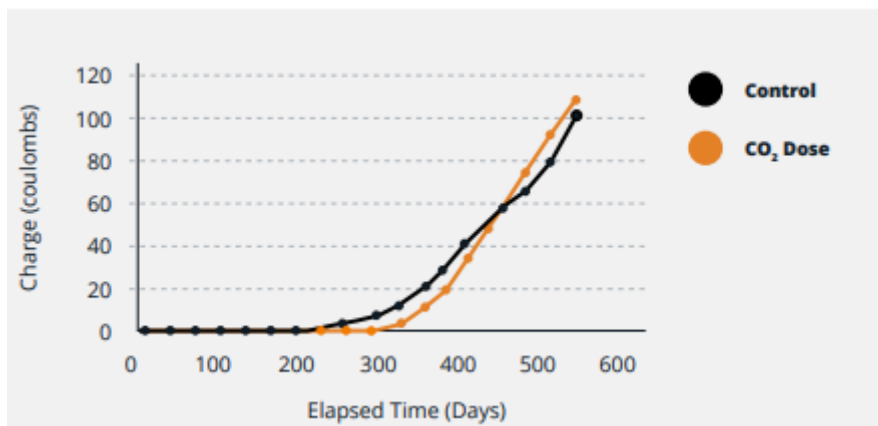


Figura 4.1.8: Resultados de la corrosión total (ASTM G109) [50].

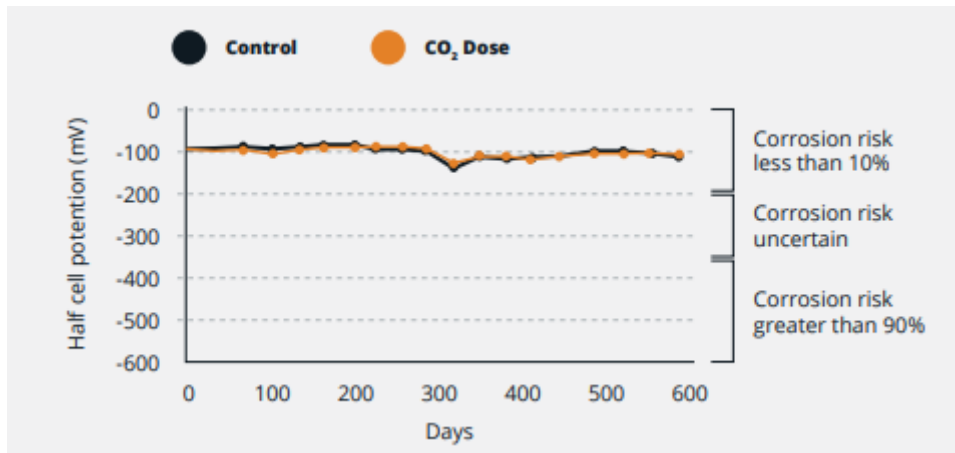


Figura 4.1.9: Resultados del potencial de media célula (ASTM C876) [50].

-Retracción por secado

La adición de CO₂ a las mezclas de hormigón no implica ninguna modificación en la retracción por secado con relación a una mezcla de hormigón de hormigón conforme la norma ASTM C157. En la figura 4.1.13 se compara la retracción por secado de una mezcla CarbonCure de 4000 psi (27,6 MPa) con una disminución de cemento respecto a una mezcla de control no modificada. La mezcla de CarbonCure justifica una reducción potencial en la retracción por secado en comparación a la mezcla de control, lo que muestra un efecto entre neutro y positivo [50].

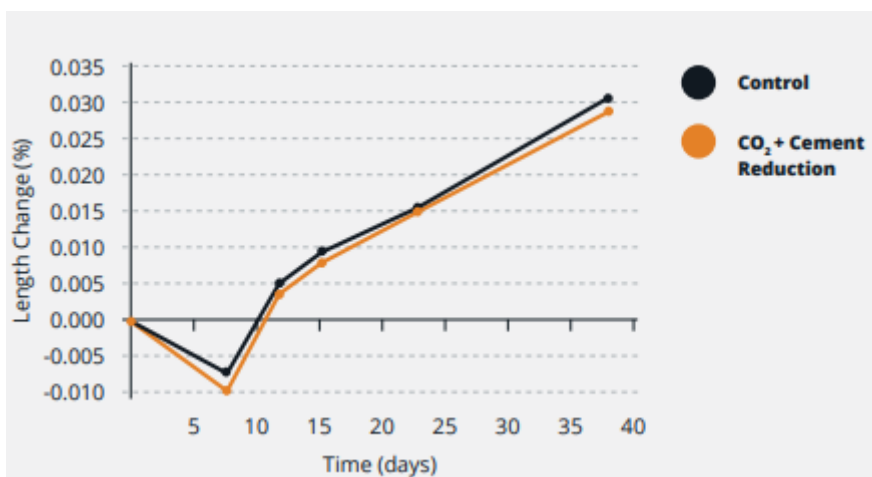


Figura 4.1.10: Resultados de la prueba ASTM C157 [50].

-Resistencia a la abrasión

Se ha comprobado el efecto de agregar CO₂ en la resistencia a la abrasión conforme a la norma ASTM C779. Las muestras de hormigón elaborado con CO₂ y un contenido reducido de cemento indican una resistencia a la abrasión parecida a la de las muestras de control. En la figura 4.1.14 se compara la resistencia a la abrasión de la superficie acabada de una mezcla de CarbonCure de 4000 psi (27,6 MPa) con una disminución de cemento respecto a una mezcla de control no alterada. Una vez pasados los 60 días, la profundidad final de desgaste de la mezcla CarbonCure se encuentra dentro de 0.001 pulgadas (0.0254 mm), significando un efecto neutro [50].

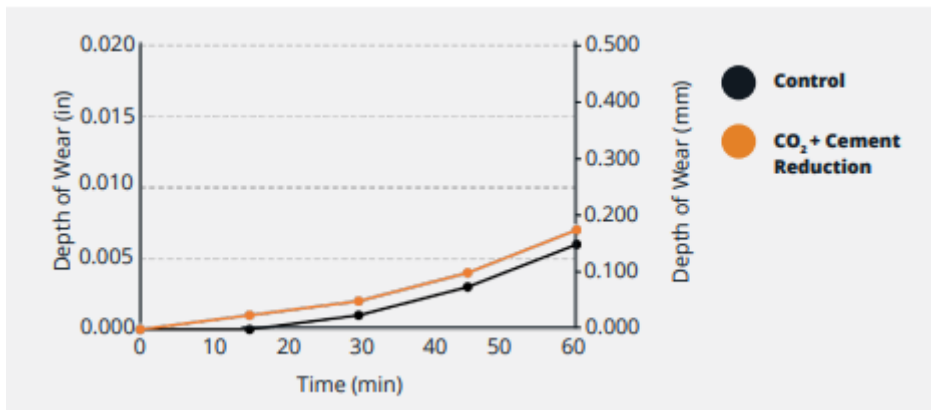


Figura 4.1.11: Resultados de la prueba ASTM C779 [50].

-Congelación-descongelación

El efecto de añadir CO₂ en la durabilidad a la congelación-descongelación se analizó de acuerdo con la norma ASTM C666. La figura 4.1.15 indica que las muestras de hormigón producidas con CO₂ y un contenido escaso de cemento presentan una resistencia a la congelación-descongelación análoga a la de las muestras de hormigón de control [50].

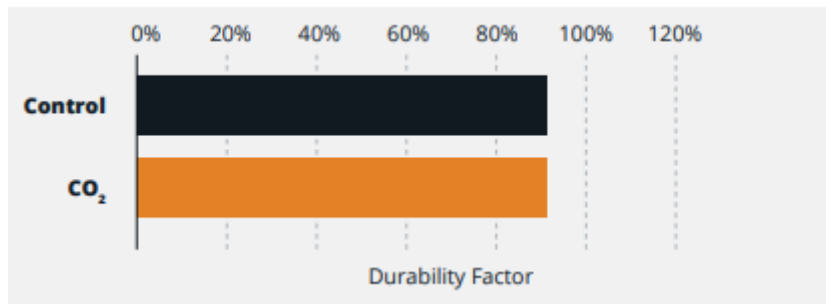


Figura 4.1.12: Durabilidad de congelación-descongelación [50].

-Aire ocluido

El efecto de la adición de CO₂ en las diferentes características del vacío de aire endurecido del hormigón con aire se ha analizado de acuerdo con la norma ASTM C457. Dicha adición no cambia la eficacia de los aditivos inclusores de aire. La figura 4.1.16 representa las características del aire ocluido elaborado con CO₂ es semejante a la de una mezcla de hormigón de control [50].

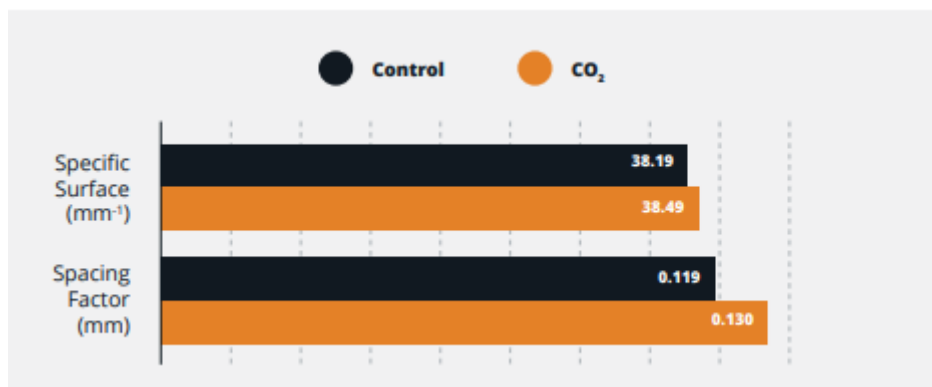


Figura 4.1.13: Características del aire ocluido del hormigón elaborado con CO₂ [50].

Por último, se hablarán de las propiedades más determinantes, las propiedades mecánicas. Primeramente, se llevó a cabo la inyección de CO en el hormigón por medio del sistema CarbonCure, en dónde los productores observaron una ganancia media de resistencia a la compresión hasta un 10 % a los 28 días, figura 4.1.1. Este dato les da la posibilidad de optimizar sus diseños de mezcla [49].

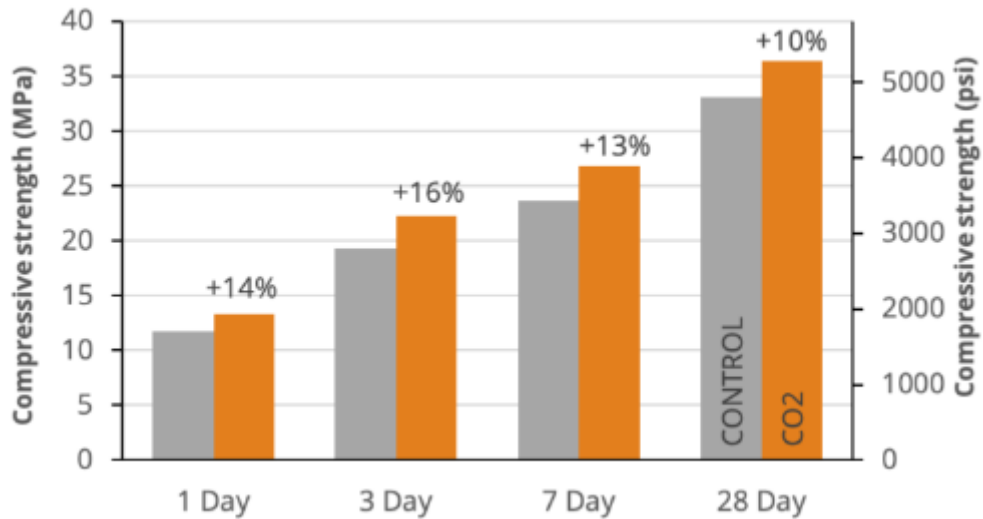


Figura 4.1.14: Ganancias de resistencia en las etapas temprana y tardía [49].

Posteriormente, se llevó a cabo la disminución del contenido de cemento en la mezcla de control en un 7 %, lo que produjo que los requisitos de resistencia no se cumplieran. A pesar de esto, en el momento en que se introdujo CO₂ a la mezcla con cemento limitado, la resistencia resultante fue idéntica a la de control y se cumplieron las condiciones [49].

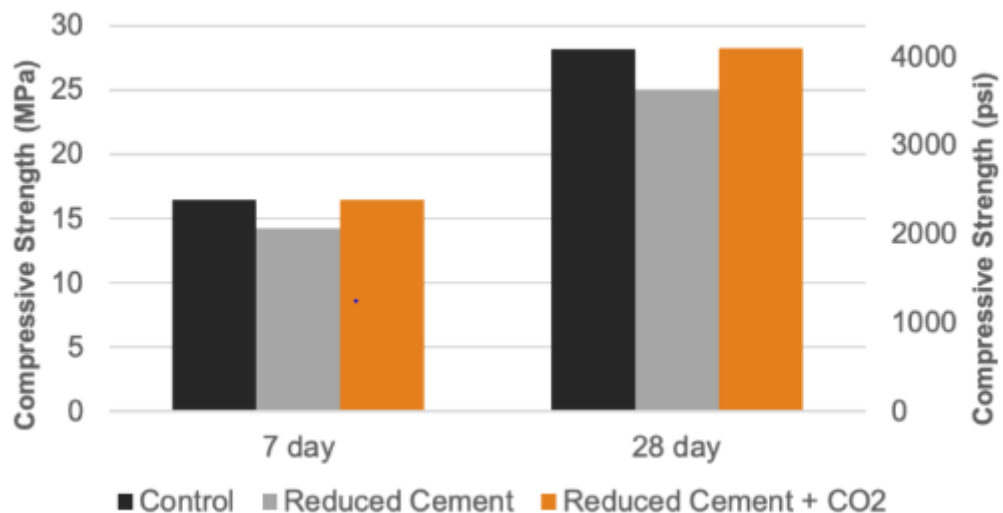


Figura 4.1.15: Influencia del CO₂ en las resistencias a la compresión [49].

Aplicaciones

-Para premezclado

El CO₂ que se inyecta mediante la tecnología CarbonCure acrecienta la resistencia a la compresión del hormigón premezclado, posibilitando a los productores de premezclado optimizar sus diseños de mezcla al tiempo que disminuye la huella de carbono de su producto.

-Para prefabricados

El CO₂ inyectado mejora la resistencia a la compresión del hormigón prefabricado, proporcionando a los productores optimizar sus diseños de la misma manera que para los premezclados.

-Albañilería

El CO₂ secuestrado disminuye la huella de carbono de la mampostería de hormigón, lo que proporciona a los productores de mampostería distinguir su marca CMU e incrementar las ventas con el creciente mercado de la construcción ecológica [50].

4.2 Tecnología CarbiCrete

CarbiCrete es una empresa de tecnología de eliminación de carbono con sede en Montreal que está desarrollando soluciones de construcción innovadoras y de bajo coste, contribuyendo a que se produzca una disminución en las emisiones de los gases de efecto invernadero [51].

Esta empresa ha desarrollado una manera de elaborar productos prefabricados de hormigón sin utilizar cemento. El proceso llevado a cabo sigue los mismos pasos que el de la producción del hormigón convencional, pero con ciertas diferencias. El primer paso a realizar en la fabricación del hormigón común se basa en la mezcla del cemento con áridos y agua. Sin embargo, CarbiCrete sustituye el cemento por escoria de las fábricas de acero que se mezcla con los otros materiales mediante un equipo estándar. Posteriormente, la mezcla se introduce en una máquina convencional de fabricación de bloques en donde se constituyen las unidades de mampostería de hormigón (CMU) [52]. Los bloques de cemento habitual se tratan como una unidad de mampostería de hormigón en la industria del cemento, cuya designación es CMU. La unidad de

mampostería habitual es la formada por Cemento Portland y un agregado, normalmente suele ser grava filtrada o arena [53].

A continuación, se lleva a cabo el curado del hormigón en una cámara de absorción especializada (fig.4.2.1) donde se inyecta CO_2 , y éste reacciona con la escoria de acero dentro del hormigón fresco. Cuando se produce el proceso de carbonatación, el CO_2 es capturado de forma permanente y se transforma en carbonatos de calcio estables, de forma que se llenan los vacíos de la matriz conformando una estructura densa, dotando de resistencia al hormigón [52].



Figura 4.2.1: Cámara de absorción especializada. Proceso de curado con CO_2 [54].

Las CMU de CarbiCrete presentan unas propiedades mecánicas de durabilidad similares o mejores respecto a las CMU habituales. En cuanto a las propiedades de absorción, permanecen inalteradas. Sin embargo, exhiben una resistencia mayor a la compresión de hasta un 30 %, y una mejor resistencia tanto a la congelación como la descongelación [48].

La tecnología CarbiCrete se puede instalar de forma sencilla en cualquier planta de prefabricados de hormigón. Se necesita un equipo estándar para hacer la mezcla de escoria de acero con los áridos y agua, y también para llevar a cabo el siguiente paso. La empresa CarbiCrete se encarga de la gestión de la instalación y la incorporación de la cámara de absorción, así como del tanque en donde se almacena CO_2 . El CO_2 que se encuentra almacenado en el tanque procede de un proveedor de gas natural que se ocupa de acumular y limpiar el gas de los emisores industriales [52].

Unidades de mampostería de hormigón (CMU) CarbiCrete
<ul style="list-style-type: none"> • Menor coste de los materiales: Hasta un 20 %
<ul style="list-style-type: none"> • Mayor rapidez para conseguir la resistencia óptima: Menos de 24 horas
<ul style="list-style-type: none"> • Mejor resistencia a la compresión: Hasta un 30 %

Tabla 4.2.1: Resumen ventajas de CMU de CarbiCrete [52].

4.3. Proceso CarbonBuilt

La tecnología llevada a cabo por CarbonBuilt se originó en la Escuela de Ingeniería Samueli y en el Instituto para la Gestión del Carbono de la Universidad de California, Los Ángeles (UCLA). Se centra en afrontar el cambio climático integrando las emisiones industriales de CO₂ en la elaboración del hormigón de una forma económicamente posible [55].

El principio de funcionamiento de este método consiste en una corriente de gas de combustión diluida procedente de cualquier fuente de emisiones de CO₂, la cual se hace pasar por una cámara de curado. El CO₂ se elimina y la corriente de gases de combustión se agota con un 75-85 % menos de CO₂. Se reduce en gran medida el CO₂ debido a que se utiliza mucho menos cemento, y por la carbonatación. Durante la carbonatación, el CO₂ del flujo de gases de combustión diluidos se incrusta permanentemente en bloques de hormigón (CMU). Esta tecnología se aplicará en un futuro temprano a los prefabricados de hormigón.

Asimismo, como se utiliza el CO₂ de una corriente diluida de gases de combustión, no se requiere el proceso costoso de extraer y aislar el CO₂. Éste último hecho le distingue de la tecnología planteada por CarbonCure.

Esta tecnología no es un proceso de inyección como es la de CarbonCure, sino es la utilización química del CO₂ en el proceso de curado y se producen unidades de mampostería de hormigón. La tecnología de inyección sólo se emplea para el cemento vertido (mezcla preparada).

Dicho proceso está probado y fue premiado con el XPRIZE en abril de este mismo año. Por otra parte, este procedimiento cumple o supera la norma ASTM C90 para la producción de CMU.

En cuanto al equipamiento, el proceso está verificado por una plataforma de control de procesos que supervisa todos los parámetros físicos y químicos críticos del proceso.

4.4. Tecnología Solidia

Solidia es una empresa de tecnología de hormigón y cemento que propone soluciones ecológicas patentadas y cuyos objetivos son favorecer y rentabilizar el uso del CO₂ para originar materiales de construcción superiores y sostenibles. Esta tecnología tiene la capacidad de suprimir un mínimo de 1.5 gigatoneladas de CO₂ cada año.

Solidia facilita dos tecnologías destacables: La primera es una tecnología de elaboración de cemento sostenible, la cual se puede realizar en hornos típicos de cemento, pero empleando menos energía de lo habitual. Por consiguiente, se reducen las emisiones de gases de efecto invernadero un 30-40 % en el momento de la fabricación. La otra tecnología consiste en el curado sostenible del hormigón. Se usa el CO₂ para curar el hormigón en vez de agua. Esto consume 240 kg de CO₂ y se ahorran 3 billones de litros de agua dulce cada año. Esta última afronta el desafío de emplear y consumir CO₂, el cual se transforma en carbonato de calcio [56].

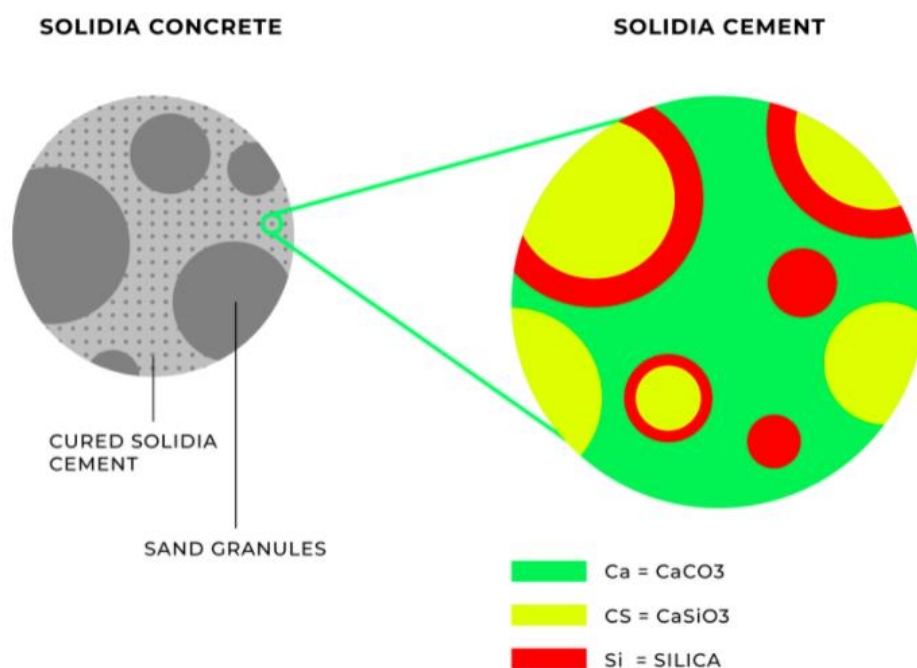


Figura 4.4.1: Composición del hormigón y cemento producido por Solidia [56].

Solidia emplea inteligencia artificial en la elaboración del hormigón. Debido a que la fase de curado es inteligente, disminuyen los residuos, hay un progreso en el control de calidad y la optimización del sistema y, para terminar, consigue que una de las industrias más antigua pase a la era digital [56].

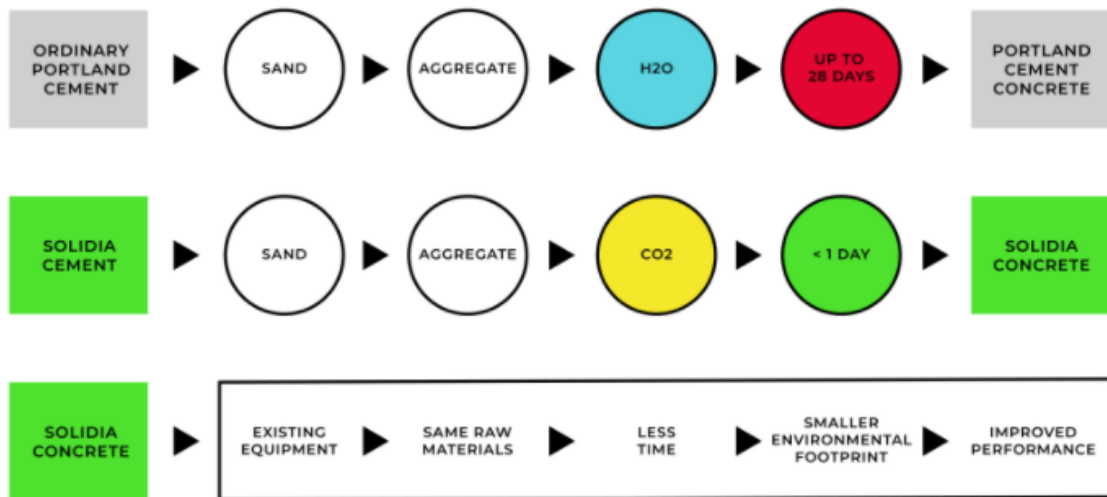


Figura 4.4.2: Procesos de obtención del hormigón de cemento Portland y hormigón Solidia [56].

El hormigón Solidia presenta una serie de beneficios concretos que hay tener en cuenta a la hora de seleccionar la tecnología más eficiente. Primero, emplea el mismo equipo, fabricación, proceso y materias primas. Tiene la capacidad de adecuarse a las líneas actuales de producción. Asimismo, no se consume agua debido a que el hormigón se cura con CO₂. El proceso de curado llevado a cabo es más rápido puesto que el hormigón se cura en tan sólo un día en vez de 28, conllevando un ahorro de tiempo considerable. Dicho hormigón actúa de una forma óptima, y presenta una durabilidad mayor en comparación al hormigón tradicional [56].

4.5 Orbix

Orbix es una empresa ubicada en Bélgica que fomenta y comercializa tecnologías y materiales sostenibles en el campo de la construcción y la siderurgia [57].

La tecnología de geopolímeros está planteada para elaborar productos de construcción de calidad elevada y a su vez presentan unas bajas emisiones de CO₂, y, por

consiguiente, un precio ambiental pequeño. En este tipo de elaboración, no se emplea cemento sino agentes aglutinantes alternativos.

Los diferentes productos realizados con dicha tecnología son principalmente resistentes al fuego, a los ácidos y suelen ser resistentes. Pueden encontrarse en diferentes sectores y teniendo diversas aplicaciones, como puede ser el sector agrícola en aplicaciones de construcción vinculadas con el agua y lugares en donde no se puede usar productos de cemento, siendo una alternativa.

La tecnología Carbstone Innovation permite crear materiales de alta calidad añadiendo CO₂ a Carbinox. Carbinox es un material creado por Orbix y se usa en aplicaciones de hormigón y asfalto. Esta tecnología de carbonatación da la posibilidad de que los materiales se puedan desarrollar en distintas formas.

En este tipo de tecnología, el cemento se sustituye por la combinación de CO₂ y Carbinox que actúan como aglutinante. Este hecho hace que los productos sean duraderos y considerados con el medio ambiente debido a que se avala un solo almacenamiento y permanente de una cantidad sustancial de CO₂ [58].

Una vez mencionadas las principales tecnologías de Orbix, cabe destacar que esta empresa crea materiales para distintos sectores, como son la construcción, infraestructura y siderurgia. Primeramente, se van a comentar los materiales que se usan en aplicaciones de hormigón y asfalto.

Carbinox

Es un material fino que se obtiene en el proceso de rotura y lavado de los granulados Stinox. Una de las principales características de este material es el ser capaz de absorber CO₂ del aire y presenta propiedades carbonatables. Por consiguiente, es óptimo para emplearlo en procesos de carbonatación y en la tecnología Carbstone, y de este modo, formar parte de la producción de todo tipo de materiales de construcción. Asimismo, presenta una densidad de Proctor elevada lo que hace que sea adecuado para aplicaciones con cimientos adheridos con cemento [59].



Figura 4.5.1: Carbinox [59].

Fillinox

Es un relleno para asfalto, mortero, plástico y hormigón, fabricado mediante subproductos. Las aplicaciones principales de este material son construcción e industrias del plástico **[60]**.



Figura 4.5.2: Fillinox [60].

Stinox

Es un granulado de elevada calidad, y se obtiene mediante la fracción mineral del acero inoxidable. Se utiliza en aplicaciones de hormigón y asfalto y en revestimientos de superficies, como, por ejemplo, en carreteras donde se coloca una superficie resistente al desgaste y así garantizar una capacidad de adherencia al desgaste **[61]**.



Figura 4.5.3: Stinox [61].

Posteriormente, se van a enumerar los materiales principales para el uso en infraestructuras y construcción.

Piedra Azul SprimontBlue

Se usa en aplicaciones tales como revestimientos de fachadas, estructuras de bloques de piedra, losas de recubrimiento, pisos y pavimentos exteriores, encimeras, mobiliario urbano y aplicaciones de escultura [62].



Figura 4.5.4: Piedra Azul SprimontBlue [62].

Caliza

La caliza exhibe de un volumen, masa y resistencia a las heladas haciendo que estas capas de roca sean adecuadas para hacer granulados y escolleras. Se procesa la piedra caliza originada en granulados más finos y arena triturada. De esta manera, durante el proceso productivo no hay desperdicios de ningún tipo [63].



Figura 4.5.5: Caliza [63].

Bloques Orbix

Estos bloques se elaboran con dos de los materiales mencionados anteriormente, Stinox y Fillinox, los cuales presentan unas propiedades ideales para fabricar cajas de almacenamiento y paredes. También son impermeables a los rayos X, por lo que se pueden utilizar como protector contra la radiación.

Entre las posibles aplicaciones que tienen, cabe destacar su uso en muros de contención, cajas de almacenamiento, naves industriales, barreras acústicas y muros ignífugos **[64]**.



Figura 4.5.6: Bloques Orbix **[64]**.

Arenisca / Grès

Orbix posee sus canteras propias de arenisca en la región de Lieja. La arenisca es un material consistente, más que la piedra caliza, y se emplea sobre todo en bloques de construcción y piedra de cantera **[65]**.



Figura 4.5.7: Arenisca / Grès [65].

4.6. Proceso Carbon8

La empresa Carbon8 Systems maneja todo tipo de residuos industriales, incluyendo los desechos peligrosos. Usa el CO₂ procedente de los gases de combustión una vez que ha sido capturado, y los convierte en productos que presentan bajas emisiones de carbono.

Carbon8 Systems es el autor del proceso químico denominado Tecnología de Carbonatación Acelerada (ACT) que emplea CO₂ con el fin de carbonatar y manejar diversos residuos industriales/ térmicos y subproductos. Esta tecnología transforma los subproductos industriales tales como cenizas volantes, tortas de filtro, APCr, escorias de acero y polvos de hornos de cemento y de derivación en productos mineralizados que posteriormente se pueden vender como agregados para diversas aplicaciones vinculadas con la construcción y, en algunos casos, como fertilizante granulado.

El proceso de carbonatación captura CO₂ en forma de carbonato de manera permanente, siendo una solución admisible de captura, utilización y almacenamiento de carbono (CCUS). Asimismo, un aspecto a destacar de la carbonatación es que es un proceso de baja energía ya que al ser una reacción exotérmica genera energía en vez de usarla. Este hecho lo diferencia de muchas tecnologías CCU, las cuales necesitan cantidades considerables de energía para empujar el CO₂ a un estado energético

superior en combustibles y productos químicos. Por lo tanto, la tecnología de carbonatación acelerada es económicamente factible.

Dicha tecnología posibilita el tratamiento de productos de fabricación y residuos alcalinos con CO_2 . Teniendo en cuenta que en todo el mundo hay gigatoneladas de estos residuos, existe la capacidad de capturar más de 500 megatoneladas de CO_2 a nivel mundial. Aparte, la carbonatación es la única manera de uso que captura el CO_2 permanentemente en vez de dejarlo que vuelva a la atmósfera en el momento en el que se degradan los plásticos o se quema el combustible [66].

Además de la tecnología de carbonatación acelerada, han desarrollado un contenedor de CO_2 que se puede situar en el sitio donde se generan las cenizas u otros subproductos, suprimiendo la necesidad de un costoso transporte y emisor de carbono, y empleando CO_2 capturado procedente de los gases de combustión.

Este contenedor cuenta con la posibilidad de tratar hasta 12.000 toneladas de residuos, ir procesándolos mientras que son producidos, y a la vez ir capturando el CO_2 que se va emitiendo.

Se llevó a cabo la puesta en marcha del contenedor de CO_2 en una planta de CRH, situada en las proximidades de Toronto. Se argumentó la captura directa de CO_2 , al igual que la capacidad para elaborar dos productos comercializables: un fertilizante rico en minerales y un agregado que se puede manufacturar. Posteriormente, este contenedor se usó en una planta de cemento en Reino Unido [67].



Figura 4.6.1: Contenedor de CO_2 en una planta de cemento [67].

5. Implementación de tecnologías específicas para un caso concreto

En este trabajo se analizan las diferentes tecnologías que se pueden implementar en Cementos Cruz, y, por consiguiente, las aplicaciones factibles que se pueden llevar a cabo.

Cementos Cruz es una empresa que se dedica a la fabricación y comercialización tanto de cementos como de morteros secos. Sus instalaciones cuentan con dos molinos que presentan una capacidad total de producción de millón y medio toneladas al año y doce silos en donde se almacena el producto terminado. Éstos tienen la capacidad de almacenar hasta 40.000 toneladas, los cuales se pueden mandar a las diez tolvas de carga automáticas de granel. Las materias primas indispensables para la elaboración de sus cementos se encuentran almacenadas en las diferentes naves, sumando una capacidad de 200.000 toneladas. De esta forma, se alcanza una conservación óptima de los productos y de las propiedades correspondientes **[68]**.

Además, el proceso de envasado se encuentra totalmente automatizado, y para ello, se cuenta con una ensacadora rotatoria con capacidad para el envasado de hasta 250.000 toneladas por año. Esta actividad se lleva a cabo en una nave diáfana de 3000 m² **[68]**.

Asimismo, aparte de la actividad que desarrolla Cementos Cruz, tiene como complemento una empresa denominada "Hormicruz". Esta última es una empresa líder en el campo de la producción y distribución de hormigones y morteros con más de 10 plantas situadas en la zona de Levante, Almería, Comunidad Valenciana, Madrid y Asturias. Se encarga fundamentalmente de la fabricación, comercialización y distribución del hormigón y mortero **[69]**.

La empresa Cementos Cruz no genera ningún tipo de emisiones de CO₂ ya que no produce clínker en sus instalaciones. El clínker utilizado para la elaboración de sus cementos proviene de otras cementeras, que cuentan con horno de fabricación de clínker y que, por tanto, generan importantes cantidades de emisiones de GEI.

Sin embargo, existe una cantidad de CO₂ que se emite durante el transporte de este clínker. El clínker utilizado proviene, concretamente, de la fábrica de Lafarge-Holcim, en Carboneras, y de la planta de CEMEX de San Vicente del Raspeig (Alicante). Hasta 2008, Cementos La Cruz tenía que importar el clínker de países extranjeros debido a la falta de disponibilidad de esta materia prima por parte de las cementeras españolas,

pudiendo aumentar o disminuir estas emisiones dependiendo del medio de transporte usado.

Se ha calculado la cantidad de CO₂ que se emite durante el transporte mediante el software académico denominado Ansys GRANTA EduPack 2020. Dicho software es la actualización del conocido CES EduPack, utilizado en más de 1000 universidades y facultades por educadores. Este software permite introducir a los estudiantes de ingeniería una amplia selección de materiales para el diseño mecánico. Asimismo, esta nueva versión ofrece una base de datos integral de materiales e información de procesos, potentes herramientas, y cuenta con diferentes recursos que avalan una amplia variedad de enfoques para la educación de materiales. Para este estudio, se ha utilizado la base de datos avanzado, nivel 3, más concretamente, la sección de ecoauditoría, para calcular el impacto ambiental del clínker.

Primero, se evaluó la cantidad de CO₂ que se emitía desde la fábrica de Carboneras hasta Cementos la Cruz en Abanilla, donde hay un recorrido de 218 kilómetros (km). Se obtuvo que en ese trayecto se producía 14,8 kilogramos (kg) de CO₂, y se requería una energía de 205 MJ.

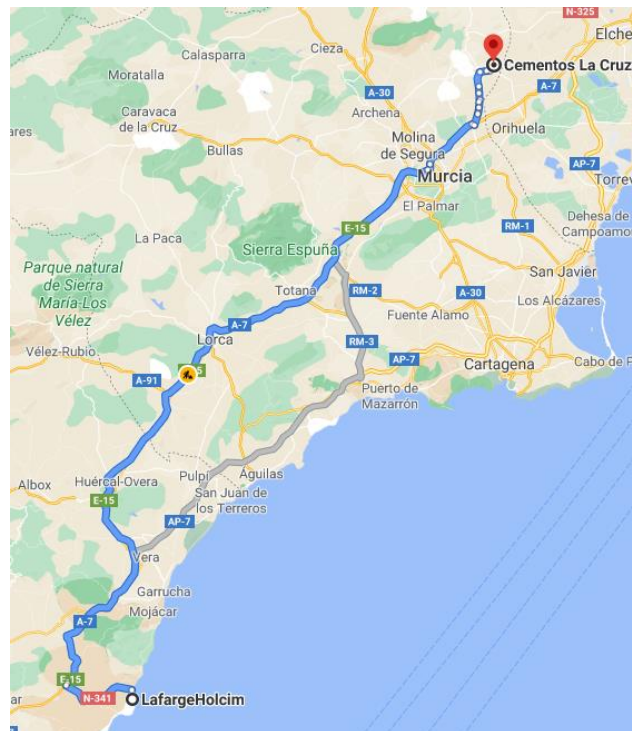


Figura 5.1: Trayecto Lafarge-Holcim-Cementos La Cruz [39].

Por otra parte, se tiene la planta cementera CEMEX situada en San Vicente de Raspeig, a 73,1 km de Cementos La Cruz. Durante este recorrido se produce 4,95 kg de CO₂, una cantidad inferior al caso anterior debido a que la distancia es mucho menor, y una energía requerida de 68,7 MJ, diferencia considerable respecto al trayecto anterior.

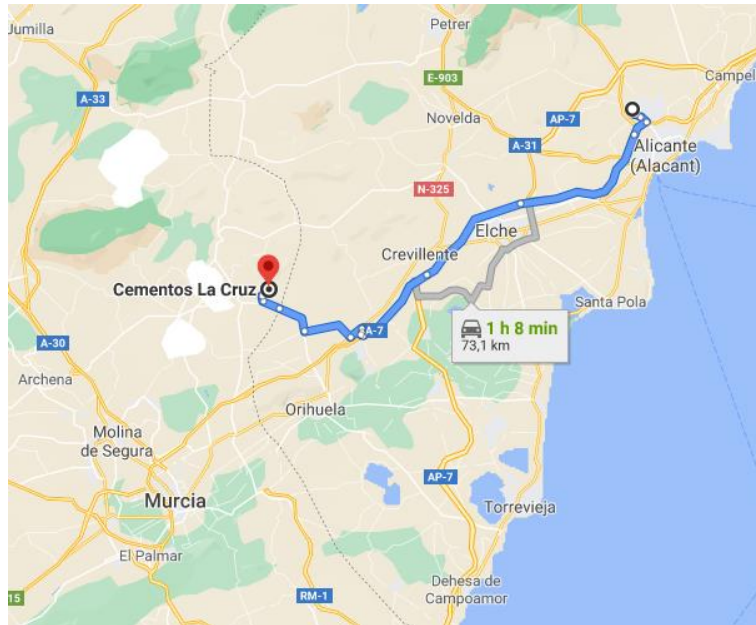


Figura 5.2: CEMEX, San Vicente del Raspeig- Cementos La Cruz [39].

Para ambos cálculos, se tuvo en cuenta que el traslado del clínker se hace mediante camiones de cuatro ejes, camiones bañera.

Se puede observar que la cantidad de CO₂ emitida aumenta de forma proporcional a la distancia, al igual que la energía requerida, produciéndose por kilómetro una cantidad de CO₂ de 0,0678 kg, una cifra que a simple vista no llama la atención, pero hay que tener en cuenta otros factores. Normalmente, se necesita más de un camión ya que las cantidades de clínker transportadas son considerables, de órdenes de magnitud de toneladas. Además, una vez que el camión ha descargado tiene que volver a su punto de partida, emitiendo CO₂ en menor proporción.

No obstante, para producir una tonelada de clínker se estima que se emite entre 800 y 1000 Kg de CO₂ por lo que esta cantidad es muy superior a lo que se puede llegar a producir durante el transporte.

En el presente trabajo, se estudia la captura del CO₂ de una cementera, concretamente de la fábrica de Lafarge-Holcim España S.A.U en Carboneras, y el posterior uso de éste en Cementos Cruz mediante una tecnología específica.



Figura 5.3: Planta de Cementos La Cruz (Murcia) [39].

Una vez analizados los diferentes usos que se le puede dar al CO₂, se ha llegado a la conclusión que, para este tipo de empresa, hay fundamentalmente tres aplicaciones que se pueden llevar a cabo. Una de las posibles aplicaciones es la inyección del CO₂ al hormigón una vez mezclado mediante la tecnología desarrollada por CarbonCure. Esta tecnología inyecta este CO₂ *in situ* al hormigón húmedo mientras se está vertiendo, aspecto que la diferencia de las otras tecnologías.

Otro hecho a tener en cuenta es que Cementos Cruz no tiene línea de prefabricados por lo que algunas de las tecnologías desarrolladas anteriormente no se podrían implementar ya que están fundamentadas en la producción de prefabricados.

Otro de los posibles usos es el crear materiales de construcción usando el CO₂ capturado. El hormigón resultante se diferencia del convencional por el hecho de usar CO₂ en el proceso de curado en vez de agua, consumiendo una gran cantidad de CO₂ y ahorrándose una cantidad considerable de agua. Dicho hormigón presenta una mayor

durabilidad respecto al hormigón tradicional, y además este proceso patentado por Solidia es mucho más rápido frente al resto de empresas que realizan también este procedimiento, conllevando un ahorro de tiempo en la producción.

Se podría concluir con la tecnología desarrollada por Orbix, denominada tecnología Carbstone Innovation, la cual se basa en la creación de materiales de alta calidad usando CO₂ y sus propios materiales patentados. En las dos últimas aplicaciones, el CO₂ se utiliza en el proceso de curado dando lugar a nuevos materiales.

Finalmente, entre las posibles aplicaciones mencionadas con anterioridad, se seleccionó para la empresa Cementos Cruz el proceso de inyección de CO₂ capturado obtenido de la planta de referencia situada en Carboneras (Almería) en el hormigón. Este CO₂ se añadiría en el hormigón premezclado en forma de aditivo pudiendo mejorar el rendimiento del hormigón y originar un hormigón más sostenible. En Hormicruz se cuenta con un volumen de producción 20.000 m³ de hormigón/mes, si contamos con todas las plantas, para los cuales se necesitarían 5.75 toneladas de CO₂, teniendo en cuenta que las dosis de CO₂ se puede generalizar como un 0,15% en peso de cemento. El hecho de introducir cierta cantidad de CO₂ a la mezcla, permite la eliminación de aglomerante en torno al 7-8%. Cuando se elimina el aglomerante se produce una reducción de la resistencia, pero la adición del CO₂ posibilita restaurar la resistencia a la compresión. Asimismo, dicha reducción de aglomerante da como resultado un hormigón con una menor huella de carbono, pudiendo conseguirse una reducción de hasta un 4,6%. Una cantidad pequeña de CO₂ se absorbe directamente, pero la mayor cantidad de emisiones de CO₂ se evitaría disminuyendo la cantidad de cemento.

Los materiales y la energía necesaria para poner en práctica esta aplicación, es decir, construir y transportar el equipo, y la captura y transporte del CO₂, provocan una pequeña emisión de CO₂ que es menor que la cantidad de CO₂ absorbido y que debería ser estimada.

En cuanto a la parte económica, habría que tener en cuenta el coste del CO₂ capturado al que se tendría que sumar el transporte de este CO₂ a la planta de Cementos La Cruz donde se llevaría a cabo el proceso de inyección. Por el contrario, al necesitar menos aglomerante, se parte de la base de que en 2.440 kg de hormigón hay 275 kg de cemento, por lo tanto, en un m³ que equivale a 2300 kg hay 259.22 kg de cemento. Una vez que tenemos este último dato se puede hacer una reducción del 7% por el hecho de introducir CO₂ en el hormigón por lo que serían necesarios 18.14 kg de cemento menos. Estos kg de cemento menos equivalen a 1.4512 € de cemento por m³, significando un ahorro de 29.024 € mensuales en cemento.

Con esta aplicación, se puede dar un uso productivo a los residuos de CO₂, reciclando de esta forma una parte de sus residuos primarios y empleando los recursos de manera coherente basado en los principios de la economía circular.

6. Resumen y conclusiones

El objeto de este Trabajo Fin de Estudios ha consistido primeramente en establecer las distintas alternativas tecnológicas ya existentes con el fin de dar respuesta a la emergencia global que se enfrenta la humanidad hoy en día, el denominado cambio climático. Su presencia es más que evidente debido a la variabilidad de las condiciones atmosféricas analizadas con el paso del tiempo. Algunos efectos que lo demuestran es el incremento considerable de las concentraciones atmosféricas de CO₂, encontrándose por encima de los niveles preindustriales en un 48 %. Este aumento se debe fundamentalmente a la intervención humana y a la actividad industrial.

Dentro de las distintas actividades industriales que se llevan a cabo actualmente, cabe destacar la industria cementera ya que es responsable del 7-8% de las emisiones industriales de CO₂ mundiales, y del 5% en España. Estos datos muestran la gran cantidad de emisiones que produce dicho sector, siendo fundamental el uso de las diferentes tecnologías de captación de CO₂.

Por lo tanto, debemos disminuir las emisiones de CO₂, concretamente en el sector de la construcción, por lo que se investigó principalmente en el proceso de producción del cemento, cuáles eran las fases que generaban más CO₂, y así, de esta manera, estudiar que tecnologías de captación de CO₂ podrían ser óptimas para nuestro caso de estudio. Actualmente, la tecnología más desarrollada, y que se encuentra implantada en diferentes sistemas de captura de CO₂ es el proceso de absorción química a base de aminas. Sin embargo, dicha tecnología presenta una desventaja significativa que es el consumo energético tan elevado que presenta en el momento de la regeneración, conllevando una disminución en la eficiencia eléctrica neta del sistema de generación. Por esta razón, se plantea como posible solución la captación del dióxido de carbono mediante un sistema de cogeneración basado en una microturbina cuya denominación es "Capstone C200", y con ella se pueden lograr eficiencias del 70%.

Una vez seleccionada la tecnología que se quiere implantar, se llevó a cabo la evaluación del caso práctico. Para el presente estudio, se toma como planta de referencia la fábrica de Lafarge-Holcim situada en Carboneras (Almería). Tiene una capacidad de producción anual de clínker de 1.100.000 toneladas, y una capacidad de producción de cemento de 1.500.000 t/año. En cuanto a la cantidad de CO₂ emitido por esta planta será aproximadamente de 1.100.000 toneladas anuales, teniendo en cuenta que una tonelada de clínker produce una tonelada de CO₂. Se tiene como objetivo el captar dicha cantidad de CO₂ para posteriormente utilizarlo en un proceso secundario.

La microturbina puede llegar a capturar hasta 770.000 toneladas de CO₂, pero no se podrá usar exactamente dicha cantidad debido a la existencia de posibles pérdidas durante el proceso de funcionamiento y de transporte del mismo.

Finalmente, como ya se ha ido mencionando a lo largo del presente trabajo, la captación de CO₂ es necesaria, pero debido al elevado volumen de gas que se plantea capturar, es necesario encontrar procesos industriales a los que incorporarlo para evitar así el problema de su almacenaje como residuo. Por este motivo, este estudio se centra en la fase de utilización del CO₂ capturado, concretamente, en la empresa Cementos La Cruz. Se concluyó que dicho CO₂ puede tener varios usos, pero principalmente se puede emplear en lo siguiente:

1. Uso del CO₂ en el curado de hormigones. Este CO₂ puede utilizarse como materia prima esencial en el curado de matrices en base cemento y/o en base a residuos alcalinos con posibilidad de endurecerse rápidamente, dando lugar a una mejora en las propiedades mecánicas de los diferentes productos. Las utilidades en hormigones pueden darse sobre una matriz formulada con el fin de producir hormigón prefabricado o bien, sobre hormigón preparado. En cuanto a los productos de hormigón prefabricado, las aplicaciones tecnológicas más novedosas, y que actualmente ya se están distribuyendo en algunos países como pueden ser Francia, UK, China o USA, se fundamentan en la creación de conglomerantes que pueden contener residuos alcalinos valorizados, y en la mayoría de los casos, el uso de un CO₂ 100% puro en procesos de curado en cámaras específicas (Orbix, Solidia, CarbonCure). En estos procesos se regulan la presión, temperatura y humedad. Las principales ventajas que presentan:
 - Disminución de las emisiones de CO₂.
 - Mejora en las propiedades de los productos.
 - Existe una circularidad debido a la valorización de los residuos.
 - Necesitan menos energía para llevar a cabo el proceso.
 - Disminuyen los costes de producción ya que se utiliza menos cantidad de cemento para obtener una prestación equivalente.
 - El proceso de curado es muy rápido, en algunas ocasiones de menos de un día.
 - En ciertos productos, como puede ser el “Carbstone” (Orbix) se usa escoria de acería en vez del cemento en la producción del prefabricado.
2. Uso del CO₂ industrial como materia prima en la confección de productos de construcción novedosos (cementos, hormigones, áridos, etc..). El método consiste

en fijar el CO₂ rápidamente de manera inalterable en matrices alcalinas y materiales a partir de tecnologías como puede ser la mineralización por carbonatación acelerada, simbolizando un sumidero para el CO₂. Se estima un aumento considerable de instalaciones de captura de CO₂ industrial en las dos siguientes décadas, y el CO₂ sobrante tendrá otros usos que ayuden a la amortización de las instalaciones de captura de CO₂.

7. Bibliografía

- [1] Agrupación de Fabricantes de Cemento de España (OFICEMEN); Hoja de ruta de la industria cementera española para alcanzar la neutralidad climática en 2050 [en línea] [consulta: 2 agosto 2021]. Disponible en: <https://www.oficemen.com/wp-content/uploads/2020/12/Hoja-de-ruta-del-cemento-neutralidad-climática-en-2050.pdf>
- [2] Cementos Cruz [en línea] [consulta: 2 agosto 2021]. Disponible en: <https://www.cementoscruz.com/i-d-i/>
- [3] NASA: Climate Change and Global Warming [en línea] [consulta: 15 abril 2021]. Disponible en: <https://climate.nasa.gov/>
- [4] Grotola, Chirara. Gases de efecto invernadero: ¿Cuáles son y cómo se producen? [en línea] [consulta: 15 abril 2021]. Disponible en: <https://es.ecobnb.com/blog/2021/02/gases-efecto-invernadero/>
- [5] ACNUSA | Autorité de contrôle des nuisances aéroportuaires [en línea] [consulta: 21 junio 2021] Disponible en: <https://www.acnusa.fr/es/contaminacion-atmosferica/fuentes/88>
- [6] Global Energy Review 2020. The impacts of the Covid-19 crisis on global energy demand and CO₂ emissions. IEA: International Energy Agency [en línea] [consulta: 13 abril 2021]. Disponible en: <https://www.iea.org/topics/climate-change>
- [7] Report Extract Industry. The Covid-19 Crisis and Clean Energy Process. IEA: International Energy Agency [en línea] [consulta: 13 abril 2021]. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/the-covid-19-crisis-and-clean-energy-progress/industry#abstract>
- [8] Tracking Industry 2020; IEA: International Energy Agency [en línea] [consulta: 7 abril 2021]. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/tracking-industry-2020>
- [9] Gobierno de España, La Moncloa 1/07/21; [en línea] [consulta: 9 agosto 2021]. Disponible en: https://ww.lamoncloa.gob.es/serviciosdeprensa/notasprensa/transicion-ecologica/Paginas/2021/010721-emisiones_co2.aspx
- [10] Spain, Data browser; IEA: International Energy Agency [en línea] [consulta: 7 abril 2021]. Disponible en: <https://www.iea.org/countries/spain>

[11] Muñoz, Cristian. M; Morales, Hernán; Torres, Cristian. Tecnologías de captura y secuestro de CO₂. Capítulo 3. Pontificia universidad católica de Chile, Escuela de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica, 25 mayo 2018.

<https://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/alumno08/co2capture/Informe%20captura%20y%20secuestro%20de%20CO2.pdf>

[12] PTECO2: Plataforma Tecnológica Española de CO₂ [en línea] [consulta: 24 febrero 2021]. Disponible en: <https://www.pteco2.es/es/tecnologias/captura>

[13] Fundación energía. Tecnologías de captura y almacenamiento de CO₂. [En línea] [Consulta: 26 febrero 2021]. Disponible en:

<http://www.fundacionenergia.es/PDFs/Carb%C3%B3n%20Futuro/Cap%C3%ADtulo%2006.1.pdf>

[14] PTECO2: Plataforma Tecnológica Española de CO₂ [en línea] [consulta: 24 febrero 2021]. Disponible en: <https://www.pteco2.es/es/tecnologias/transporte>

[15] PTECO2: Plataforma Tecnológica Española de CO₂ [en línea] [consulta: 24 febrero 2021]. Disponible en: <https://www.pteco2.es/es/tecnologias/almacenamiento>

[16] Carbon capture, utilisation and storage, Momentum is growing for CCUS; IEA: International Energy Agency [en línea] [consulta: 18 marzo 2021]. Disponible en: <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/carbon-capture-utilisation-and-storage>

[17] GARTNER, Ellis; MORIN, Vincent; Aditivos para cemento [patente]. Lafarge 61, rue des Belles Feuilles 75116 Paris, Francia. Número de solicitud: E 09725265.

<https://patents.google.com/patent/ES2402474T3/es?q=cemento+Portland&og=cemento+Portland>

[18] Componentes y propiedades del cemento; IECA: Instituto Español del Cemento y sus aplicaciones [en línea] [consulta 11 febrero 2021]. Disponible en: <https://www.ieca.es/componentes-y-propiedades-del-cemento/>

[19] Oficemen: Agrupación de fabricantes de cemento en España [en línea] [consulta 11 febrero 2021]. Disponible en: <https://www.oficemen.com/wp-content/uploads/2020/12/Hoja-de-ruta-del-cemento-neutralidad-clim%C3%A1tica-en-2050.pdf>

[20] El cemento, proceso de fabricación; IECA: Instituto Español del Cemento y sus aplicaciones [en línea] [consulta 11 febrero 2021]. Disponible en: <https://www.ieca.es/proceso-de-fabricacion/>

- [21] Freepng [en línea] [consulta: 14 julio 2021]. Disponible en: <https://www.freepng.es/png-osx1z0/>
- [22] Robbie M. Andrew; Global CO₂ emissions form cement production; CICERO Center for International Climate Research, Oslo 0349, Norway. Published 26 January 2018. <https://essd.copernicus.org/articles/10/195/2018/essd-10-195-2018.pdf>
- [23] Dean C.C, Blamey J, Florin N.H, Al-Jeboori M.J, Fennell P.S. The calcium looping cycle for CO₂ capture from power generation, cement manufacture and hydrogen production. Chemical Engineering Research and Design, 89 (2011), 836-855.
- [24] Cemento, Informe de seguimiento junio de 2020; IEA: International Energy Agency [en línea] [consulta: 7 abril 2021]. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/cement>
- [25] Pérez Sánchez, J; Anguillan Martínez, J. Elazar Czerwiec, Z; Zavala Guzmán, A. M. Levelized cost analysis of microturbine with exhaust gas recirculation and CO₂ capture system in Mexico. International Journal of Greenhouse Gas Control ,83 (2019), 105-116.
- [26] Modelo C200 Manual del usuario Capstone MicroTurbine [en línea] [consulta: 16 julio 2021]. Disponible en: <https://globalmicroturbine.com/search/c200/pages/capstone-microturbine-model-c200-users-manual-001.html>
- [27] Capstone Turbine Corporation. Capstone C200 Microturbine. Technical Reference .410066 RevC (June 2009). 21211 Nordhoff Street, Chatsworth, CA 91311, USA [en línea] [consulta: 28 junio 2021]. Disponible en: http://regattasp.com/files/410066C_C200_Tech_Ref.pdf
- [28] Micropower Europe, Authorized Capstone Distributor [en línea] [consulta: 20 julio 2012] Disponible en: <http://wm1396961.web-maker.es/TECNOLOG-A/>
- [29] Capstone Turbine. Ventajas de la aplicación de microturbinas para la generación eléctrica de biogás [en línea] [consulta 8 julio 2021] Disponible en: <https://www.esamur.com/public/file/ponencia137.pdf>
- [30] Capstone Microturbine Soluciones energéticas [en línea] [consulta: 19 julio 2021]. Disponible en: <https://docplayer.es/8282196-Capstone-microturbine-soluciones-energeticas.html>

- [31] Global Energy LLC, C200 Microturbine [en línea] [consulta: 19 julio 2021]. Disponible en: <https://globalmicroturbine.com/search/c200/pages/c200-microturbine-011.html>
- [32] Micropower Europe. Authorized Capstone Distributor [en línea] [consulta: 19 julio 2021]. Disponible en: <https://www.micropowereurope.com/en-US/products/c200s>
- [33] G.I. T Grupo de Ingeniería Térmica, Universidad Jaume I, Castellón. Compresores centrífugos, Tema 4 [en línea] [consulta: 19 julio 2021]. Disponible en: http://www.git.uji.es/docencia/Apuntes/Tec_Frig/TF_4_COMP_CENTRIF.pdf
- [34] Wilfrid Francis; Martin C. Peters. Data Sheet No.174 -The Gas Turbine. Fuels and Fuel Technology (Second (SI) Edition) (1980), 661-668.
- [35] Vernon L. Eriksen; Heat Recovery Steam Generator technology; Introduction (2017), 1-15.
- [36] Breeze Paul; Combined Heat and Power; Power Generation Technologies (Third Edition) (2019)), pág 121-143
- [37] Turbina de vapor. Área tecnología [en línea] [consulta: 19 julio 2021] Disponible en: <https://www.areatecnologia.com/mecanismos/turbina-de-vapor.html>
- [38] Carboneras | Oficemen, Agrupación de fabricantes de cemento de España [en línea] [consulta: 26 junio 2021]. Disponible en: <https://www.oficemen.com/el-cemento/fabricas-en-espana/carboneras/>
- [39] Google Maps
- [40] Periódico IDEAL [en línea] [consulta: 20 julio 2021]. Disponible en: <https://www.ideal.es/almeria/almeria/fabrica-holcim-carboneras-20200224124426-nt.html>
- [41] Cementos Cruz | CEM I 52,5 R [en línea] [consulta: 10 agosto 2021]. Disponible en: <https://www.cementoscruz.com/cem-i-52-5r-cemento-gris-de-alta-resistencia-recomendado-para-hormigones-y-prefabricados-granel/>
- [42] Cementos Cruz | CEM II/ A-L 42,5 R [en línea] [consulta: 10 agosto 2021]. Disponible en: <https://www.cementoscruz.com/cem-ii-a-l-42-5r-cemento-gris-recomendado-para-hormigones-y-prefabricados-ensado-y-granel/>
- [43] Cementos Cruz | CEM II/ B-L 42,5 R [en línea] [consulta: 10 agosto 2021]. Disponible en: <https://www.cementoscruz.com/cem-iib-l-32-5-r-cemento-para-los-profesionales-de-la-construccion-ensado-y-granel/>

- [44] LafargeHolcim [en línea] [consulta: 10 agosto 2021]. Disponible en: <https://www.lafargeholcim.es/planta-captura-y-uso-carbono-a-gran-escala-carboneras-net-zero>
- [45] Tecnalía | Propuesta ATRIC-C 2021: Usos del CO2 en materiales de construcción.
- [46] Skocek, J, Zajac, M y Haha, M.B (2020). Carbon capture and utilization by mineralization of cement pastes derived from recycled concrete. Scientific reports, 10(1), 1-12.
- [47] Woodall, C.M, McQueen, N, Pilorgé, H y Wilcox, J (2019). Utilization of mineral carbonation products: current state and potential. Greenhouse Gases: Science and Technology, 9(6), 1096-1113.
- [48] CarbonCure XPrize 30/06/21 [en línea] [consulta: 30 junio 2021]. Disponible en: <https://carbon.xprize.org/prizes/carbon/teams/carboncure>
- [49] CarbonCure's Concrete Solution | Concrete Technology [en línea] [consulta: 23 junio 2021]. Disponible en: <https://www.carboncure.com/technology/>
- [50] Frequently asked questions for engineers; CarbonCure [en línea] [consulta: 22 junio 2021] Disponible en: <https://www.carboncure.com/resources/>
- [51] CarbiCrete [en línea] [consulta: 8 julio 2021] Disponible en: <https://carbicrete.com/about/>
- [52] The cement-free, carbon negative concrete solution; CarbiCrete [en línea] [consulta: 22 junio 2021] Disponible en: https://carbicrete.com/wp-content/uploads/video/1/carbicrete_hd-en.mp4
- [53] Netinbag [en línea] [consulta: 8 julio 2021] Disponible en: <https://www.netinbag.com/es/manufacturing/what-is-a-concrete-masonry-unit.html>
- [54] CO₂ curing; CarbiCrete Technology [en línea] [consulta: 8 julio 2021] Disponible en: <https://carbicrete.com/technology/>
- [55] CarbonBuilt [en línea] [consulta: 5 julio 2021] Disponible en: <https://www.carbonbuilt.com/about-us>
- [56] Solidia- Sustainable cement manufacturing and concrete curing technologies [en línea] [consulta: 5 julio 2021] Disponible en: <https://www.solidiatech.com/solutions.html>
- [57] Orbix | In symbiosis with circular economy [en línea] [consulta: 5 julio 2021] Disponible en: <https://www.orbix.be/en/about-us>

- [58]** Orbix | In symbiosis with circular economy [en línea] [consulta: 5 julio 2021]
Disponible en: <https://www.orbix.be/en/technologies/carbonation>
- [59]** Orbix | In symbiosis with circular economy [en línea] [consulta: 5 julio 2021]
Disponible en: <https://www.orbix.be/en/materials/carbinoxr>
- [60]** Orbix | In symbiosis with circular economy [en línea] [consulta: 9 junio 2021]
Disponible en: <https://www.orbix.be/en/materials/fillinoxr>
- [61]** Orbix | In symbiosis with circular economy [en línea] [consulta: 9 junio 2021]
Disponible en: <https://www.orbix.be/en/materials/stinoxr>
- [62]** Orbix | In symbiosis with circular economy [en línea] [consulta: 9 junio 2021]
Disponible en: <https://www.orbix.be/en/materials/blue-stone-sprimontbluer>
- [63]** Orbix | In symbiosis with circular economy [en línea] [consulta: 9 junio 2021]
Disponible en: <https://www.orbix.be/en/materials/limestone>
- [64]** Orbix | In symbiosis with circular economy [en línea] [consulta: 9 junio 2021]
Disponible en: <https://www.orbix.be/en/materials/orbix-blocks>
- [65]** Orbix | In symbiosis with circular economy [en línea] [consulta: 9 junio 2021]
Disponible en: <https://www.orbix.be/en/materials/sandstone-gres>
- [66]** Carbon8 Systems [en línea] [consulta: 9 junio 2021] Disponible en:
<https://c8s.co.uk/talking-carbonation-with-dr-paula-carey/>
- [67]** Biomass and municipal solid waste fly and Accelerated Carbonation Technology [en línea] [consulta: 9 junio 2021] Disponible en: <https://c8s.co.uk/wp-content/uploads/2020/07/C8S-%E2%80%93-Information-Sheets.pdf>
- [68]** Cementos Cruz | Fabricación y distribución de cementos [en línea] [consulta: 27 julio 2021] Disponible en: <https://www.cementoscruz.com/>
- [69]** Hormicruz | Venta y fabricación de hormigón y mortero [en línea] [consulta: 27 julio 2021] Disponible en: <https://hormicruz.com/>