

**CÁTEDRA
DE TRANSICIÓN
ENERGÉTICA**



CÁTEDRA FUNDACIÓN REPSOL DE TRANSICIÓN ENERGÉTICA

Descarbonización de la industria

OBSERVATORIO DE DESCARBONIZACIÓN EN LA INDUSTRIA
MEDIDAS DE DESCARBONIZACIÓN EN LA
INDUSTRIA CEMENTERA. SITUACIÓN ACTUAL Y
VIABILIDAD DE NUEVAS PROPUESTAS

Madrid

Septiembre de 2023

1. Introducción.....	3
2. Situación actual.....	4
3. Análisis de ciclo de vida.....	6
3.1 Introducción	6
3.2 Metodología, Objetivo y Alcance	8
3.3 Análisis de Inventario.....	9
3.4 Resultados	14
4. Medidas propuestas desde la cátedra en la fábrica piloto.....	19
4.1 Recuperación de calor residual en el horno de clínker.....	19
4.2 Uso de hidrógeno dorado	26
5. Conclusiones.....	30
6. Referencias.....	32

Resumen

El sector de la fabricación del cemento es responsable del 6% de las emisiones de CO₂ globales relacionadas con usos energéticos, y del 27% de las de origen industrial. Ello hace que el sector haya establecido una hoja de ruta de la descarbonización con la vista puesta en ser neutros en 2050. Se han repasado las medidas propuestas por el sector para la descarbonización, poniendo el foco en la recuperación de calores residuales y el empleo de hidrógeno.

Desde un punto de vista nacional, se ha realizado un análisis de ciclo de vida desde la cuna a la puerta, encontrándose una huella de carbono media en la producción nacional de 873,6 kg CO_{2eq}/t clínker y de 739,1 kg CO_{2eq}/t cemento. Se han propuesto medidas concretas desde la Cátedra, abarcando la recuperación de calores residuales para producir un autoconsumo de electricidad y el empleo de biohidrógeno con emisiones negativas (*hidrógeno dorado*) para descarbonizar el horno de clínker.

La recuperación de calores residuales ha logrado autoproducir el 20% de la electricidad demandada por la fábrica con pocas modificaciones en la disposición de la planta y con un retorno de menos de 6 años. En cuanto al empleo del hidrógeno dorado, logra unas reducciones de emisiones más allá de los objetivos de 2030, habiendo potencial suficiente para su empleo a nivel nacional y cubriendo los costes con la tasa de CO₂ que se ahorra.

1. INTRODUCCIÓN

Este informe presenta una exploración de medidas de descarbonización aplicables a la industria de la fabricación del cemento. La exploración presentada en este “observatorio”, llevada a cabo durante el curso 2022/23, ha empleado la siguiente metodología:

- Selección de un fabricante representativo, que aportase datos reales de una factoría. Sobre dicho fabricante se ha analizado la viabilidad técnico-económica de la aplicación de medidas innovadoras encaminadas a su reducción.
- Revisión del estado del arte sobre buenas prácticas y medidas del sector.
- A partir de datos del sector se ha elaborado el ACV para España.
- Debate con empresas del sector.
- Investigación propia para llevar a cabo el análisis de viabilidad de las medidas. Dicha investigación se ha elaborado con alumnos del Máster en Ingeniería Industrial, del Máster en Medioambiente y Transición Energética y del programa de doctorado de modelado de sistemas en ingeniería, todos de Comillas – ICAI.

El debate con las empresas ha sido principalmente en acceso abierto, a través del [Seminario de la Cátedra](#). En cuanto a la participación de los alumnos, se ha llevado a cabo mediante [Proyectos Fin de Carrera](#) y estudios específicos.

Este informe presenta, de forma estructurada, el resumen de los resultados alcanzados en las diversas actividades. En todo momento se incluyen los enlaces a los documentos (presentaciones, grabaciones o textos) completos con objeto de que la persona interesada pueda profundizar en el tema.

2. SITUACIÓN ACTUAL

El sector cementero es responsable de aproximadamente el 6% de las [emisiones globales relacionadas con usos energéticos](#) y del [27% de las emisiones industriales](#) de gases de efecto invernadero. Conscientes de esta situación, la patronal del sector en España (OFICEMEN) aprobó una [hoja de ruta](#) en 2023 con el objetivo de alcanzar la neutralidad climática en 2050.

A nivel medio el sector ha ido avanzando en esta descarbonización desde 1990, cuando tenía unas emisiones de 815 kg CO₂/t cemento, hasta 2018, con unas emisiones de 729 kg CO₂/t cemento. Se ha fijado como referencia en 2030 llevar esas emisiones a 461 kg CO₂/t cemento, para alcanzar el cero en 2050.

La estrategia de OFICEMEN se basa en las 5Cs, que se explican seguidamente y se encuentran cuantificados en la Tabla 1.

- Clinker. Este producto es el principal componente del cemento y su producción libera CO₂ en el horno tanto por la combustión como por la descarbonatación de las materias primas empleadas. De ahí que esta medida apunte en estas dos direcciones: empleo de materias descarbonatadas y uso de combustibles de biomasa. Además, se pueden buscar cementos que requieran menor cantidad de clínker, mejorar la eficiencia energética, utilizar hidrógeno y electricidad y, finalmente, incorporar tecnologías de captura de CO₂.
- Cemento. Enlazando con el punto anterior, para producir un cemento con menor proporción de clínker se requieren nuevos aditivos que aporten las propiedades que daba el clínker. Por otra parte, en la operación de la fábrica se puede trabajar en el origen renovable de la electricidad, tanto para la molienda como para el transporte interno, que podría electrificarse tanto por vía de baterías como por hidrógeno.
- Hormigón. Esta medida del transporte también puede aplicarse a la producción del hormigón, así como incorporar nuevos aditivos para emplear menos cemento, pero manteniendo las propiedades.
- Construcción. Esta vía sería de alcance 3, y se basa en la eficiencia en el uso de la construcción, encomendada a los códigos y estándares constructivos que reducirán la demanda, eliminando el suministro de energía fósil a los edificios.
- Recarbonatación. Aunque pendiente de aprobar por el IPCC, existe un consenso científico en considerar que el hormigón es capaz de absorber a lo largo de su vida

útil un 20% de las emisiones producidas en su fabricación, incrementando un 3% adicional si al final de su vida se tritura.

Empresas del sector como [CEMEX han establecido sus propios objetivos](#), que pasan por unas emisiones de 520 kg CO₂/t cemento en 2025 y un objetivo de 430 kg CO₂/t cemento en 2030. Para ello buscan producir cementos con menos del 68% de clínker, empleando más del 55% de combustibles alternativos (bajos o neutros en carbono) y un 65% de electricidad limpia. Por el momento, se emplea hidrógeno para facilitar el incremento de combustibles alternativos y se trabaja en otros proyectos como la sustitución del coque de petróleo por un gas de síntesis obtenido de la gasificación de combustible derivado de residuos o el empleo de concentradores solares para aportar calor al horno de clínker.

Tabla 1. Estrategia [5Cs de OFICEMEN](#).

Objetivos medios estimados para el desarrollo de la estrategia de las 5Cs				
Cadena de valor del cemento - 5Cs	Áreas que permiten una reducción significativa de las emisiones de CO ₂	Objetivos		
		2018	2030	2050
5C - Clínker	Uso de materias primas descarbonatadas	3,15%	5%	8%
	Uso de combustibles biomasa	12%	20%	40%
	Mejora de la eficiencia energética	3.602MJ/tck	3.400MJ/tck	3.000MJ/tck
	Reducción de emisiones de proceso por clínkeres bajos en carbono	0%	2%	5%
	Reducción de emisiones de combustión por uso de hidrógeno y electrificación	0%	0%	10%
	Tecnologías de almacenamiento, captura y uso de carbono. Porcentaje de penetración	0%	1%	50%
5C - Cemento	Adiciones. Evolución del factor clínker	83%	75%	70%
	Origen renovable de la electricidad		50%	100%
	Transportes internos neutros (eléctricos y/o propulsados por hidrógeno)	0%	0%	100%
5C - Hormigón ¹	Reducción de la cantidad de cemento por m ³ de hormigón de idénticas prestaciones	0%	5%	10%
	Transporte neutro (eléctricos y/o propulsados por hidrógeno)	0%	0%	100%
5C - Construcción	Eficiencia en el uso del hormigón: mejora en la eficiencia energética de las construcciones (no se contabilizan estas reducciones de CO ₂ ya que se estima que en 2050 toda la energía de los edificios provendrá de fuentes renovables)	n.a.	n.a.	n.a.
5C - (re) Carbonatación	Recarbonatación del hormigón. Según metodología científica publicada y consenso multigeográfico, pendiente de evaluar por IPCC, se considera que en la vida útil del hormigón, un 20% de las emisiones de proceso del clínker son reabsorbidas. Adicionalmente, si el hormigón se tritura al final de su vida útil se recarbonata un 3% más	0%	20%	23%

1. Concrete en inglés.

3. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

3.1 INTRODUCCIÓN

La fabricación del cemento es la responsable del 27% de las emisiones industriales de gases de efecto invernadero y de aproximadamente un 6% de las emisiones globales de GEIS (Fuente IEA año 2020) tal y como se puede ver en la Figura 1.

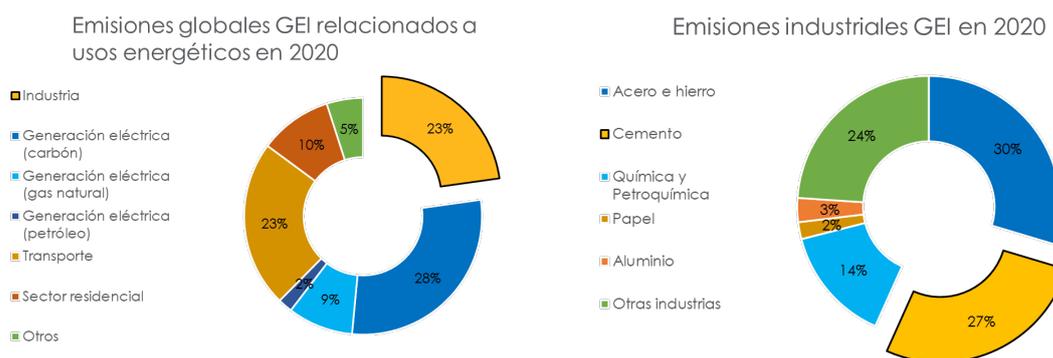


Figura 1: Desglose de emisiones globales GEI del sector cementero en 2020. [[IEA Global Energy](#), [IEA Direct emissions](#)]

Hay que tener en cuenta que es un sector clave para el desarrollo de un país y por tanto, la producción de cemento en los países en desarrollo está aumentando significativamente, tal y como se refleja en la Figura 2.

El proceso de producción de cemento comprende las siguientes fases (extraído de Oficemen):

1. Obtención y preparación de materias primas. Las canteras se explotan mediante voladuras controladas, en el caso de materiales duros como calizas y pizarras, mientras que en el caso de materiales blandos (arcillas y margas) se utilizan excavadoras para su extracción.
2. Trituración. Una vez extraído y clasificado el material, se procede a su trituración hasta obtener una granulometría adecuada para el producto de molienda. Esta trituración se hace en la cantera y/o en la planta.

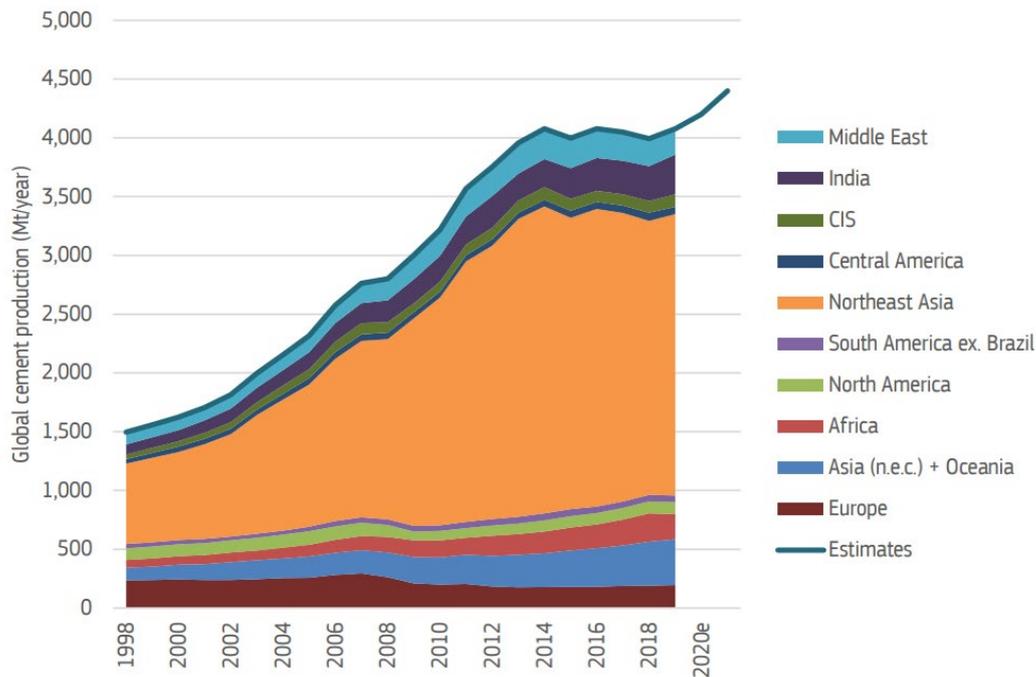


Figura 2: Evolución de la producción mundial de cemento del 2008-2020. [Marmier, 2023]

3. Prehomogeneización. El material triturado se almacena en capas uniformes para ser posteriormente seleccionadas de forma controlada. La prehomogeneización permite preparar la dosificación adecuada de los distintos componentes reduciendo su variabilidad.
4. Molienda de crudo. Se muelen y mezclan las materias primas en la proporción adecuada para el crudo con el fin de reducir su tamaño y favorecer así su cocción en el horno. El crudo se almacena en un silo para incrementar la uniformidad de la mezcla.
5. Precalentador de ciclones. La alimentación al horno se realiza a través del precalentador de ciclones, que calienta la materia prima para facilitar su cocción. El crudo se introduce por la parte superior de la torre y va descendiendo por ella. Mientras tanto, los gases provenientes del horno, ascienden a contracorriente precalentando así el crudo, que alcanza los 1.000°C antes de entrar al horno.

Fabricación del clínker: Horno. A medida que la harina va avanzando en el interior del horno la temperatura va aumentando hasta alcanzar los 1.500°C, produciéndose entonces las complejas reacciones químicas que dan lugar al clínker. Para alcanzar las temperaturas necesarias para la cocción de las materias primas y la producción de clínker, el horno cuenta con una llama principal que arde a 2.000°C.

- Fabricación del clínker: Enfriador. A la salida del horno, el clínker se introduce en el enfriador, que inyecta aire frío del exterior para reducir su temperatura de los 1.400°C a los 100°C. El aire caliente generado en este dispositivo se introduce nuevamente en el horno para favorecer la combustión, mejorando así la eficiencia energética del proceso.
6. Molienda de clínker y fabricación de cemento. El clínker se mezcla con yeso y adiciones dentro de un molino de cemento, hasta lograr un polvo fino y homogéneo: el cemento.
 7. Almacenamiento del cemento. El cemento se almacena en silos, separado según sus clases.
 8. Envasado o expedición a granel. El cemento se ensaca o se descarga en un camión cisterna para su transporte por carretera o ferrocarril.

En el caso del sector cementero español, la estrategia adoptada para conseguir emisiones cero en el 2050 está recogida en [“Hoja de ruta de la industria cementera española para alcanzar la neutralidad climática en 2050”](#) . En ella se describen los retos y objetivos que se plantea la industria española a medio plazo (2030) y a largo plazo (2050), tal y como se vio en la Tabla 1.

3.2 METODOLOGÍA, OBJETIVO Y ALCANCE

El objetivo de este estudio es evaluar el impacto medioambiental de la producción de clínker y cemento en España con el fin de poder proponer las medidas que se consideran más adecuadas para conseguir la descarbonización del sector cementero español.

Para realizar esta evaluación medioambiental del sector cementero en España se ha elegido la metodología del análisis de ciclo de vida (ACV) recogida en la norma ISO 14040/14044. Se han realizado dos análisis de ciclo de vida. En el primero, la unidad funcional elegida es 1 tonelada de clínker y permite conocer el impacto de la producción de 1 tonelada de clínker en España en el año 2021. En el segundo ACV realizado, la unidad funcional es 1 tonelada de cemento y permite conocer el impacto de la producción de 1 tonelada de cemento en España en el año 2021. Se ha utilizado la herramienta SimaPro 9.4.0.2, y la base de datos Ecoinvent (3.8) y el método de evaluación CML-IA baseline 3.08 /EU 25.

En cuanto al alcance, se ha realizado un análisis de ciclo de vida *cradle to gate* (de la cuna a la puerta) en el que están incluidas todas las actividades necesarias para la obtención y transporte de todas las materias primas y combustibles (tradicionales y alternativos)

necesarios para el proceso fabricación, el proceso de fabricación completo hasta la obtención del producto (clínker o cemento) dispuesto para la venta.

En la Figura 3 se recogen los procesos principales para la obtención de clínker y cemento, además de las entrada y salidas.

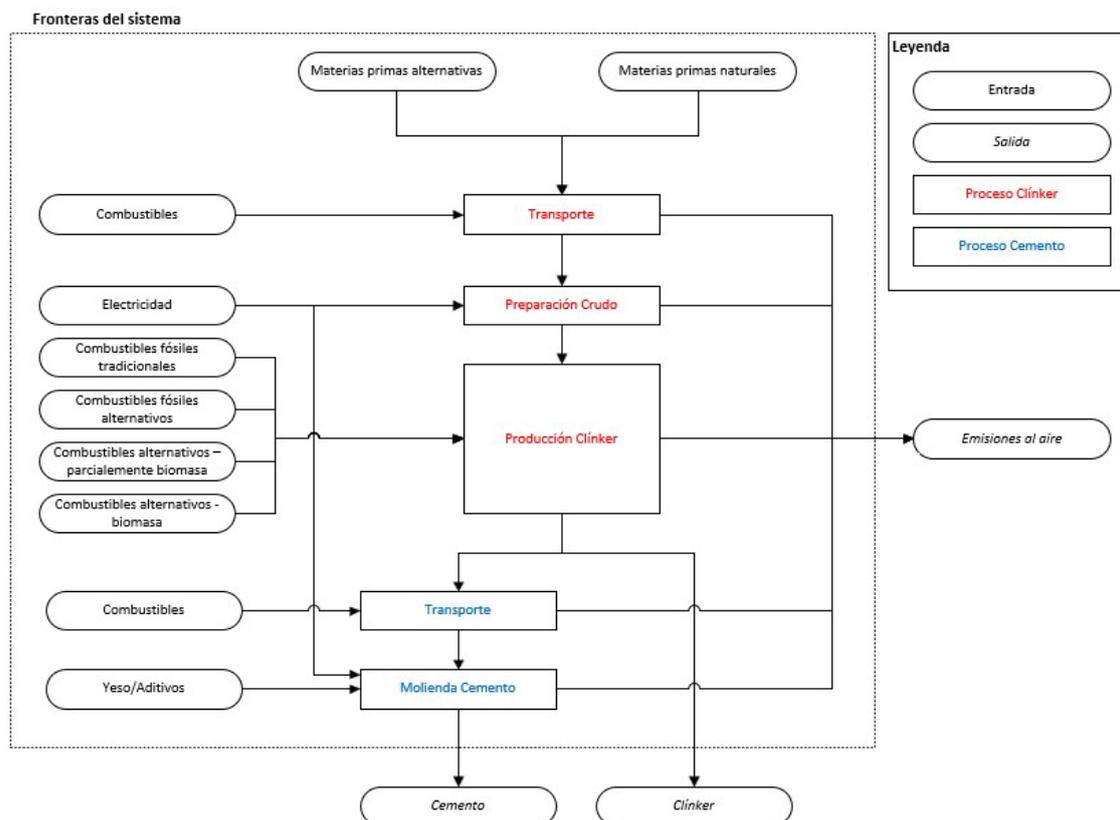


Figura 3: Principales procesos considerados en la elaboración del ACV.

3.3 ANÁLISIS DE INVENTARIO

Para poder realizar este estudio se han utilizado los datos publicados en la Memoria Anual Estadística 2021 de Oficemen, los últimos publicados en el momento de realizar este trabajo. En esta memoria se recogen, entre otros, los datos de producción tanto de clínker como de los distintos tipos de cemento en todas las fábricas de España, además de los combustibles y las materias primas utilizadas para ello.

En la Tabla 2 se recogen los datos de producción de clínker y de cemento en España en 2021 utilizados en el análisis de inventario.

Tabla 2: Producción de clínker y de cemento en España 2021. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de Oficemen 2021

Producción Año 2021	Toneladas
Clínker producido en España en 2021	16.800.011
Clínker vendido	4.906.078
Clínker comprado	846.227
Clínker utilizado para elaborar cemento (Producido+Comprado-Vendido)	12.740.160
Cemento producido en España en 2021	16.168.650

El consumo de materias primas necesarias para la elaboración del crudo, que es la mezcla de materiales que se introduce al horno para obtener el clínker, una vez realizado el proceso químico provocado por el aumento gradual de la temperatura, está recogido en la Tabla 3, donde se describe tanto la cantidad total de toneladas como la cantidad por unidad funcional (1 tonelada de clínker).

Con los datos mostrados en la Tabla 3 se constata que el uso de materias primas alternativas naturales del total de materias primas utilizadas para la elaboración del crudo es muy bajo, de un 3%. De hecho, la mayor parte (68,9%) son caliza y otras rocas calcáreas, seguidas de las margas en un 16,6% y un 5,3% arcillas.

A la salida del horno, después de los procesos químicos sufridos por el crudo en el horno, se obtiene el clínker. Para obtener el cemento, es necesario mezclar el clínker con las materias primas descritas en la Tabla 4. La proporción de clínker varía significativamente según el tipo de cemento a producir.

En cuanto a las materias primas utilizadas en la molienda del cemento, casi el 78% son materias primas naturales y únicamente un 22% materias primas alternativas. Entre las materias primas naturales la mayoría es caliza, seguida del mineral de yeso y anhidrita. Entre las materias primas alternativas, destacan las cenizas y las escorias, que se corresponden con un 9,3% y un 6,5% respectivamente del total de materias primas de la molienda del cemento.

Tabla 3: Materias primas necesarias para obtener el crudo para la producción de clínker en España en 202. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de Oficemen 2021

CONSUMO DE MATERIAS PRIMAS NATURALES

	En toneladas	tonelada/1 t clínker
ARCILLAS	1.440.180	8,57E-02
ARENA	473.031	2,82E-02
ARENISCA	154.129	9,17E-03
BAUXITA	50.827	3,03E-03
CALIZA Y OTRAS ROCAS CALCAREAS	18.772.312	1,12E+00
CAOLIN Y ARCILLAS CAOLINICAS	531.448	3,16E-02
FELDESPATOS/FUNDENTES	1.482	8,82E-05
MARGAS	4.515.702	2,69E-01
MINERALES DE HIERRO	86.565	5,15E-03
OTRAS MATERIAS PRIMAS NATURALES CRUDO	16.793	1,00E-03
PIZARRAS	328.377	1,95E-02
SILICE	91.009	5,42E-03
Total Materias primas naturales	26.461.855	1,58E+00

CONSUMO DE MATERIAS PRIMAS ALTERNATIVAS NATURALES

ALUMINA RESIDUAL, PAVAL	40.967	2,44E-03
ARENAS DE FUNDICIÓN	29.634	1,76E-03
CASCARILLA HIERRO	86.432	5,14E-03
CENIZAS CRUDO	5.978	3,56E-04
CENIZAS DE PIRITA	25.751	1,53E-03
CERAMICA VALORIZABLE	7.449	4,43E-04
ESCORIAS BLANCAS SIDERURGICAS CRUDO	41.625	2,48E-03
ESCORIAS NEGRAS SIDERURGICAS CRUDO	159.134	9,47E-03
ESPUMA AZUC.	1.700	1,01E-04
LODOS CON CARBONATO	14.744	8,78E-04
OTRAS ESCORIAS CRUDO	104.349	6,21E-03
OTRAS MATERIAS PRIMAS ALTERNATIVAS CRUDO	94.898	5,65E-03
RCD, ESCOMBRO	41.298	2,46E-03
RESIDUOS ROCAS INDUSTRI, ORNAMENT Y DERIV CRUDO	62.807	3,74E-03
OTROS APORTADORES DE HIERRO RECICLADO	76.194	4,54E-03
Total Materias Primas Alternativas	792.960	4,72E-02
Total Materias Primas	27.254.815	

Tabla 4: Materias primas necesarias para la molienda del cemento producido en España en 2021. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de Oficemen 2021

CONSUMO DE MATERIAS PRIMAS EN LA MOLIENDA DE CEMENTO

NATURALES	En toneladas	tonelada/1 t cemento
ADITIVOS	3.466	2,14E-04
CALIZA MOLIENDA CEMENTO	1.100.239	6,80E-02
MINERAL DE YESO Y ANHIDRITA	672.064	4,16E-02
OTROS MINORITARIOS NATURALES CEMENTO	34.246	2,12E-03
PUZOLANAS	305.479	1,89E-02
AGENTE REDUCTOR NO RECICLADO	76	4,70E-06
Total NATURAL	2.115.570	1,31E-01
ALTERNATIVAS		
AGENTE REDUCTOR RECICLADO	30.146	1,86E-03
CENIZAS MOLIENDA CEMENTO	252.104	1,56E-02
ESCORIAS MOLIENDA CEMENTO	177.160	1,10E-02
OTROS MINORITARIOS ALTERNATIVOS CEMENTO	9.333	5,77E-04
YESO ARTIFICIAL O RECICLADO	43.908	2,72E-03
HUMO DE SILICE	43	2,66E-06
ESQUISTOS CALCINADOS	87.780	5,43E-03
Total ALTERNATIVA	600.474	3,71E-02
Total consumo materias primas	2.716.044	

Existen dos tipos de consumos energéticos: electricidad y combustibles (fósiles y alternativos). En la Tabla 5 se detallan los flujos energéticos utilizados en la producción de clínker (electricidad y combustibles) y cementos (electricidad).

Teniendo en cuenta el PCI de cada combustible de la Tabla 5, en la Figura 4 se muestra la contribución en porcentaje cada categoría de combustibles utilizados para el proceso de fabricación del clínker.

Tabla 5: Consumo energético para la producción de clínker (electricidad y combustibles) y cemento (electricidad) en España en 2021. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de Oficemen 2021

CONSUMO DE ENERGÍA

ELÉCTRICA

	MWh	kWh/t cemento
Energía eléctrica total	2.778.803.506	117,23

COMBUSTIBLES

	Toneladas
a - TRADICIONAL	1.193.688
COQUE DE PETROLEO DE IMPORTACION	327.645
COQUE DE PETROLEO NACIONAL	738.577
FUEL OIL HORNOS	13.525
FUEL OIL OTRAS INSTALACIONES	491
GAS NATURAL (m3)	4.222
GASOLEO OTRAS INSTALACIONES	351
GASÓLEO PARA HORNOS	305
HULLA IMPORTACION	40.698
HULLA NACIONAL	43.451
OTROS COMBUSTIBLES TRADICIONALES SOLIDOS	22.360
PROPANO	107
LIGNITOS NACIONAL	1.955
b - ALTERNATIVO FOSIL	123.600
ACEITE MINERAL USADO Y EMULSIONES	27.638
DISOL.,BARNI., PINTURAS Y MEZCLAS	31.608
LODOS INDUSTRIALES	387
OTROS LIQUIDOS ALTERNATIVOS NO BIOMASA	18.834
OTROS SOLIDOS ALTERNATIVOS NO BIOMASA	682
PLASTICOS	1.261
RESIDUOS LIQUIDOS DE HIDROCARBUROS	5.940
RESIDUOS PROCEDENTES DE VEHICULOS FUERA DE USO	34.309
RESIDUOS SOLIDOS DE HIDROCARBUROS	2.942
c - ALTERNATIVO PARC BIOMASA	555.125
CDR - RSU	341.085
NEUMATICOS	183.368
SERRIN IMPREGNADO O MADERA TRATADA	30.671
d - ALTERNATIVO BIOMASA	385.565
BIOMASA VEGETAL	143.393
HARINAS ANIMALES	95.753
LODOS DE DEPURADORA URBANA	14.442
MADERA	44.769
OTROS COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS SÓLIDOS BIOMASA	87.208
Total general	2.257.978

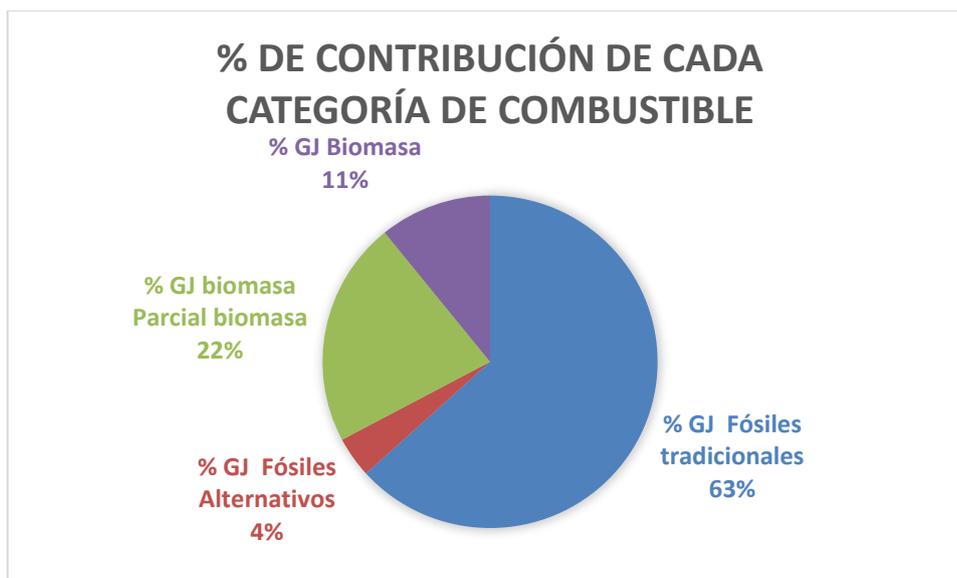


Figura 4: Contribución en porcentaje de las distintas categorías de combustibles utilizados en la obtención del clinker

Los combustibles fósiles han aportado un 63% de la energía destacando que un 58% procede del coque de petróleo. En el caso de los combustibles alternativos parcialmente biomasa su contribución es de un 22% estando repartido entre un 12% por los combustibles derivados de residuos y un 10 % por los neumáticos de vehículo usado. En cuanto a los combustibles alternativos de biomasa, que suponen aproximadamente un 11%, están repartidos entre un 4% y 3% entre biomasa vegetal, harinas cárnicas y lodos de depuradoras urbanas. También cabe destacar que la cantidad de energía por tonelada de clinker es de 3,58 GJ/t Clinker.

3.4 RESULTADOS

Para obtener una evaluación medioambiental lo más completa posible, se ha utilizado el método CML-IA para el análisis de ciclo de vida que proporciona 11 categorías de impacto como son: agotamiento abiótico, agotamiento abiótico (combustibles fósiles), calentamiento global a 100 años (GWP 100a), agotamiento de la capa de ozono (ODP), toxicidad humana, ecotoxicidad acuática en agua dulce, ecotoxicidad acuática marítima, ecotoxicidad terrestre, oxidación fotoquímica, acidificación y eutroficación.

En la Figura 5 se reflejan los resultados obtenidos en las 11 categorías de impacto en la producción de 1 tonelada de clinker en España en 2021, incluyendo también el impacto en cada una de las fases del modelo realizado.

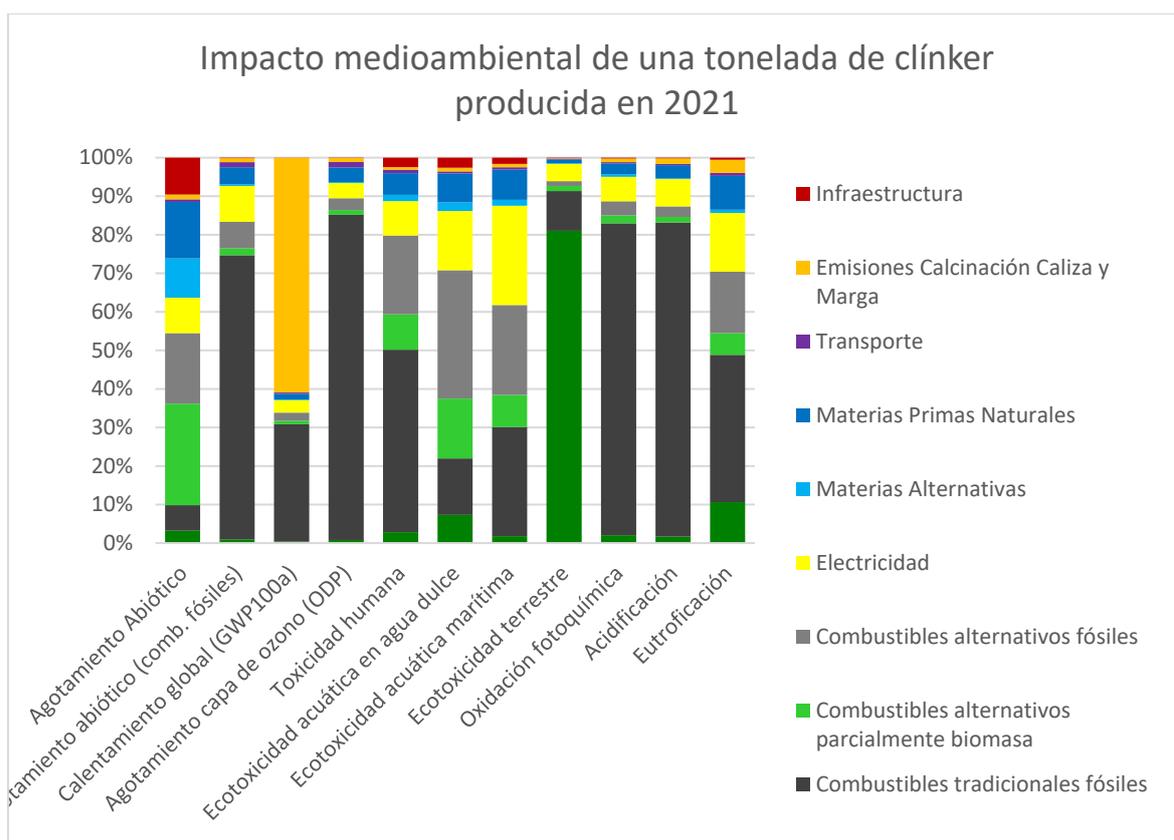


Figura 5: Impacto medioambiental en la obtención de 1 tonelada de clínker producida en España en el 2021

Como se muestra en la Figura 5 para todos los impactos evaluados, excepto para el potencial de calentamiento global, la mayor contribución procede de los combustibles utilizados para obtener la energía térmica del proceso y principalmente debido a los combustibles fósiles. En los impactos de agotamiento abiótico y ecotoxicidad de agua dulce y terrestre producen un impacto mayor los otros tipos de combustibles utilizados.

Analizando en detalle el potencial de calentamiento global a 100 años para la obtención de 1 tonelada de clínker se emiten 873,6 kg CO₂ eq/t clínker. Tal y como se ve en la Figura 6, el 61% son emisiones producidas en el proceso químico de formación de clínker, el 34% son emisiones debidas a los combustibles (30,4 % combustibles fósiles tradicionales y el 3,2% restante debido a los alternativos mayoritariamente los alternativos fósiles), un 3% a la electricidad consumida y un 2% a las materias primas y su transporte de la cantera a la planta.

Es importante destacar que un 90% del impacto global generado por los combustibles se debe a los combustibles fósiles tradicionales que aportan un 63% de la energía necesaria. Sin embargo, los combustibles parcialmente biomasa aportan un 22% de la energía mientras que solo contribuyen con un 2,5 % de las emisiones de los combustibles, lo cual pone de

manifiesto la importancia de sustituir los combustibles fósiles por combustibles alternativos más amigables con el medio ambiente.

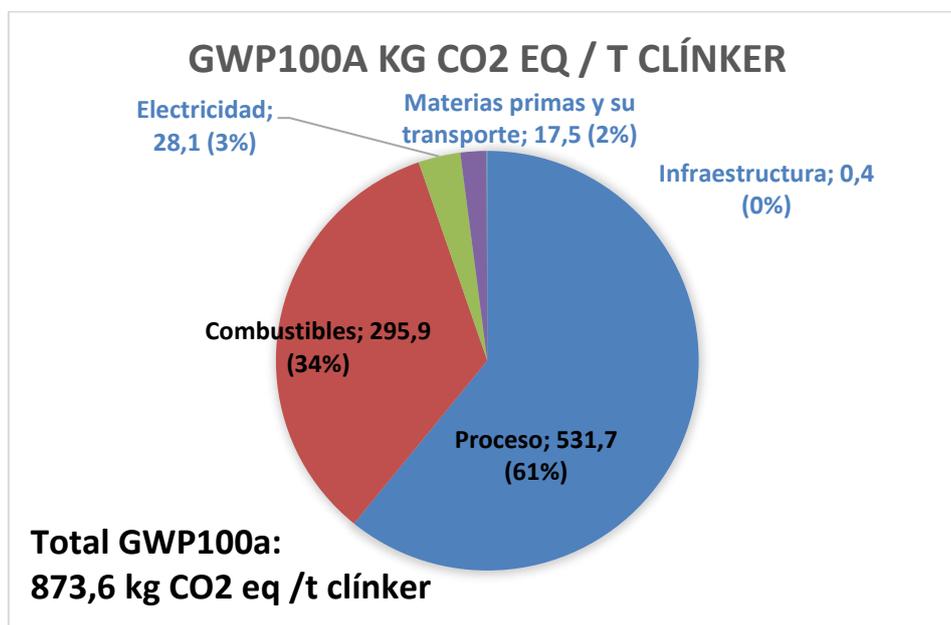


Figura 6: Potencial de calentamiento global a 100 años de 1 tonelada de clinker en España en el 2021

En la Figura 7 se reflejan los resultados obtenidos en las 11 categorías de impacto en la producción de 1 tonelada de cemento en España en 2021 en todas las fases del modelo. Para todos los impactos evaluados, excepto para el agotamiento abiótico y el potencial de calentamiento global, el uso de los combustibles es la etapa que más contribuye al impacto. Destaca la elevada contribución que tienen los combustibles tipo parcialmente biomasa en la Ecotoxicidad terrestre.

Si se analiza el potencial de calentamiento global de una tonelada de cemento, tal y como se puede ver en la Figura 8, las emisiones de GWP100a son de 739,1 kg CO₂ eq/tonelada de cemento. La mayor parte del cemento producido en España está formado principalmente por clinker (entre un 65% y un 95% según norma dependiendo del tipo de cemento, 79% de media en la producción de cemento en España en el 2021). El 97% de las emisiones de GWP100a proviene de la producción de clinker, principalmente de proceso químico para la obtención del clinker (59%). De las fases propias del cemento, únicamente cabe destacar la electricidad consumida en la molienda del cemento, causante del 1,85% de las emisiones de GWP100a por tonelada de cemento.

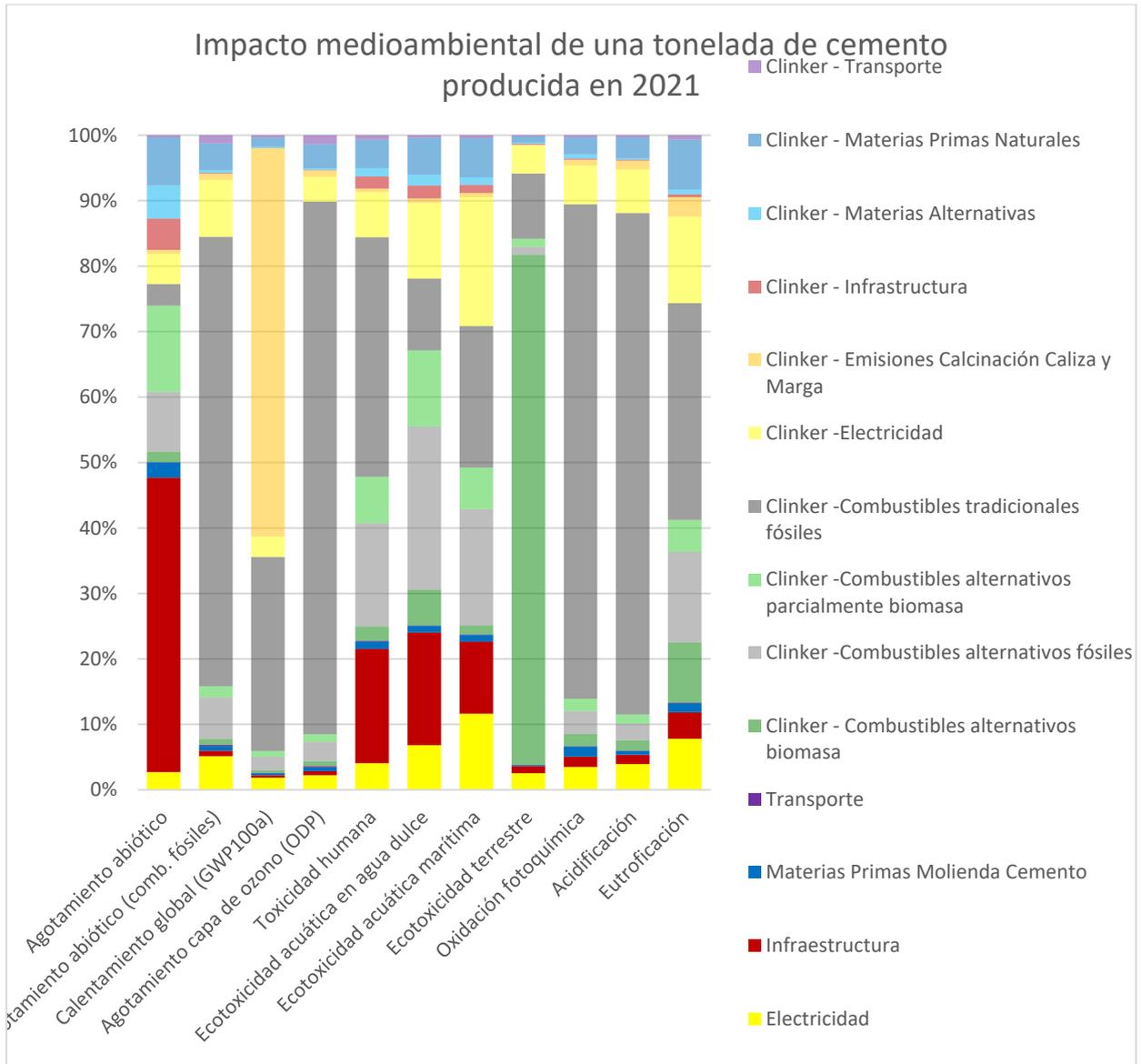


Figura 7: Impacto medioambiental en la obtención de 1 tonelada de cemento producida en España en el 2021

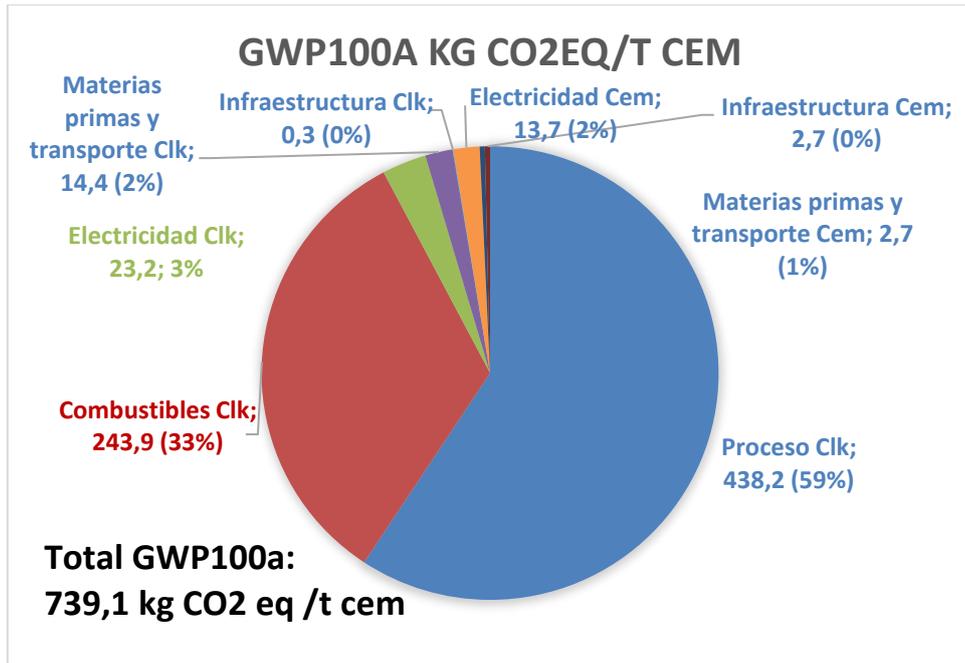


Figura 8: Potencial de calentamiento global a 100 años de 1 tonelada de cemento en España en el 2021

Fuente: Elaboración propia

4. MEDIDAS PROPUESTAS DESDE LA CÁTEDRA EN LA FÁBRICA PILOTO

4.1 RECUPERACIÓN DE CALOR RESIDUAL EN EL HORNO DE CLÍNKER

Los gases del horno salen a una temperatura adecuada para poder alimentar un ciclo de potencia de baja temperatura, como puede ser el ciclo de Rankine orgánico (ORC). De esta manera, es posible convertir dicho calor residual en energía eléctrica. Investigadores de ICAI ya exploraron esta posibilidad [en 2011](#), evaluando su viabilidad tanto técnica como económica. En 2023 se ha realizado una actualización de aquel estudio, disponiendo de datos reales de la fábrica piloto y analizando diferentes escenarios. Los detalles se pueden consultar en [[Serrat, 2023](#)].

La tecnología ORC está extendida por varias fábricas de cemento europeas, oscilando las producciones eléctricas por este método entre 2 y 7 MWe, como se puede ver en la Figura 9. Esta medida se podría considerar integrada dentro de las estrategias de las 5Cs de OFICEMEN en el apartado de mejora de la eficiencia energética y origen limpio de la electricidad, en tanto que la electricidad se obtiene de la revalorización de un calor residual.

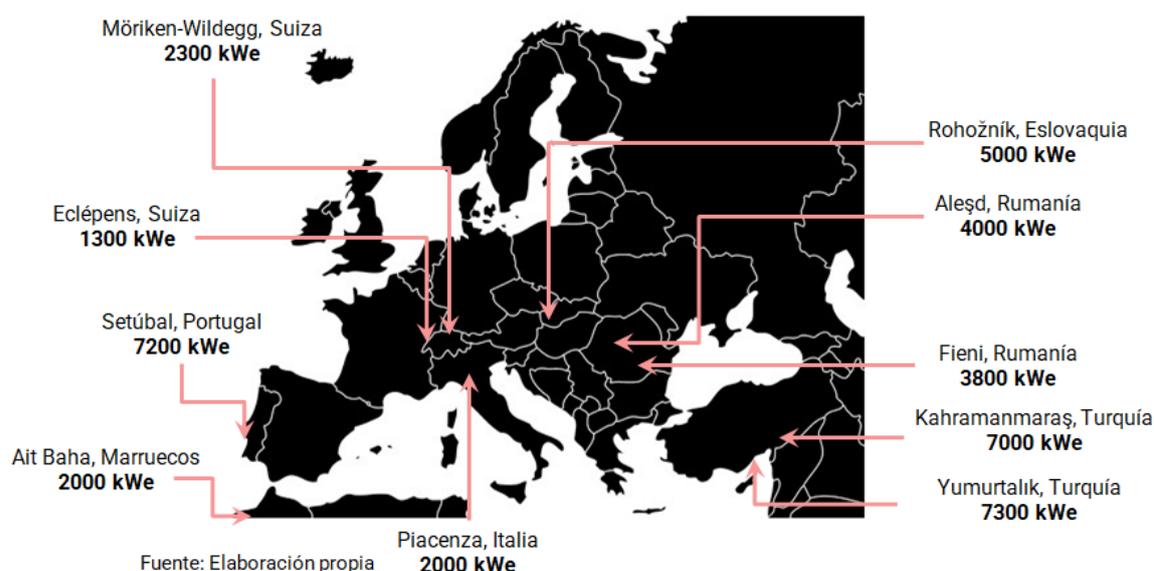


Figura 9. Utilización de ORCs en fábricas de cemento europeas. [[Serrat, 2023](#)].

Sin embargo, el poder de descarbonización por esta medida, que se situaría dentro del alcance 2, es reducido. Pese a ello, se mostrará que la rentabilidad de esta medida permitiría generar fondos para acometer otras inversiones en descarbonización.

La Figura 10 muestra el esquema del flujo de los humos de escape del horno antes de la intervención, con sus respectivas temperaturas. Se observa que tras la torre de precalentadores de crudo los gases están disponibles a 330 °C. Sin embargo, actualmente se realiza una recuperación térmica de una fracción de dichos gases, empleándolos para secar el crudo en los molinos. Dicha recuperación es variable, de modo que según el volumen de crudo molido en cada momento se pasa más o menos caudal de gases por el molino. El resto se acondiciona, disipando su calor, de modo que toda la corriente alcance los 190 °C, temperatura adecuada para los sistemas de filtración previos a su expulsión por la chimenea. La recuperación a través del ORC ha de tener en cuenta, por tanto, la existencia de este uso térmico. Para ello, se han contemplado dos escenarios: humos a 190 °C y humos a 330 °C.

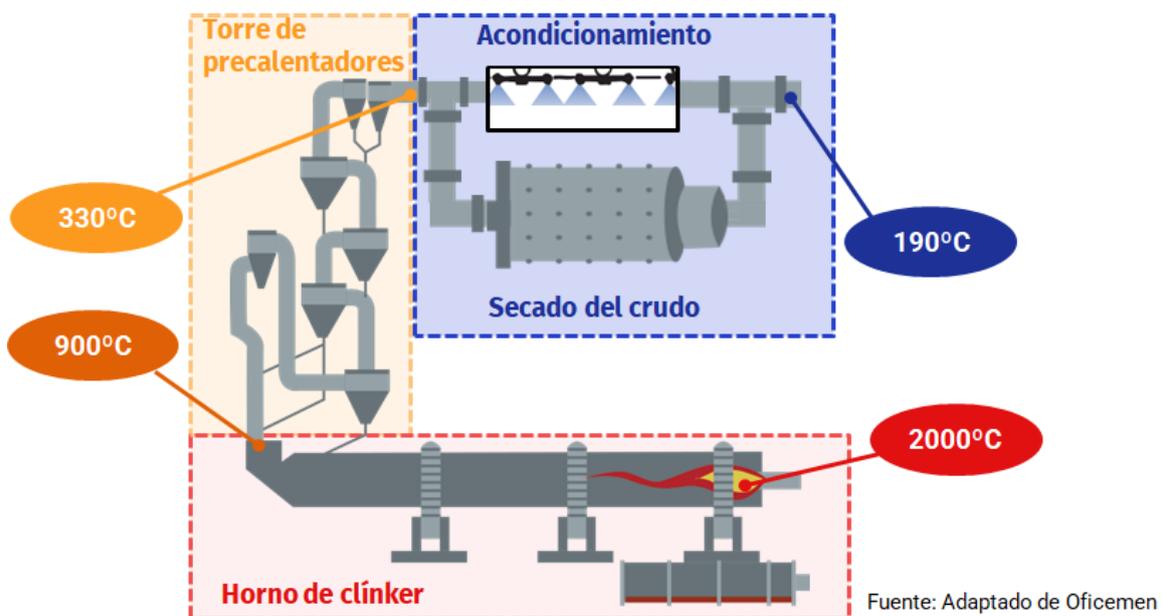


Figura 10. Recorrido de los gases de escape a la salida del horno de clínker. [Serrat, 2023].

La Figura 11a recoge la implementación del escenario de 190 °C. Es la que menos interfiere en la disposición de la fábrica, y consiste en recoger todo el caudal que actualmente se dirige a la chimenea y hacerlo pasar por una caldera de recuperación, para enviarlo a la chimenea a una temperatura entre 100 y 130 °C. La Figura 11b recoge el escenario de 330 °C, donde se alimenta la caldera de recuperación del ORC con los humos a 330 °C, pero es preciso incorporar un quemador auxiliar para reemplazar el uso térmico previo.

En cuanto al ORC en sí, tras probar diferentes alternativas y fluidos se ha seleccionado un ciclo transcrito regenerativo recorrido por n-butano, como el mostrado en la Figura 12. El ciclo transcurre entre 3,3 bar y 50 bar. Se han dimensionado los componentes principales y las tuberías, realizándose una representación 3D (Figura 13) para visualizar su integración en la planta. Se ha optado por un diseño que minimice la altura, obteniéndose una huella de 17 x 15 m.

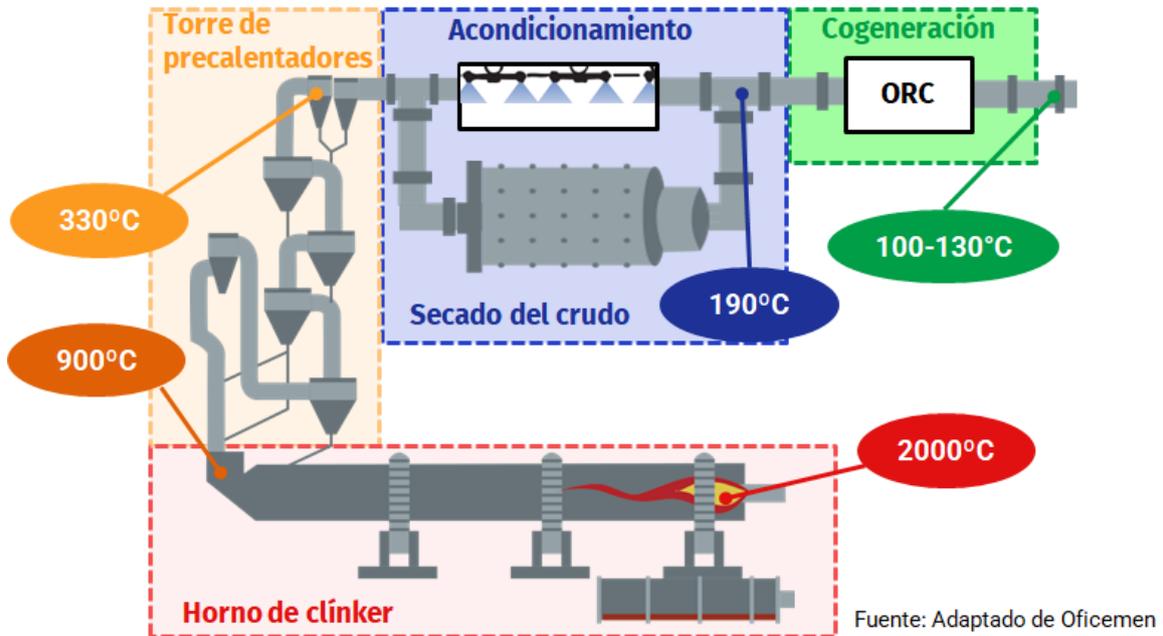


Figura 11a. Disposición para el escenario de 190 °C. [Serrat, 2023].

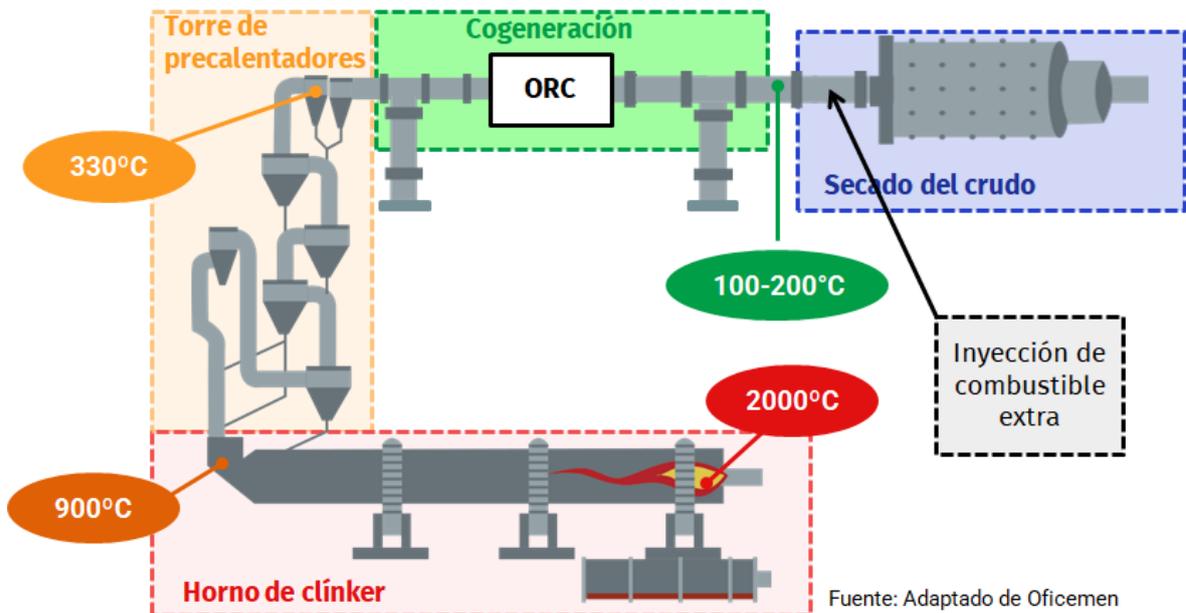
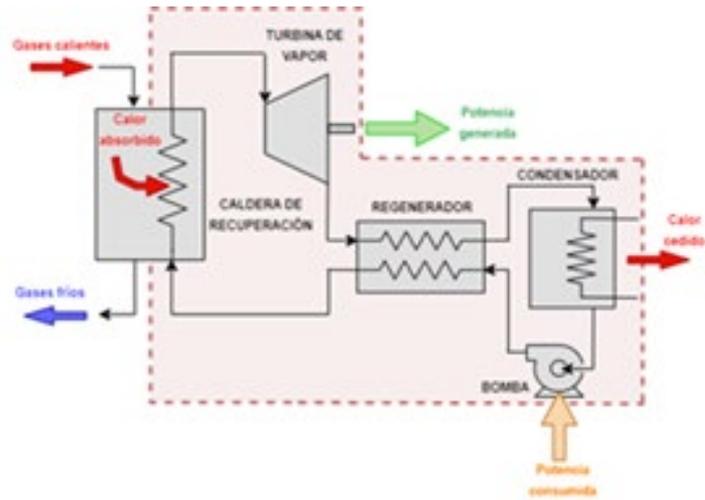


Figura 11b. Disposición para el escenario de 330 °C. [Serrat, 2023].



Fuente: Elaboración propia

Figura 12. Esquema del ciclo ORC. [Serrat, 2023].

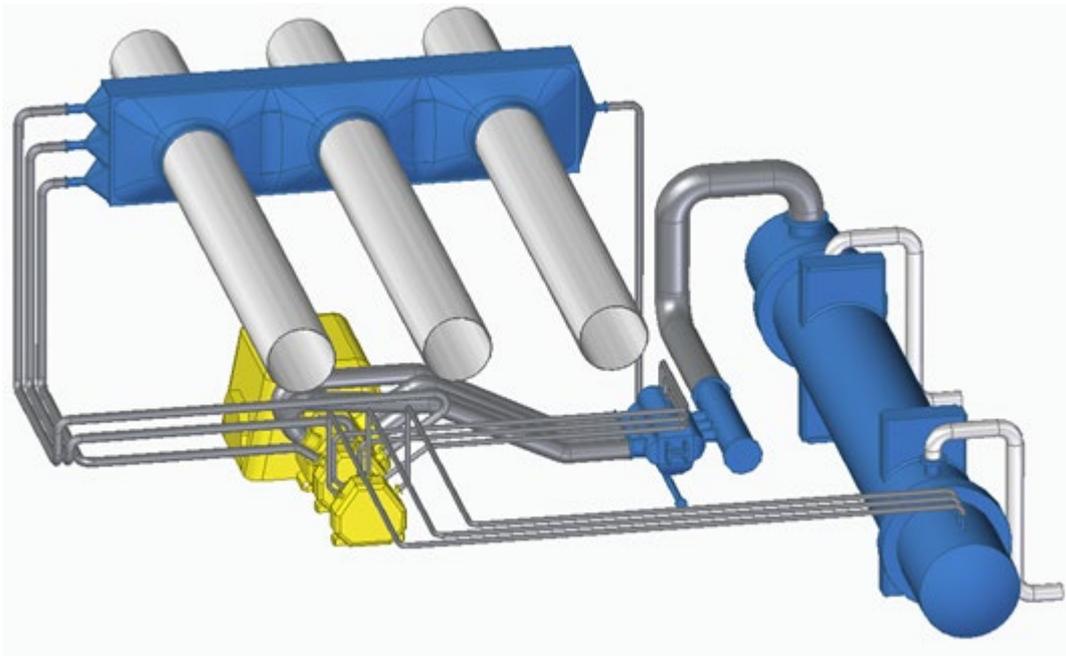


Figura 13. Representación 3D del ORC para el escenario de 190 °C. [Serrat, 2023].

Escenario 190 °C

La Figura 14 muestra el nivel de cobertura de la demanda de la fábrica que se logra en este escenario, oscilando entre el 20 y 30% en función de la temperatura hasta la que se enfríen los gases. Aunque se ha analizado su enfriamiento hasta 100 °C, la posible condensación de productos ácidos recomienda no bajar de 120 °C, que es el punto propuesto. En cuanto a la viabilidad económica, el LCOE (*levelized cost of electricity*) se sitúa entre 60 y 65 €/MWh. Con objeto de traducirlo a rentabilidad, la Tabla 6 muestra el VAN, la TIR y el periodo de retorno para diferentes precios de compra de electricidad. Actualmente la fábrica compra a unos 90 €/MWh, por lo que se ha señalado el punto de 120 °C de temperatura de salida de los gases de la caldera de recuperación y 100 €/MWh de precio de compra de la electricidad.

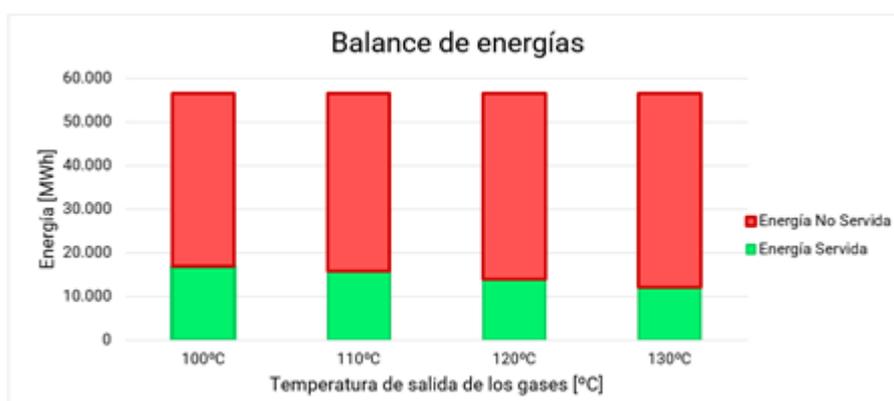


Figura 14. Autoconsumo (verde) logrado en el escenario de 190 °C a diferentes temperaturas de los gases de escape a la salida de la caldera de recuperación. [Serrat, 2023].

Tabla 6. Índices de rentabilidad en el escenario de 190 °C. [Serrat, 2023].

VAN [k€]	Tarifa eléctrica [€/MWh]							
	50	75	100	125	150	175	200	225
100	2.937	9.577	16.217	22.856	29.496	36.135	42.775	49.415
110	2.589	8.787	14.984	21.182	27.380	33.577	39.775	45.973
120	2.062	7.569	13.076	18.583	24.090	29.597	35.104	40.612
130	1.545	6.344	11.144	15.943	20.742	25.542	30.341	35.140

TIR	Tarifa eléctrica [€/MWh]							
	50	75	100	125	150	175	200	225
100	11,21%	18,28%	24,52%	30,43%	36,19%	41,87%	47,52%	53,15%
110	10,97%	17,96%	24,16%	30,00%	35,68%	41,28%	46,85%	52,40%
120	10,56%	17,47%	23,55%	29,27%	34,82%	40,30%	45,73%	51,15%
130	10,08%	16,89%	22,85%	28,43%	33,85%	39,17%	44,46%	49,72%

PR [años]	Tarifa eléctrica [€/MWh]							
	50	75	100	125	150	175	200	225
100	13,8	8,0	5,7	4,4	3,5	3,0	2,6	2,3
110	14,1	8,2	5,8	4,4	3,6	3,0	2,6	2,3
120	14,7	8,5	5,9	4,6	3,7	3,1	2,7	2,4
130	15,3	8,8	6,2	4,7	3,8	3,2	2,8	2,4

Escenario 330 °C

La Figura 15 muestra el nivel de cobertura de la demanda de la fábrica que se logra en este escenario, oscilando entre el 75 y 95% en función de la temperatura hasta la que se enfrían los gases. Nuevamente, se toman 120 °C como temperatura de salida de los gases de la caldera de recuperación como escenario deseable.

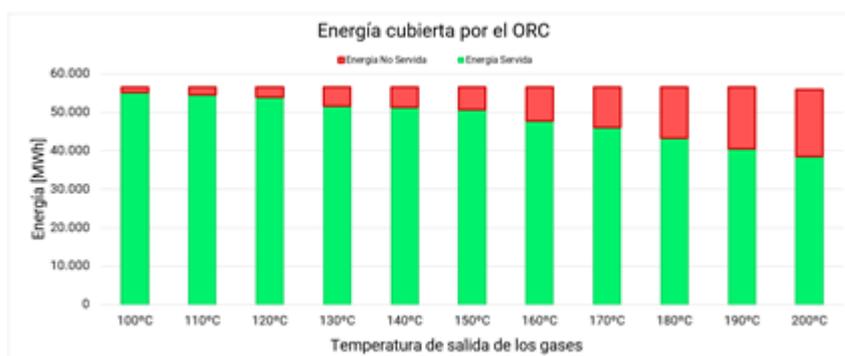


Figura 15. Autoconsumo (verde) logrado en el escenario de 330 °C a diferentes temperaturas de los gases de escape a la salida de la caldera de recuperación. [Serrat, 2023].

La viabilidad económica se complica, dado que es preciso emplear combustible adicional para calentar el crudo, al asumir que toda la corriente de gases se deriva hacia la caldera de recuperación del ORC. Realmente esto no es así, pero se toma esta hipótesis a modo de criterio conservador. En esta ocasión se define el LCOECD (LCOE + *Crude Drying*), que incluye el coste del combustible adicional para el secado del crudo. La Tabla 7 muestra los valores de este coste normalizado en función de la temperatura de salida de los gases de escape y del coste del combustible utilizado. Asumiendo 120 °C como temperatura de salida de los gases de la caldera de recuperación y 5 €/MWh como coste del combustible adicional se logra un LCOECD menor de 65 €/MWh, comparable con el del escenario previo. Como referencia, el precio medio de los combustibles alternos que paga la fábrica es de 4,55 €/MWh.

Tabla 7. Coste normalizado de electricidad y combustible adicional para el secado del crudo (LCOECD) en el escenario de 330 °C. [Serrat, 2023].

LCOECD [€/MWh]		Coste del combustible alternativo [€/MWh]										
		5	7,5	10	12,5	15	17,5	20	22,5	25	27,5	30
Escenario	120°C	62,44	70,41	78,38	86,35	94,31	102,28	110,25	118,22	126,19	134,16	142,13
	150°C	64,21	72,76	81,31	89,85	98,40	106,94	115,49	124,03	132,58	141,13	149,67
	190°C	70,93	81,64	92,34	103,05	113,75	124,46	135,16	145,87	156,57	167,28	177,98

A nivel de rentabilidad, ésta depende del precio de la electricidad y del combustible empleado para el secado del crudo, viniendo resumida esta dependencia en la Figura 16, mostrando que precios elevados de electricidad permiten precios altos de combustible. Actualmente la planta paga 90 €/MWh por la electricidad y 5 €/MWh por la biomasa, que caen en la zona de rentabilidad de la Figura 9, obteniéndose 42,2 M€ de VAN, 24,8% de TIR y 5,63 años de período de retorno.

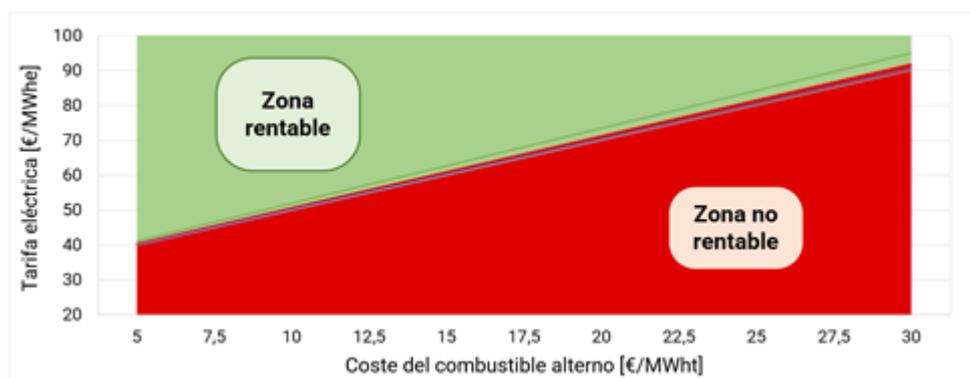


Figura 16. Mapa de rentabilidad en el escenario de 330 °C. [TFM de Serrat].

En cuanto al tipo de combustible adicional, éste ha de ser biomasa (típicamente harinas cárnicas) para evitar incrementar las emisiones de la planta.

De los resultados anteriores se puede concluir que, si bien el nivel de cobertura de la demanda en el escenario 330 °C es muy atractivo, la mayor complejidad técnica derivada de la inclusión de combustible adicional, unido a sus problemas de gestionabilidad, hacen que la solución preferida sea el escenario de 190°C, que supone una intromisión mínima en las infraestructuras existentes y permite un período de la inversión en menos de 6 años, dejando a partir de ahí liberados fondos para acometer otras medidas de descarbonización. En este sentido, el hecho de poder reducir la dependencia energética de la instalación en momentos

actuales de fuertes precios de la energía eléctrica supone una ventaja competitiva para la instalación.

4.2 USO DE HIDRÓGENO DORADO

Dentro de los gases renovables, el hidrógeno está despertando gran interés. En el sector del cemento se viene [usando desde hace tiempo en pequeñas cantidades para compensar la caída de temperatura](#) que provoca la masiva introducción de combustibles alternos respecto al coque de petróleo. En esta sección se propone un uso diferente del [hidrógeno, capaz de evitar las emisiones del coque y compensar las del proceso](#).

Si bien el hidrógeno verde del que se habla actualmente procede de la electrólisis del agua mediante energías renovables, es posible también producir hidrógeno verde (renovable) sustituyendo el gas natural empleado actualmente en el proceso SMR (*steam methane refoing*) por biometano. Dado que procede de residuos orgánicos, el CO₂ liberado en ese proceso es neutro, y si se captura (CCS, *carbón capture and storage*), genera emisiones negativas, capaces de compensar emisiones inevitables. A este tipo de biohidrógeno le denominamos *hidrógeno dorado*, y es el que se propone como medida para descarbonizar la fabricación del cemento. La Figura 17 muestra un esquema de la producción del hidrógeno dorado, comparado con otros tipos.

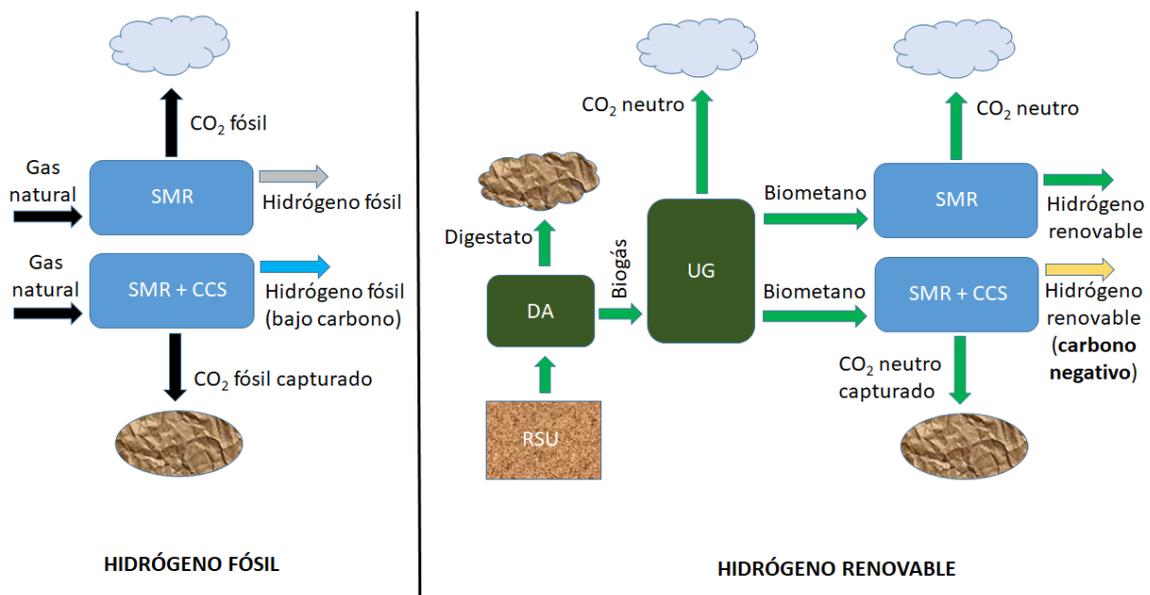


Figura 17. Tipos de hidrógeno obtenidos a partir de metano. [Linares et al., 2023].

En este caso estudio se asume un cemento con unas emisiones de 591 kg CO₂/t cemento, que son relativamente bajas debido a que el coque empleado supone tan solo el 38% de la energía térmica aportada el horno, procediendo el resto de biomasa y combustibles parcialmente descarbonizados (derivados de residuos). Asumiendo un reparto de las emisiones de CO₂ del 60% para las debidas al proceso y 40% para las debidas a combustión, y sabiendo que el [factor de emisión del coque de petróleo](#) es de 3,169 kg CO₂/kg coque se tiene que el coque empleado emite 131,52 kg CO₂/t cemento y el proceso (descarbonatación de la caliza) 354 kg CO₂/t cemento. La base de la propuesta es reemplazar todo el coque por hidrógeno dorado, lo que requiere 11,22 kg H₂/t cemento, permitiendo reducir 228,76 kg CO₂/t cemento (38,7%) desglosadas como:

- 131,52 kg CO₂/t cemento evitadas al reemplazar el coque por hidrógeno.
- 97,24 kg CO₂/t cemento compensadas por el uso de [hidrógeno con emisiones negativas](#) (-8,67 kg CO₂/kg H₂).

Con esto se obtiene un cemento con unas emisiones de 362 kg CO₂/t cemento, menores que el objetivo previsto para 2030, lo que significa que habría margen para sustituir sólo una parte del coque, por ejemplo.

Una vez comprobada la capacidad de descarbonización, se procede a evaluar las existencias de este tipo de hidrógeno, así como su coste. El volumen de hidrógeno para una planta de 500.000 t cemento/año es de 5.611 toneladas, que demandarían 302,97 GWh de biometano. En términos unitarios, el biometano requerido es de 605,95 kWh/t cemento, que escalado a la producción nacional de cemento (14,5 millones de toneladas anuales) supone una demanda anual de biometano de 8,81 TWh, coincidente con el [potencial de biometano procedente de la desgasificación de vertederos](#), el más económico.

El coste de producción del hidrógeno dorado a partir de biometano procedente de la desgasificación de vertederos aparece desglosado en la Figura 18. Las emisiones de CO₂ evitadas y compensadas ascienden a 228,76 kg CO₂/t cemento, que valoradas a 85 €/t CO₂ representan 1,73 €/kg H₂. Si dicha tasa se normaliza¹ se obtienen 4,11 €/kg H₂. Esa tasa

¹ 25 años con wacc de 8% y tasa nominal de actualización del 8,1%.

normalizada es la que establece el límite de la suma de todos los costes de la cadena de suministro del hidrógeno dorado constituida por:

- Coste normalizado del hidrógeno (LCOH): 1,72 €/kg H₂ (Figura 18).
- Inyección del biometano en la red. Supone un [coste medio de 3 €/MWh](#) referido al poder calorífico inferior, que se traduce en 0,24 €/kg H₂ normalizado².

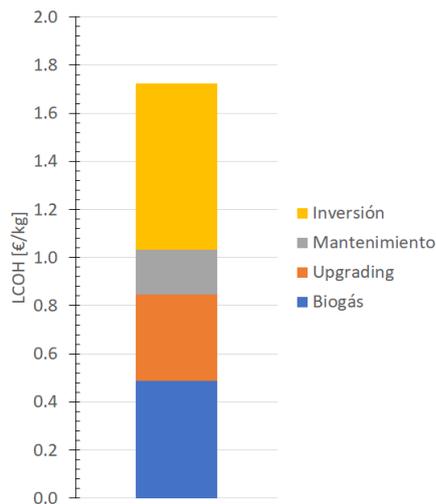


Figura 18. Coste de producción del hidrógeno dorado (sin descontar los créditos de CO₂) para una producción de biometano de 300 GWh/año. [[Soler et al., 2022](#)].

- Transporte de hidrógeno o de CO₂. La Figura 19 muestra que existen dos alternativas para la gestión del CO₂ capturado: ubicar la planta SMR+CCS próxima a la demanda y transportar el CO₂ hasta el almacenamiento geológico (opción preferida) o ubicar la planta SMR+CCS próxima al almacenamiento geológico y transportar el hidrógeno hasta la demanda. La tasa de 4,11 €/kg H₂ permite un coste de transporte de hasta 1,29 €/kg H₂ a día de hoy (2,14 €/kg H₂ normalizado²) para no incurrir en costes adicionales. Los [costes de transporte del hidrógeno](#) para un rango de entre 100 y 1000 km oscilan entre 0,22 y 1,82 €/kg H₂, mientras que [para el CO₂](#) ascienden a 36 €/t CO₂ para distancias de hasta 500 km, lo que equivale a 0,53 €/kg H₂. Por tanto, los costes de transporte se pueden cubrir con el margen existente aportado por la tasa de CO₂.

² 25 años con wacc de 8% y tasa nominal de actualización del 5%.

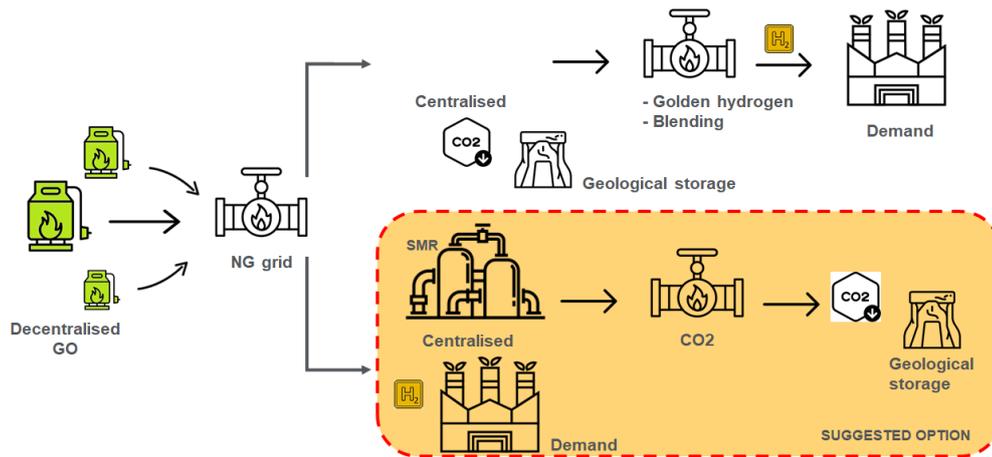


Figura 19. Cadena logística del hidrógeno dorado. [Elaboración propia].

De los resultados anteriores se deduce que el hidrógeno dorado es una buena solución para descarbonizar la fabricación del cemento al actuar tanto sobre las emisiones de combustión como sobre las de proceso. En el ejemplo analizado el reemplazo de la totalidad del coque lograría unas emisiones por debajo de las anunciadas para 2030, lo que permitiría sustituir menos y así evitar posibles problemas por la combustión de grandes cantidades de hidrógeno, hasta que se desarrollen soluciones tecnológicas para el reemplazo total.

En cuanto a la disponibilidad de recurso, se ha comprobado que el hidrógeno que se podría producir a partir de la desgasificación de los vertederos sería suficiente para cubrir la demanda nacional, pudiendo pasarse luego a sustratos más caros una vez se haya agotado el biogás de vertedero, pero dando tiempo a una reducción de precios fruto del escalado.

Finalmente, las tasas de CO₂ y su previsible encarecimiento hacen viable la medida a nivel económico.

5. CONCLUSIONES

La fabricación del cemento ocupa un lugar relevante dentro de los emisores de CO₂ industriales, dado que además del CO₂ liberado en la combustión de combustibles fósiles, se libera CO₂ en el propio proceso de descarbonatación de la caliza, para producir cal, elemento constitutivo del clínker.

Se han aplicado tres metodologías para analizar la descarbonización: una de diagnóstico y dos de tratamiento.

El diagnóstico se ha hecho a través del análisis de ciclo de vida. Los resultados obtenidos muestran que de los 873,6 kg CO₂ eq/t clínker un 61% corresponde a emisiones del proceso químico de fabricación y un 34% corresponde a las emisiones derivadas del uso de los combustibles. En todos los impactos, salvo el potencial de calentamiento global, la fase que más impactos genera es el uso de los combustibles en el proceso de fabricación del clínker. Por tanto, para conseguir reducir el potencial de calentamiento global del clínker de manera significativa, se puede:

- Sustituir los combustibles fósiles por combustibles alternativos, preferentemente no fósiles para conseguir obtener las altas temperaturas necesarias en el horno para que la obtención del clínker.
- Utilizar técnicas de captura de CO₂ ya que el 61% de las emisiones provienen del proceso químico que se produce en la obtención del clínker.

El 97% de las emisiones de potencial de calentamiento global del cemento provienen de la obtención de clínker. Al igual que ocurría en el proceso de obtención del clínker, el uso de los combustibles fósiles tradicionales es lo que más contribuye en la mayoría de los impactos evaluados. Por tanto, para reducir el impacto de la fabricación del cemento, son necesarias las medidas anteriormente planteadas para reducir el impacto del clínker. Además, la industria cementera está trabajando para conseguir cementos con los mismos requisitos mecánicos y físicos, pero con cantidades menores de clínker.

En cuanto al tratamiento, se ha planteado la recuperación de calores residuales para producir energía eléctrica, lo que apunta a las emisiones de alcance 2, y la sustitución del coque de petróleo por hidrógeno dorado, actuando así sobre el alcance 1.

La recuperación de calores residuales no logra una elevada tasa de descarbonización, pero sí permite mejorar la eficiencia y reducir las compras de electricidad renovable con garantía de origen, lo que redundaría en la competitividad de la fábrica. Se han explorado dos escenarios, seleccionando aquel que, aunque produce un menor nivel de autoconsumo (del orden del 30%) resulta más fácil de implementar, alcanzándose retornos de menos de 6 años.

El empleo del hidrógeno dorado se ha mostrado como una medida eficaz al actuar sobre ambos tipos de emisiones del horno de clínker: las de combustión y las de proceso. La explotación del biometano procedente de la desgasificación de los vertederos ha resultado económicamente viable, con un potencial capaz de cubrir la producción nacional de cemento. Es importante señalar que con esta medida se lograrían reducciones más allá del objetivo marcado para 2030, lo que permitiría rebajar el nivel de sustitución para asegurar unas buenas condiciones de la combustión, incrementándolo posteriormente conforme madure la tecnología.

6. REFERENCIAS

La propia metodología para elaborar este documento, a partir del trabajo desarrollado en la Cátedra en el curso 2022/23, contando tanto con las aportaciones de entidades externas en las sesiones de debate como con el trabajo con los alumnos y profesores de COMILLAS-ICAI en los Proyectos Fin de Carrera ha permitido ir intercalando enlaces a los documentos, presentaciones y grabaciones de dicho material. En algunos de dichos documentos se pueden encontrar referencias externas al uso, pero se ha considerado que los enlaces a los propios documentos resultan mucho más útiles como referencias activas para el presente informe del Observatorio del curso 2022/23.