



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

ANÁLISIS DE LAS OPCIONES DE REDUCCIÓN DE EMISIONES DEL SECTOR DE CEMENTO EN ESPAÑA HASTA EL HORIZONTE 2030

Autor: Luis Ángel Pé-Ferrer Carpintero

Director: José Pablo Chaves Ávila

Director: Timo Gerres

Madrid

Julio 2018

AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN RED DE PROYECTOS FIN DE GRADO, FIN DE MÁSTER, TESIS O MEMORIAS DE BACHILLERATO

1º. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.

El autor **D. LUIS ÁNGEL PÉ-FERRER CARPINTERO** DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra: **ANÁLISIS DE LAS OPCIONES DE REDUCCIÓN DE EMISIONES DEL SECTOR DE CEMENTO EN ESPAÑA HASTA EL HORIZONTE 2030**, que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

2º. Objeto y fines de la cesión.

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad, el autor **CEDE** a la Universidad Pontificia Comillas, de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución y de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra a) del apartado siguiente.

3º. Condiciones de la cesión y acceso

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia habilita para:

- a) Transformarla con el fin de adaptarla a cualquier tecnología que permita incorporarla a internet y hacerla accesible; incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar “marcas de agua” o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.
- b) Reproducir la en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato.
- c) Comunicarla, por defecto, a través de un archivo institucional abierto, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.
- d) Cualquier otra forma de acceso (restringido, embargado, cerrado) deberá solicitarse expresamente y obedecer a causas justificadas.
- e) Asignar por defecto a estos trabajos una licencia Creative Commons.

- f) Asignar por defecto a estos trabajos un HANDLE (URL *persistente*).

4°. Derechos del autor.

El autor, en tanto que titular de una obra tiene derecho a:

- a) Que la Universidad identifique claramente su nombre como autor de la misma
- b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.
- c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada.
- d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

5°. Deberes del autor.

El autor se compromete a:

- a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
- b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.
- c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e intereses a causa de la cesión.
- d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

6°. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso

posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.

- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.
- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.
- La Universidad se reserva la facultad de retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

Madrid, a de de

ACEPTA

Fdo.....

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título **ANÁLISIS DE LAS OPCIONES DE REDUCCIÓN DE EMISIONES DEL SECTOR DE CEMENTO EN ESPAÑA HASTA EL HORIZONTE 2030** en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el curso académico **2017-2018** es de mi autoría, original e inédito y no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: Luis Ángel Pé-Ferrer Carpintero

Fecha://

Autorizada la entrega del proyecto

DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: José Pablo Chaves Ávila

Fecha://

DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Timo Gerres

Fecha://



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

ANÁLISIS DE LAS OPCIONES DE REDUCCIÓN DE EMISIONES DEL SECTOR DE CEMENTO EN ESPAÑA HASTA EL HORIZONTE 2030

Autor: Luis Ángel Pé-Ferrer Carpintero

Director: José Pablo Chaves Ávila

Director: Timo Gerres

Madrid

Julio 2018

ANÁLISIS DE LAS OPCIONES DE REDUCCIÓN DE EMISIONES DEL SECTOR DE CEMENTO EN ESPAÑA HASTA EL HORIZONTE 2030

Autor: Pé-Ferrer Carpintero, Luis Ángel

Director: Chaves Ávila, José Pablo; Gerres, Timo

Entidad Colaboradora: IIT - Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

1. Introducción

La creciente preocupación a nivel mundial por el incremento del calentamiento global del planeta y el aumento de emisiones de CO₂ ha provocado que el sector industrial se esté sometiendo a una transformación de los procesos industriales hacia una mayor eficiencia energética. España, como parte de la Unión Europea, se ha comprometido a reducir entre un 80% y un 95% las emisiones de gases de efecto invernadero con respecto al año 1990 en el horizonte 2050. Previamente, se ha trazado una hoja de ruta con unos objetivos de reducción de emisiones GEI un 40% para 2030 con respecto a los valores de 1990 y una mejora de eficiencia energética en al menos un 27% sobre los criterios actuales.

Sin embargo, existe un vacío de conocimiento sobre el conjunto de tecnologías que podrían ser adoptadas en la industria española que permitan cambiar el patrón de consumo de combustibles en el medio plazo y reducir las emisiones. Igualmente, determinados sectores como el de cemento restringen la capacidad de la industria de reducir emisiones por su alta dependencia del coque de petróleo y un gran porcentaje de emisiones inevitables.

Por lo tanto, este proyecto busca ofrecer una visión analítica del sector cementero en España, evaluando la capacidad de esta industria de afrontar los objetivos energéticos europeos de reducción de emisiones de efecto invernadero en el horizonte 2020-2030. Para ello, se evaluará la aplicación de las diferentes tecnologías de reducción de emisiones disponibles para el sector en el medio plazo y el efecto de los ciclos de inversión en la descarbonización de la industria.

2. Metodología

En este contexto, se ha decidido modelar la industria de cemento española con el objetivo de evaluar los costes y el funcionamiento del sector para un horizonte 2020-2030, considerando diferentes hipótesis y situaciones.

Para la elaboración del modelo se ha optado por la implementación de la metodología bottom-up que considera un alto grado de detalle tecnológico para los diferentes actores que participan en el sector, permitiendo el análisis minucioso de cada una de las tecnologías de descarbonización del sector. El modelo minimiza los costes de operación e inversión del sistema teniendo en cuenta una serie de factores entre los que se hallan la demanda de cemento y clínker que se debe abastecer, el precio de los combustibles además de un precio ascendente de CO₂. Las mejoras tecnológicas de reducción de emisiones discutidas son la renovación de los hornos industriales, utilización de materias primas sustitutivas de clínker, combustibles alternativos, y tecnologías de captura de CO₂.

Esta metodología permite analizar el impacto técnico-económico de la aplicación de las diferentes tecnologías de eficiencia energética y reducción de emisiones definidas y estudiar la capacidad del sector para cumplir los objetivos de reducción de emisiones marcados por la Unión Europea en el medio plazo. También, se estudia la transición del mix energético de la industria y el efecto de la evolución energética del sector en las emisiones de CO₂. Se evalúan el impacto de la renovación de las instalaciones actuales del parque cementero español teniendo en cuenta la vida útil de estas, prestando especial atención a los ciclos de inversión habituales del sector. Finalmente, ofrece la oportunidad de valorar a qué precio es rentable la aplicación de las tecnologías de captura de CO₂ y si realmente serán económicamente viables en el medio plazo para el sector cementero español teniendo en cuenta una evolución realista de la demanda.

3. Resultados

Los casos de estudio desarrollados han mostrado resultados interesantes sobre la evolución de las emisiones del sector cementero, la transición del mix energético y el impacto de la renovación energética de los hornos teniendo en cuenta los ciclos de inversión. Los resultados obtenidos se muestran a continuación.

Evolución de emisiones

En el año 2030, las emisiones del sector aumentarán un 9,3% respecto a 2015, principalmente debido al aumento de la producción de cemento. Este nivel de emisiones representa una reducción de 42,7% respecto a niveles de 2005, cercano al objetivo marcado por Unión Europea para los sectores ETS. La sustitución de combustibles fósiles por combustibles alternativos, renovación de hornos y sustitución de contenido de clínker por materias primas alternativas junto con la caída de la producción desde 2006, no recuperada, son prácticamente suficientes para la descarbonización del sector en el horizonte estudiado.

Precios bajos por de CO₂ supondrán grandes riesgos para cumplir los objetivos marcados debido a la pérdida de competitividad de los combustibles fósiles frente a los alternativos. Estos precios también influirán en los costes de producción, destacando que para costes medios por tonelada de CO₂ emitida, el coste de producción se conseguiría reducir en un 6,95% debido a la renovación energética de hornos y el menor coste de emisiones.

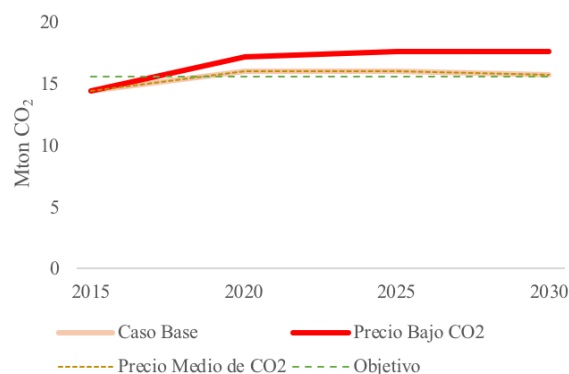


Figura 1: Evolución emisiones del sector de cemento

Los resultados obtenidos muestran que la instalación de las tecnologías de captura de emisiones de CO₂ no es viable para la industria en el horizonte 2030. Esto se debe al alto consumo térmico y costes de mantenimiento e inversión de las tecnologías disponibles, por lo que se necesitarán precios de CO₂ mayores de los esperados para promover su implementación en el medio plazo. Sin embargo, esto demuestra que el éxito de reducción de emisiones para 2050 vendrá marcado por la eliminación de emisiones del proceso de calcinación de la industria de cemento,

etapa del proceso que no se ha visto afectada por las distintas tecnologías propuestas en el medio plazo.

Transición del mix energético

En cuanto a la transición del mix energético de la industria, se ha reducido considerablemente la dependencia de los combustibles fósiles tradicionales desde el 74% en el año 2015, hasta 55% al final del horizonte estudiado. Los combustibles alternativos alcanzan el 45% en el año 2030, siendo el 40% de estos biomasa. La transformación energética de la industria en el medio plazo está directamente relacionada con el precio de CO₂ y con la disponibilidad de combustibles alternativos y biomasa accesible para el sector. El mayor poder calorífico del coque de petróleo y su bajo precio hacen este combustible muy competitivo con bajos costes de emisiones de CO₂. En cuanto al consumo eléctrico del sector de cemento nacional aumentará un 15% respecto al año 2015 debido a un incremento de la producción de cemento y el aumento del consumo de cemento con mayor porcentaje de materias primas sustitutivas que requieren un mayor consumo de electricidad en su proceso de molienda.

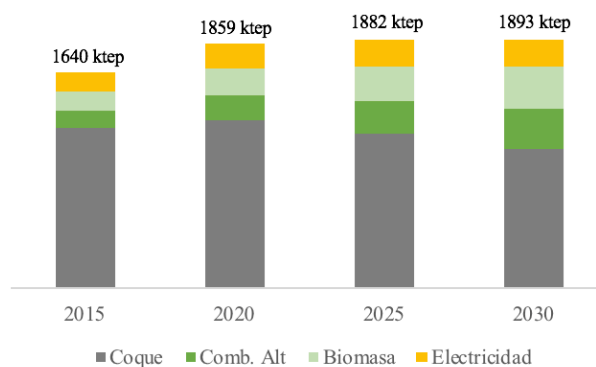


Figura 2: Mix energético sector de cemento

Ciclos de inversión y renovación de hornos

Finalmente, se muestra el impacto en el comportamiento energético de la renovación de los hornos actuales por hornos de 6 etapas con pre-calentador y pre-calcinador y la importancia de los ciclos de inversión del sector. Los resultados muestran una importante sobrecapacidad instalada de producción de clínker, en la que el 65% de la capacidad instalada será utilizada en 2030. También se observa una pobre renovación energética de los actuales hornos de producción de clínker

bajo la demanda esperada. Solamente, un escenario en el que se alcance una producción de 15% mayor de la esperada motivaría la renovación de al menos 1 planta antes de completar su vida útil.

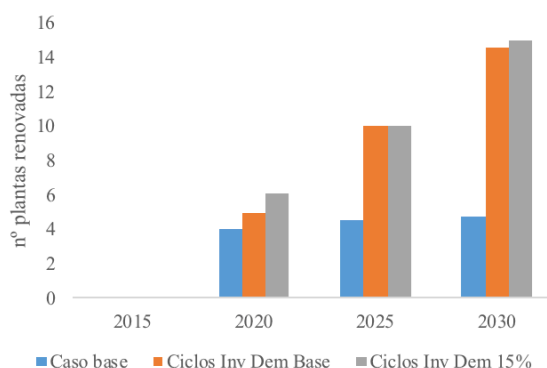


Figura 3: Renovación de plantas en la industria de cemento

Los ciclos de inversión tendrán un gran impacto en la eficiencia energética del sector. La renovación de los hornos de producción de clínker gris tras el cumplimiento de una vida útil media de 40 años permite reducir 6,4% el consumo térmico en 2030. Las emisiones del sector también reducirán por el rejuvenecimiento de los hornos llegando a un nivel de reducción de 44% en el horizonte 2030 respecto 2005.

4. Conclusiones

En primer lugar, el sector de cemento reducirá sus emisiones un 42,7% respecto a niveles de 2005 para el horizonte 2030 mediante la sustitución de combustibles fósiles por alternativos, renovación de hornos y materias primas sustitutivas de clínker. Las tecnologías de captura de emisiones no serán viables para el sector en el medio plazo, aunque representarán un papel clave en la consecución de los objetivos para 2050 reduciendo las emisiones del proceso de calcinación.

En segundo lugar, los ciclos de inversión tendrán un gran impacto en la eficiencia energética y descarbonización del sector en el medio plazo. La vida útil de los hornos actuales, apunto de completarse, supone un palanca de cambio hacia un modelo más eficiente. Sin embargo, esta renovación sólo vendrá acompañada de una mayor demanda de cemento y objetivos de reducción de emisiones más restrictivos.

ANALYSIS OF DECARBONIZATION OPTIONS FOR THE SPANISH CEMENT INDUSTRY IN THE TIME HORIZON 2030

EXECUTIVE SUMMARY OF THE PROJECT

1. Introduction

The increasing concern worldwide about global warming and greenhouse gas emissions is impacting the industrial sector, resulting in an energy revolution which will transform industrial processes towards a more efficient system. Spain, as a part of the European Union, has made a commitment to reduce GHG emissions by the 2050 time horizon between 80% and 95% with respect to 1990 levels. To reach this objective, the EU has established a roadmap including a set of intermediate milestones to guide the transition towards decarbonization. The 2030 framework defines a target of reducing GHG emissions by 40% compared to 1990 and increasing the energy efficiency by 27%.

However, there is a knowledge gap in the Spanish industry about the technologies that may be implemented in the midterm which will permit the change of the current energy carrier and result in the reduction of emissions. Additionally, there are certain sectors with energy restrictions which in turn reduce the potential of the industry to reach its decarbonization targets. Particularly, the cement industry has a high energy dependence from petroleum coke and an abundant amount of unavoidable emissions from the clinker production process.

Consequently, this report seeks to offer an analytical view of the Spanish cement subsector, evaluating the capacity of this industry to face the European emissions reduction targets in the time horizon 2020-2030. To accomplish this objective, this project evaluates the implementation of the different emission reduction technologies available for the sector in the given time period and the effect of the investment cycles of the industry in its decarbonization transition.

2. Methodology

In the given context, a Spanish cement industry optimization model was designed in order to study the operational behavior and costs of this sector in the time horizon 2020-2030, considering a defined range of situations and hypothesis.

This tool is a bottom up non-linear optimization model that reflects a high level of detail for the different actors who influence this sector, allowing a meticulous analysis of the different decarbonization technologies available in the midterm for the cement industry. This model minimizes the operational and investing cost from the system, taking into account various factors such as the clinker and cement demand, the fuel prices, and the price of the CO₂ emissions. The technological improvements in emission reductions studied include cement kiln renovation, alternative de-carbonated raw materials for clinker production, fuel switching and carbon capture and storage technologies, both post-combustion and oxidation.

This methodology permits the technical and economical analysis from the implementation of the different energy efficiency and emissions reduction technologies while simultaneously studying the capacity of the cement sector to accomplish the targets established by European Union for 2030. This model also estimates the energy carrier transition and the effect of the energy efficiency measures in the CO₂ emissions from the industry. Additionally, the cement kiln renovation is evaluated based on the lifetime of the current installations influenced by the present investment cycles of the sector. Finally, the methodology assesses the economic profitability of the implementation of carbon capture technologies and estimates the implementation of CCS technologies in the midterm for the cement industry based on a realistic trend of the upcoming cement demand and CO₂ prices.

3. Results

The different scenarios defined provided interesting results about the cement industry emissions behavior, the transition to a less petroleum dependent energy carrier, the cement kiln renovation, and the clear impact of the investment cycles in the energy renovation. The results obtained are shown below.

CO₂ emissions behavior

In 2030, the CO₂ emissions from the Spanish cement sector will increase 9,3% respect 2015 level, mainly due to the rise in the cement demand. This emission level represents a reduction of 42,7% compared with 2005 levels, close to the

targets defined by the European Union for ETS sectors in 2030. The substitution of fossil fuels for alternative fuels, cement kiln renovation, the use of decarbonated raw materials to replace the clinker content in cement production along with the fall in production since 2006, are sufficient enough for the decarbonization of the sector in the 2030 horizon.

Low prices for CO₂ will pose great risks to meet the objectives set out, due to the loss of competitiveness of fossil fuels versus alternative fuels. These prices will also influence production costs. For the average cost per ton of CO₂ emitted, in addition to achieving the targets defined, the cost of production would be reduced by 6.95% due to the renovation of the thermal energy installations and the lower cost of emissions.

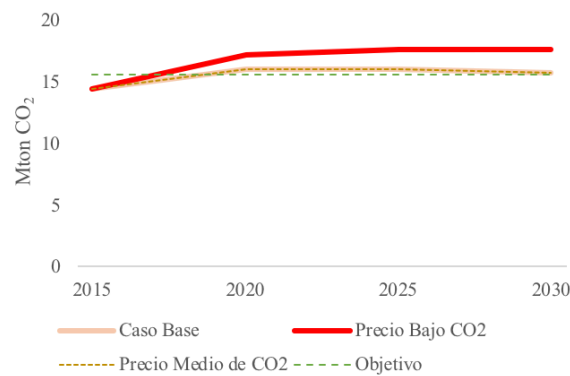


Figure 1: CO₂ emissions trend for the Spanish cement sector

The results obtained also show that the carbon capture and storage technologies are not economically viable for the industry in the time horizon 2030. This is due to the high thermal consumption as well as the maintenance and investment costs of the available technologies, which will require higher CO₂ prices than expected to uphold its implementation in the medium term. However, this shows that the ability to meet the goals of reducing emissions by 2050 will depend on the elimination of emissions from the calcination process of the cement industry, a stage of the process that has not been affected by the different technologies proposed to be implemented by 2030.

Energy carrier transition

With respect to the transition of the cement industry energy carrier, the fossil fuel dependence has been reduced drastically from 74% in 2015 to 55% in 2030. Additionally, the alternative fuels will represent 45% of the thermal consumption by 2030, 40% of that being biomass. The mid-term industrial energy transformation is directly related with both the CO₂ prices and the availability for of the alternative fuels and biomass accessible to the sector. The higher calorific values from petroleum coke and its low price make this fuel much more competitive with low CO₂ emissions costs. In terms of the electrical consumption of the cement industry, the national cement sector will grow by 15% compared to 2015 levels due to an increase in cement production and the impact from the lower clinker-cement ratio, resulting in higher de-carbonated cement consumption which in return increases demand for milling and electricity.

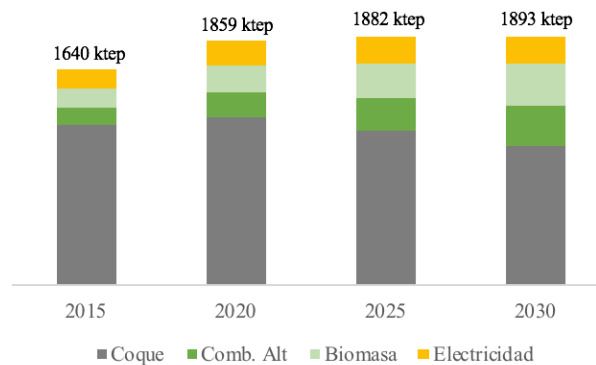


Figure 2: Cement sector energy carrier in the midterm

Investment cycles and cement kiln renovation

Finally, the results show the impact from cement kiln renovation to 6 cyclone stages kilns with pre-heaters and pre-calciners in addition to the importance of investment cycles in the industrial decarbonization. Moreover, the different analyses highlight a significant clinker production overcapacity, in which only 65% of the installed capacity will be operating by 2030. Additionally, the expectation of low cement demand will result in a poor energy renewal of the Spanish cement industry in the upcoming years. Solely a scenario with a 15% higher cement demand would to motivate the operators to renovate at least 1 plant before its investment cycle is completed.

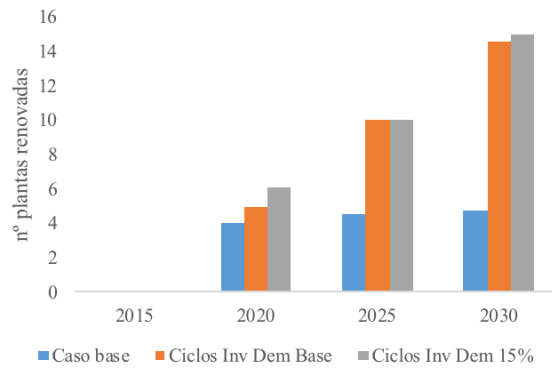


Figure 3: Cement plant renovation behavior in the midterm

Last but not least, the investment cycles will have a great impact on the energy efficiency behavior of the industry. The kiln renovation with an estimated average useful life of 40 years allows a 6,4% thermal consumption reduction by 2030. The CO₂ emissions will also be reduced by the rejuvenation of the kilns, achieving a 44% reduction in the time horizon 2030 with respect to 2005 levels.

4. Conclusions

First of all, the Spanish cement sector will reduce its CO₂ emissions by 42,7% respect to 2005 levels in the time horizon 2030 by replacing fossil fuels with alternative fuels, renovation of cement kilns, and substituting alternative decarbonated raw materials in clinker production. The carbon capture technologies will not be economically viable for this industry in the midterm. Nonetheless, they will represent a key role in achieving the 2050 objectives by capturing CO₂ emissions from the calcination process.

Secondly, the investment cycles will have an outstanding impact on energy efficiency and decarbonization of the sector in the time horizon 2030. Although the useful life of the current Spanish cement kilns is nearing its end, it is a lever for a more efficient model going forward. However, this renewal will only be accompanied by a greater demand for cement and more restrictive emission reduction targets.

Tabla de contenido

1	Introducción.....	15
1.1	Contexto actual.....	15
1.2	Objetivos del proyecto.....	17
1.3	Recursos a emplear.....	18
2	Realidad actual del sector industrial.....	19
2.1	Industria española en Europa.....	19
2.2	Sector industrial en España.....	24
3	Industria de cemento española.....	35
3.1	Características del proceso de producción de cemento.....	35
3.2	Ciclos de Inversión.....	40
3.3	Mejoras tecnológicas del sector de cemento español.....	42
3.3.1	Renovación de hornos industriales.....	43
3.3.2	Materias primas sustitutivas.....	44
3.3.3	Combustibles alternativos.....	46
3.3.4	Recuperación de calor.....	48
3.3.5	Mejora eficiencia eléctrica.....	49
3.3.6	Captura y almacenamiento de CO ₂	50
4	Modelado de la industria de cemento.....	55
4.1	Aspectos generales.....	55
4.2	Especificación del modelo.....	57
4.3	Parámetros considerados en el caso base.....	59
4.4	Parámetros considerados en el análisis de sensibilidad.....	65
4.5	Estructura matemática.....	67
5	Análisis de resultados.....	71
5.1	Resultados del caso base.....	71
5.2	Análisis de sensibilidad.....	75
6	Conclusiones.....	85
6.1	Conclusiones sobre los resultados.....	85
6.2	Conclusiones sobre la metodología.....	88
6.3	Recomendaciones para futuros estudios.....	89

7	Referencias.....	91
8	Anexos.....	95
8.1	Glosario.....	95
8.2	Código modelo sector cemento.....	96

1 Introducción

El presente informe presenta los resultados de un estudio realizado como proyecto final de máster de ingeniería industrial en colaboración con el Instituto de Investigación Tecnológica (IIT), con objeto de evaluar los costes y la transformación en el consumo energético y emisiones de la industria de cemento española bajo diferentes escenarios futuros para el horizonte de tiempo 2020-2030. Esta sección introductoria describe el contexto que motiva el presente estudio, así como los objetivos del mismo.

1.1 Contexto actual

Actualmente existe una gran preocupación a nivel mundial por el incremento del calentamiento global del planeta debido, principalmente, a las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera lo que representa una gran amenaza para el medioambiente. El sector industrial, dado que es uno de los mayores consumidores de energía junto con otros sectores como el de transportes, residencial o comercial, se está sometiendo a una transformación de los procesos industriales hacia una mayor eficiencia energética, lo que será decisivo para conseguir reducir las emisiones de gases a la atmósfera.

Actualmente la Unión Europea está realizando un gran esfuerzo para reducir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero ya que el cambio climático es una prioridad para Europa. Estos esfuerzos vienen motivados por el Acuerdo de París alcanzando en diciembre de 2015 donde se llegó a un consenso a nivel global de contener el aumento de la temperatura media mundial inferior a 2 °C sobre los niveles preindustriales y esforzarse para limitar el aumento a 1,5 °C (Naciones Unidas, 2015). Los países miembros de la Unión Europea, se han comprometido a reducir entre un 80% y un 95% las emisiones de gases de efecto invernadero con respecto al año 1990 en el horizonte 2050 para contener el incremento de temperatura de la Tierra (Comisión de expertos de transición energética, 2018). Previamente, la Unión Europea ha trazado una hoja de ruta con unos objetivos de reducción de emisiones GEI de un 40% para 2030 con respecto a los valores de 1990. Para lograr este objetivo las reducciones en los sectores sujetos y no sujetos al régimen de comercio de derechos de emisión deben concretarse en un 43% y 30%, respectivamente en comparación con 2005 (Comisión de expertos de transición energética, 2018). Concretamente, para España se ha definido un objetivo vinculante de reducción de 26% para los sectores difusos (Comisión de expertos de

transición energética, 2018). La finalidad de estos objetivos intermedios es facilitar la transición a un modelo energético descarbonizado.

La industria española también se encuentra actualmente en una situación de renovación a nivel energético para cumplir las políticas energéticas llevadas a cabo por la Unión Europea. El Gobierno español, está trabajando en un Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030 y una futura Ley de Cambio Climático y Transición Energética (El periódico de la energía, 2017). Tal y como se ha citado, los principales objetivos que se quieren cumplir son la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero de la Unión Europea por lo menos en un 40% y mejora de eficiencia energética en al menos un 27% sobre los criterios actuales, ambos en el horizonte 2030 (Ministerio Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, 2017). Estas metas se pretenden conseguir mediante proyectos de gestión y eficiencia energética en la industria, incentivando la contratación de electricidad con certificado de garantía de origen renovable, haciendo un mayor aprovechamiento de calor residual o sustituyendo combustibles fósiles por fuentes renovables o por combustibles fósiles menos contaminantes (Ministerio de energía, turismo y agenda digital, 2017) (Secretaría General de Industria y PYME, 2015). También se están apoyando en paralelo otras estrategias como la reutilización de materiales, el aumento de los ciclos de vida de los productos que ayudan a la reducción de emisiones.

Actualmente, existe un vacío de conocimiento sobre las tecnologías que podrían ser adoptadas en la industria española que permitan cambiar el patrón de consumo de combustibles en el medio plazo y de esta manera reducir las emisiones. Los ciclos de inversión, que dependen de la vida útil de la maquinaria, influyen en el proceso de renovación de la industria, ya que determinan cuándo sería óptimo realizar las inversiones en renovación de equipos mucho más eficiente. Al mismo tiempo, existen determinados procesos industriales que restringen la capacidad de cierto sector de reducir el consumo de combustibles y reducir emisiones en ciertas etapas ya que estos tienen una vital importancia en sus procesos productivos. Uno de estos sectores es el subsector de cemento que tiene una alta dependencia del coque de petróleo y un gran porcentaje de emisiones inevitables, hasta ahora, procedentes del proceso de calcinación (WSP - Parsons Brinckerhoff Engineering Services, 2015).

Por lo tanto, este proyecto pretende analizar cuantitativamente las consecuencias de la

aplicación de las diferentes tecnologías de eficiencia energética disponibles en el sector de cemento en el horizonte 2020-2030 con el objetivo de predeterminedar cómo y cuándo el cambio en el consumo de los principales combustibles y el comportamiento de las emisiones se va a producir. Todo este análisis se realizará teniendo en cuenta los objetivos medioambientales europeos que se dirigen hacia una futura descarbonización de la industria en el horizonte 2050. También, se hará hincapié en la necesidad promover políticas de eficiencia energética que motiven a las empresas a utilizar sistemas más eficientes.

1.2 Objetivos del proyecto

Como se ha citado anteriormente, este proyecto busca ofrecer una visión analítica del consumo energético del sector cementero en España, evaluando la capacidad de esta industria de afrontar los objetivos energéticos europeos de reducción de emisiones de efecto invernadero en el horizonte 2020-2030. Para ello, se evaluará la aplicación de las diferentes tecnologías de reducción de emisiones disponibles para el sector en el medio plazo y el efecto de los ciclos de inversión del sector de cemento en la descarbonización de la industria.

Por lo tanto, los objetivos principales que se buscan en la realización de este proyecto son:

- Análisis de la realidad energética del sector industrial tanto de Europa como de España, incluyendo la posición de la industria española a nivel energético respecto al resto de países.
- Estudio a nivel nacional del consumo energético de los principales procesos industriales e identificación del sector de cemento como sector clave para la descarbonización de la industria española
- Valoración de la situación actual de las instalaciones de producción de cemento en España, y estimación de ciclos de inversión de estas. Evaluación de tecnologías innovadoras de descarbonización y eficiencia energética que se vayan a aplicar en el corto-medio plazo en el sector industrial de cemento.
- Desarrollo de un modelo cuantitativo en el cual se pueda explorar la evolución energética de la industria de cemento española en el medio plazo, así como el

impacto técnico-económico de la aplicación de las tecnologías de reducción de emisiones y mejora energética en este mismo horizonte temporal.

- Análisis de la transformación del mix energético y la evolución de las emisiones CO₂ para el sector cementero en el horizonte 2020-2030. Evaluación de la renovación de las actuales plantas de producción y su impacto en la eficiencia energética del sector en el horizonte estudiado.

1.3 Recursos a emplear

Los principales recursos que se van a emplear para estudiar la situación energética presente y prospectivas futuras de la industria española son:

- Análisis de investigaciones y artículos científicos previamente publicados para conocer tanto la realidad energética de la industria europea y nacional como las tecnologías presentes y futuras.
- Estudio de publicaciones de los principales organismos gubernamentales del país y europeos para conocer la regulación actual en cuanto a emisiones y la tendencia regulatoria que se van a desarrollar.
- Análisis de datos y estadísticas publicadas por el Instituto Nacional de Estadística e Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía a nivel nacional o Eurostat a nivel europeo que permitirán evaluar los actuales procesos y conocer las actividades industriales que más energía consumen y emiten más gases.
- Desarrollo de un modelo cuantitativo utilizando el programa de optimización algebraico GAMS que permite predecir consumos a medio plazo de la industria y analizar las consecuencias de las nuevas tecnologías aplicadas.

2 Realidad actual del sector industrial

En el capítulo introductorio, se ha situado este informe en el contexto energético actual europeo, además de explicar detalladamente las cuestiones que se buscan resolver con este proyecto. En este segundo capítulo se va a proceder a realizar el análisis de la realidad energética de la industria tanto de Europa como de España, incluyendo la evaluación de la posición que ocupa la industria española en cuanto a emisiones y consumo energético respecto a otros países de la Unión Europea. Se estudiarán los consumos de los principales procesos que integran estos sectores, detectando los problemas energéticos de cada sector. Además, se evaluará la evolución del consumo energético de la industria española durante los últimos 25 años observando el cambio en el vector energético de cada actividad. Finalmente, la visión energética global de toda la industria española permitirá identificar al sector de cemento como una de las industrias con mayor probabilidad de mejoras e implementación de tecnologías de eficiencia energética y reducción de emisiones.

2.1 Industria española en Europa

Actualmente, a nivel europeo se encuentra en marcha el Paquete de Energía y Cambio Climático 2013-2020, que ha sentado las bases para dar cumplimiento a los compromisos en materia de cambio climático y energía asumidos por el Consejo Europeo en 2007 e incluyó como objetivos para 2020: reducir las emisiones GEI de la industria en un 20% respecto de los niveles de 1990, cubrir el 20% del consumo de energía final con energías renovables y reducir en un 20% el consumo de energía primaria, y conseguir una mejora del 20% en eficiencia energética (Comisión Europea, 2011).

El principal instrumento de la Unión Europea para controlar las emisiones de la industria es el mercado europeo de derechos de emisión, siendo este una de las principales medidas de Europa en su lucha contra el cambio climático. Establecido en 2005, este mercado busca reducir en un 21% las emisiones de CO₂ de la industria europea en 2020 y un 43% en 2030, ambos respecto a los niveles de 2005. Este sistema cubre aproximadamente el 45% de las emisiones totales de GEI de la Unión Europea (Pintos Touriño, 2017).

El gráfico mostrado en la Figura 4 compara la variación de la producción en la industria europea a lo largo de los últimos diez años frente a la evolución del consumo energético final y emisiones directas de la industria en Europa en el mismo periodo de tiempo. Se puede apreciar que a pesar de que la industria a nivel europeo ha aumentado en estos diez

años su producción, creciendo un 4,21% respecto el año 2005, se observa que el consumo energético final y emisiones directas de CO₂ han decrecido considerablemente. Adicionalmente, durante los cinco primeros años de esa década la evolución en el consumo energético y las emisiones son prácticamente idénticas, pero ha sido desde 2010 cuando ambas se han desacoplado observándose realmente una mayor caída en emisiones demostrando que están teniendo efecto las medidas de la Unión Europea respecto a la reducción en emisiones debido al cambio en el vector energético que se está dando en la industria.

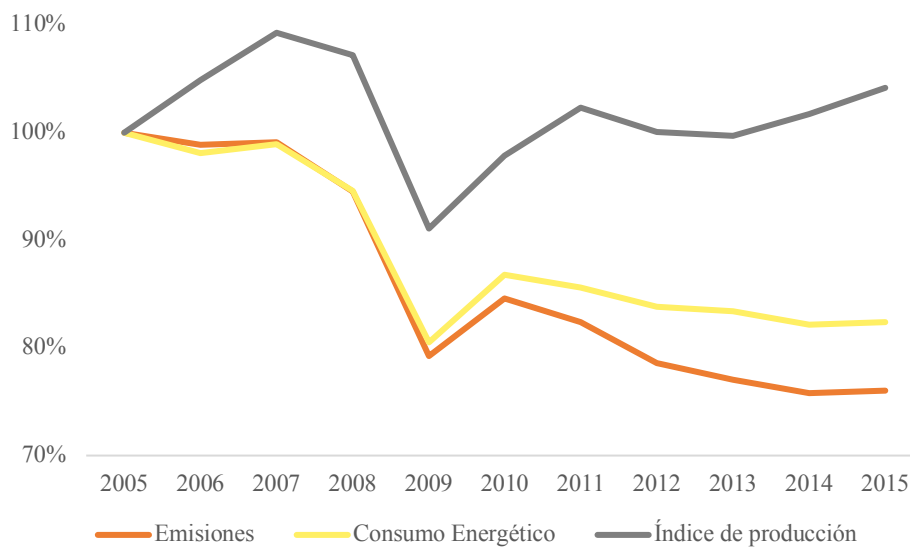
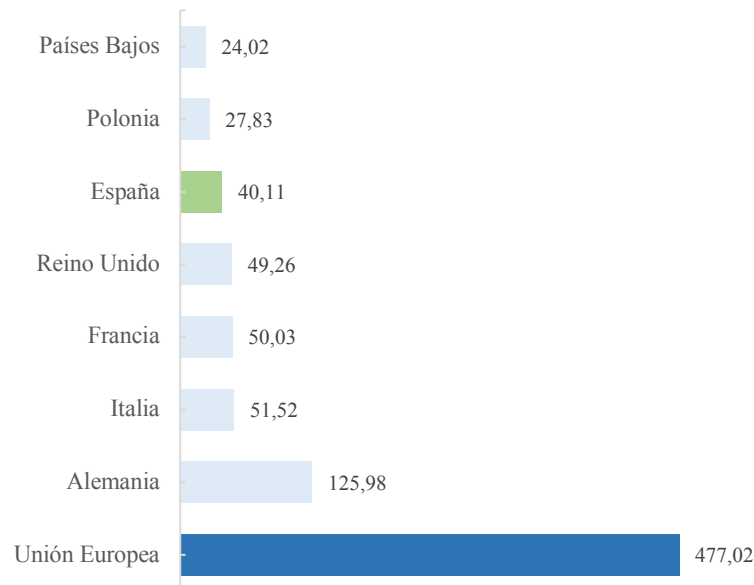


Figura 4: Evolución en la industria europea de emisiones y consumo energético frente a producción respecto al año 2005. Elaboración propia a partir de (Odyssee, 2017)

Si se analiza la situación a nivel de emisiones, en el año 2015 la industria de la Unión Europea emitió a la atmósfera un total de 447 MtCO₂ a la atmósfera, el 14% del total de 3214,8 MtCO₂ emitidas por los 28 países que componen la Unión Europea. La industria alemana es con diferencia la mayor emisora de CO₂ ya que es la causante del 26,4% de emisiones seguida por las industrias de Italia, Francia y Reino Unido. En cuanto a España, su industria ocupa la quinta posición en emisiones representando el 8,4% del total, seguida de Polonia y Países Bajos cuyas industrias son también intensivas en emisiones. Esta comparación de emisiones se puede observar en la Figura 5.



*Figura 5: Inventario de emisiones de CO₂ (MtCO₂) de la industria europea por países.
Elaboración propia a partir de (Odyssee, 2017)*

Estudiando la evolución de las emisiones de CO₂ de los diferentes países de la comunidad económica europea teniendo como referencia el año 2005, tal y como se muestra en la Figura 6, se puede concluir que la industria española ha sido la que más ha reducido sus emisiones en esta década, consiguiendo reducir en un 42% el total de toneladas de CO₂ emitidas a la atmósfera. En este mismo periodo de tiempo la media europea de reducción de emisiones en la industria ha sido de un 23% muy inferior a la española. Este gran descenso en emisiones del sector se debe a la caída en la producción de la industria española, en 2015 su producción fue un 17% menor que los niveles de 2005, y a la adopción de los planes nacionales de ahorro y eficiencia energética. La creciente evolución de los precios del petróleo y las previsiones de mantenerse los mismos motivó al Estado español a promover mediante su plan estratégico de Ahorro y Eficiencia Energética 2004-2012 la reducción la dependencia energética del petróleo y por lo tanto sus importaciones. (Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, 2007). Gracias a este plan estratégico y su sucesor han conseguido reducir la dependencia energética del petróleo hasta el 12,35% del consumo de energía final que representó en 2015.

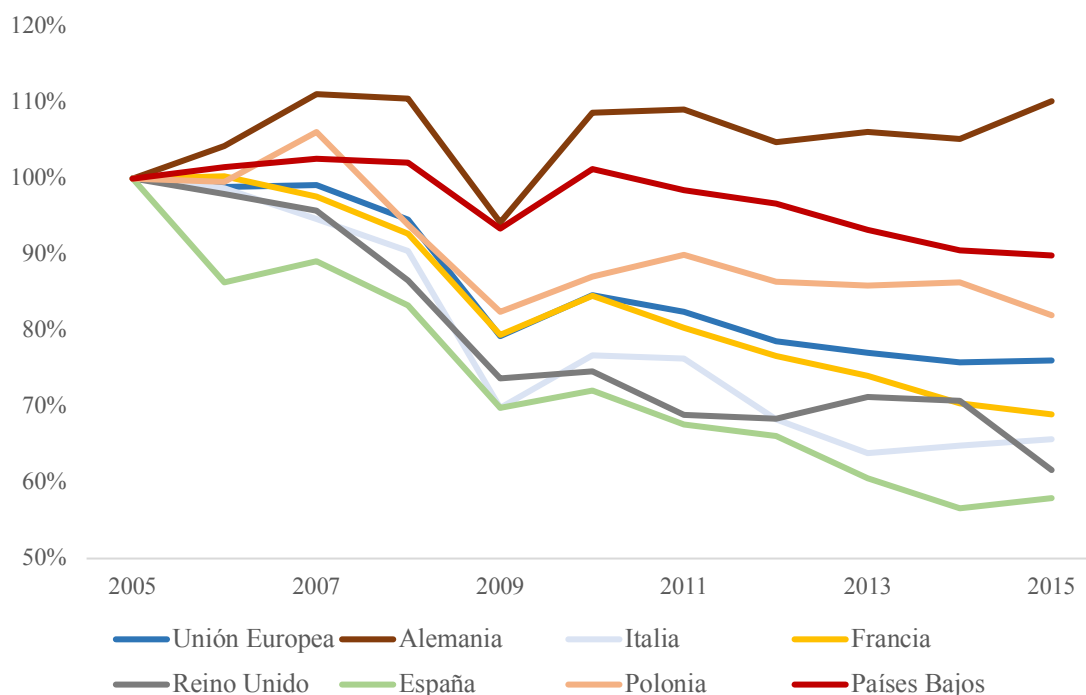


Figura 6: Evolución de emisiones de la industria europea respecto al año 2005. Elaboración propia a partir de (Odyssee, 2017).

Sin embargo, analizando el total de emisiones de la industria en tCO₂ por cada tep de energía final consumida en el año 2015 y la intensidad de CO₂ de la industria española respecto al resto de países, mostradas en las Figura 7 y Figura 8, se puede observar que España ocupa uno de los puestos más altos respecto al resto de industrias en Europa debido principalmente a la todavía gran dependencia de productos derivados del petróleo en sus procesos productivos que el resto de la Comunidad Europea. No obstante, respecto a otros países, la industria española destaca por su bajo uso de carbones, el cual sólo representó el 6,3% del total de energía final consumida. Otros países como Reino Unido y Polonia tienen una dependencia del carbón de un 21,43% y 20,77% en sus industrias. El bajo uso de carbón en España se debe a que su industria siderúrgica, la más intensiva en uso de carbón, es una de las más eficientes de la Unión Europea por su gran porcentaje de capacidad de tecnología EAF1 instalada (Pintos Touriño, 2017).

¹ Las siglas EAF significan Electric Arc Furnace. Se refiere a la tecnología aplicada en la industria siderúrgica española en la que se fabrica acero mediante horno eléctrico alimentado principalmente de chatarra.

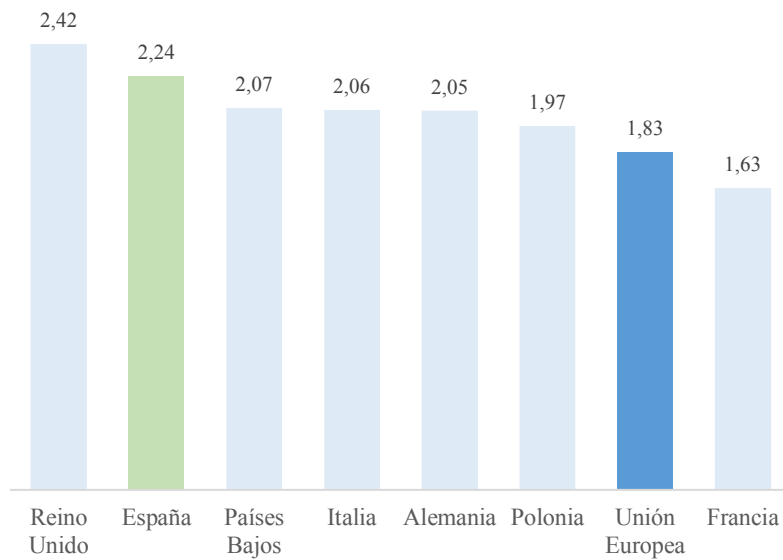


Figura 7: Factor de emisión por energía final consumida (tCO₂/tep). Elaboración propia a partir de (Odyssee, 2017)

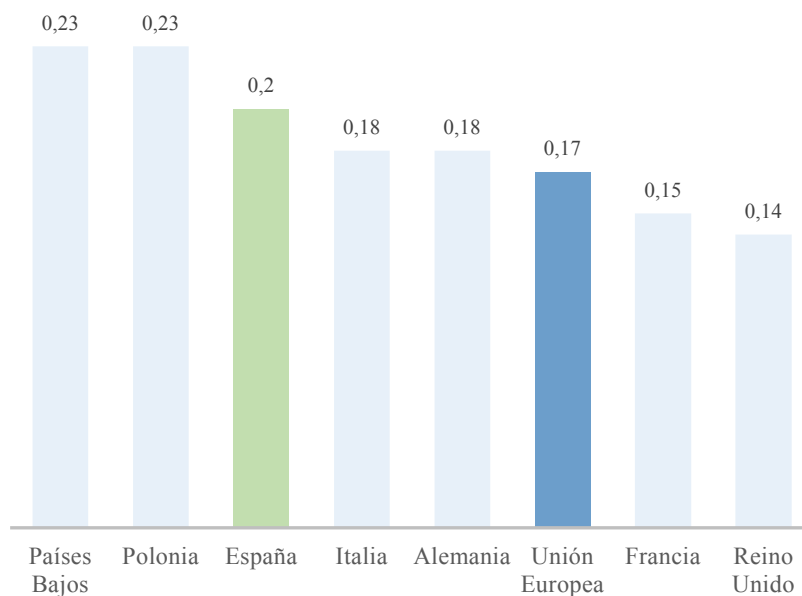


Figura 8: Intensidad de CO₂ (kCO₂/€2005) de la industria europea. Elaboración propia a partir de (Odyssee, 2017)

Por lo tanto, viendo las conclusiones obtenidas a través del análisis energético de la industria europea, España representará un papel importante en la consecución de los objetivos de reducción de emisiones para conseguir un sistema sostenible y prácticamente descarbonizado en el medio-largo plazo. La industria española, a pesar de reducir drásticamente sus emisiones comparado con el resto de países de la Unión Europea por

la caída de su producción y el efecto de los planes energéticos implementados, los análisis posteriores muestran una pobre eficiencia energética y de emisiones. Esta conclusión demuestra que en la industria de España existe un amplio margen de mejora y ofrece un gran número de oportunidades de implantación de medidas de eficiencia y ahorro energético ya implementadas en otros países europeos que permitan reducir las emisiones de CO₂ por unidad de energía consumida y por valor económico agregado al país haciendo una industria mucho más competitiva en el entorno europeo y menos dependiente energéticamente del exterior.

2.2 Sector industrial en España

Una vez situada energéticamente la industria de España respecto al resto de países de la Unión Europea, se procede a realizar el análisis energético de los sectores más destacados del sector industrial español.

El consumo total de energía de la industria española en el año 2015 fue de 18.491 ktep, lo que representa un 23,5 % del consumo de energía total del país (IDAE, 2017). Las ramas principales del sector en cuanto a consumo energético son: minerales no metálicos², siderurgia y fundición, química, alimentación, bebidas y tabaco y pasta, papel e impresión. Estas actividades suponen más del 70 % del consumo energético total de la industria, siendo la industria de minerales no metálicos el mayor consumidor, con un 18% de consumo energético.

En cuanto al consumo de combustibles de la industria las dos principales fuentes de energía son gas natural y electricidad representado 71% del consumo total. Destaca que el carbón es principalmente utilizado por la industria siderúrgica y fundición y los productos petrolíferos por el sector de minerales no metálicos en la fabricación de cementos, vidrios y cerámicas. En la Figura 9, se puede observar el consumo energético de las principales ramas industriales de la industria española en el año 2015, así como los principales combustibles utilizados por cada actividad.

² La industria de materiales no metálicos se refiere principalmente a la producción de vidrio, cerámicas, cemento y productos derivados de estos

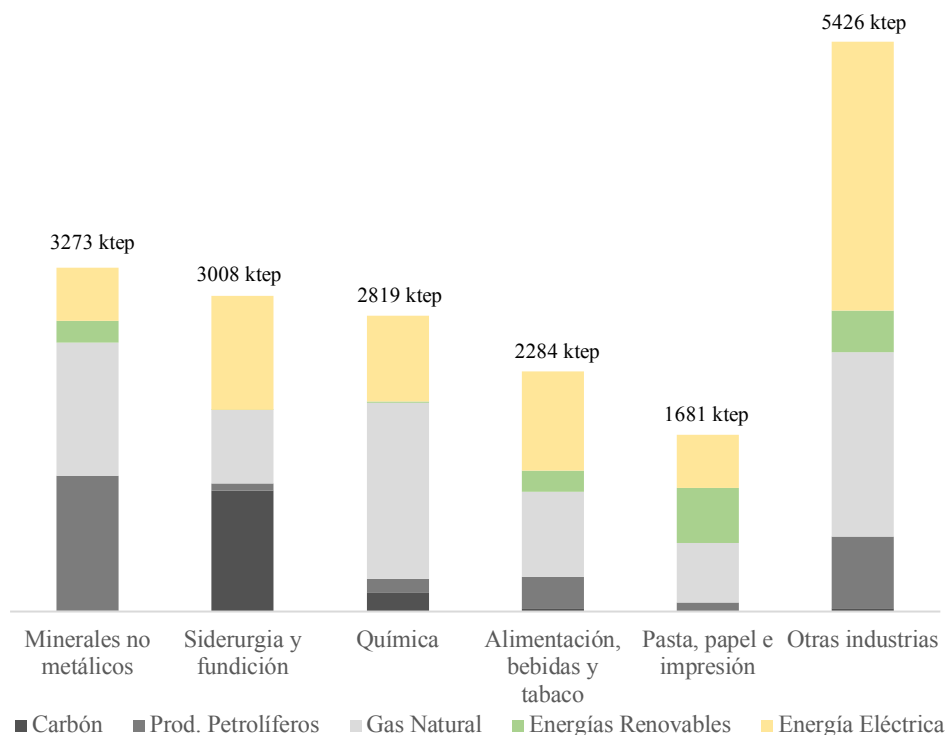


Figura 9: Consumo Energético³ de las principales ramas industriales en la industria española, 2015. Elaboración propia a partir de (IDAE, 2017)

Analizando la evolución del consumo de combustibles de la industria española desde la década de los 90 hasta el presente, como se puede observar en la Figura 10, se ha reducido el consumo de carbones y productos derivados del petróleo a favor de energía eléctrica y especialmente gas natural. Se ha reducido más de un 50% el consumo de carbones y productos petrolíferos respecto el año 1993. En cuanto al gas natural, ha crecido su importancia en la industria desde el 23% que representaba de la energía consumida en el año 1993 hasta el 37% que representó en el año 2015.

Adicionalmente, se observa que se produjo un incremento sustancial del consumo energético de la industria española hasta el año 2007, cuando se redujo drásticamente debido a la crisis económica que atravesó el país. Comparando la evolución del consumo total de la industria y del gas natural destaca que ambos consumos son prácticamente paralelos lo que indica que el consumo de gas es muy dependiente de los eventos que pasen en la industria, mientras que la energía eléctrica consumida es más constante y por

³ Usos no energéticos excluidos

lo tanto menos dependiente.

En cuanto a los ciclos de inversión de la industria en general, se puede analizar que se produjo una fuerte remodelación de maquinaria en el lustro 1990-1995 apostando por equipos que utilizasen gas natural como principal fuente de alimentación debido a los notables descubrimientos sobre este combustible durante las décadas previas. Por lo que asumiendo que la vida útil general de los equipos es de aproximadamente 30 años, la recuperación económica del país y las políticas energéticas lideradas por la Unión Europea se espera que se produzca una fuerte renovación de la industria en los próximos años afectando así de una manera apreciable el consumo de combustibles en el medio plazo.

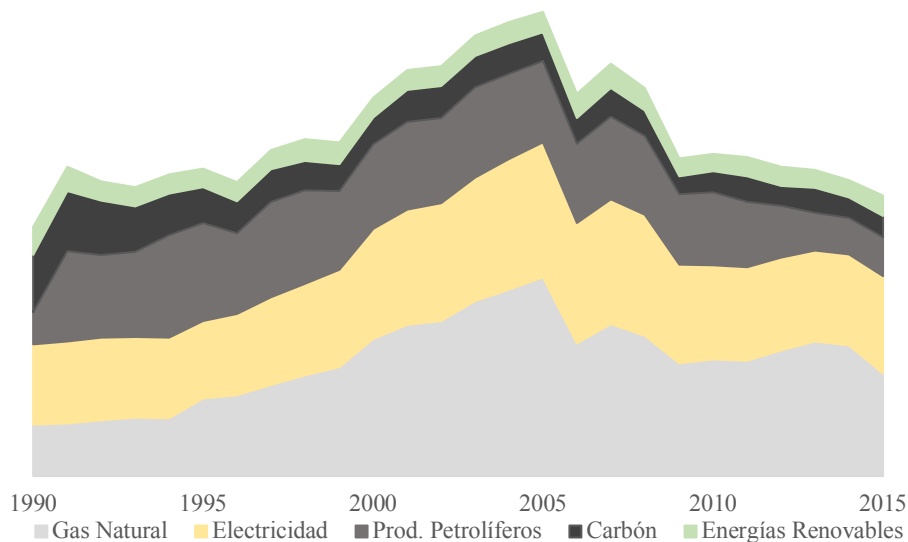


Figura 10: Evolución del consumo energético de la industria española. Elaboración propia a partir de (IDAE, 2017)

La evolución del sector del gas ha sido significativa para la industria debido a los diversos usos del gas natural dadas sus características de facilidad de regulación, mayor eficiencia en el proceso de combustión, además de ser el combustible fósil menos contaminante.

El gas natural, debido a su mayor poder calorífico y menor contenido de contaminantes, es considerado como el combustible adecuado para cualquier utilización energética de aportación de calor por combustión. El metano, principal componente del gas natural, presenta una relación molecular entre sus componentes, carbono e hidrógeno, de manera

que su combustión produce una menor emisión de CO₂ que otros combustibles fósiles. A igualdad de energía producida, la combustión de gas natural representa aproximadamente un 30% menos de CO₂ que con la combustión de productos derivados del petróleo y un 40 % menos que con la combustión del carbón antracita. Esta es una de las principales razones por las que se ha extendido el uso del gas natural como principal combustible en la industria (Fundación Gas Natural Fenosa, 2011).

El sector del gas natural tuvo un crecimiento destacable a partir de 1985, cuando se acordó el Protocolo de intenciones para el desarrollo del gas en España que establecía las condiciones para avanzar en la implantación del gas natural en el país (Fundación Gas Natural Fenosa, 2011). Este acuerdo fue firmado por el Gobierno de España, los presidentes de las empresas encargadas de la distribución y suministro de gas y los presidentes del INH⁴ y Enagás (Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado, 1994).

Otro de los principales factores que ha provocado el incremento de importancia de este combustible en los últimos 30 años en el país ha sido su gran expansión territorial. Este sector ha sido capaz de desarrollar sistemas de distribución llegando a zonas donde nunca había habido suministro de gas. Uno de los hitos destacables fue la construcción del gasoducto Burgos-Santander-Asturias, inaugurado en 1988, que permitió suministrar gas natural tanto a las grandes industrias de la región como a poblaciones que anteriormente no disponían de este servicio (Cuartas, 1988). En la actualidad, el sistema gasista español consta de 85.108 km de gasoductos de transporte en alta y media presión. Nuestro sistema está conectado con Argelia, Marruecos, Francia y Portugal. En la Figura 11 se puede observar la distribución del sistema gasista español.

⁴ INH se refiere al Instituto Nacional de Hidrocarburos. Esta institución creada en 1981 con el objetivo de gestionar la actividad pública en materia de hidrocarburos, labor que realizaba el Instituto Nacional de Industria, INI. El INH fue suprimido en 1995, junto con el INI, creando la Sociedad Estatal de Participaciones Industriales (Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado, 1995).

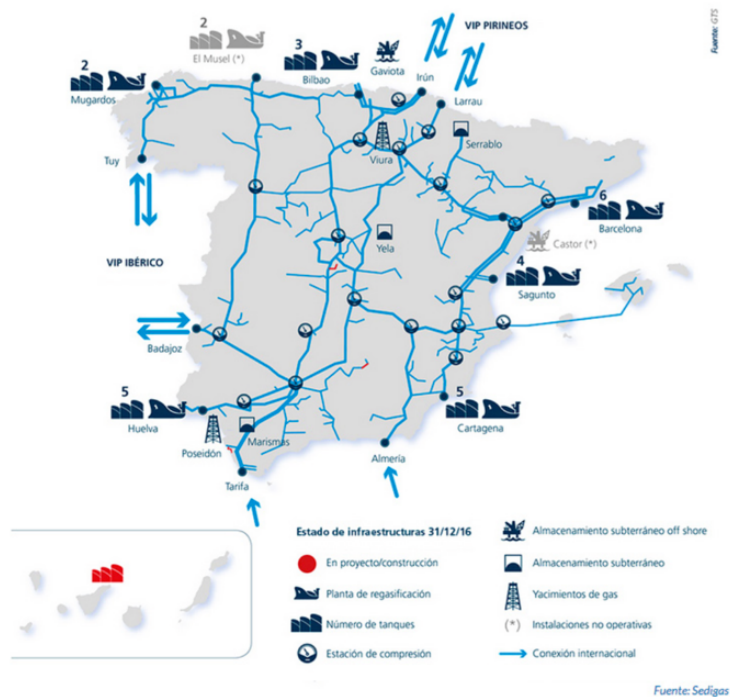


Figura 11: Sistema gasista español (Sedigas, 2016)

Todo este desarrollo del sistema de gas natural en España también ha provocado la aparición de nuevas tecnologías, que unido a la liberalización del sector iniciada a finales de los años 90 cuando la comercialización del gas se estableció en el mercado de libre competencia ha dado lugar a un sector con capacidad de respuesta, dinámico y dispuesto para afrontar los retos del futuro (Sedigas, 2018).

En cuanto a las emisiones de gases de efecto invernadero, España emitió un total de 251 MtCO₂ en el año 2015, de las cuales un total de 40 MtCO₂ provinieron del sector industrial. Como se observa en la Tabla 1, los sectores del procesamiento de minerales no metálicos, siderurgia y fundición e industria química son responsables del 56 % de las emisiones de CO₂ de la industria. Otras actividades industriales como pasta y papel o alimentación, bebidas y tabaco también son intensivas en emisiones. En cuanto al tipo de combustible, el gas natural es el causante de la emisión de 25 MtCO₂, el 62 % de emisiones totales, ya que como hemos podido observar en la Figura 9 es el combustible más utilizado en la industria española.

Otra de las actividades que se puede considerar como actividad industrial es el refino de petróleo causante del 4,7 % de emisiones de CO₂ a la atmósfera debido principalmente al uso de petróleo y gas natural.

Tabla 1: Inventario de emisiones industria española 2015. Elaboración propia a partir de (Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medioambiente, 2017)

	Minerales no metálicos	Siderurgia y fundición	Química⁵	Alimentación, bebidas y tabaco	Pasta, papel e impresión	Otras Industrias	Total Emisiones
Carbones	0,31%	9,28%	1,61%	0,08%	0,00%	0,27%	11,55%
Petróleos	13,72%	0,29%	1,67%	1,85%	0,35%	7,00%	24,89%
Gas Natural	8,69%	4,59%	14,66%	8,01%	9,12%	17,00%	62,06%
Otros	1,50%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	1,50%
Total Industria	24,22%	14,16%	17,94%	9,94%	9,47%	24,27%	100,00%

Estudiando la evolución de emisiones directas desde el año 1990 de la industria española, mostrada en la Figura 12, se puede observar que desde 2005 se ha reducido en un 43% las emisiones de CO₂ por la caída de la actividad industrial en el país debido a la desaceleración económica sufrida y por el cambio en el vector energético del sector el cual ha reducido la importancia de los productos derivados del petróleo en la industria. Se observa que las emisiones de CO₂ de la industria española para el año 2015, están en niveles similares a los objetivos establecidos para los sectores ETS sometidos al mercado de emisiones europeo, que marca una reducción de un 43% respecto al año 2005. Sin embargo, este descenso aún es insuficiente para cumplir los objetivos de reducción de emisiones de un 40% respecto al año 1990 en el horizonte de 2030 y el 80% respecto el mismo año de referencia para el año 2050 establecidos por la Unión Europea dado que son mucho más restrictivos (Comisión de expertos de transición energética, 2018). Por lo tanto, en estas próximas décadas será clave continuar con la reducción de carbón y petróleo en los procesos productivos de las principales actividades industriales, así como promover una mayor introducción de energías renovables.

⁵ A diferencia de IDAE en este caso no se tiene en cuenta la industria petroquímica.

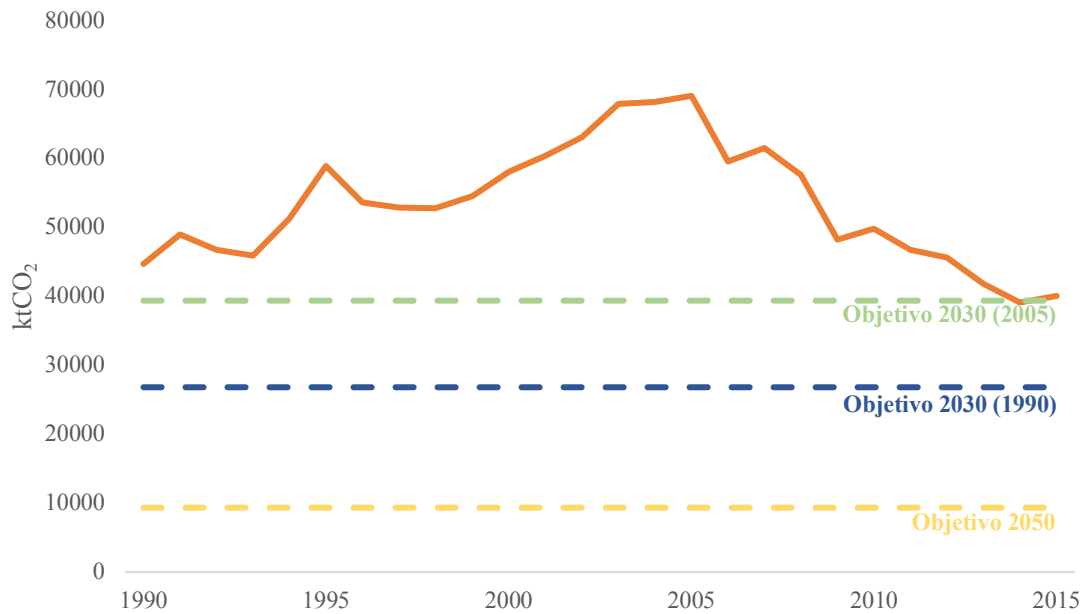


Figura 12: Evolución de emisiones de CO₂ de la industria española. Elaboración propia a partir de (Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medioambiente, 2017)

Como se puede observar en la Figura 13, si se estudia la reducción de emisiones en los principales sectores industriales intensivos en consumo energético a niveles de 2015 respecto al año 2005, el sector que ha sufrido un mayor descenso en emisiones ha sido el de minerales no metálicos, encargado especialmente de a la fabricación de cemento, cerámicas y vidrio. Una de las principales causas que ha provocado este descenso tan acentuado de las emisiones ha sido la caída de la producción de cemento debido a la crisis del sector de la construcción en el país. La producción de cemento en España se redujo en un 60% en 2015 con respecto al año 2005 (Odyssee, 2017). Otros sectores que han conseguido una gran reducción de emisiones han sido pasta y papel y alimentación, bebidas y tabaco.

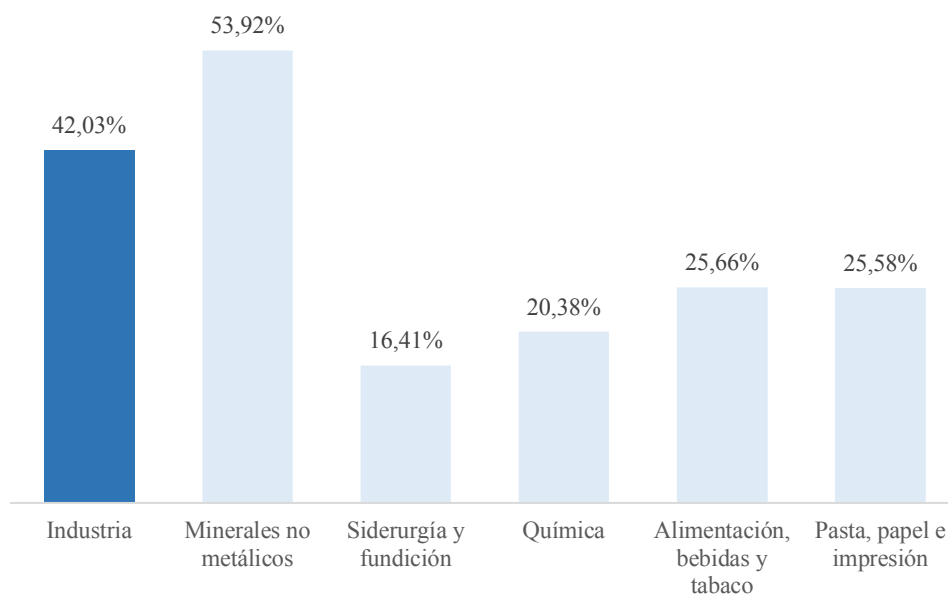


Figura 13: Reducción de emisiones de CO₂ por sector industrial en España 2005-2015. Elaboración propia a partir de (Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medioambiente, 2017)

De acuerdo con el IPCC⁶ la manera más eficaz de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera es la mejora de la eficiencia energética de la industria manufacturera. Adicionalmente, existen otras estrategias como la captura y almacenamiento de emisiones, el reciclaje y la reutilización de materiales o la reducción en la demanda del consumidor de determinados servicios que deberán ser implementadas en paralelo (Fischedick, y otros, 2014). Por ello, resulta interesante hacer un estudio de la eficiencia energética de diversos subsectores de la industria española durante los últimos 15 años que completará la explicación de esta reducción de emisiones en los sectores que se presenta en la Figura 14.

⁶ Las siglas IPCC significan Intergovernmental Panel on Climate Change, en español Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático

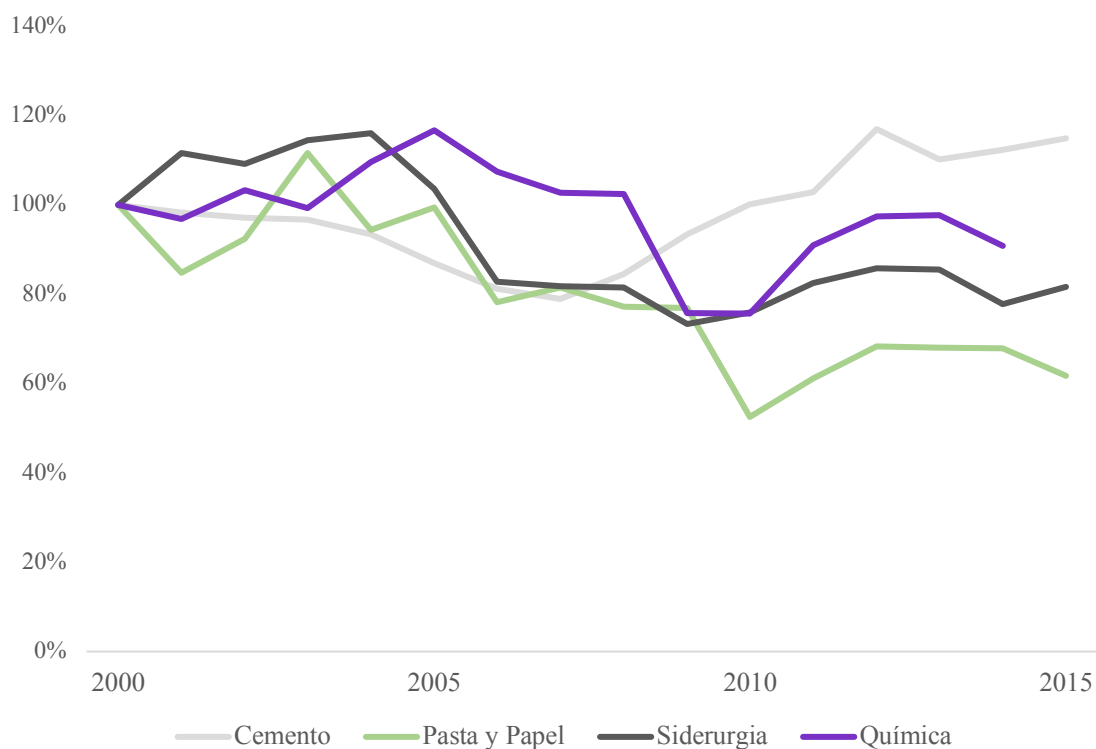


Figura 14: Evolución consumo energético unitario por sector industrial 2000-2015⁷ (IDAE, 2017)

Las ramas que consiguieron una mayor mejora en eficiencia energética en el periodo 2000-2008 fueron las industrias del cemento y acero. Sin embargo, en el periodo 2005-2010 destaca la industria del papel, cuya evolución puede explicarse por un aumento de la importación de pasta y del uso de papel reciclado en la producción de papel (Odyssee-Mure, 2015). Esta revolución en su proceso de producción ha conseguido reducir en un 38% el consumo energético por tonelada desde 2000 hasta 2015. En general, las industrias de acero, cemento, papel y química han incorporado mejoras sustanciales en procesos de producción en las últimas décadas con impacto positivo en la eficiencia energética. En el caso del cemento, en el periodo 2000-2008 se ha realizado un esfuerzo inversor en medidas de eficiencia, lo que explica una mejora media anual cercana al 2% en este periodo. Destaca que desde 2010, se registra un empeoramiento en el comportamiento de todas estas ramas, provocado por la caída en la producción, al funcionar las instalaciones y equipamiento por debajo de su capacidad, lo que penaliza el uso eficiente de la energía consumida. La industria cementera ha sido una de las más penalizadas, donde además se

⁷ La evolución energética unitaria del sector químico ha sido calculada en tep/índice de producción industrial. Cemento, pasta y papel y siderurgia como tep/tonelada producida

ha incrementado la producción de clínker, lo que conlleva un incremento del consumo energético (Odyssee-Mure, 2015).

Sin embargo, la implementación de medidas de mejora de eficiencia energética supone un gran desafío en todos los estamentos de la sociedad. Incluso en el mejor de los escenarios, donde las nuevas tecnologías surgiesen y se implementasen de manera rápida y eficiente, el consumo energético y las emisiones de CO₂ van a seguir creciendo en las próximas décadas (Thollander & Palm, 2013). Por lo tanto, el modo en que se lleve a cabo la evolución de la industria a un modelo sin emisiones y más eficiente será clave para determinar si la industria es capaz de crear un sistema sostenible a largo plazo. La transformación energética de la industria se pretende llevar a cabo mediante campañas informativas, políticas energéticas, mecanismos de financiación e incentivos a las empresas para que implementen nuevas tecnologías mucho más eficientes. No obstante, tal vez estas estrategias no son suficientes para conseguir el impacto deseado ya que apenas un 40% de las medidas sugeridas son finalmente implementadas en la industria (Thollander, Danestig, & Rohdin, 2007).

A modo de conclusión, los resultados extraídos identifican a la industria de minerales no metálicos, concretamente el sector cementero español, como un sector crítico para la consecución del propósito de descarbonización de la industria del país en el medio plazo. Esta afirmación viene motivada por el análisis del mix energético del sector, mostrado tanto en la Figura 9, como Tabla 1, que demuestra que esta industria tiene una gran dependencia de los productos petrolíferos. En el año 2015, el 74% de calor demandado por las diferentes etapas del proceso de producción de cemento fue abastecido por coque de petróleo (Oficemen, 2016). Igualmente, el hecho de que la reducción de emisiones de CO₂ en la década comprendida entre 2005-2015, no haya sido consecuencia de una mejora energética de la industria si no la drástica caída del consumo de cemento en el país por la crisis de la construcción hace prever un aumento considerable de estas en el medio plazo. Finalmente, el estudio de la evolución de la eficiencia energética del sector, que muestra una mejora media anual de 2% en el periodo 2000-2008 cuando la producción de cemento estaba en máximos, ha puesto de manifiesto un amplio margen de mejora energética en el sector.

En el caso concreto del sector de cemento, la implementación de las mejoras de eficiencia energética supone un desafío debido principalmente a los altos costes de inversión

necesarios para una disminución importante del consumo energético, que a menudo son inviables financieramente. De igual modo, otro reto que se presenta para la descarbonización del sector es asegurar la disponibilidad de combustibles con bajo contenido en carbono. Actualmente, el co-procesado en España encuentra más barreras a nivel político y legal que a nivel técnico (Oficemen, 2017). Estos recursos tampoco se deben desviar a otras áreas de la economía que reciben incentivos por el uso de estos haciendo inaccesible estos recursos para los operadores de cemento (WSP - Parsons Brinckerhoff Engineering Services, 2015). Los incentivos económicos y políticas también son un aspecto importante en la adopción de tecnologías de captura de emisiones (Oficemen, 2017).

Por lo tanto, basándose en estas conclusiones se ha decidido estudiar en detalle el sector cementero español con el objetivo de detectar oportunidades para la implementación de medidas de eficiencia y ahorro energético y captura de emisiones en el medio plazo. En los siguientes apartados se explica detalladamente el proceso de producción de cemento, los ciclos de inversión del sector y las mejoras tecnológicas aplicables. Seguidamente, se ofrece una visión de la evolución del sector en el horizonte 2020-2030 analizando el impacto técnico-económico de la aplicación de diferentes tecnologías de eficiencia energética y reducción de emisiones.

3 Industria de cemento española

Tras haber detectado al sector de cemento como un sector clave en la descarbonización de la industria, esta sección define la estructura de esta industria que en los capítulos posteriores será representado en el modelo de optimización. A continuación, se explican los diferentes procesos que intervienen en la fabricación de cemento identificando las etapas clave para la descarbonización del sector. Posteriormente se definen las mejoras energéticas y de reducción de emisiones aplicables al sector. Igualmente, se razona la importancia de los ciclos de inversión del sector de cemento, uno de los aspectos clave de esta tesis, que suponen una palanca de cambio hacia un modelo más descarbonizado.

3.1 Características del proceso de producción de cemento

El cemento es una sustancia clave en la edificación e ingeniería civil. Es un material inorgánico y no metálico que al mezclarlo con agua y áridos forma una pasta que fragua y endurece (morteros y hormigones). El fraguado ocurre transcurrido un cierto tiempo desde el momento en que se realiza la mezcla, lo que permite moldear a la piedra resultante. Estas tres cualidades principales de este producto, moldeable, resistente y duradero, hacen que los productos derivados del cemento tengan una gran aplicación en la construcción de infraestructuras y otros elementos constructivos (Ministerio de Medio Ambiente - Dirección general de calidad y evaluación ambiental, 2004).

AENOR establece en su norma UNE-EN 197-1 que existen 27 tipos de cementos grises comunes agrupados en 5 categorías: CEM I – cemento Portland; CEM II – cemento Portland mixtos; CEM III – cemento con escorias de horno alto; CEM IV – cemento puzolánico; CEM V – cemento compuesto. Estos cementos también se subdividen por su resistencia en: media (32,5 MPa), media-alta (42,5 MPa), alta (52,5 MPa). Además, esta norma también especifica 7 cementos comunes resistentes a los sulfatos, 3 cementos de horno alto de baja resistencia inicial y de 2 cementos de horno alto de baja resistencia inicial resistentes a los sulfatos y de sus componentes. También existen otros cementos especiales como cemento especial de muy bajo calor de hidratación tratado, cemento sobresulfatado, cemento de aluminato de calcio, cemento de albañilería (AENOR - Asociación Española de Normalización y Certificación, 2011).

El proceso de fabricación de cemento se puede dividir en tres etapas básicas (Ministerio de Medio Ambiente - Dirección general de calidad y evaluación ambiental, 2004).

- Producción de clínker (principal componente de cemento) fabricado en un alto horno industrial que calcina materias primas como carbonato cálcico (CaCO_3) mezclado con otras materias como arcilla en menor cantidad. Durante el proceso de calcinación o descarbonatación, se produce la transformación desde carbonato cálcico (CaCO_3) a óxido de calcio, cal (CaO).
- El proceso de producción de clínker contiene una segunda etapa en la que se produce la clinkerización del óxido de calcio que reacciona con el resto de materias constituyentes a temperaturas de hasta 1450 °C, produciendo así el llamado clínker. Este producto es rápidamente enfriado hasta temperaturas de 100-200°C.
- La producción de cemento consiste en la adición de otros componentes como caliza, yeso, escorias de alto horno, puzolanas o cenizas volantes al clínker creando el producto final.

Actualmente, el parque cementero español consta de 33 plantas todas ellas contienen un proceso seco de producción de clínker (Mora Peris, 2018). Adicionalmente existen tres procesos diferentes para la producción de clínker; semiseco, semihúmedo y húmedo (Ministerio de Medio Ambiente - Dirección general de calidad y evaluación ambiental, 2004). La elección del proceso viene determinada por el estado seco o húmedo de las materias primas y es de gran importancia debido a la diferencia en sus consumos energéticos siendo el proceso húmedo el que más energía consume.

1. A lo largo del **proceso seco** las materias son molidas y secadas para formar el crudo que alimenta el horno con pre-calentador sin/con pre-calcinador o en un menor número de caso el horno largo de vía seca (Ministerio de Medio Ambiente - Dirección general de calidad y evaluación ambiental, 2004). En España, la totalidad de las instalaciones son de esta modalidad (Mora Peris, 2018).
2. En el **proceso semi-seco**, el crudo seco es granulado con agua y alimenta un pre-calentador de parrilla previo al horno o a un horno (Ministerio de Medio Ambiente - Dirección general de calidad y evaluación ambiental, 2004).
3. En el **proceso semi-húmedo**, la pasta de crudo y agua, es escurrida en filtros prensa. Las tortas del filtro son extruidas en forma de gránulos que alimentan un

pre-calentador de parrilla, o directamente un secador de tortas de filtrado para la producción de crudo (Ministerio de Medio Ambiente - Dirección general de calidad y evaluación ambiental, 2004).

4. En el **proceso húmedo**, las materias primas se muelen con agua para formar una pasta más tarde bombeada. La pasta es alimentada directamente al horno, o previamente se pasa por un secador. La elección de los procesos húmedo y semi-húmedo se debe al único acceso a materias primas húmedas (Ministerio de Medio Ambiente - Dirección general de calidad y evaluación ambiental, 2004).

Independientemente del proceso elegido para la producción de cemento, todos estos procesos contienen las siguientes etapas adicionales.

- **Obtención de materias primas** – Las principales materias primas utilizadas, caliza, marga arcillosa y arcilla, se extraen de las canteras próximas a las plantas, estas canteras son, en la mayoría de los casos, a cielo abierto. Las operaciones de extracción incluyen perforación de rocas, voladuras, excavaciones, acarreo y trituración (Ministerio de Medio Ambiente - Dirección general de calidad y evaluación ambiental, 2004). Materias primas como cenizas volantes, escorias de alto horno o puzolanas son obtenidas de fuentes externas.
- **Trituración y transporte** – Después de la trituración primaria, las materias primas se transportan a la planta de cemento para su almacenamiento y posterior preparación.
- **Preparación de materias primas** – El control del peso y la proporción de las materias primas que entran al molino es una etapa esencial para un funcionamiento eficiente del horno y la producción de un clinker de gran calidad. Para los hornos secos y semi-secos, las materias primas se muelen y se secan hasta lograr un polvo fino, haciendo uso del calor reciclado de salida del horno y/o del enfriador de clinker. En los hornos de vía húmeda o semi-húmeda, las materias primas se muelen junto con agua añadida para formar una pasta. Esta molienda se realiza en circuito cerrado para alcanzar la calidad demandada.
- **Preparación de combustibles** – Los sistemas de cocción de clinker permiten emplear diversos combustibles para el calentamiento del horno. Los principales

tipos de combustibles empleados, por orden de importancia, son: coque de petróleo, carbón pulverizado, residuos orgánicos, fuelóleo pesado y gas natural. El elevado coste de los dos últimos tipos de combustibles limita el uso de estos. En cuanto al cemento blanco se deberá prestar especial atención a la selección de combustibles para evitar elementos que puedan alterar el color blanco del producto final. En general, no es posible el uso de combustibles alternativos.

- **Cocción de las materias primas para la obtención de clínker** – Esta etapa es la más intensiva en emisiones. También tiene especial importancia en la calidad del producto, así como su coste. Para la fabricación del clínker, el crudo o pasta en procesos húmedos se introduce en el horno donde se seca, se pre-calienta, pre-calcula, calcina y se trata hasta producir clínker de cemento. Este clínker se lleva a las siguientes etapas donde se enfría y mezcla con otras sustancias hasta producir cemento.

El proceso de obtención de clínker comienza con el proceso de calcinación o descarbonatación que consiste en la descomposición del carbonato cálcico (CaCO_3) aproximadamente a $900\text{ }^\circ\text{C}$ dando óxido cálcico, cal (CaO) y liberando dióxido de carbono (CO_2). La descomposición de carbonato cálcico en cal típicamente emite el 60-65% de las emisiones de CO_2 de todo el proceso (WSP - Parsons Brinckerhoff Engineering Services, 2015). Los hornos más modernos disponen de cámaras de combustión (pre-calcinador) en la parte baja del pre-calentador. En el pre-calcinador se realiza parte de la combustión con aporte de aire caliente proveniente del enfriador de clínker.

Durante el proceso de clinkerización es necesario mantener la materia a temperaturas de $1450\text{ }^\circ\text{C}$, lo que implica alcanzar una temperatura de llama de $2000\text{ }^\circ\text{C}$. Esta reacción se produce en una atmósfera oxidante requiriendo exceso de aire en el horno. En cuanto al clínker blanco dado que las materias primas no contienen fundentes será necesario que lleguen hasta temperaturas de $1600\text{ }^\circ\text{C}$, provocando que la llama incremente su temperatura más de $2000\text{ }^\circ\text{C}$. La necesidad de operar en atmósferas reductoras en algunos casos provoca un mayor consumo energético (Ministerio de Medio Ambiente - Dirección general de calidad y evaluación ambiental, 2004). Normalmente el 35% del combustible consumido en

la planta se utiliza en el proceso de clinkerización (WSP - Parsons Brinckerhoff Engineering Services, 2015).

- **Enfriamiento de clíinker** – Durante esta etapa se procede a enfriar el Clinker hasta una temperatura apta para su posterior manipulación. El enfriamiento rápido del clíinker es beneficioso ya que mejora su molturabilidad y optimiza la reactividad del cemento. Esta etapa también es de gran importancia para la mejora del rendimiento energético del sistema ya que permite reutilizar el calor recuperado del clíinker caliente. Existen dos tipos de enfriadores, rotativos y de parrilla. En caso del clíinker blanco, este proceso difiere del habitual por la necesidad de reducir la temperatura hasta 600 °C para mantener su color blanco (Ministerio de Medio Ambiente - Dirección general de calidad y evaluación ambiental, 2004).
- **Molienda del clíinker para obtener cemento** – Los cementos comunes se producen mediante la molienda de clíinker con yeso y otros sulfatos. Adicionalmente, hay cementos que llevan otras adiciones como escorias de horno, puzolanas o cenizas volantes. Estas adiciones se pueden moler junto con el clíinker o pueden necesitar secarse y realizar la molienda por separado. La disposición de la instalación y el tipo de molienda del cemento dependerán del cemento que se quiera producir, su humedad y la abrasión de sus componentes. Normalmente, los molinos se diseñan en circuito cerrado pudiendo separar el cemento de la finura requerida y moler de nuevo el cemento grueso. Además, las plantas de molienda pueden ser independientes y estar separadas de las plantas de producción de clíinker.
- **Almacenamiento, ensacado y expedición de cemento** – Finalmente la última etapa consiste en el transporte del producto final de cemento a los silos de almacenamiento, se emplean tanto sistemas mecánicos como neumáticos. Son necesarios varios silos para almacenar los distintos cementos producidos. Sin embargo, existe la posibilidad de almacenar diferentes cementos en un mismo silo de almacenamiento. La venta y transporte del cemento se realiza a granel mediante cisternas transportadas por carretera, ferrocarril y barco o en sacos.

En la Figura 15 se muestran las diferentes etapas del proceso de producción de cemento mediante vía seca con pre-calentador y pre-calcinador (WSP - Parsons Brinckerhoff Engineering Services, 2015). También se definen cuales son las etapas donde se centran

las mejoras energéticas del proceso.

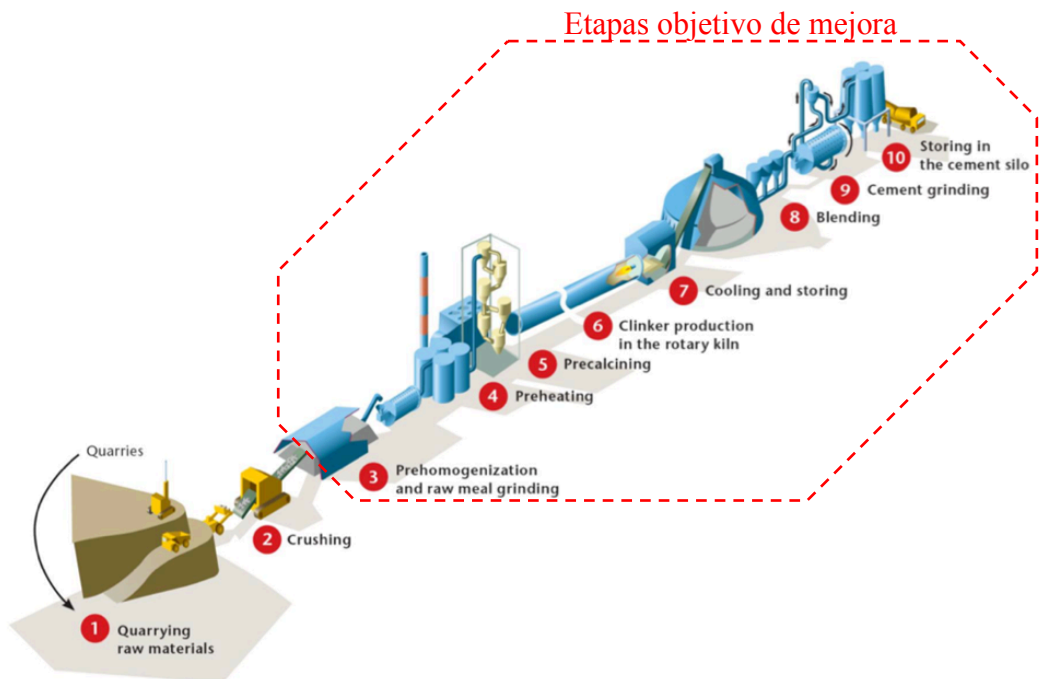


Figura 15: Proceso de producción de cemento con hornos con pre-calcinador y pre-calentador (Cement Sustainability Initiative, 2009)

3.2 Ciclos de Inversión

En línea con la argumentación de T. Gerres y J.P. Chaves Ávila en (Gerres & Chaves Ávila, 2018), un factor muy importante en la exitosa evolución de la industria a un modelo sostenible son los ciclos de inversión de cada sector que dependen de la vida útil de la maquinaria utilizada y los procesos productivos implementados. Estos ciclos de inversión determinarán cuando se va a realizar una fuerte renovación de equipos más eficientes. También es necesario tener en cuenta que las nuevas tecnologías que se lanzan al mercado necesitan un cierto tiempo hasta que los operadores de las plantas comiencen a implementarlas en sus procesos productivos.

En la última década, la mayoría de las mejoras de eficiencia energética económicamente viables, ya se han implementado dentro de los diferentes subsectores industriales. El resultado de esta aplicación ha sido una reducción significativa del uso de combustibles fósiles. Las tecnologías y otras opciones de reducción que podrían contribuir a una mayor

reducción de la intensidad de carbono en estos subsectores aún no están disponibles a escala comercial. Así mismo, existe una gran incertidumbre en qué tecnologías estarán disponibles para cada una de las industrias. Los primeros en adoptar una nueva tecnología aún no implementada a gran escala, con largos períodos de recuperación, arriesgan su fiabilidad económica en caso de que estas tecnologías no permitan ser competitivas respecto a la producción a largo plazo (Gerres & Chaves Ávila, 2018).

En la Figura 16 podemos observar la representación del ciclo de inversión de la industria en general. Destaca que las mejoras de fin de línea serán rápidamente implementadas en un sector ya que no son necesarios grandes cambios de sus procesos de producción. Además, se muestra que las modificaciones en el proceso de producción y en el producto difícilmente serán implementadas cuando el ciclo de inversión ha comenzado recientemente y no se han amortizado aún los costes relativos a estos equipos.

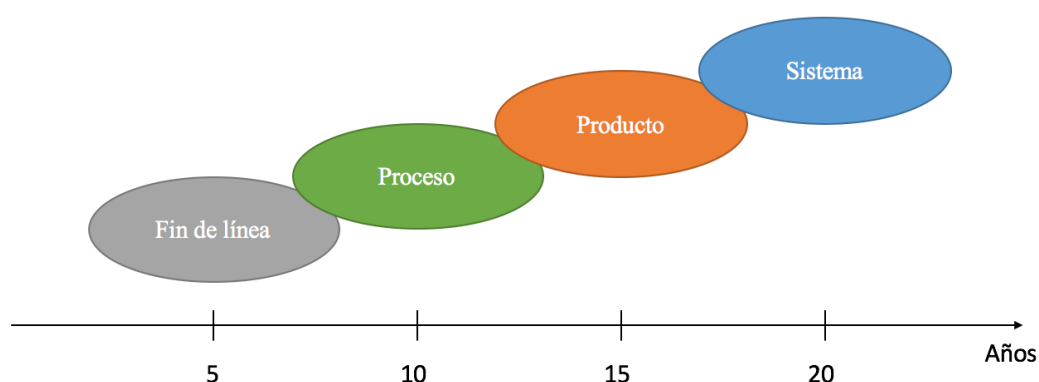


Figura 16: Esquema del ciclo de inversión de la industria (Vellinga & Herb, 1999)

El caso concreto del sector del cemento se caracteriza por grandes inversiones iniciales de capital para la instalación de hornos con una vida útil normalmente de 30-50 años. Estos nuevos hornos se implementan con mayor facilidad en mercados donde se espera un fuerte crecimiento. Por otro lado, el equipamiento de los hornos se moderniza continuamente conforme a las últimas tecnologías del mercado, de modo que tras 20-30 años la mayor parte de los equipos, entre otros pre-calcinadores, pre-calentadores o enfriadores, han sido renovados. La renovación de cierto equipamiento de los hornos es una técnica habitualmente aplicada en Europa, donde las plantas son antiguas, pero sin embargo eficientes. Solo las grandes modificaciones de proceso como el cambio desde vía húmeda a seca permiten un cambio significativo en la eficiencia energética del sector.

Para este tipo de modificaciones, se requiere una inversión similar a la de los nuevos hornos. Por lo tanto, estas reformas solo se implementan en situaciones prometedoras del mercado o en hornos muy antiguos e ineficientes. A través de este tipo de renovaciones, a menudo es posible cerrar en gran medida la brecha de eficiencia con tecnología de punta. Por otro lado, las grandes modificaciones de instalaciones de producción de cemento se ven afectadas por diversos compromisos, debido al tiempo de inactividad del horno para su modernización (CSI/ECRA, 2017).

En cuanto al sector de producción de cemento nacional, los ciclos de inversión de los hornos actuales jugarán un papel clave en la descarbonización de la industria española. Muchas de las plantas que se encuentran en operación en la actualidad que contienen una instalación de horno de 4 etapas con pre-calentador datan de los años 70 (Ministerio de Medio Ambiente - Dirección general de calidad y evaluación ambiental, 2004). Igualmente, las conclusiones obtenidas tanto del análisis de eficiencia energética y de conversaciones con expertos del sector cementero nacional (Mora Peris, 2018) se observa que durante la etapa 2000-2008 se produjo una gran mejora de eficiencia debido a la renovación de varias plantas y cambios en el proceso de producción desde vía húmeda a seca. La desaceleración económica del país y la crisis del sector de construcción a partir de esta fecha frenó la renovación de la industria. Sin embargo, las previsiones de crecimiento de la producción de cemento mencionadas en (G-Advisory, 2015) y la vida útil casi completa de las plantas actuales hacen prever que los ciclos de inversión tendrá una gran repercusión en la descarbonización de la industria en el horizonte temporal estudiado en este informe.

3.3 Mejoras tecnológicas del sector de cemento español

A continuación, se explican las principales mejoras en la eficiencia de las diferentes etapas del proceso de producción del cemento, siendo las más discutidas la renovación de los hornos industriales, la utilización de materias primas, combustibles alternativos, la recuperación y reutilización de calor, la mejora de eficiencia eléctrica, y las tecnologías de captura de CO₂ como se concluye en (Gerres & Chaves Ávila, 2018).

3.3.1 Renovación de hornos industriales

Actualmente, el proceso de producción de clínker seco con hornos rotativos con pre-calentador y pre-calcinador es considerado como la tecnología más novedosa para la implementación de nuevas plantas.

Los hornos rotativos largos pueden ser utilizados tanto en procesos húmedos como secos. Estas unidades son capaces de producir alrededor de 3600 t/día de clínker. Estos hornos están diseñados para secar, precalentar, calcinar y clinkerizar, de tal manera que sólo se completan con el sistema de alimentación y el enfriador. Los hornos largos de proceso húmedo, son los hornos rotativos, más antiguos, empleados en la producción de clínker de cemento. Esta tecnología tiene un consumo calorífico superior a la vía seca, lo que conlleva a una mayor emisión de gases de combustión y de vapor de agua (Ministerio de Medio Ambiente - Dirección general de calidad y evaluación ambiental, 2004). Los hornos rotativos largos de vía húmeda tienen un consumo aproximado de 6000 MJ/t clínker (Canadian Industry Program for Energy Conservation, 2001). Actualmente, en España ninguna planta contiene hornos largos de producción de cemento (Mora Peris, 2018).

El sistema de horno con pre-calentador de cuatro etapas tiene un mejor comportamiento y mucho más eficiente que el horno largo debido al precalentamiento y calcinación parcial del crudo mediante la reutilización de los gases calientes de la salida del horno. Cuando el crudo entra al horno rotativo, ya se ha completado alrededor del 30% de la calcinación. El sistema pre-calentador normalmente es utilizado con hornos de tres apoyos, mucho más sencillos que los hornos largos (Ministerio de Medio Ambiente - Dirección general de calidad y evaluación ambiental, 2004). Este sistema fue muy utilizado en España en la década de los 70 cuando muchas líneas de producción de cemento con una capacidad de 1000 a 3000 t/día de clínker se construyeron.

Más tarde, se comenzó a implementar la etapa de pre-calcinación. En este sistema la etapa de quema de combustible se realiza en dos puntos, en la zona de salida del horno y en el pre-calcinador situado entre el horno rotativo y el pre-calentador. En esta cámara se puede quemar hasta el 60% de combustible total del horno. El pre-calcinador permite calcinar completamente el crudo antes de entrar en el horno. El aire caliente necesario para la combustión en el pre-calcinador puede proceder del enfriador de clínker (Ministerio de Medio Ambiente - Dirección general de calidad y evaluación ambiental, 2004).

Adicionalmente, la utilización de pre-calcinadores facilita el uso de combustibles alternativos. Inicialmente, estos hornos se instalaban con cuatro etapas de ciclones (Cement Sustainability Initiative, 2009) teniendo un consumo energético medio de 3200-3600 MJ/t clinker (CSI/ECRA, 2017). En la actualidad, si la humedad de las materias primas es baja, se instalan hornos pre-calentadores con seis ciclones reduciendo así el combustible empleado debido a su menor consumo energético, entre 3000-3400 MJ/t clinker. Las plantas con pre-calentador de suspensión y pre-calcinador suelen tener capacidades de entre 3.000 y 5.000 t/día (Ministerio de Medio Ambiente - Dirección general de calidad y evaluación ambiental, 2004) (CSI/ECRA, 2017). El consumo energético medio de producción de clinker en España actualmente se encuentra aproximadamente en 3600 MJ/t clinker (Mora Peris, 2018).

La actual generación de hornos con pre-calentador y pre-calcinador es relativamente nueva y han sido construidos o modificados en los últimos 15 años. Esta generación de hornos ha sido capaz de cambiar el proceso de producción de cemento desde un proceso húmedo mediante hornos largos hacia un proceso más eficiente energéticamente mediante hornos secos con diferentes etapas. Debido a que las plantas de cemento habitualmente tienen una vida útil de 30-50 años, no se espera la aparición de nuevas tecnologías en el corto-medio plazo (WSP - Parsons Brinckerhoff Engineering Services, 2015).

Como se ha mencionado en la sección anterior la renovación de hornos vendrá influenciada por los ciclos de inversión de la industria de cemento. La fabricación de cemento es altamente intensiva en capital y la vida útil de sus hornos de cemento es muy extensa, aproximadamente 30-50 años. Por otro lado, el equipamiento técnico de los hornos de cemento se moderniza continuamente, lo que significa que a menudo después de 20-30 años la mayor parte del equipo original ha sido reemplazado (ciclones, pre-calentadores, enfriadores de clinker, quemadores, etc.) (CSI/ECRA, 2017). A través de este tipo de ampliaciones extensas, a menudo es posible cerrar la brecha de eficiencia energética respecto a la tecnología de punta.

3.3.2 Materias primas sustitutivas

El clinker es el componente principal en la mayor parte de los cementos existentes. El cemento después de ser molido, reacciona con agua y se endurece. Otros posibles componentes del cemento son el yeso, caliza, escorias de horno alto (industria de hierro o acero), cenizas volantes (centrales eléctricas de carbón) y materiales volcánicos

naturales (puzolanas). Estas sustancias pueden ser usadas para sustituir parcialmente el clínker del cemento, reduciendo así, los volúmenes utilizados y también las emisiones de CO₂ asociadas a su producción (Oficemen, 2017).

La producción de los distintos tipos de cemento depende de las aplicaciones en las que se vaya a utilizar según los requisitos técnicos y la normativa europea. La principal limitación para la introducción de las materias primas sustitutivas es el ratio clínker-cemento. La proporción de los materiales sustitutivos se establece en la norma UNE EN 197-1 (AENOR - Asociación Española de Normalización y Certificación, 2011). Esta norma define los cementos más comunes y tiene como objetivo cumplir con los requisitos mecánicos y de durabilidad necesarios para los diferentes usos de cemento. Adicionalmente existen otras limitaciones para la sustitución de clínker como la disponibilidad de componentes alternativos que pueden ser utilizados o las propiedades de los materiales de sustitución. El cemento más utilizado está compuesto por más de 90% de clínker mezclado con yeso y caliza (Cement Sustainability Initiative, 2018).

Las escorias generadas en el proceso de producción de hierro y acero pueden ser integradas en grandes proporciones en el cemento. El estándar español de cemento UNE EN 197-1 define varios cementos con hasta un 95% en masa de esta materia prima (AENOR - Asociación Española de Normalización y Certificación, 2011). Sin embargo, la producción de cementos con alto contenido en escorias de alto horno requiere un mayor consumo térmico en la etapa secado y un mayor consumo eléctrico en las fases de molienda y mezcla. Esta penalización en aumento en el consumo energético se compensa con el ahorro de energía derivado de la reducción de las necesidades de producción de clínker. Además, la utilización de estas escorias como componente principal del cemento puede mejorar la fuerza del cemento a largo plazo así como su resistencia a ácidos y otros agentes corrosivos (WSP - Parsons Brinckerhoff Engineering Services, 2015).

La disponibilidad de cenizas volantes y escorias de alto horno disminuirá en los próximos años lo que aumentará la competencia entre los consumidores industriales de estas materias. Así mismo, la ruta de descarbonización definida por el sector de acero apostando por hornos de arco eléctrico basados en la economía circular de la chatarra que reducen el consumo energético de la industria del acero. En cuanto a las centrales eléctricas de carbón, se estima que reduzcan drásticamente su cuota de mercado. El auge de estas materias primas sustitutivas del clínker en la producción de cemento, el aumento

de la demanda y la reducción predicha de estas aumenta la necesidad de explorar otros componentes para evitar el aumento del ratio clínker-cemento (Cement Sustainability Initiative, 2018).

La utilización de partículas puzolánicas obtenidas de rocas volcánicas también pueden ser sustitutas del clínker en la producción de cemento. El uso de esta materia prima tiene una fuerte dependencia de la localización de la planta debido a su disponibilidad. La caliza es otro de los sustitutos utilizados. Los cementos que contienen caliza tiene una menor demanda de agua, ofreciendo un mejor comportamiento en el hormigón.

Tras mantener conversaciones con la Asociación de Fabricantes de Cemento en España se estima que actualmente el ratio clínker-cemento se encuentra en 82% (Mora Peris, 2018). La hoja de ruta para la descarbonización del sector del cemento tiene como objetivo reducir este ratio hasta el 70% de contenido de clínker en cada tonelada de cemento para el horizonte 2030.

3.3.3 Combustibles alternativos

La producción de cemento es una actividad intensiva en consumo energético. Aproximadamente el 40% de la emisiones del sector proviene de la quema de combustibles necesaria para la clinkerización de la piedra caliza (Oficemen, 2017). En la actualidad el mix energético del sector está compuesto por carbón, coque de petróleo, fuelóleo, gas natural y residuos tanto orgánicos como aceites usados y neumáticos.

El uso de combustibles alternativos llevado a cabo por la industria cementera contribuye a la solución de los tres problemas principales a los que se enfrenta la Unión Europea actualmente:

- Contribuye a la lucha contra el cambio climático. Los combustibles alternativos forman una de las principales palancas de reducción de CO₂ en la industria del cemento, al sustituir combustibles fósiles por residuos. De esta manera se evitan sus emisiones directas, la biomasa tiene una emisión de CO₂ neutra⁸, e indirectas

⁸ Las emisiones de CO₂ producidas por la combustión de la biomasa está en equilibrio con la cantidad de CO₂ que han retirado las plantas de la atmósfera.

ya que se evita el consumo energético de su obtención, transporte y molienda (Fundación CEMA, 2013). Otros combustibles alternativos, tienen un menor contenido de CO₂ respecto a su poder calorífico que carbón o coque.

- Mejora en la gestión de residuos. El uso de combustibles alternativos reduce el volumen residuos que se depositan en vertederos, además utiliza de manera eficiente la energía contenida en ellos. Las emisiones de vertedero consisten principalmente en un 60% de metano, un gas con un potencial de efecto invernadero 21 veces mayor que el CO₂ (CSI/ECRA, 2017).
- Favorece la economía circular. El co-procesado que se realiza en la industria cementera facilita la posibilidad de alcanzar el máximo de sustitución de materiales no renovables, minimiza los gastos de gestión y se recuperan importantes cantidades de materiales.

Los residuos orgánicos empleados en el sector cemento español proceden principalmente de restos de otras actividades, destinados inicialmente al vertido. Entre la biomasa utilizada en el sector del cemento destacan los restos de podas, desechos de la industria agroalimentaria, harinas de animales, restos orgánicos de materia orgánica o papel y lodos de depuradora (Fundación CEMA, 2013). Otros combustibles alternativos clasificados como residuos también importantes en el sector son neumáticos o aceites usados.

El nivel actual del sector del cemento en España es de un 25% de sustitución de combustibles alternativos (Oficemen, 2016). A pesar de la tendencia al crecimiento, existe todavía un amplio potencial de incremento de la valorización energética en el sector cementero español, hasta llegar a alcanzar los porcentajes de otros países de Europa con mayores niveles de protección ambiental donde este porcentaje de sustitución es más elevado (Oficemen, 2017). Desde el punto de vista técnico una mayor tasa de sustitución es posible, sin embargo, existen varios requisitos que deben ser satisfechos (CSI/ECRA, 2017). Hay que tener en cuenta que la utilización de residuos y subproductos como combustibles alternativos no debe dificultar la operación de la fábrica o afectar a la calidad del cemento. Una de las restricciones técnicas más destacadas es el poder calorífico mínimo de los combustibles aceptados por los hornos, este se encuentra en 20-22 GJ/t frente al poder calorífico típico de los residuos 10-18 GJ/t. Los sistemas con pre-calcinadores son capaces de aceptar al menos un 60% de combustibles de bajo poder

calorífico ya que la etapa de pre-calcinación opera a temperaturas menores (CSI/ECRA, 2017). Además, existen otros inconvenientes derivados del uso de residuos que pueden causar problemas en la producción de clínker como la humedad de los residuos o su alto contenido en cloro (Cement Sustainability Initiative, 2009).

Adicionalmente, existen otras barreras, además de las técnicas, que supondrán un reto para la mayor implementación del co-procesado. La legislación en la gestión de residuos jugará un papel importante para conseguir una mayor sustitución de los combustibles fósiles que sólo se dará si se promueven leyes que favorezcan la utilización energética de los residuos frente al vertido de estos a vertederos. El coste biomasa también es otro factor importante en el desarrollo de esta medida de eficiencia energética. En España, tal y como BCG e IDAE expresan en el informe Evolución de la tecnología y prospectiva de costes por tecnologías de energías renovables a 2020-2030, “la oferta de biomasa en España a los precios actuales es muy superior al volumen comercializado hoy en día” por lo que se asume un coste constante para esta en el medio plazo (IDAE-BCG, 2011).

3.3.4 Recuperación de calor

El calor residual de los hornos de cemento se usa generalmente para el secado de materias primas como piedra caliza o arcilla. Dependiendo de la humedad de las materias primas y de la tecnología aplicada en el proceso de enfriamiento de clínker, se puede obtener calor residual de los gases del horno (gas de salida del pre-calentador) y del aire de escape del enfriador. Principalmente, este calor puede usarse para el secado de otros materiales como la escoria y combustibles alternativos o para la producción de vapor y agua caliente o energía eléctrica. Dado que el secado de la materia prima es un requisito clave para la producción de cemento, la recuperación de calor tiene una aplicación limitada para las plantas con mayor contenido de humedad de la materia prima (CSI/ECRA, 2017).

La producción de vapor o agua caliente solo tiene sentido si los consumidores industriales o la calefacción urbana existen en los alrededores de la planta de cemento. La producción de energía requiere una caldera de recuperación de calor y un sistema de turbinas. La generación de energía puede basarse en un proceso de vapor dado que esta tecnología es muy común en las centrales eléctricas. La aplicación de un sistema compuesto por un Ciclo de Rankine de vapor para la generación de electricidad en las plantas de cemento tiene un rendimiento relativamente bajo, 20-25%, debido a las bajas temperaturas del calor residual en estas plantas (200-400 °C) (CSI/ECRA, 2017). Existen otros métodos

de producción de electricidad como el Ciclo de Rankine orgánico, aplicable en plantas de tamaño pequeño-mediano con materias primas con mayor contenido de humedad, o el proceso Kalina con una mayor eficiencia en rango menores de temperatura.

Dependiendo del proceso elegido y de la tecnología del horno se pueden producir entre 8 y 22 kWh /t clínker producida o hasta 16% del consumo de energía de una planta de cemento utilizando estas tecnologías sin cambios en la operación del horno.

Las principales barreras de la aplicación de estas tecnologías son la alta inversión en la caldera, turbina y generador eléctrico, así como el precio de kWh generado/ton CO₂ marcado en el mercado de CO₂. También estará influenciado por la disponibilidad de calor, que no haya sido utilizado para el secado de materias primas o combustibles (CSI/ECRA, 2017). En España, esta tecnología no es funcional debido a que solamente la temperatura de los gases de salida de los hornos largos, no existentes actualmente en nuestro parque cementero, es suficientemente alta para que esta tecnología sea viable económicamente (García-Gusano, 2014) (Mora Peris, 2018).

3.3.5 Mejora eficiencia eléctrica

Continuando con las mejoras del equipamiento de las plantas de producción de cemento que son capaces de conseguir reducciones significativas en el consumo energético de las plantas, una de las importantes modificaciones que se puede realizar es la sustitución de los molinos de bolas por molinos de rodillos verticales altamente eficientes o rodillos de molienda de alta presión. Esta modificación en el proceso de molienda de cemento requiere una gran inversión, por lo tanto, vendrá motivada por el mercado o la antigüedad del sistema.

En el procesado seco de producción de cemento, el consumo total de energía eléctrica puede distribuirse de la siguiente manera: aproximadamente 2% del consumo eléctrico corresponde a la extracción de materia prima, 25% preparación de materia prima, 25% producción de clínker más 3% adicional para molienda de combustible, 43% para cemento molienda y 2% para embalaje y carga (CSI/ECRA, 2017).

Dado que los procesos de molienda consumen la mayor parte de la electricidad, la optimización de este proceso tendrá un gran impacto en el consumo eléctrico total. Las tecnologías que actualmente se están implementando son los rodillos de molienda de alta

presión y los molinos verticales de rodillos que sustituyen a los actuales molinos de bolas (Ministerio de Medio Ambiente - Dirección general de calidad y evaluación ambiental, 2004) (CSI/ECRA, 2017). Según las conversaciones mantenidas con expertos en el sector cementero español, no se espera la aplicación, en el corto-medio plazo, de los nuevos molinos de molienda de cemento debido a la poca fiabilidad conseguida hasta ahora por los rodillos de alta presión o los altos costes de mantenimiento de los molinos verticales que hacen imposible la viabilidad de la inversión (Mora Peris, 2018).

La demanda de energía eléctrica no solo depende de los equipos, sino que también depende en gran medida de las propiedades del producto. Tanto el tipo de cemento producido como la utilidad de este, tiene un impacto importante en el consumo de energía. Cuanto mayor es el desarrollo de la resistencia del cemento, más fino debe ser generalmente molido, lo que requiere mucha más energía en los molinos. Especialmente en mercados maduros se puede observar un desarrollo de la cartera de productos hacia una mayor resistencia. Esta tendencia puede llevar a una demanda creciente de energía eléctrica, aunque la eficiencia del equipo mejora (CSI/ECRA, 2017). Con respecto al proceso de quemado de clínker, las medidas que aumentan la eficiencia térmica a menudo demandan más energía eléctrica. La instalación de técnicas modernas de enfriadores de parrilla causa una reducción en el consumo térmico, pero aumenta el consumo eléctrico. Por otro lado, el cambio de la tecnología de horno largo húmedo a un horno de precalcificación de proceso en seco moderno ahorra energía térmica y energía eléctrica (hasta 5 kWh/t clínker) (CSI/ECRA, 2017).

3.3.6 Captura y almacenamiento de CO₂

La captura y almacenamiento de CO₂ es una tecnología emergente que se espera que con apoyo externo de políticas emergentes y ciertos requisitos técnicos alcance una reducción de emisiones máxima del 80% para el año 2050 (WSP - Parsons Brinckerhoff Engineering Services, 2015). Las tecnologías de CAC tendrán un papel clave en el medio-largo plazo ya que, incluso en los procesos más eficientes, un porcentaje de las emisiones de CO₂ provocadas por la producción de cemento no se pueden evitar. Estas emisiones son en mayor parte debidas a la reacción química de calcinación que representa más de la mitad de emisiones de todo el proceso.

Las metodologías con mayor aplicación en el proceso de producción de cemento para la captura de CO₂ se dividen en:

- La captura de CO₂ por **post-combustión** es una medida de final de línea aplicable en cualquier proceso industrial. El CO₂ se captura de los gases residuales a baja presión y con un contenido de CO₂ reducido. Cuanto mayor es el contenido en CO₂ de los gases de salida, mayor es el rendimiento de la captura.

Los gases expulsados por las torres de las plantas de cemento tienen una concentración más elevada de CO₂ (≈30%) en comparación con otros procesos industriales (10-15% plantas térmicas de carbón), lo que hace que este sector tenga unas condiciones más favorables para la aplicación de estas tecnologías. El CO₂ se separa de una mezcla formada principalmente por nitrógeno y oxígeno y, en menor proporción, SO_x, NO_x y partículas en suspensión (Bartolomé Muñoz, Mora Peris, & Recalde Rodríguez, 2011). Una de las mayores ventajas de la aplicación de las tecnologías de captura de CO₂ es que al ser una técnica de fin de línea no requiere grandes cambios en el proceso de producción de cemento por lo tanto se puede aplicar tanto en plantas nuevas como ya existentes (Oficemen, 2017).

La tecnología de post-combustión más prometedora a corto plazo para el sector es la absorción química mediante aminas o amoníaco refrigerado capaz de capturar hasta el 95% emisiones de CO₂ (CSI/ECRA, 2017). La aplicabilidad de la absorción química es debida a su alta disponibilidad a gran escala, su mínimo impacto en el proceso de producción además de su alto rendimiento de captura de CO₂ (Bartolomé Muñoz, Mora Peris, & Recalde Rodríguez, 2011). Esta metodología de absorción química ya ha sido implementada de manera experimental en diversas industrias obteniendo resultados satisfactorios. Además, también se ha llevado a cabo un primer proyecto piloto en la industria del cemento. Aker Solutions experimentó esta metodología desde 2013 hasta 2016 en la planta de cemento de Brevik (Noruega) aplicándola a una pequeña corriente lateral del gas de combustión de la planta de cemento. La captura total de CO₂ de la unidad de prueba móvil ascendió a 2,000 t/año (CSI/ECRA, 2017). Para una mayor aplicación de la técnica de absorción química, está aún debe superar las penalizaciones energéticas y económicas derivadas de la regeneración y degradación de los absorbentes y el incremento de su vida útil (Bartolomé Muñoz, Mora Peris, & Recalde Rodríguez, 2011). A largo plazo, se espera que

las tecnologías de membrana ocupen un papel importante y puedan sustituir progresivamente a la absorción química siendo aún un escollo a superar la sensibilidad de las membranas a los compuestos de azufre o la baja resistencia a altas temperaturas (Bartolomé Muñoz, Mora Peris, & Recalde Rodríguez, 2011). Otra tecnología que será destacable en las próximas décadas es la captura de CO₂ a través del proceso cíclico de carbono (Cement Sustainability Initiative, 2009)

- La tecnología de **oxi-combustión** consiste en utilizar el oxígeno como comburente en vez de aire en los hornos, lo que resultaría en un flujo de CO₂ mucho más puro incrementando su concentración desde 7%-33% en una combustión con aire hasta un 80% en una combustión enriquecida con oxígeno (Bartolomé Muñoz, Mora Peris, & Recalde Rodríguez, 2011). Este proceso requiere una unidad de separación de gases que permita eliminar parcial o totalmente el nitrógeno (CSI/ECRA, 2017). La captura de CO₂ es más sencilla ya que sólo será necesario eliminar los compuestos de azufre y oxígeno mediante un proceso de purificación del aire (García-Gusano, 2014).

Existen dos posibilidades para la aplicación de la tecnología de oxi-combustión. La primera opción es la aplicación completa a toda la planta del horno, adaptando el horno y enfriador. De esta manera se conseguiría lograr eficiencias de captura de 90-99%. Esta posibilidad parece principalmente aplicable en nuevos hornos, ya que la adaptación de los actuales sería muy costosa. Adicionalmente, existe una línea de investigación en la que solamente el pre-calcinador opera con esta tecnología, reduciendo así el coste de implementación y manteniendo la calidad del producto. Esta opción tendría una menor eficiencia de captura de CO₂ (60%) (Cement Sustainability Initiative, 2009). Se espera que las primeras plantas prototipo con la tecnología de oxi-combustión se empiecen a implementar en 2020, por lo que no se espera la aplicación de esta tecnología a escala comercial antes de 2025 (CSI/ECRA, 2017).

La implementación a gran escala de las tecnologías de captura de CO₂ va a incrementar significativamente el consumo de electricidad (50-120%) en la producción de cemento. Ambas metodologías necesitarán altos consumos eléctricos para la producción de oxígeno mediante la absorción de los agentes restantes del aire en la tecnología de oxi-combustión y la separación, purificación y compresión de CO₂ en la metodología de post-combustión

(Cement Sustainability Initiative, 2009). Además, esta tecnología supone un aumento considerable del coste de producción de cemento debido a la gran inversión necesario para la construcción e implementación de una red de transporte y almacenamiento del CO₂. Se estima que provoque un incremento entre el 25-100% del coste de producción (Oficemen, 2017).

Finalmente, en la Tabla 2, se recopila la información más destacada del conjunto de medidas de eficiencia energética y reducción de emisiones aplicables al sector de cemento en el horizonte 2020-2030. Este análisis servirá como punto de partida para la implementación de estas tecnologías en el modelo de predicción de la industria de cemento nacional.

Tabla 2: Mejoras tecnológicas aplicables al sector del cemento en el horizonte 2020-2030

	Estímulos	Barreras
Renovación de hornos	<ul style="list-style-type: none"> - Ciclos de inversión de las plantas por completar - Tecnología de hornos de 6 etapas con pre-calentador y pre-calcinador madura - Reducción del consumo térmico en 200-700 MJ/ton clínker 	<ul style="list-style-type: none"> - Alto coste de inversión inicial - Desconfianza en crecimiento de la demanda de cemento
Materias primas sustitutivas	<ul style="list-style-type: none"> - Potencial de reducción de ratio clínker-cemento de 70% - Amplia reducción de consumo térmico frente aumento consumo eléctrico en la molienda de cementos 	<ul style="list-style-type: none"> - Disponibilidad según localización de la planta - Limitación por propiedades técnicas
Combustibles alternativos	<ul style="list-style-type: none"> - Amplio margen de mejor frente al resto de UE - Alternativa al vertido de residuos en vertedero - Disponibilidad en el medio plazo para los precios actuales 	<ul style="list-style-type: none"> - Restricciones técnicas por humedad y alto contenido en cloro - Bajo poder calorífico
Captura de CO₂	<ul style="list-style-type: none"> - Emisiones de calcinación (60%) inevitables - Potencial de reducción de emisiones de 85% para tec. post-combustión 	<ul style="list-style-type: none"> - Alto consumo térmico y eléctrico de tec. post-combustión - Altos costes de inversión - Disponibilidad a escala comercial

	<ul style="list-style-type: none">- Aplicable a todos los procesos (post-combustión)- Potencial de reducción de emisiones de 55% para tec. oxi-combustión	
--	--	--

4 Modelado de la industria de cemento

En los anteriores capítulos, se ha estudiado la importancia del sector industrial español en cuanto a emisiones y consumo energético a nivel europeo, así como un análisis exhaustivo de las principales actividades que conforman el tejido industrial de España. Así mismo, se ha detectado al sector de cemento como un sector clave para la descarbonización de la industria española. También se ha hecho una evaluación del estado de la técnica en la actualidad teniendo en cuenta las tecnologías que se pueden aplicar en el corto-medio plazo en la industria de cemento y el estudio de los ciclos de inversión en el sector. A continuación, se va a proceder a definir el modelo cuantitativo desarrollado sobre la industria de cemento española para conocer el verdadero alcance de las tecnologías explicadas en el apartado Mejoras tecnológicas del sector de cemento español.

4.1 Aspectos generales

Como se ha comentado en la sección introductoria el objetivo principal de este informe es evaluar la capacidad de la industria española de afrontar los objetivos europeos de reducción de emisiones GEI en el corto-medio plazo. La industria del cemento en concreto, es una de las que más oportunidades de mejora energética y emisora presenta debido a su excesivo uso de coque de petróleo, el empeoramiento de la eficiencia energética de su proceso productivo en los últimos años y las emisiones inevitables del proceso de calcinación para la producción de clínker (WSP - Parsons Brinckerhoff Engineering Services, 2015).

En este contexto, se ha decidido modelar la industria de cemento española con el objetivo de evaluar los costes y el funcionamiento del sector para un horizonte 2020-2030, considerando diferentes hipótesis y situaciones. Más concretamente, este modelo de la industria de cemento analiza el impacto técnico-económico de la aplicación de diferentes tecnologías de eficiencia energética y reducción de emisiones. Permite estudiar la capacidad del sector para cumplir los objetivos de reducción de emisiones marcados por la Unión Europea en el medio plazo. Para ello, se estudia un caso base y múltiples sensibilidades de los resultados y parámetros. En la Figura 17 se muestra el diagrama de bloques simplificado del modelo que se pretende realizar especificando entradas y salidas de este.

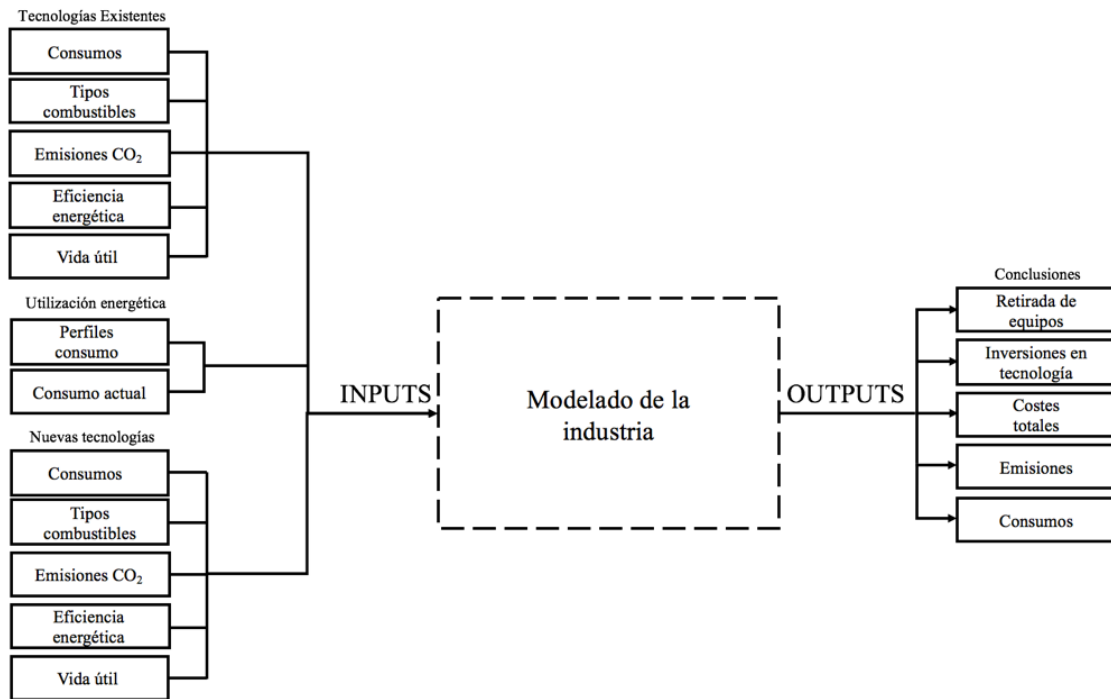


Figura 17: Esquema simplificado del modelo cuantitativo de la industria

El análisis de la industria de cemento española evalúa cómo se va a efectuar el cambio en el vector energético de la industria y el efecto de la evolución energética del sector en las emisiones de CO₂. Además, permite evaluar la renovación de las instalaciones actuales del parque cementero español teniendo en cuenta la edad útil de estas y prestando especial atención a los ciclos de inversión habituales del sector. Así mismo, ofrece la oportunidad de valorar a qué precio es rentable la aplicación de las tecnologías de captura de CO₂ y si realmente serán económicamente viables en el medio plazo para el sector cementero español teniendo en cuenta una evolución realista de la demanda.

En un entorno económico y energético tan incierto como el actual, este estudio resalta la importancia de evaluar diferentes situaciones futuras para la elaboración de los planes nacionales y las decisiones de política energética que guíen a la industria hacia un modelo descarbonizado. Es importante destacar que el objetivo del modelado de la industria no es predecir el futuro con exactitud, si no aportar información cualitativa y cuantitativa de la posible evolución energética de uno de los sectores más intensivos en emisiones de la industria española teniendo en cuenta la aparición de nuevas tecnologías de eficiencia energética y el futuro impacto de estas en términos de costes y emisiones.

A modo de resumen, las preguntas más relevantes que este modelo pretende responder son:

- ¿Cuáles son las tecnologías que conformarían el parque cementero español en corto-medio plazo? ¿cómo se va a producir la renovación de hornos del sector de cemento? y ¿qué efecto va a tener esta renovación energética en el consumo térmico medio y emisiones de CO₂?
- ¿Cómo se va a producir la transición del vector energético en el sector? y ¿qué impacto tiene la disminución de la dependencia al coque de petróleo en las emisiones CO₂?
- ¿Son viables las tecnologías de captura de CO₂ en el corto-medio plazo? y ¿qué precio de CO₂ marca la rentabilidad de estas tecnologías?
- ¿El sector de cemento va a ser capaz de cumplir los objetivos de reducción de emisiones en el horizonte 2030 sin la aplicación de las tecnologías de captura de CO₂?
- ¿Qué impacto deberán tener las políticas energéticas nacionales futuras para la consecución de los objetivos de descarbonización?

4.2 Especificación del modelo

Para llevar a cabo el análisis de la industria de cemento española se ha implementado un modelo matemático integrado bottom-up basado en el modelo desarrollado en (Santamaría & Linares, 2011) que simula el comportamiento del sector. Este modelo, se ha actualizado a la situación actual del sector y completado con la introducción de las tecnologías de mejora de eficiencia energética y reducción de emisiones previamente explicados en el capítulo Industria de cemento española. La descripción del sector y sus opciones de mejora energética y de emisiones se han obtenido mediante la literatura existente y el apoyo de la valoración de expertos para representar lo más realísticamente posible la industria.

El modelo minimiza los costes de operación e inversión del sistema teniendo en cuenta la demanda de cemento y clínker que se debe abastecer, el precio de los combustibles además de un precio ascendente de CO₂ permitiendo cambios en el uso de combustibles y materias primas, tecnologías de producción de cemento e inversión en nuevas tecnologías de eficiencia energética.

La industria de cemento en España se muestra en la Figura 18. El modelo elaborado representa las tres etapas con un mayor consumo energético y emisoras del proceso de producción del cemento: calcinación, clinkerización y molienda. Estas tres etapas han sido previamente explicadas en el apartado Industria de cemento. Se han representado dos tipos de fábricas de cemento, las plantas integrales que producen tanto clinker como cemento y las plantas de molienda que importan clinker para la producción de cemento. Para el modelado, se tienen en cuenta siete tipos de cementos diferentes.

Las plantas integrales utilizan caliza y arcilla como materias primas para la fabricación de clinker. Las tecnologías consideradas para la producción de clinker son de vía seca. En cuanto a los hornos, se han incluido aquellos con un sistema con pre-calentador (SECP), hornos de cuatro etapas con pre-calentador + pre-calcinador (SECPP-4st) y hornos de seis con pre-calentador + pre-calcinador (SECPP-6st), los cuales tienen un mejor rendimiento energético. Los hornos de producción de clinker son alimentados con una gran variedad de combustibles entre los que se encuentran, carbón, gas natural, coque, combustibles alternativos fósiles, combustibles alternativos con porcentaje de biomasa y biomasa.

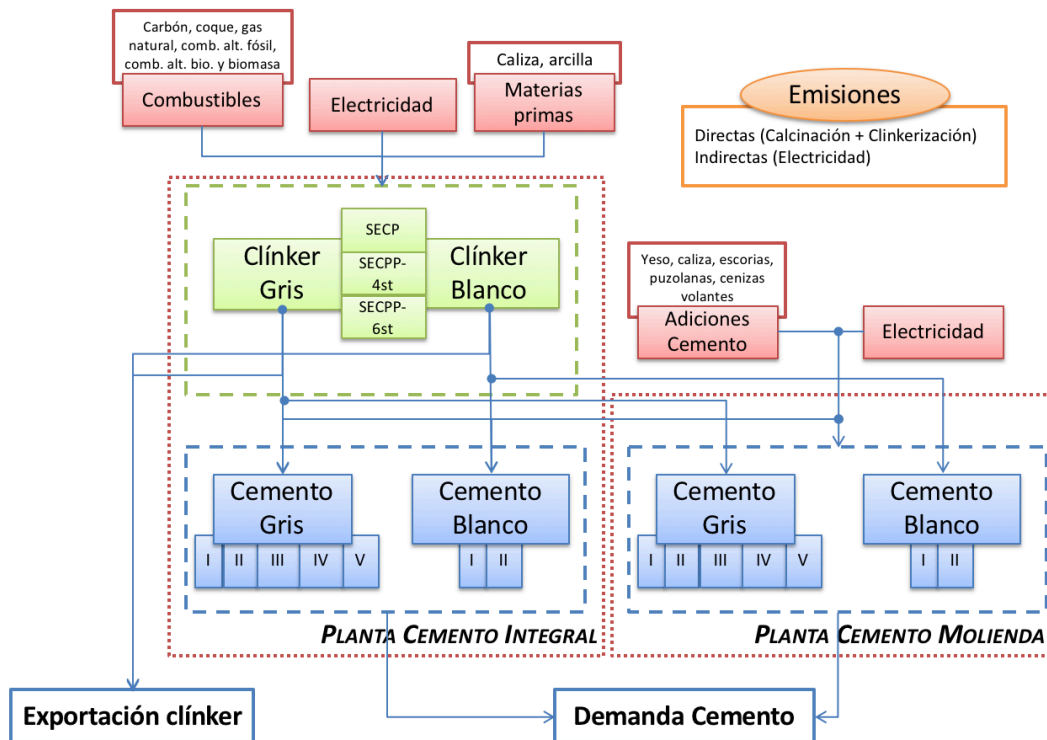


Figura 18: Esquema del modelo de la industria de cemento en España. Elaboración propia a partir de (Santamaría & Linares, 2011).

4.3 Parámetros considerados en el caso base

A continuación, se explican las distintas hipótesis consideradas respecto al caso base simulado en el modelo del sector de cemento español. Se hace referencia tanto a la demanda y producción de cemento como a los costes relacionados de la aplicación de las tecnologías que se prevé que tengan un importante impacto energético en la industria.

Precio CO₂, combustibles y electricidad

Un factor relevante en la transición del sector cementero a un modelo descarbonizado bajo en emisiones es la evolución del precio CO₂. Tal y como se ha mencionado en la sección Contexto actual del capítulo introductorio el objetivo de reducción de emisiones para los sectores que se encuentran acogidos al sistema europeo de comercio de emisiones, como sucede para el sector de cemento, deberán reducir al menos un 43% sus emisiones con respecto al año 2005, siendo este no vinculante a nivel país ya que el mercado de emisiones regularía el cumplimiento. Para los sectores no acogidos al sistema de comercio de emisiones, el objetivo marcado actualmente para España es de 26% también respecto al año 2005 (Comisión de expertos de transición energética, 2018).

Por lo tanto, para asegurar la coherencia de los resultados de los diferentes supuestos se ha optado por introducir un precio de CO₂ que representaría el precio marcado por este mercado europeo de comercio de emisiones. Para el caso base, se ha establecido la evolución del precio de CO₂, definiendo para el año 2030 en 50€/tCO₂ en línea con otros estudios relacionados con la evolución de las emisiones GEI (Comisión de expertos de transición energética, 2018) y (IDAE-BCG, 2011). Los precios de CO₂ para cada lustro se pueden observar en la Tabla 3. Para el análisis de sensibilidad de los resultados se han considerado otros precios alternativos de 10€/tCO₂ y 30€/tCO₂. En el escenario de implementación de tecnologías de captura de CO₂, con un horizonte a largo plazo, se aumentará progresivamente el límite de emisiones de este para conocer qué precio marcará la implementación de estas tecnologías bajo los parámetros del caso base.

Tabla 3: Evolución precios de CO₂ para el caso base

€/ton	2015	2020	2025	2030
Caso Base	15	30	40	50

Así mismo, el precio de los combustibles tendrá un impacto importante en la consecución del cambio de vector energético en el sector, por lo tanto, se ha estudiado la evolución de los precios de los diferentes combustibles en España en los próximos años. Se han tomado como referencia diferentes estudios sobre la evolución de precios de los combustibles más consumidos en el sector. Este análisis se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4: Evolución de los precios de combustibles en el corto-medio plazo. Elaboración propia a partir de (Rivier, y otros, 2018), (Jethmalani, 2017), (IDAE-BCG, 2011) (IHS, 2017)

	2015	2020	2025	2030	
Carbón	50,16	64,93	63,98	65,20	€/ton
	7,40	9,58	9,44	9,62	€/MWh
Gas Natural	186,91	120,57	205,21	233,52	€/1000 m ³
	19,61	12,65	21,53	24,50	€/MWh
Coque	72,13	93,38	92,01	93,77	€/ton
	8,14	10,54	10,38	10,58	€/MWh
Comb. alternativos fósiles	103,89	103,89	103,89	103,89	€/ton
	11,00	11,00	11,00	11,00	€/MWh
Comb. alternativos parc. biomasa	118,74	118,74	118,74	118,74	€/ton
	11,00	11,00	11,00	11,00	€/MWh
Biomasa	70,60	70,60	70,60	70,60	€/ton
	18,00	18,00	18,00	18,00	€/MWh

El aumento del consumo eléctrico y emisiones indirectas debido a la implementación de las tecnologías de mejora energética ha motivado el estudio de la evolución del precio de la electricidad y el contenido de CO₂ de esta. Se ha utilizado como referencia el informe técnico Análisis de escenarios futuros para el sector eléctrico en España para el período 2025-2050 publicado por el IIT de la Universidad Pontificia de Comillas (Rivier, y otros, 2018). Concretamente, se ha tenido en cuenta el escenario con cierre ordenado de la capacidad nuclear instalada en el sector energético español y una penetración de fuentes de energía renovable de 46% para el año 2025 y un 54% para el año 2030. Una vez calculado el precio y contenido de CO₂ de ambos años se ha definido el año 2020 asumiendo una relación lineal entre los tres lustros. Los precios y contenido de CO₂ por MWh tenidos en cuenta en el modelo han sido representados en la Tabla 5.

Tabla 5: Evolución de los precios y contenido de CO₂ de la electricidad en el corto-medio plazo. Elaboración propia a partir de (Rivier, y otros, 2018).

Electricidad	2015	2020	2025	2030
€/MWh	28	24	40	37
ton CO₂/MWh	0,205	0,184	0,163	0,072

Instalaciones actuales del parque cementero

El modelo diseñado para industria de cemento parte desde la situación actual, definida a continuación, sin tener en cuenta futuros cierres de plantas previos a completar su vida útil o desarrollos de otras actividades industriales que afecten a los diferentes agentes involucrados en el sector ya que estos no son parte del objetivo del estudio. La totalidad del parque cementero español ha sido considerado como hornos de vía seca. Adicionalmente, se ha establecido que el consumo energético medio de producción de clínker de la capacidad instalada es de 3600 MJ/t clínker, conteniendo el 14% de las plantas, hornos de 6 etapas con pre-calentador y pre-calcinador, la tecnología más eficiente posible. Así mismo, se considera que el 52% de la capacidad instalada de producción de clínker es mediante la utilización de hornos de vía seca con pre-calentador. El sistema de producción de cemento se completa con hornos de 4 etapas con pre-calentador y pre-calcinador. Adicionalmente, se han considerado unos costes de fijos y variables para cada tipo de planta, siendo estos una de las palancas motivadoras para la renovación de hornos ya que los más modernos tendrán unos costes menores.

En la Tabla 6 se muestra los costes de inversión y vida útil considerados para la construcción de una planta integral de producción de clínker con un sistema por vía seca con hornos de 6 etapas con pre-calentador y pre-calcinador (SECPP-6st). También se muestran la mejora energética que representa la renovación de hornos.

Tabla 6: Datos estimados para la renovación de hornos

	Inversión (M€)	Vida útil (años)	Incremento Cons. Térmico (MJ/ton clk)	Cons. Eléctrico (kWh/ton clk)
Renovación de hornos	100-150	40	∇ 200 - 700	∇ 5

En la Tabla 7 se muestra el estado actual de capacidad instalada que representa cada una de las diferentes tecnologías de producción de clínker por vía seca y los dos tipos de plantas para producción de cemento.

Tabla 7: Capacidad instalada de producción de clínker y cemento. Elaboración propia a partir de (Oficemen, 2017) y (Mora Peris, 2018).

Capacidad [Mton]	Prod. Clínker			Prod. Cemento	
	SECP	SECPP-4st	SECPP-6st	Integral	Molienda
Gris	17	11	4,5	44,5	2,2
Blanco	0,7	0,6	0,2	1,8	0

Evolución de la demanda de clínker y cemento

La demanda del sistema ha sido establecida tomando como referencia la demanda existente en el año 2015 con un ratio clínker-cemento de 81,4%. Se ha definido un comportamiento real para el horizonte 2020-2030 acorde con lo comentado con expertos de la industria, tal y como se muestra en la Figura 19. Se espera que en el año 2030 se alcance una producción de 25 toneladas de cemento gris, sin embargo, no se estima un aumento tan considerable en la producción de clínker debido al aumento del peso de las materias primas sustitutivas y descenso de la exportación de clínker causado por el auge de productores foráneos que están ganando importancia en el mercado internacional.

Tabla 8: Evolución esperada de la demanda de clínker y cemento en el corto-medio plazo. Elaboración propia a partir de (Oficemen, 2016) y (Mora Peris, 2018).

Producción [Mton]	2015	2020	2025	2030
Cemento Gris	14,3	20,2	22,1	25
Clínker Gris	16,9	19,99	20,54	20,85
Exportación clínker (gris)	5,3	4,5	4	3
Ratio clínker-cemento (gris)	81,4%	76,7%	74,8%	71,4%

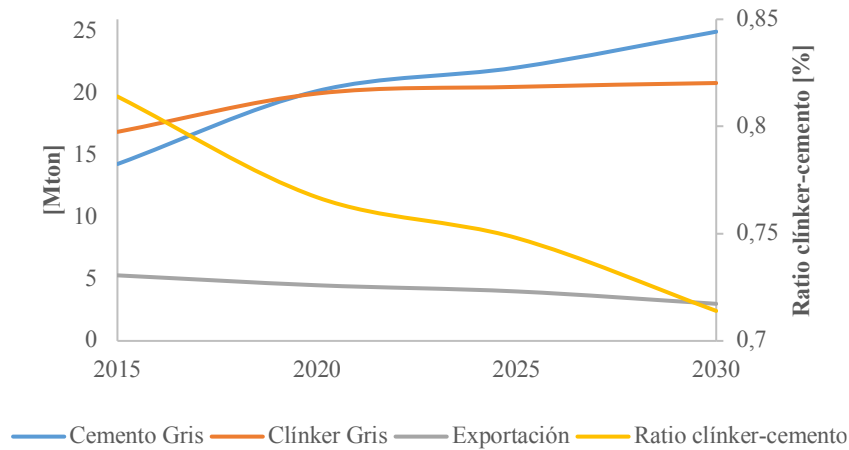


Figura 19: Evolución producción clinker-cemento establecida para el modelo del sector de cemento

Tecnologías de captura de emisiones

En cuanto a las tecnologías de captura de CO₂, se ha considerado la metodología de absorción química mediante aminas o amoníaco refrigerado en tecnología de captura de CO₂ por post-combustión con un rendimiento de captura de 85%.

La razón de la aplicación de esta tecnología y no la captura de CO₂ a través del proceso cíclico de carbono es debido a que el horizonte de estudio es el medio plazo, y aún no se tienen suficiente información sobre esta debido a que se encuentra en las primeras etapas de su desarrollo (CSI/ECRA, 2017). La aplicación de la tecnología de captura de CO₂ por absorción química demanda una fuerte inversión inicial ya que será necesario instalar todo el sistema desde cero y disponible a partir de 2020. Así mismo, ofrece la oportunidad de ser instalada en los tres tipos de plantas, algo que no sucede con la captura de CO₂ por oxi-combustión que se ha optado por un sistema aplicable al proceso de combustión del pre-calcinador. Para esta tecnología se ha definido un rendimiento de captura de emisiones de 55%, estando disponible a escala comercial en 2025.

A continuación, en la Tabla 9, se muestran todos los costes asumidos para la implementación de las tecnologías de mejora de eficiencia energética y reducción de emisiones teniendo en cuenta la inversión inicial de cada una de las tecnologías, el rendimiento de reducción de emisiones en caso de las tecnologías de captura de CO₂, y sus incrementos de consumos térmicos y eléctricos.

Tabla 9: Tecnologías de mejora de eficiencia energética y reducción de emisiones.

Elaboración propia a partir de (CSI/ECRA, 2017) y (Mora Peris, 2018).

	Disponibilidad	Inversión (M€)	Operación (€/ton)	Rendimiento Absorción CO ₂ (%)	Incremento Cons. Térmico (MJ/ton clk)	Cons. Eléctrico (kWh/ton clk)
Post-Combustión	2020	100 - 300	10 - 50	80 - 95 %	Δ 1000 - 3500	Δ 50 - 90
Oxi-Combustión	2025	105-130	8 - 13	55 - 75 %	Δ 0 - 200	Δ 117 - 180

Otros parámetros utilizados en el caso base

Además de los parámetros ya explicados, se ha tenido en cuenta otros supuestos que se explican a continuación.

- La evolución energética del sector cementero ha sido analizada en el horizonte 2020-2030. En concreto se estudian los años 2020, 2025 y 2030 para el caso base elegido. Cada año ha sido definido de forma individual, si bien se comprueba la trayectoria temporal de las inversiones para cada tecnología. La tasa de descuento elegida es de 6,5%, un valor medio entre una tasa de descuento social y privada.
- Para el modelado de la industria, se ha asumido que el proceso de producción de clínker es el causante del total de emisiones directas del sector del cemento. Aproximadamente el 60% de éstas emisiones son producidas por las reacciones químicas que sufren las materias primas en el horno, y el 40% restante son debidas a la combustión realizada para alcanzar las altas temperaturas del proceso de clinkerización y descarbonatación y las emisiones indirectas causadas por el consumo eléctrico en hornos y molinos.
- Como se ha citado con anterioridad, España aún tiene un gran potencial de crecimiento en la valorización y reciclado de los residuos para conseguir estar en sintonía con el resto de países de la Unión Europea. Por lo tanto, se ha incluido una restricción que limita el consumo de combustibles alternativos de manera realista considerando un aumento paulatino de la disponibilidad de estos residuos para uso energético en la industria cementera del país. Se ha definido un calor demandado máximo cubierto por combustibles alternativos en los diferentes años estudiados siendo de 30% en 2020 y 45 % para 2030, asumiendo que el 40% de

estos residuos es biomasa, en línea con lo establecido en (Oficemen, 2017), (Cement Sustainability Initiative, 2018) y (CSI/ECRA, 2017). Para el proceso de producción de clínker blanco, el aumento sería lineal desde un 15% en 2020 hasta un 20% en 2030 como se expresa en (Oficemen, 2017). Se entiende que estas restricciones guían al modelo hacia un comportamiento real del sector que busca reducir la dependencia de los combustibles fósiles. No se ha definido ninguna sobrecoste adicional según tecnología para el consumo de biomasa en los hornos, según lo comentado con expertos de la industria (Mora Peris, 2018).

- Tal y como se ha mencionado en capítulos anteriores, en el modelo no se han incluido como mejoras de eficiencia energética la renovación de molinos de molienda ya que no se espera su instalación en el corto-medio plazo. Tampoco se estudia la implementación del sistema de reutilización de calor para producir electricidad ya que su instalación solamente es viable en hornos largos, no existentes en el parque cementero español (Mora Peris, 2018).

4.4 Parámetros considerados en el análisis de sensibilidad

Adicionalmente, además del caso base, previamente explicado, se han simulado otros casos modificando algunos de los parámetros más significativos. Estos supuestos se explican a continuación.

- En el caso base se supone que el precio del CO₂ para el año 2030 será fijado en 50 €/ton. De manera paralela se han realizado dos análisis de sensibilidad en el que se suponen precios más bajos tal y como se muestra en la Tabla 10. De esta manera se pretende conocer qué impacto tendrá el precio del CO₂, tanto en la renovación del parque cementero como en la evolución de emisiones y vector energético del sector. Para el estudio del caso de precio bajo de CO₂ se ha considerado que el consumo de combustibles alternativos no debe ser menor que el consumido en 2015, es decir, 23,4% del calor demandado es abastecido por este tipo de combustible.

Tabla 10: Evolución del precio de CO₂ en los escenarios de sensibilidad estudiados

€/ton	2015	2020	2025	2030
Caso Base	15	30	40	50

Sensibilidad precio bajo CO₂	15	10	10	10
Sensibilidad precio medio CO₂	15	20	25	30

- Adicionalmente, en los parámetros asumidos para el caso base no se tiene en cuenta el impacto que tienen los ciclos de inversión en la industria. En el caso base, se ha evaluado que la renovación de hornos se producirá cuando sea económicamente viable para el sistema debido a un menor consumo energético y menores coste de producción. Sin embargo, para este análisis de sensibilidad se ha definido que cada año el sistema deberá renovar al menos una planta debido a la longevidad de la capacidad instalada actual. Este supuesto se obtuvo de las conversaciones con expertos del sector cementero español basándose en la edad del parque cementero (Mora Peris, 2018).

Así mismo, se ha aplicado un sobrecoste, correspondiente al resto de vida útil aún no utilizada, en caso de que se renueve una mayor cantidad de plantas de las definidas para cada año estudio. Para este caso de sensibilidad se ha asumido que el parque cementero español está compuesto por un total de 32 plantas operativas de producción de cemento, 3 de ellas de molienda tal y como muestra Oficemen (Oficemen, 2017). Por lo tanto, se ha asumido que la capacidad correspondiente de producción de cada planta integral es de 1/29 del total de la capacidad instalada tanto para clinker gris y blanco.

Dentro de este análisis de sensibilidad, también se ha comparado el comportamiento de la renovación de las instalaciones de la industria aplicando teniendo en cuenta los ciclos de inversión de está manteniendo la demanda de cemento de escenario base y aumentando hasta en un 15% con el objetivo de analizar la eficiencia energética del sector en un escenario más prometedor.

- Finalmente, se desarrolla un último análisis en el que se considera una visión a largo plazo que incluye un escenario hasta el horizonte 2050. De esta forma, se pretende evaluar la coherencia de los diferentes escenarios definidos para el horizonte de 2030 con una visión de largo plazo. En este escenario estudiado, se asume que para el año 2050 se debe cumplir el objetivo de reducción de emisiones de 80% respecto a niveles de 1990 marcado por Acuerdo de París sobre el cambio

climático. Así mismo, se mantienen los parámetros de entrada definidos para el año 2030. Para este análisis no se han tenido en cuenta los ciclos de inversión de la industria de cemento, por lo que el modelo decidirá cuándo renovar las plantas conforme al objetivo de reducción de emisiones. Con este análisis se busca conocer la verdadera aplicación de las tecnologías de captura de emisiones, y su impacto en la reducción de emisiones del sector. Para este caso se ha tenido en cuenta el factor de curva de aprendizaje en la implementación de tecnologías de captura de emisiones que considera una reducción de un 25% los costes de inversión y mantenimiento de estas tecnologías tras implementarse en un 5% de la capacidad total de producción de clínker siguiendo la hipótesis presentada en (P.S., y otros, 2017).

4.5 Estructura matemática

En esta sección se presenta la estructura matemática diseñada para simular el funcionamiento del sector cementero en España. Como se ha mencionado con anterioridad, el modelo realizado parte de una versión inicial explicada en (Santamaría & Linares, 2011) y (Pintos Touriño, 2017). En este apartado no se hará mención a las restricciones ya comentadas en esos documentos. Adicionalmente, el significado de la nomenclatura utilizada se puede encontrar en el apartado Glosario de la sección de Anexos.

La función objetivo del modelo, está compuesta por los costes asociados a la producción de cemento y los costes inversión de cada una de las tecnologías de eficiencia energética y reducción de emisiones tenidas en cuenta.

$$\begin{aligned}
 \text{Min Costes} = & \sum \text{Costes mat.primas (clínker – cemento)} \\
 & + \text{Costes combustibles} + \text{Costes electricidad} \\
 & + \text{Costes mantenimiento} + \text{Costes inv.nuevas plantas} \\
 & + \text{Costes inv.captura emisiones} + \text{Costes emisiones}
 \end{aligned}$$

Esta función objetivo será minimizada teniendo en cuenta un grupo de restricciones dando lugar el coste optimizado de los diferentes actores que intervienen para satisfacer la demanda del sector. A continuación, se muestra el conjunto de restricciones añadidas al modelo.

- El consumo energético de combustibles alternativos está marcado por su disponibilidad y restricciones técnicas.

$$\begin{aligned}
& QCOM_{tcl,cl,comb_alt_fos} * enercomb_{comb_alt_fos} + QCOM_{tcl,cl,comb_alt_bio} \\
& \quad * enercomb_{comb_alt_bio} + QCOM_{tcl,cl,biomasa} * enercomb_{biomasa} \\
& \leq maxcombalt_{año} * QCL_{tcl,cl} * ctcl_{tcl,cl}
\end{aligned}$$

$\forall tcl, cl$

- La aceptación de biomasa por las instalaciones de producción de clínker es de 40% respecto al total de combustibles alternativos.

$$\begin{aligned}
& QCOM_{tcl,cl,biomasa} * enercomb_{biomasa} \\
& = 0,4 * (QCOM_{tcl,cl,comb_alt_fos} * enercomb_{comb_alt_fos} \\
& \quad + QCOM_{tcl,cl,comb_alt_bio} * enercomb_{comb_alt_bio} \\
& \quad + QCOM_{tcl,cl,biomasa} * enercomb_{biomasa})
\end{aligned}$$

$\forall tcl, cl$

- La renovación de hornos de producción de clínker debe ser al menos la marcada por los ciclos de inversión.

$$INVCL_{tcl,cl,SECPP-6st} \leq minrenovado_{año} * \frac{1}{29} * \sum_{tcl,cl} ccl_{tcl,cl}$$

$\forall año, cl$

- La implementación de las tecnologías de captura de emisiones deberá ser menor del 100%.

$$0 \leq PostCCS_{tcl,cl} \leq 1$$

$\forall tcl, cl$

$$0 \leq OxiCCS_{SECPP-6st,cl} \leq 1$$

$\forall cl$

Adicionalmente, existen algunas ecuaciones que influenciarán el comportamiento del sector, según costes y emisiones de las tecnologías implementadas. Estas ecuaciones se muestran a continuación.

- Las plantas que sean renovadas antes de cumplir la vida útil de estas deberán asumir un coste extra de inversión correspondiente al número de años que restan hasta completar su vida útil.

$$\begin{aligned} \text{Costes Inv.} &= INVCL_{tcl,cl,SECPP-6st} * cinv_{tcl,cl,SECPP-6st} \\ &+ \sum_{i=\text{minrenovado}_{\text{año}}}^{INVCL_{tcl,cl,SECPP-6st}} \frac{(i - \text{minrenovado}_{\text{año}})}{40} * cinv_{tcl,cl,SECPP-6st} \end{aligned}$$

$\forall \text{ año}, tcl, cl$

- La tecnología de captura de emisiones de CO₂ por post-combustión tiene un 85% eficiencia de captura.

$$\begin{aligned} \text{Emisiones}_{\text{Post-Combustión}} &= 0,85 \\ &* \left(\sum_{comb,tcl,cl} PostCCS_{tcl,cl} * QCOM_{tcl,cl,comb} * emc_{comb} \right. \\ &\left. + \sum_{mcl,tcl,cl} PostCCS_{tcl,cl} * emc_{mcl,tcl,cl} * QRM_{mcl,tcl,cl} \right) \end{aligned}$$

$\forall mcl, tcl, cl$

- La tecnología de captura de emisiones de CO₂ por oxi-combustión tiene un 55% eficiencia de captura sólo aplicable en plantas con la tecnología más novedosa.

*Emissiones*_{Oxi-Combustión}

$$\begin{aligned}
 &= 0,55 \\
 &* \left(\sum_{comb,tcl,cl} OxiCCS_{SECPP-6st,cl} * QCOM_{SECPP-6st,cl,comb} \right. \\
 &* emc_{comb} \\
 &+ \sum_{mcl,tcl,cl} OxiCCS_{SECPP-6st,cl} * emc_{mcl,tcl,cl} \\
 &\left. * QRM_{mcl,SECPP-6st,cl} \right)
 \end{aligned}$$

$\forall mcl, cl$

- El impacto asociado a la curva de aprendizaje en los costes de inversión de las tecnologías de captura de emisiones de CO₂ reducirá los costes de inversión.

$$redpreciocapt = 0,25$$

$$: \frac{PostCCS_{tcl,cl} * QCL_{tcl,cl} + OxiCCS_{SECPP-6st,cl} * QCL_{SECPP-6st,cl}}{\sum_{tcl,cl} QCL_{tcl,cl}} \geq 0,05$$

*Costes Inv*_{Capt. Emisiones}

$$= (1 - redpreciocapt)$$

$$\begin{aligned}
 &* \left(\sum_{tcl,cl} PostCCS_{tcl,cl} * QCL_{tcl,cl} * CostiPostCCS_{tcl,cl} \right. \\
 &+ \sum_{SECPP-6st,cl} OxiCCS_{SECPP-6st,cl} * QCL_{SECPP-6st,cl} \\
 &\left. * CostiOxiCCS_{SECPP-6st,cl} \right)
 \end{aligned}$$

5 Análisis de resultados

Como se ha mencionado con anterioridad, el sector de cemento va a jugar un papel importante en el proceso de descarbonización de la industria. Por ello se han estudiado el conjunto de tecnologías de reducción de emisiones y mejora energética aplicables a las diferentes etapas del proceso de producción de este y se ha desarrollado un modelo de optimización para analizar la evolución del sector en el horizonte 2020-2030. Finalmente, una vez conocido el modelo diseñado, y los parámetros definidos para los diferentes casos estudio, en el capítulo de análisis de resultados se presentan los resultados obtenidos tanto para el escenario base como para las diferentes situaciones consideradas en el análisis de sensibilidad.

5.1 Resultados del caso base

A continuación, se presentan los resultados para el caso base para el horizonte 2020-2030. Las variables discutidas son inversión en renovación de hornos, evolución del vector energético, comportamiento de emisiones de CO₂ e impacto de las tecnologías de captura de CO₂.

Es importante destacar que solamente se estudiarán resultados de costes en los casos del análisis de sensibilidad de precios de CO₂ para conocer el impacto relativo de los diferentes escenarios definidos. En el caso base no se estudian debido a que los costes no son relevantes en términos absolutos, son meramente una aproximación.

Evolución de emisiones

En primer lugar, se realiza el análisis de resultados de la evolución de las emisiones de CO₂ del sector a lo largo del horizonte estudiado. Como se puede observar en la Figura 20, bajo los supuestos considerados, las emisiones totales del sector de cemento en España alcanzarían 15,7 Mton CO₂ muy cercano al objetivo de reducción de emisiones para los sectores ETS marcado en 43% de reducción de emisiones respecto al año 2005, en este caso, 15,61 Mton CO₂. Estudiando la evolución a través de los años estudio se observa que hay un aumento considerable de las emisiones de CO₂ en el primer lustro principalmente causado por el aumento de producción de clínker/cemento. Así mismo, a partir de 2020 se estabilizan las emisiones y es en el año 2025 cuando se comienza a observar el efecto de las medidas de eficiencia energética y reducción de emisiones.

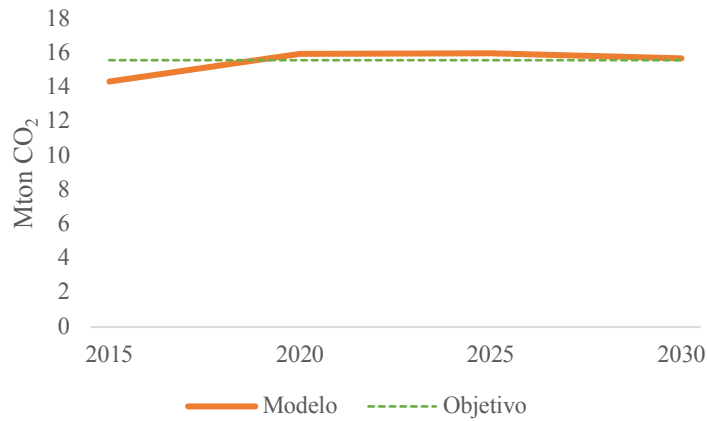


Figura 20: Evolución de las emisiones totales de CO₂ del sector cementero en España

Analizando la cantidad total de emisiones provocadas por los principales emisores del proceso de producción de cemento, mostrado en la Figura 21, se puede observar que para el año 2030, las emisiones producidas por la quema de combustibles fósiles se reduce considerablemente. La causa principal de la reducción de emisiones del sector es la sustitución de estos combustibles fósiles, principalmente coque, por combustibles alternativos y biomasa.

También, se puede observar que no se ha aplicado ningún tipo de medida para reducir el contenido de emisiones del proceso de calcinación ya que no se invierte en tecnologías de captura de emisiones. Las razones principales de la falta de inversión en tecnologías post-combustión y oxi-combustión son sus altos costes de inversión y renovación de los absorbentes químicos utilizados y su alta demanda energética en el proceso de separación de CO₂.

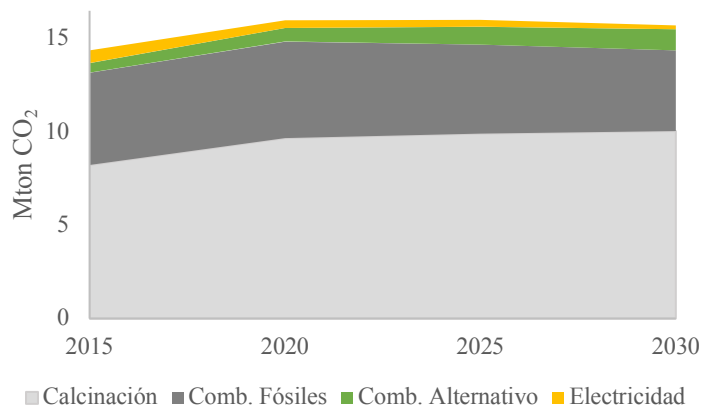


Figura 21: Evolución de las emisiones de CO₂ de cada emisor principal del sector

Transición del mix energético del sector cemento

A continuación se muestra la evolución del mix energético económicamente óptimo del sector cementero en España bajo los supuestos considerados, representado en la Figura 22. La primera de las conclusiones que se puede observar es el crecimiento significativo del consumo energético de la industria debido a la mayor demanda de clínker y cemento en el primer lustro estudiado.

Destaca también la reducción de la dependencia del coque en el sector debido al aumento de los combustibles alternativos. Esto se debe principalmente al aumento del precio de CO₂ y la mayor disponibilidad de biomasa y combustibles alternativos para el sector debido a las restricciones del vertido de estos. La dependencia del sector cementero de los combustibles fósiles es reducida desde un 74% en 2015, hasta un 55% en el año 2030. Los combustibles alternativos alcanzan la cuota máxima de disponibilidad marcada para cada año, siendo de 45% en el año 2030 y el 40% de estos biomasa. Esto demuestra que el sector de cemento es una buena vía alternativa al vertido de estos residuos a los vertederos, dado que tienen un alto valor energético para el sector.

En cuanto al consumo de electricidad, se puede observar un crecimiento en el consumo de esta debido al aumento del consumo de cemento con mayor porcentaje de materias primas sustitutivas de clínker tales como yeso, caliza, cenizas volantes, puzolanas y escorias que requieren un mayor empleo de electricidad en el proceso de molienda. Este aumento de consumo eléctrico para el año 2030 es de un 15% respecto del año de partido. Así mismo, no se aprecia un aumento extremo en la demanda eléctrica del sector por la falta de inversión en tecnologías de captura de CO₂ que demandan gran cantidad de electricidad. En el escenario definido para el horizonte 2050, se analizará el impacto de la aplicación de estas tecnologías en el consumo eléctrico de la industria.

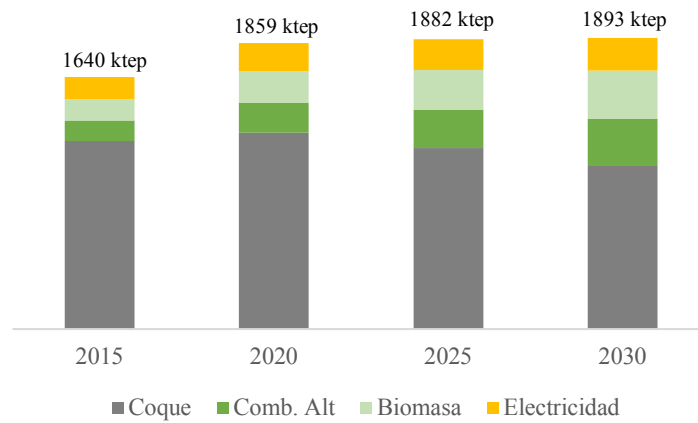


Figura 22: Evolución del consumo de combustibles en la industria de cemento

Renovación de los hornos e impacto en eficiencia energética

Los resultados obtenidos muestran que existe una situación de sobrecapacidad instalada de producción de clínker, lo que provoca que bajo los supuestos asumidos en el año 2030, solamente el 65% de la capacidad instalada sea utilizada, siendo el total de hornos parados de las tecnologías más antiguas. En cuanto al tipo de hornos utilizados para la producción de clínker, tal y como muestra la Figura 23, se puede apreciar que a partir del año 2020 y un precio de CO₂ de 30 €/ton, no es rentable utilizar la tecnología de hornos más antigua y menos eficiente de producción de clínker, los hornos de vía seca con pre-calentador. Adicionalmente, se puede observar para la demanda de cemento definida no es viable renovar los hornos de producción de clínker de 4 etapas con pre-calentador y pre-calcinador. Hay que recordar que en este escenario base no se ha considerado el efecto de los ciclos de inversión de las plantas y su vida útil solamente, se tienen en cuenta el consumo energético de cada planta y sus costes fijos y variables. Este caso se estudiará más adelante en el análisis de sensibilidad.

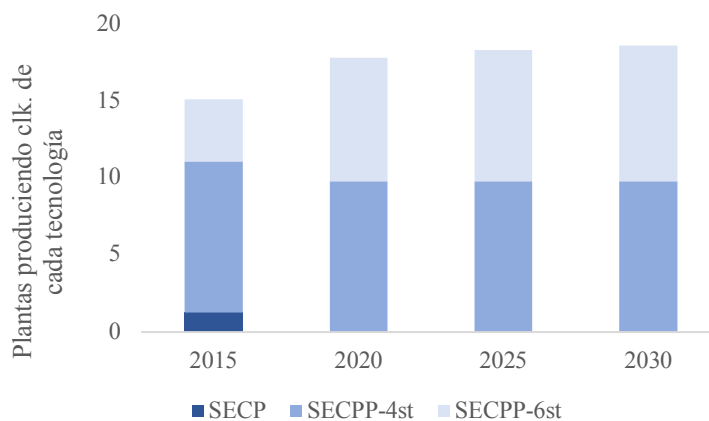


Figura 23: Plantas de producción de clínker gris operativas

Por último, la renovación de hornos tiene un efecto considerable en la eficiencia energética del sector. La Figura 24 muestra la evolución del consumo energético medio demandado para la producción de clínker. En esta figura se puede apreciar una gran mejora de la eficiencia del sector en el primer lustro analizado causada por la renovación de hornos desde hornos de vía seca con pre-calentador a hornos de 6 etapas con pre-calentador y pre-calcinador. A partir de 2020, el consumo térmico medio se mantiene prácticamente constante. El consumo medio de la industria para la producción de clínker en el año 2030 es de 3400 MJ/ton clk, habiéndose reducido en un 3,7% respecto a 2015.

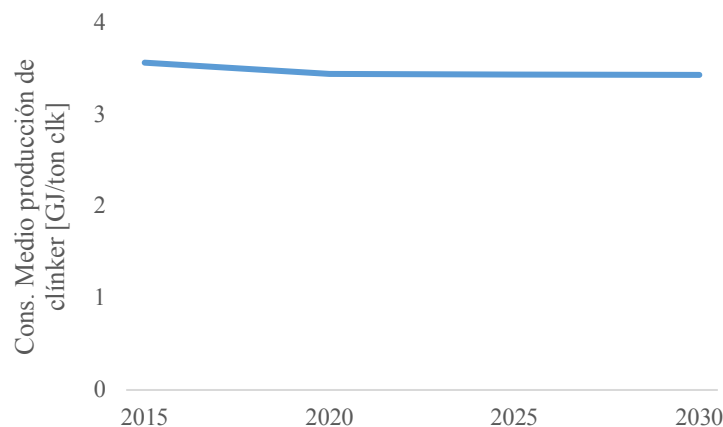


Figura 24: Evolución del consumo energético medio de producción de clínker

5.2 Análisis de sensibilidad

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en los casos definidos para el análisis de sensibilidad del caso base.

Análisis de sensibilidad del precio de CO₂

A continuación, se presentan los resultados del primer análisis de sensibilidad realizado. Como se ha mencionado con anterioridad este escenario analiza el comportamiento del sector con precios de CO₂ considerablemente más bajos marcado por el comercio de emisiones para los sectores ETS.

Analizando los resultados obtenidos, mostrados en la Figura 25, que representa la evolución de emisiones totales del sector, se puede concluir que con precios muy bajos

de CO₂, en este caso 10€/ton, no se cumplirían los objetivos marcados para el medio plazo por la hoja de ruta definida por la Unión Europea poniendo en serias dificultades conseguir una reducción del 80% de emisiones para el año 2050 para el sector de cemento respecto niveles de 1990. En este escenario, bajo los parámetros definidos, apenas se reduciría un 35,6% las emisiones respecto a niveles de 2005, mientras que el objetivo es de 43%. La principal razón para la no consecución de esta meta es la no reducción de las emisiones de CO₂ provenientes de los combustibles fósiles tradicionales, coque y carbón, tal y como muestra la Figura 26.

Sin embargo, en el segundo análisis de sensibilidad definido, en el que se considera para el año 2030, un precio de CO₂ de 30€/ton, se pueden observar que se obtienen resultados energéticos exactamente iguales que el caso base, reduciendo un 42,7% las emisiones de CO₂ respecto al año 2005.

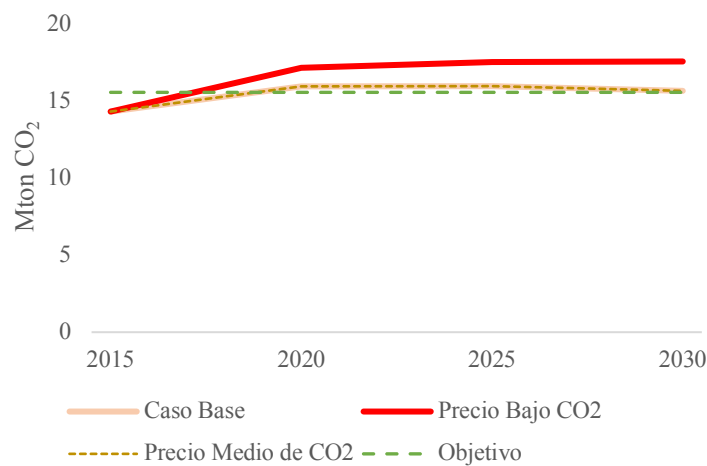


Figura 25: Comparación de evolución de emisiones según el precio de CO₂

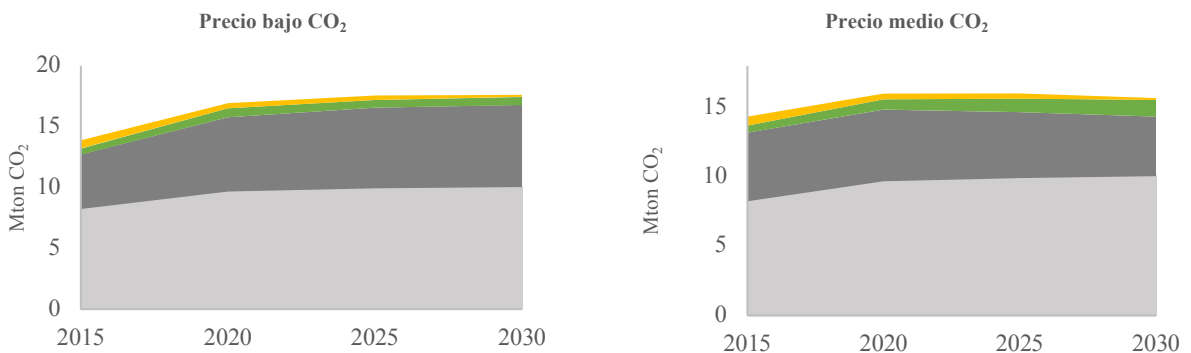


Figura 26: Comparación de emisiones causadas por los principales emisores

En línea con lo comentado anteriormente, observando la Figura 27, se analiza que en el caso de tener un precio de tonelada emitida de 10 €, no se conseguiría reducir la dependencia del sector cementero español de los combustibles fósiles. En una situación hipotética de precio de tonelada de CO₂ muy bajo se mantendría un consumo de combustibles fósiles mayor de 70%. Por el contrario, en el escenario en el segundo análisis de sensibilidad, con un precio de 30 €/tonCO₂, se conseguiría reducir hasta 55%. En cuanto, a la importancia de los combustibles alternativos y biomasa en el mix energético del sector se mantendría constante desde 2015, dejando de ser una alternativa para la valorización energética de estos residuos.

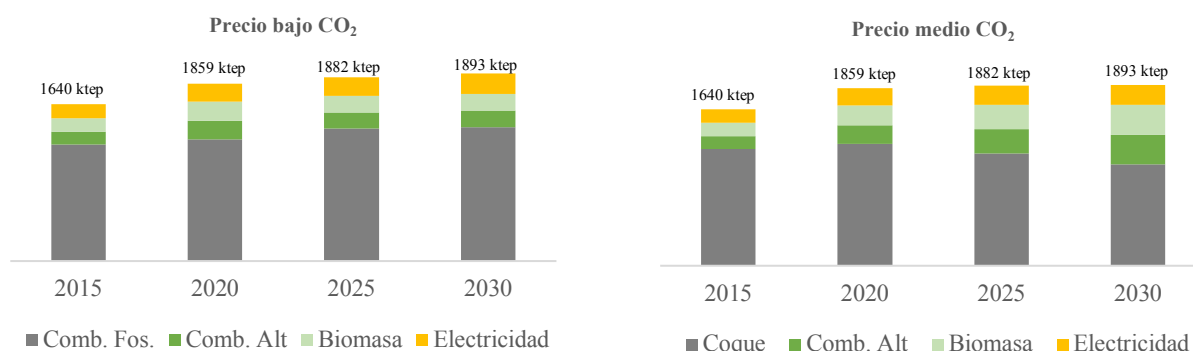


Figura 27: Evolución del consumo de combustibles según precio de CO₂

Finalmente, se ha estudiado que impacto tendría los diferentes precios de CO₂ en los costes medios de producción de cada tonelada de cemento. Estos resultados se representan en la Figura 28. Bajo los supuestos ya explicados, se ha obtenido que para el caso base, definiendo el precio de CO₂ en 50 €/ton en un 9,3% el coste de producción de tonelada de cemento respecto al año 2015. En el caso de que se marcara un precio de 30 €/ton, además de conseguir reducir las emisiones considerablemente, se obtiene que también se reducirían los costes de producción de cemento en 6,95% debido a la renovación energética de los hornos de producción de clínker y un menor coste de las emisiones. Otro dato importante sería que con un precio de 10€/ton en el medio plazo se reduciría en un 23,7% los costes de producción de cemento, pero no tendría ningún efecto energético en la industria.

La comparación de estos tres escenarios demuestra que tanto precios altos como bajos de CO₂ pueden incrementar los costes de producción del sector. En caso de precios demasiado altos, se elevarían considerablemente los costes de producción y por lo tanto el precio de venta del cemento provocando una pérdida competitividad sin obtener

beneficios energéticos. Por el contrario, con precios muy bajos directamente no se conseguiría descarbonizar una industria altamente emisiva y con una fuerte dependencia de los combustibles fósiles.

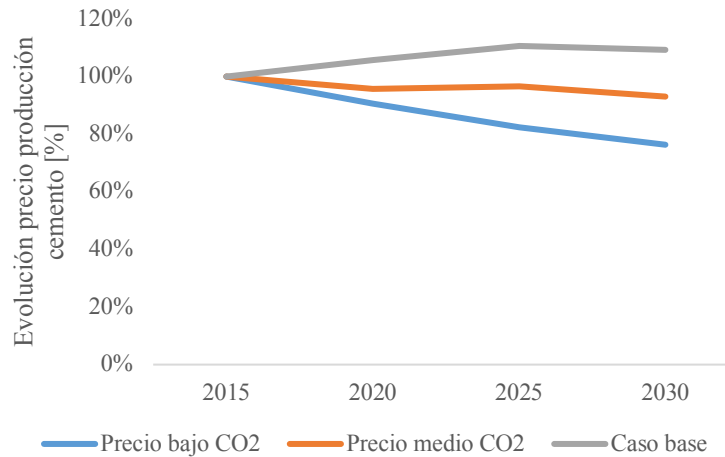


Figura 28: Evolución precio/ton cemento

Análisis de sensibilidad sobre los ciclos de inversión y aumento de demanda

El siguiente análisis realizado ha sido estudiar el impacto energético y a nivel de emisiones de los ciclos de inversión de las instalaciones de producción de clínker en el sector. En la Figura 29, se muestra la evolución del número de instalaciones de producción de clínker renovadas por hornos de 6 etapas con pre-calentador y pre-calcinador según los escenarios planteados. En el caso base, según los resultados obtenidos con los parámetros de entrada explicados, se ha renovado una capacidad total de 5,35 Mton/año para el año 2030.

En los otros dos escenarios definidos, se puede observar que para ambos la renovación de los hornos de producción de clínker gris alcanza un total de 15 plantas para el medio plazo. Sin embargo, llama la atención que en el corto plazo, hasta 2020, asumiendo un escenario más prometedor de la demanda de cemento, en este caso un 15%, para el sistema sí es viable la renovación de plantas que no hayan alcanzado el total de su vida útil asumiendo el correspondiente sobrecoste. Para ese escenario, se ha renovado una planta a falta de un año por completar su vida útil en el lustro 2015-2020. Toda esta capacidad renovada corresponde a capacidad instalada de la tecnología más antigua, hornos con pre-calentador. También se muestra que para el escenario en el que se

mantiene la demanda del caso base, la producción de clínker y cemento sería insuficiente para la renovación de las 15 plantas correspondientes al año 2030.

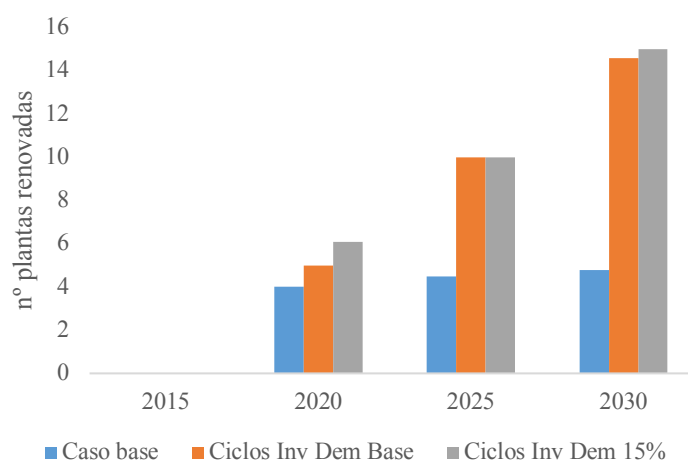


Figura 29: Número de plantas renovadas

Analizando la evolución del consumo medio para la producción de clínker gris, tal y como muestra la Figura 30, se puede observar una gran mejora energética del sector debido a la renovación de las plantas al terminar la vida útil de estas. En el escenario de cumplimiento de renovación tras 40 años de funcionamiento de la planta con la demanda del escenario base se ha obtenido que, para el año 2030, el consumo medio por tonelada es de 3100 MJ/ton clínker. Por lo tanto, para una misma demanda, aplicar los ciclos de inversión de la industria permite reducir el consumo en 2030 en 6,4%. No obstante, el incremento de la demanda en un 15% con respecto al supuesto base, incrementaría el consumo medio hasta 3140 MJ/ton clínker para el horizonte 2030.

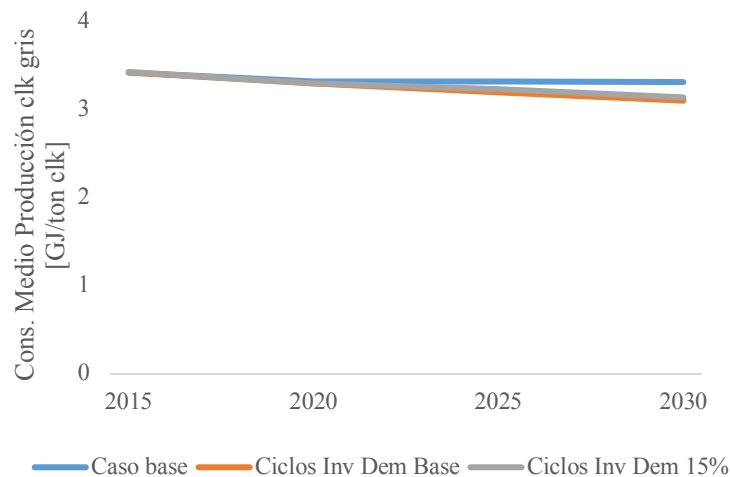


Figura 30: Evolución eficiencia energética de producción de clínker gris

Finalmente, se ha procedido a estudiar la evolución de las emisiones del sector calculadas para los diferentes escenarios de este análisis de sensibilidad. En el escenario de renovación de la capacidad de producción tras cumplir su vida útil se ha conseguido reducir las emisiones en un 44% respecto al nivel de emisiones de 2005. No obstante, en el caso de un crecimiento de un 15% de la demanda de cemento respecto al escenario base, la renovación de las plantas, el co-procesado de residuos en sustitución de coque y la reducción del ratio clínker-cemento a penas conseguirían un reducción de emisiones de 36% también tomando como referencia el año 2005. Estos resultados se pueden observar en la Figura 31.

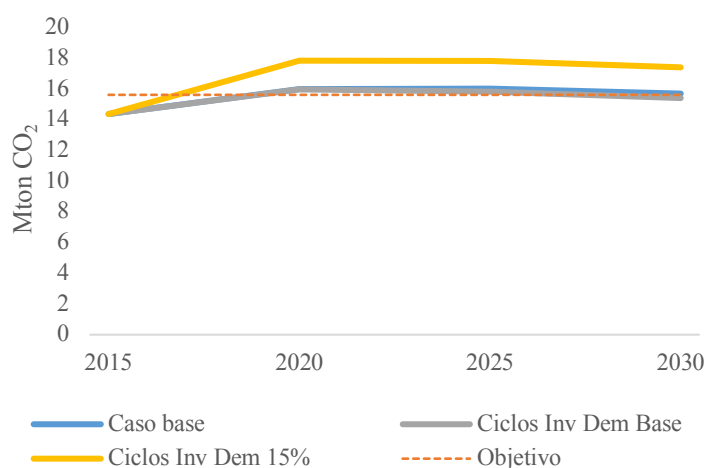


Figura 31: Evolución de emisiones del sector cementero según escenario

Análisis sobre el impacto de captura de CO₂ en el largo plazo

Finalmente, el tercer y último caso de estudio, analiza bajo qué condiciones de precio de CO₂ y reducción de emisiones comienza a ser viable la inversión en tecnologías de captura de emisiones. Bajo los supuestos considerados, se ha observado que solamente la tecnología de post-combustión de captura de emisiones de CO₂ es rentable para la industria cementera debido a la falta de rentabilidad económica considerada para la tecnología de oxi-combustión. Así mismo, la aplicación de esta tecnología solamente es económicamente viable en plantas con hornos de 6 etapas con pre-calentador y pre-calcinador, ya que la antigüedad de estas plantas penaliza los tiempos de recuperación de inversión.

La Figura 32 representa los costes marginales de abatimiento de reducción de emisiones a partir de los niveles obtenidos en el año 2030. En esta figura se puede apreciar una variación relativamente baja en el coste de reducción de CO₂. Así mismo, se ha obtenido que el inicio de inversión en tecnologías de captura de emisiones se realiza con un precio de 53,1€/ton en las plantas de producción de clínker blanco y 66€/ton para las plantas de clínker gris. Por último, para la industria de cemento, bajo los parámetros definidos y asumiendo el factor de la curva de aprendizaje, será suficiente con un valor de 66,35€/ton para cumplir con los objetivos de reducción de emisiones en 2050.

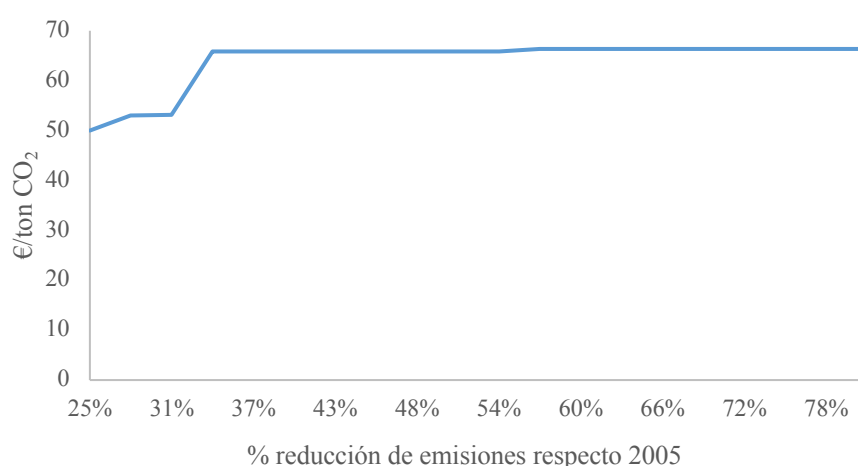


Figura 32: Evolución los costes marginales de abatimiento de CO₂

Los resultados obtenidos muestran que la manera óptima de reducir emisiones es implementando la captura de CO₂ primeramente en el proceso de producción de clínker blanco. Bajo los supuestos ya explicados, esta implementación comienza en un objetivo

de 28% respecto a niveles de 2005. La razón principal de este resultado es la menor penetración de combustibles alternativos en su proceso de producción por las restricciones técnicas ocasionadas por su color blanco y su mayor demanda térmica. Ambas razones hacen que la relación de emisiones directas derivadas de la quema combustibles respecto a tonelada de clínker producido sean mucho mayores, por lo que para un mismo coste de inversión en tecnologías de captura de emisiones son viables con anterioridad. La implementación de la tecnología de post-combustión en plantas integrales de producción de clínker gris sería necesaria a partir de un objetivo de reducción de emisiones de 33% respecto a los niveles de 1990. Estos resultados se muestran en la Figura 33.

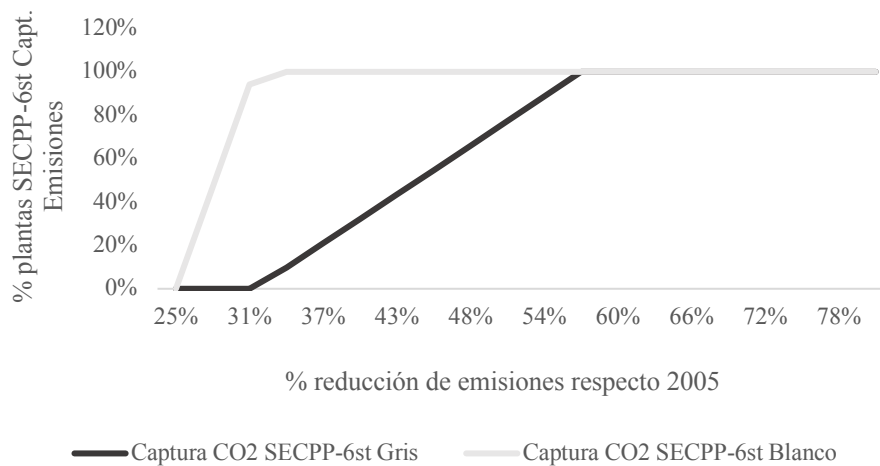


Figura 33: Implementación de la tecnología de captura de CO₂

Otro de los resultados destacados obtenidos en el caso base ha sido la no renovación de hornos de 4 etapas con pre-calentador y pre-calcinador, en los escenarios que no tienen en cuenta los ciclos de inversión del sector. En relación con esta afirmación, los resultados obtenidos, representados en la Figura 34, muestran que la renovación de estas plantas para la producción de clínker blanco comienza para un objetivo de reducción de 31% respecto al año 1990. En cuanto al clínker gris, esta renovación se producirá a partir de una reducción de 57%, tras haber aplicado a las plantas ya renovadas en el escenario base la tecnología de captura de CO₂. La explicación de esta afirmación es, como en el caso anterior, la mayor intensidad de emisiones del proceso de clínker blanco. Para reducir las emisiones del sector en un 80% respecto 2005 y cumplir el objetivo marcado por la Unión Europea, los resultados muestran que al menos el 88% de la producción de clínker gris y 100% de clínker blanco debe incluir la tecnología de captura de emisiones.

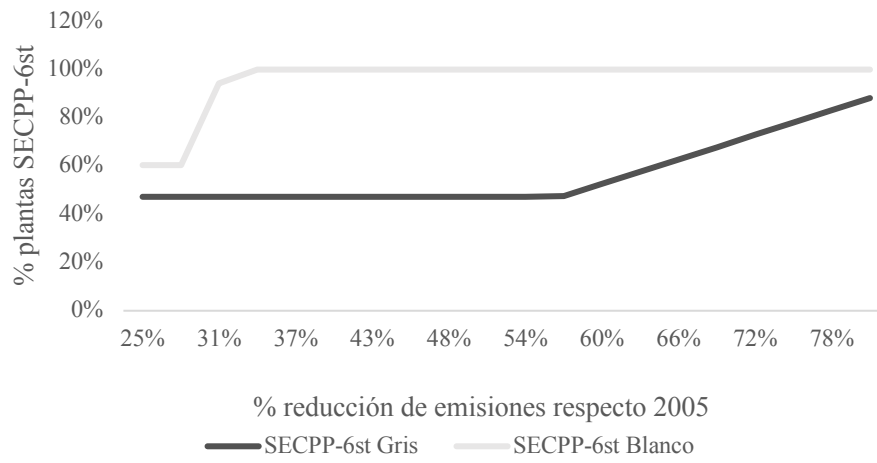


Figura 34: Renovación de hornos de producción de clínker

6 Conclusiones

Los resultados obtenidos mediante la simulación del escenario base y los diferentes casos sugeridos a partir de este, han permitido extraer una serie de conclusiones de se expresan en esta sección. Además, se comentará la metodología seguida para realizar este análisis y se hará una serie de recomendaciones para futuros estudios que partan de este proyecto.

6.1 Conclusiones sobre los resultados

Evolución de emisiones

El escenario base simulado ha estimado que el sector cementero emitirá para el horizonte 2030, 15,7 Mton CO₂. Para el medio plazo, año 2030, los resultados muestran que las emisiones del sector aumentarán un 9,3% respecto a 2015, principalmente debido al aumento de la producción de cemento. Este nivel de emisiones representa una reducción de 42,7% respecto a niveles de 2005, muy cercano al objetivo marcado por UE para los sectores ETS. Sin embargo, en caso de tener como referencia el límite referido a 1990, reducir las emisiones de CO₂ en un 40% respecto de ese año, el grado de cumplimiento sería muy pobre ya que no se cumple para ningún escenario, debido a ser un objetivo más estricto para la industria española.

En el medio plazo, las medidas de sustitución de combustibles fósiles por alternativos, renovación de hornos, y sustitución de contenido de clínker por materias primas alternativas en cemento son prácticamente suficientes para reducir las emisiones del sector y cumplir el objetivo marcado por la UE. Otra de las principales razones de la consecución de los objetivos europeos es el alto nivel de producción y emisiones del sector cementero en el año 2005, que comenzó su caída a partir de 2006 y aún en el horizonte de 2030 no se espera recuperar. Sin embargo, esto demuestra que el éxito de reducción de emisiones para 2050 vendrá marcado por la eliminación de emisiones del proceso de calcinación de la industria de cemento, etapa del proceso que no se ha visto afectada por las distintas tecnologías de reducción de emisiones propuestas en el medio plazo.

Los tres casos de precios de CO₂ simulados (10, 30, 50 €/ton CO₂) han mostrado que precios muy bajos de CO₂ supondrían grandes riesgos para el sector para cumplir los objetivos marcados por la hoja de ruta de Unión Europea debido a la pérdida de competitividad de los combustibles fósiles alternativos. Además, se ha observado que

para precios más altos, 50 € por tonelada, solamente se producen cambios en los costes del sistema, sin alterar las emisiones totales de este. Estos precios también influirán en los costes de producción, concluyendo que para costes medios por tonelada de CO₂ emitida, el coste de producción se conseguiría reducir consiguiendo la descarbonización de la industria. Precios muy bajos en el medio plazo reducirían los costes de producción de cemento, pero no tendría ningún efecto energético en la industria.

Resulta muy interesante observar, que, en ninguno de los escenarios simulados, la aparición de las tecnologías de captura de emisiones de CO₂ es viable para la industria hasta el año 2030. Esto se debe al alto consumo térmico y costes de mantenimiento de las tecnologías disponibles para el sector en el horizonte estudiado, por lo que se necesitarán precios de CO₂ mayores de los esperados para su implementación en el medio plazo. Sin embargo, en el escenario realizado para el largo plazo, tomando como referencia el horizonte 2050, se observa que estas tecnologías tendrán un papel crítico para el sector de cara a reducir las emisiones hasta un 80% respecto 1990. Este escenario, muestra la necesidad de instalación de las tecnologías de captura de emisiones en un horizonte cercano a 2030, iniciándose en el proceso de producción de clínker blanco en plantas con hornos de 6 etapas. Los resultados de este escenario presentan que para cumplir los objetivos de 2050 al menos el 88% de la producción de clínker gris y 100% de clínker blanco debe incluir la tecnología de captura de emisiones. El precio de CO₂ deberá alcanzar 66,35€/ton asumiendo un 25% de abaratamiento de los costes de inversión por el efecto de la curva de aprendizaje.

Transición del mix energético

En cuanto a la transición del vector energético de la industria, bajo los supuestos definidos para el escenario base se ha reducido considerablemente, hasta un 55%, la dependencia de los combustibles fósiles tradicionales, actualmente principal fuente energética del sector. No obstante, se han obtenido resultados muy interesantes que demuestran que para conseguir la descarbonización del sector cementero español en el medio plazo, la reducción de la importancia del coque en el mix energético del sector tendrá un papel fundamental.

La transformación energética de la industria está fuertemente relacionada con el precio de CO₂ y con la disponibilidad de combustibles alternativos y biomasa accesible para el sector. Es importante destacar que el alto contenido energético del coque de petróleo y su

bajo precio hacen este combustible muy competitivo respecto al resto en escenarios con bajos costes de emisiones de CO₂.

Así mismo, el sector del cemento español es considerado como una alternativa viable y con un alto potencial para la valorización energética de residuos. Las plantas productoras de cemento en España aún se encuentran por detrás de otros países de Unión Europea que poseen porcentajes de sustitución considerablemente más elevados. Por lo tanto, es imprescindible salvar las barreras legislativas del país que entorpecen una mayor implementación del co-procesado y que favorezcan la utilización energética de residuos frente a su vertido en vertederos. Adicionalmente, el uso de combustibles alternativos y biomasa está sometido a restricciones técnicas provocadas por su menor poder calorífico, humedad y alto contenido en cloro de estos combustibles, lo que limitará la quema de biomasa en los hornos de producción clínter.

Finalmente, el consumo eléctrico del sector industrial de cemento también aumentará debido a un incremento de la producción de cemento. Además, la electricidad aumenta su importancia dentro del mix energético como consecuencia del descenso del ratio clínter-cemento y aumento del consumo de cemento con mayor porcentaje de materias primas sustitutivas que requieren un mayor consumo de electricidad en su proceso de molienda. También, se concluye que no se espera un aumento extremo en la demanda eléctrica del sector en el corto-medio plazo por la no implementación de tecnologías de captura de CO₂.

Renovación de los hornos e impacto en la eficiencia energética del sector

Otro de los factores importantes del proceso de descarbonización de la industria es la renovación energética de los hornos de producción de clínter y el impacto de los ciclos de inversión de la cual se ha obtenido interesantes conclusiones durante la simulación de los diferentes escenarios. Los resultados mostrados en el escenario base y los diferentes análisis de sensibilidad llevados a cabo muestran una pobre renovación energética de los actuales hornos de producción de clínter. Solamente, un escenario en el que se alcancen mayores cotas de producción de cemento motivaría a la industria a renovar sus sistemas antes de completar la vida útil de las plantas en el corto plazo. Esto demuestra que las perspectivas de consumo de cemento en España no son suficientemente prometedoras para renovar su capacidad a pesar de que la vida útil de las plantas está comenzando a completarse. Sin embargo, si se incrementa la demanda de cemento y clínter en el corto

plazo, significaría una palanca de cambio hacia un sistema más eficiente debido a que una mayor cantidad de hornos con más antigüedad e ineficientes del parque cementero estarán operativos y por lo tanto viables para su renovación. No obstante, un incremento de la producción de cemento significaría un aumento considerable de las emisiones del sector no cumpliendo las metas marcadas por la UE en su hoja de ruta.

En cuanto al impacto de los ciclos de inversión en la eficiencia energética, se ha concluido que para la renovación de las plantas supone una gran mejora energética para el sector. La renovación de los hornos de producción de clínker gris tras el cumplimiento de una vida útil media de 40 años permite reducir 6,4% el consumo térmico en 2030 respecto 2015. La evolución de las emisiones del sector también se verán afectadas por el rejuvenecimiento de la capacidad actual del parque cementero llegando a un nivel de reducción de 44% en el horizonte 2030 respecto al nivel de emisiones de 2005.

De los resultados obtenidos para el largo plazo, más allá de 2030, se han alcanzado numerosas conclusiones relacionadas con la renovación energética y eficiencia de hornos de la industria de cemento. Primeramente, se renuevan las plantas de clínker blanco debido a sus mayores consumos energéticos y mayor intensidad de emisiones por tonelada de clínker producidas debido a la menor penetración de combustibles alternativos en su proceso de producción por las restricciones técnicas ocasionadas por su color blanco.

En cuanto a las tecnologías de post-combustión de captura de emisiones se ha observado que son únicamente rentables en las plantas más novedosas de producción de clínker debido a que estas plantas permiten una visión más a largo plazo para obtener beneficios de la implementación de este sistema. Por lo tanto, se espera que en las próximas décadas en las que la Unión Europea marque restricciones más ambiciosas, la renovación energética de las instalaciones actuales junto con la implementación de tecnologías de captura de emisiones sean clave para la descarbonización de la industria cementera.

6.2 Conclusiones sobre la metodología

Con el objetivo de evaluar la capacidad del sector industrial español de afrontar los objetivos de reducción de emisiones en el medio plazo, se ha diseñado un modelo de predicción de la industria de cemento, sujeto a diferentes escenarios coherentes y que reflejan las diferentes dinámicas del sector en cuanto a demanda y precio.

Un aspecto importante de la metodología seguida para la realización del informe es que no se trata de predecir el futuro, ni simular las situaciones más probables, si no de analizar una serie de futuros posibles que ofrezcan una visión general de las consecuencias de diferentes evoluciones de uno de los sectores más intensivos en emisiones de la industria española.

Para la elaboración del modelo se ha optado por la implementación de la metodología bottom-up estudiando el sector de cemento nacional. En este modelo considera un alto grado de detalle tecnológico para los diferentes actores que participan en el sector, permitiendo el análisis minucioso de cada una de las tecnologías de descarbonización del sector. Sin embargo, la implementación de esta metodología frente a un modelo top-down ha provocado la pérdida de una visión energética global del sector industrial.

Por último, para este informe sólo se ha evaluado el comportamiento del sector cementero frente a la implementación de tecnologías de eficiencia energética y reducción de emisiones obteniendo resultados concretos de precio de CO₂ para esta industria. No obstante es muy importante tener en cuenta otros sectores industriales relevantes, tanto de la industria de minerales no metálicos, como del resto de subsectores de la industria española con el objetivo de estudiar las interacciones entre estos de cara a diseñar una hoja de ruta coherente con todos los sectores e identificar las opciones de menor coste para todos ellos.

6.3 Recomendaciones para futuros estudios

Para poner punto y final a este informe, se ha incluido un último apartado de recomendaciones con el objetivo de ser este un punto de partida para futuros estudios relacionados tanto como el sector de cemento como para la industria española en general.

- La primera de las recomendaciones que se deberían considerar es la actualización de los datos de entrada de cara a una simulación a largo plazo hasta el horizonte 2050-2100 del modelo de la industria de cemento. Para este informe, se ha considerado una simulación a largo plazo sin tener en cuenta futuras alteraciones tanto de precio de combustibles y electricidad y su contenido de CO₂ como disponibilidad de biomasa y residuos para su valorización energética dentro del sector.

- Una de las conclusiones más destacadas de este informe es la no renovación de las plantas de producción de clínker tras haber superado su vida útil con los supuestos considerados. Por lo tanto se considera interesante estudiar los costes derivados de un mayor mantenimiento y gasto en reparaciones de las actuales plantas de cemento españolas de cara a conocer cuánto tiempo es rentable alargar el funcionamiento de las plantas y conocer su impacto económico.
- Así mismo, se ha asumido como correcta la hipótesis de no viabilidad económica de ciertas medidas de eficiencia energética como la reutilización de calor para generación eléctrica y renovación de sistema de molienda de cemento, sería recomendable comprobar la veracidad de esta afirmación tanto a medio como en el largo plazo.
- Como se ha concluido, el aumento del precio de CO₂ y los altos costes de inversión tendrán impacto negativo en los costes de producción. Esto provoca la pérdida de competitividad del sector frente a otros países, surgiendo la posibilidad de importar clínker y cemento para abastecer la demanda. Este efecto se ve magnificado especialmente en plantas cercanas a la costa por los menores costes de transporte del cemento importado (Allewi, Oggioni, Riccardi, & Rocco, 2017). Por lo tanto, uno de los estudios adicionales que se podrían considerar es evaluar el impacto de la aparición de productores externos sometidos a menores restricciones económicas, respecto a toneladas de CO₂ emitidas, en la implementación de nuevas tecnologías y descarbonización del sector, así como en el cierre de plantas para el sector de cemento en España. Medidas de política energética deberían de considerarse para evitar estos efectos (European Commission, 2017).

7 Referencias

- WSP - Parsons Brinckerhoff Engineering Services. (2015). *Industrial Decarbonisation & Energy Efficiency Roadmaps to 2050 - Cement*.
- A. S., & P. L. (2011). *Costes de reducción de CO2 en la industria española*. Economics for energy.
- AENOR - Asociación Española de Normalización y Certificación. (2011). *Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes*.
- Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado. (1994). *Orden de 13 de mayo de 1994 por la que se modifican las tarifas y los precios de los suministros de gas natural y gases manufacturados por canalización para usos domésticos y comerciales*.
- Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado. (1995). *Real Decreto-ley 5/1995, de 16 de junio, de creación de determinadas entidades de derecho público*.
- C. B., Peris, P. M., & Rodríguez, J. R. (2011). *Estado del arte de las tecnologías de captura y almacenamiento de CO2 en la industria del cemento*.
- Canadian Industry Program for Energy Conservation. (2001). *Energy Consumption Benchmark Guide: Cement Clinker Production*.
- Cement Sustainability Initiative. (2009). *Development of State of the Art-Techniques in Cement Manufacturing: Trying to Look Ahead*.
- Cement Sustainability Initiative. (2016). *Cement Industry Energy and CO2 Performance "Getting the Numbers Right"*.
- Cement Sustainability Initiative. (2018). *Technology Roadmap Low-Carbon Transition in the Cement Industry*.
- Comisión de expertos de transición energética. (2018). *Análisis y propuestas para la descarbonización*.
- Comisión Europea. (2011). *Hoja de ruta hacia una economía hipocarbónica competitiva en 2050*. Comisión Europea, Bruselas.
- CSI/ECRA. (2017). *Development of State of the Art-Techniques in Cement Manufacturing: Trying to Look Ahead*.
- Cuartas, J. (5 de Diciembre de 1988). Inaugurado el gasoducto de Enagas entre Cantabria y Asturias. *El País*.
- D. G.-G. (2014). *Long-Term Analysis of the Spanish Environmental Policies using the Life Cycle Assessment Method and Energy Optimisation Modelling*.

- D. L., N. M., N. S., C. P., & P. F. (2017). *A Techno-economic analysis and systematic review of carbon capture and storage (CCS) applied to the iron and steel, cement, oil refining and pulp and paper industries, as well as other high purity sources.*
- E. A., G. O., R. R., & M. R. (2017). *The carbon leakage effect on the cement sector under different climate policies.*
- El periódico de la energía. (13 de marzo de 2017). El Gobierno trabaja en un Plan Nacional Integrado de Energía y Clima. *El periódico de la energía.*
- Ente Vasco de la Energía. (2014). *Energía en la Industria Vasca 2012.*
- Ente Vasco de la Energía. (2014). *Energía en la Industria Vasca 2012.*
- European Commission. (2017). *Carbon Leakage List 2021 - 2030.*
- Fischedick, M., Joyashree, R., Abdel-Aziz, A., Acquaye, A., Allwood, J., Ceron, J.-P., . . . Tanaka, K. (2014). *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Fundación CEMA. (2013). *Recuperación de residuos en fábricas de cemento y protección del clima.*
- Fundación Gas Natural Fenosa. (2011). *La tecnología del gas a través de su historia.* LID Editorial.
- G-Advisory. (2015). *Informe base "CRECIMENTA 2030": propuesta de reactivación industrial de Oficemen al Ministerio de Industria, Energía y Turismo.*
- H. J. (18 de noviembre de 2017). *Petcoke ban: Shifting back to coal is easier said than done for cement companies.* Recuperado el 11 de junio de 2018, de <https://www.livemint.com/Money/AvYlpcFLb9TEghBcLRowHL/Petcoke-ban-Shifting-back-to-coal-is-easier-said-than-done.html>
- IDAE. (2017). *Balances de Energía Final.*
- IDAE. (2017). *Indicadores energéticos de detalle (2015).*
- IDAE-BCG. (2011). *Evolución de la tecnología y prospectiva de costes por tecnologías de energías renovables a 2020-2030.*
- IHS. (2017). *Energy Projections as of July 2017.*
- M. d., & D. G. (2000). *BIOMASS FOR GREENHOUSE GAS EMISSION REDUCTION.*

- M. F., J. R., A. A.-A., A. A., J. A., J.-P. C., . . . K. T. (2014). *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- M. R., T. G., J. C., R. C., A. S., F. M., & T. G. (2018). *Análisis de escenarios futuros para el sector eléctrico en España para el periodo 2025-2050*.
- Ministerio Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente. (noviembre de 2017). Anteproyecto de ley de cambio climático y transición energética.
- Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medioambiente. (2017). *Informe nacionales de gases de efecto invernadero*. Tabla de datos.
- Ministerio de Agricultura, P. A. (s.f.). *Industria no sujeta al comercio de derechos de emisión - Mitigación: políticas y medidas*. Recuperado el 19 de enero de 2018, de <http://www.mapama.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/industria.aspx>
- Ministerio de energía, turismo y agenda digital. (2017). *Plan nacional de acción de eficiencia energética 2017-2020*. Ministerio de energía, turismo y agenda digital.
- Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. (2007). *Plan de Acción 2018-2012*.
- Ministerio de Medio Ambiente - Dirección general de calidad y evaluación ambiental. (2004). *Guía de Mejores Técnicas Disponibles en España de fabricación de cemento*.
- Naciones Unidas. (2015). *Convención Marco sobre el Cambio Climático - Aprobación del Acuerdo de París*.
- Odyssee. (Octubre de 2017). ODYSSEE data base.
- Odyssee-Mure. (2015). *Perfil Eficiencia Energética: España*.
- Oficemen. (2016). *Anuario del sector cementero español 2015*.
- Oficemen. (2017). *Hoja de ruta de la industria española del cemento para la reducción de emisiones de carbono a 2050*.
- Oficemen. (2017). *Oficemen - Fábricas de cemento en España*. Recuperado el 11 de junio de 2018, de <https://www.oficemen.com/el-cemento/fabricas-cemento-espana/>
- Peris, P. M. (8 de de mayo de 2018). Modelado de la Industria de Cemento en España.

- R. C.-F., & A. A. (2014). *Carbon capture, storage and utilisation technologies: A critical analysis and comparison of their life cycle environmental impacts*. Elsevier Ltd.
- Ricardo-AEA. (2013). *Decarbonisation of heat in industry - A review of the research evidence*.
- Secretaría General de Industria y PYME. (2015). *Agenda para el fortalecimiento del sector industrial en España*. Ministerio de Economía, Industria y Competitividad.
- Sedigas. (2016). *Informe anual - El gas en España*.
- Sedigas. (2018). *Sedigas Asociación Española de Gas; El mercado del gas*. Recuperado el 12 de febrero de 2018, de <https://www.sedigas.es/consumidores/pagina.php?p=230>
- T. G., & J. P.-Á. (2018). *A Review of Cross-sector Decarbonisation Potentials in the European Energy Intensive Industry*.
- Thollander, P., & Palm, J. (2013). *Improving Energy Efficiency in Industrial Energy Systems*.
- Thollander, P., Danestig, M., & Rohdin, P. (2007). *Energy policies for increased industrial energy efficiency: Evaluation of a local energy programme for manufacturing SMEs*.
- Touriño, P. P. (2017). *Análisis del impacto de las políticas climáticas europeas en la competitividad de la economía española*. Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI).
- United Nations Development Programme. (2009). *Biomass Energy for Cement Production: Opportunities in Ethiopia*.
- Vellinga, P., & Herb, N. (1999). *Industrial transformation science plan*. International Human Dimensions Programme.

8 Anexos

8.1 Glosario

año años definidos para la simulación del modelo (2015, 2020, 2025 y 2030)

cl tipo de clínker producido (gris y blanco)

tcl tipo de producción de clínker (SECP, SECPP-4st y SECPP-6st)

mcl materia prima para clínker (caliza y arcilla)

comb_alt_fos combustible alternativo fósil

comb_alt_bio combustible alternativo parcialmente con biomasa

biomasa combustible alternativo biomasa

enercomb poder calorífico combustibles

maxcombalt implementación máxima de combustibles alternativos

minrenovado número de plantas mínimo renovado

cinv coste inversión de instalación de hornos

emc factor de emisiones

redpreciocapt % reducción coste por factor de curva de aprendizaje

QCL clínker producido

QCOM combustibles consumidos

QRM materias primas consumidas para la producción de cemento

INVCL inversión en nuevos hornos de producción de clínker

CostiPostCCS coste inversión tecnología captura de emisiones por post-combustión

PostCCS % toneladas de clínker producido con tecnología CAC por post-combustión

CostiOxiCCS coste inversión tecnología captura de emisiones por oxi-combustión

OxiCCS % toneladas de clínker producido con tecnología CAC por oxi-combustión

8.2 Código modelo sector cemento

Sets

```
tcem tipo de cemento /gris_1, gris_2, gris_3, gris_4, gris_5,
blanco_1, blanco_2/
clinker tipo de clinker /Gris, Blanco/
```

*CLINKER

```
mck materias primas cklinker /caliza, arcilla/
mck2 materis primas cklinker 2 /normal/
```

*CONSUMOS

```
fclinker tipo de fabricación de clinker /SECP, SECPP-4st, SECPP-6st/
```

*COSTES

```
tipocost tipo de costes /cfijo, cvar, cinv/
```

*Tipos de combustibles utilizados -> Luis Pe-Ferrer ha añadido el uso de biomasa

```
comb Combustibles /Carbon, Gas_Natural, GLP, Fuel_Oil, Gasolina,
Gasoleo, Coque, Comb_Alt_Fosil, Comb_Alt_Bio, Biomasa/
```

*adcem otras adiciones en producción de cemento /Yeso, Puzolanas, Escorias, Cenizas_volantes/

```
mpcem materias primas en producción de cemento / Caliza, Yeso,
Puzolanas, Escorias, Cenizas_volantes/
```

```
ejecucion ejecuciones de la curva MAC /1*20/
```

```
year año de simulación /2015, 2020, 2025, 2030/
```

```
j parts of plants /planta_int, fabr_mol/
```

```
;  
*
```

Parameters

*DEMANDA CEMENTO

```
dcem(year,tcem) demanda de cemento + exportaciones[Mton]
export(year,clinker) exportaciones clinker [Mton]
```

*COSTES

```
costcomb(comb,year) costes combustibles
costelect(year) coste electricidad [€-MWh]
emisionesco2elec(year) CO2 en cada MWh [€-MWh]
pimpcem(tcem) costes importación de cemento [€-ton]
prm(mck, mck2) price of raw materials
padic(mpcem) precio otras adiciones
```

*CLINKER en PLANTA INTEGRADA

```
picostf(fclinker,clinker) planta integrada costes fijos
picostv(fclinker,clinker) planta integrada costes variables
picosti(fclinker,clinker) planta integrada costes de inversión
piimpck(clinker) costes clinker importado planta integrada
```

*PLANTA INTEGRADA

```
fabcem(tipocost,tcem) coste fabricación de cemento (planta integrada)
[€-ton]
```


*FABRICA DE MOLIENDA
fabccemo(tipocost,tcem) coste fabricación de cemento (fabrica de molienda) [€-ton]

*CONSUMOS
porck(mck,clinker) materias primas en clinker[ton material-ton clinker]
matpricem(mpcem,tcem) materias primas en produccion de cemento[ton material-ton cemento]
mpclink(tcem) materias primas en cemento[ton material-ton cemento]

elecclink(fclinker,clinker) consumo de electricidad en la fabricación de clinker [kWh-ton ck]
cotermck(fclinker,clinker) consumo termico para la fabricacion de clinker [Gj-Ton ck]
eleccem(j,tcem) consumo de electricidad en la fabricación de cemento [kWh-ton cem]
enercomb(comb) poder calorífico de los combustibles

*CAPACIDADES
procem(j,clinker) capacidad de produccion de cemento [Mton]
prock(fclinker,clinker) capacidad de produccion de clinker [Mton]

*CONSUMO BIOMASA ->Luis Pe-Ferrer ha añadido el uso de biomasa
picostbio(fclinker,clinker) costes fijos+variables consumo biomasa por planta [€-Mton]

*EMISIONES
emis1(mck,mck2) emisiones clinkers [ton CO2ton material]
emiscomb(comb) emisiones de combustibles [ton CO2ton combustible]

*Para CASO_BASE
inverpost(fclinker,clinker)
inveroxi(clinker)

*Para BUCLE
costeco2(ejecucion)
emis(ejecucion) nivel de emisiones de CO2 en cada ejecucion(Mton)
mac(ejecucion) coste marginal de abatimiento de CO2 (€ por tonCO2)
costetotal(ejecucion) costes totales de producción de cemento
combustibles(ejecucion,comb,fclinker,clinker) cantidad de combustibles proceso clinker[Mton]
invtec(ejecucion,fclinker,clinker) inversión en nueva capacidad de clinker
invpost(ejecucion,fclinker,clinker) cantidad de clinker producido de cada clinker que se instala Post-CCS [Mton]
invoxi(ejecucion,clinker) cantidad de clinker producido de cada clinker que se instala Oxi-CCS [Mton]
redpreciocapt1(ejecucion)
consumoelectricidad1(ejecucion)
combustiblesPost(ejecucion,comb,fclinker,clinker)
combustiblesOxi(ejecucion,comb,clinker)

*CAPTURA CO2
costecapturaco2Oxi(fclinker,clinker) coste inversión+costes operación tecnología Oxicomustión Captura CO2 [€-ton clk]
eleccaptOxi(fclinker,clinker) demanda eléctrica de procesos CCS Oxi-Combustión [kWh-ton ck]
cotercaptOxi(fclinker,clinker) demanda térmica de procesos CCS Oxi-Combustión [Gj-Ton ck]

costecapturaco2Post(fclinker,clinker) coste inversión+costes operación
tecnología Postcombustión Captura CO2 [€-ton clk]
eleccaptPost(fclinker,clinker) demanda eléctrica de procesos CCS Post-
Combustión [kWh-ton ck]
cotercaptPost(fclinker,clinker) demanda térmica de procesos CCS Post-
Combustión [Gj-Ton ck]

*Tecnología reutilización calor para generación de energía
elecreucalor(fclinker,clinker) cantidad de electricidad producida del
calor recuperado [kWh-ton ck]
invreucalor(fclinker,clinker) coste inversión tecnología recuperación
calor [M€-ton clk]

```
$CALL gdxxrw DatoscemedemLuis.xlsx index=index_cem!a1
$GDXIN DatoscemedemLuis.gdx
$LOAD prm, padic, matpricem, picostf , picostv, picosti, piimpck,
fabcem, costcomb, elecclink, eleccem, pimpcem, dcem, cotermck, enercomb,
porck, procem, prock, mpclink, emis1,
emiscomb, fabcemo, picostbio, costecapturaco2Oxi, costecapturaco2Post, elec
captOxi, cotercaptOxi, eleccaptPost, cotercaptPost, elecreucalor, invreucal
or, export, costelect, emisionesco2elec
$GDXIN
```

```
Scalar precioco2 precio del CO2 [€-ton] /50/;
Scalar bau nivel base de emisiones de CO2 [MtonCO2] (se ajusta la
primera vez que se ejecuta el modelo CEO_MAC)/0/
Scalar reduccionco2 Reducción total CO2 [%] /0/
Scalar Co2incremento nivel de reduccion deseado (pu) (incremento entre
ejecuciones del bucle de MAC)/0.039/
Scalar maxbiomasa biomasa en residuos [%] /0.4/
Scalar mincombalttotalgris mínimo suma de combustibles alternativos en
gris[%] /0.45/
Scalar mincombalttotalblanco mínimo suma de combustibles alternativos
en blanco[%]/0.2/
Scalar redpreciocapt reducción inversión tecnologías capt. emisiones
(curva aprendizaje) [%] /0/
Scalar eficienciaPostCCS eficiencia captura CO2 tecnología Oxi-CCS
/0.85/
Scalar eficienciaOxiCCS eficiencia captura CO2 tecnología Oxi-CCS
/0.55/
Scalar restriccioncemento Activar(1)-Desactivar(0) restricción NO
IMPORTAR cemento /1/
Scalar restriccionclinker Activar(1)-Desactivar(0) restricción NO
IMPORTAR clinker /1/
Scalar restriccionalternativosclinkertotal Activar(1)-Desactivar(0)
restricción x% Comb. Alternativos en clinker gris-blanco/1/
Scalar restriccionalternativosbiomasa Activar(1)-Desactivar(0)
restricción x% biomasa en comb alternativos/1/
Scalar restriccionOxicombustion Activar(1)-Desactivar(0) restricción
Oxi-combustión clinker SECPP Gris+Blanco/1/
Scalar restriccionPostcombustion Activar(1)-Desactivar(0) restricción
Post-combustión clinker Gris+Blanco/1/
Scalar minrenovado número de plantas renovadas /0/
Scalar restriccionInversiones Activar(1)-Desactivar(0) restricción
obligar al modelo a remodelar una planta cada año/0/
Scalar restriccionReuCalor Activar(1)-Desactivar(0) restricción
reutilización de calor/0/
```

```
;
```

```
*
```

Variables

*Materias Primas Clinker Caliza + Arcilla

qrmg(mck, mck2, fclinker) cantidad clinker gris

qrmb(mck, mck2, fclinker) cantidad clinker blanco

*Combustibles

qcomb(comb, fclinker, clinker) cantidad de combustibles proceso
clinker[Mton]

*para Cemento

qcepr(j, tcem) cemento producido

inqcem(j, tcem) inversión en nueva capacidad de cemento [Mton]

impcem(tcem) cemento importado [Mton]

*para Clinker

qclinker(fclinker, clinker) clinker producido

inqclinker(fclinker, clinker) inversión en nueva capacidad de clinker

qpiimpck(clinker) cantidad clinker importado planta integrada [Mton]

*Tecnología captura CO2

PostCCS(fclinker, clinker) cantidad de clinker producido con Post-CCS
[%]

costPostCCS Coste total instalación Post-CCS [M€]

qcombPost(comb, fclinker, clinker) cantidad de combustibles proceso
Post-CCS[Mton]

OxiCCS(clinker) cantidad de clinker producido de cada clinker que se
instala Oxi-CCS [%]

costOxiCCS Coste total instalación CCS [M€]

qcombOxi(comb, clinker) cantidad de combustibles proceso Oxi-CCS[Mton]

*Tecnología reutilización calor para generación de energía

reucalor(fclinker, clinker) cantidad de clinker sometido a recuperación
de calor [%]

mpii Coste materias primas clinker gris+blanco [M€]

mpcemii Coste materias primas en producción de cemento [M€]

combustiblesii Coste combustibles en producción de clinker [M€]

clinkerii Costes fijos+variables en clinker [M€]

impclinkii Coste importaciones de cemento [M€]

impcemii Coste importaciones cementos [M€]

cementoii Costes fijos+variables+inversión en cemento [M€]

invclinkerii Costes inversión nueva capacidad clinker [M€]

invcementoii Costes inversión nueva capacidad cemento [M€]

electii Costes Electricidad [M€]

emisii Costes Emisiones Clinker+Combustibles+Electricidad [M€]

emisionesdescarbonatacion Emisiones en el proceso de descarbonatacion
[Mton]

emisionesindirectas Emisiones indirectas electricidad [Mton]

emisionesdirectas Emisiones directas combustibles [Mton]

emisiones Emisiones totales [Mton]

consumoelectricidad

costbiomasa Coste extra por consumo de biomasa [M€]

emisionesPostCCS Emisiones Evitadas por Tecnología Post-CCS

emisionesOxiCCS Emisiones Evitadas por Tecnología Oxi-CCS

costelectOxiCCS Costes electricidad de Tecnología Oxi-CCS

costelectPostCCS Costes electricidad de Tecnología Post-CCS

elecprodreucalor Electricidad producida por Tecnología Recuperación de
calor [kWh]

costreucalor Costes totales de inversión Tecnología Recuperación de
calor [M€]

ciclosinversion
ciclosinversion2

z costes totales de producción de cemento;

Positive Variable qrmg, qrmb, qcepr, inqcem, qpiimpck
, qclinker, qcomb, inqclinker, impcem, inqcem, OxiCCS, PostCCS, qcombOxi, qcomb
Post, reucalor, ciclosinversion;

*

Equations

Cost define la función objetivo
demandac(tcem) demanda mínima de cemento
energiatermck(fclinker,clinker) demanda de energía termica para
produccion de clinker gris y blanco
restric3(mck,fclinker) consumo de materias primas gris
restric4(mck,fclinker) consumo de materias primas blanco
restric5(j) cemento producido < prod max. de cemento (gris)
restric6(j) cemento producido < prod max. de cemento (blanco)
restric7(fclinker,clinker) clinker producido < prod max. de clinker
(gris y blanco)
restric8(clinker) cantidad mínima de producción de clinker renovado
restric9 consumo de clinker (tipo de planta (j))gris
restric10 consumo de clinker (tipo de planta (j))blanco
restric11 reduccion Co2
restric12(fclinker,clinker) el x% del calor de residuos es de biomasa
restric13(clinker) prueba no importar clinker
restric14(tcem) prueba no importar cemento
restric15(clinker)
restric16(fclinker,clinker)
restric18(fclinker) el x% del calor demandado es comb alternativos en
gris
restric19(fclinker) el x% del calor demandado es comb alternativos en
blanco

rest_mp
rest_mpcemii
rest_combustiblesii
rest_clinker
rest_impclink
rest_impcem
rest_cementoii
rest_invclinkerii
rest_invcementoii
rest_elect
rest_emis
rest_emisionesdescarbonatacion
rest_emisionesindirectas
rest_emisionesdirectas
rest_emisiones
rest_consumoelectricidad
rest_costbiomasa
rest_costOxiCCS
rest_emisionesOxiCCS
rest_costPostCCS
rest_emisionesPostCCS
rest_costelectOxiCCS
rest_costelectPostCCS
energiatermckOxiCCS(clinker)
energiatermckPostCCS(fclinker,clinker)
rest_elecprodreucalor

```

rest_costreucalor
rest_ciclosinversion
rest_ciclosinversion2
;
*
-----
*Coste materias primas clinker gris+blanco [M€]
rest_mp .. mp11 =e=
    sum((mck, mck2, fclinker), prm(mck, mck2)*qrmg(mck,
mck2, fclinker))
+    sum((mck, mck2, fclinker), prm(mck, mck2)*qrmb(mck,
mck2, fclinker));
*Coste materias primas en producción de cemento [M€]
rest_mpcemii .. mpcemii =e=
    sum(j, ((sum(tcem,
matpricem('Caliza', tcem)*qcepr(j, tcem)))*padic('Caliza')
+    (sum(tcem,
matpricem('Yeso', tcem)*qcepr(j, tcem)))*padic('Yeso')
+    (sum(tcem,
matpricem('Puzolanas', tcem)*qcepr(j, tcem)))*padic('Puzolanas')
+    (sum(tcem,
matpricem('Escorias', tcem)*qcepr(j, tcem)))*padic('Escorias')
+    (sum(tcem,
matpricem('Cenizas_volantes', tcem)*qcepr(j, tcem)))*padic('Cenizas_vola
ntes'))));
*Coste combustibles en producción de clinker [M€]
rest_combustiblesii..combustiblesii =e=

sum((comb, fclinker, clinker), costcomb(comb, '2030')*qcomb(comb, fclinker,
clinker))
+
sum((comb, clinker), costcomb(comb, '2030')*qcombOxi(comb, clinker))
+
sum((comb, fclinker, clinker), costcomb(comb, '2030')*qcombPost(comb, fclink
er, clinker));
*Costes fijos+variables en clinker [M€]
rest_clinker .. clinkerii =e=

sum((fclinker, clinker), picostf(fclinker, clinker)*qclinker(fclinker, cli
nker))+

sum((fclinker, clinker), picostv(fclinker, clinker)*qclinker(fclinker, cli
nker));
*Costes fijos+variables en cemento [M€]
rest_cementoii .. cementoii =e=
    sum(j, sum(tcem, fabcem('cfijo', tcem)*qcepr(j, tcem)))+
    sum(j, sum(tcem, fabcem('cvar', tcem)*qcepr(j, tcem)));
*Inversión nueva capacidad clinker [M€]
rest_invclinkerii .. invclinkerii =e=
sum((fclinker, clinker), picosti(fclinker, clinker)*inqclinker(fclinker, c
linker));
*Inversión nueva capacidad cemento [M€]
rest_invcementoii..invcementoii=e=
    sum(j, sum(tcem, fabcem('cinv', tcem)*inqcem(j, tcem)));
*Importación clinker [M€]
rest_impclink .. impclinkii =e=
    sum(clinker, piimpck(clinker)*qpiimpck(clinker));
*Importación cemento [M€]
rest_impcem .. impcemii =e=
    sum(tcem, pimpcem(tcem)*impcem(tcem));
*Costes Electricidad [M€]

```

```

rest_elect .. electii =e=

(sum(clinker, sum(fclinker, qclinker(fclinker, clinker) *elecclink(fclinker, clinker)))
+
sum(j, sum(tcem, qcepr(j, tcem) *eleccem(j, tcem))) *costelect('2030')/1000
+
costelectOxiCCS
+
costelectPostCCS
-
elecprodreucalor*costelect('2030')/1000;
*Costes Emisiones Clinker+Combustibles+Electricidad [M€]
rest_emis .. emisii =e=
*costes emisiones clinkerización

sum((mck, mck2, fclinker), qrmg(mck, mck2, fclinker) *emis1(mck, mck2)) *precioco2
+
sum((mck, mck2, fclinker), qrmb(mck, mck2, fclinker) *emis1(mck, mck2)) *precioco2
*costes emisiones combustión
+
sum((comb, fclinker, clinker), qcomb(comb, fclinker, clinker) *emiscomb(comb)) *precioco2
-
emisionesOxiCCS*precioco2
+
sum((comb, clinker), qcombOxi(comb, clinker) *emiscomb(comb)) *precioco2
-
emisionesPostCCS*precioco2
+
sum((comb, fclinker, clinker), qcombPost(comb, fclinker, clinker) *emiscomb(comb)) *precioco2
*costes emisiones electricidad
+
(sum((clinker, fclinker), qclinker(fclinker, clinker) *elecclink(fclinker, clinker))
+
sum((j, tcem), qcepr(j, tcem) *eleccem(j, tcem))) *precioco2 *emisionesco2elec('2030')/1000
+
sum(clinker, OxiCCS(clinker) *qclinker('SECPP-6st', clinker) *eleccaptOxi('SECPP-6st', clinker) *precioco2 *emisionesco2elec('2030')/1000)
+
sum((fclinker, clinker), PostCCS(fclinker, clinker) *qclinker(fclinker, clinker) *eleccaptPost(fclinker, clinker) *precioco2 *emisionesco2elec('2030')/1000)
-
elecprodreucalor*precioco2 *emisionesco2elec('2030')/1000;
*emisiones proceso de clinkerización
rest_emisionesdescarbonatacion..emisionesdescarbonatacion =e=
sum((mck, mck2, fclinker), (1-PostCCS(fclinker, 'gris')) *qrmg(mck, mck2, fclinker) *emis1(mck, mck2))
+
sum((mck, mck2, fclinker), (1-PostCCS(fclinker, 'blanco')) *qrmb(mck, mck2, fclinker) *emis1(mck, mck2));
*emisiones indirectas
rest_emisionesindirectas..emisionesindirectas =e=

(sum((fclinker, clinker), qclinker(fclinker, clinker) *elecclink(fclinker, clinker))
+
sum((j, tcem), qcepr(j, tcem) *eleccem(j, tcem))) *emisionesco2elec('2030')/1000
+
sum(clinker, OxiCCS(clinker) *qclinker('SECPP-6st', clinker) *eleccaptOxi('SECPP-6st', clinker) *emisionesco2elec('2030')/1000)

```

```

+
sum((fclinker,clinker),PostCCS(fclinker,clinker)*qclinker(fclinker,clinker)*eleccaptPost(fclinker,clinker)*emisionesco2elec('2030')/1000
-
elecprodreucalor*emisionesco2elec('2030')/1000;
*emisiones directas
rest_emisionesdirectas..emisionesdirectas =e=

sum((comb,fclinker,clinker),qcomb(comb,fclinker,clinker)*emiscomb(comb));
rest_consumoelectricidad..consumoelectricidad =e=

sum((clinker,fclinker),qclinker(fclinker,clinker)*elecclink(fclinker,clinker))
+
sum((j,tcem),qcepr(j,tcem)*eleccem(j,tcem))
+
sum(clinker,OxiCCS(clinker)*qclinker('SECPP-6st',clinker)*eleccaptOxi('SECPP-6st',clinker))
+
sum((fclinker,clinker),PostCCS(fclinker,clinker)*qclinker(fclinker,clinker)*eleccaptPost(fclinker,clinker));
*suma total emisiones del modelo
rest_emisiones..emisiones =e=

sum((comb,fclinker,clinker),qcomb(comb,fclinker,clinker)*emiscomb(comb))
-
emisionesOxiCCS
+
sum((comb,clinker),qcombOxi(comb,clinker)*emiscomb(comb))
-
emisionesPostCCS
+
sum((comb,fclinker,clinker),qcombPost(comb,fclinker,clinker)*emiscomb(comb))
+
sum((mck,mck2,fclinker),qrmg(mck,mck2,fclinker)*emis1(mck,mck2))
+
sum((mck,mck2,fclinker),qrmb(mck,mck2,fclinker)*emis1(mck,mck2))
+
(sum((fclinker,clinker),qclinker(fclinker,clinker)*elecclink(fclinker,clinker))
+
sum((j,tcem),qcepr(j,tcem)*eleccem(j,tcem)))*emisionesco2elec('2030')/1000
+
sum(clinker,OxiCCS(clinker)*qclinker('SECPP-6st',clinker)*eleccaptOxi('SECPP-6st',clinker)*emisionesco2elec('2030')/1000)
+
sum((fclinker,clinker),PostCCS(fclinker,clinker)*qclinker(fclinker,clinker)*eleccaptPost(fclinker,clinker)*emisionesco2elec('2030')/1000)
-
elecprodreucalor*emisionesco2elec('2030')/1000;
*Costes extra por uso de biomasa [ME]
rest_costbiomasa .. costbiomasa =e=

sum((fclinker,clinker),qcomb('Biomasa',fclinker,clinker)*picostbio(fclinker,clinker));

*Emisiones evitadas Post-CCS
rest_emisionesPostCCS .. emisionesPostCCS =e=

(sum((comb,fclinker,clinker),qcomb(comb,fclinker,clinker)*emiscomb(comb))*PostCCS(fclinker,clinker))
+
sum(fclinker,sum((mck,mck2),qrmg(mck,mck2,fclinker)*emis1(mck,mck2))*PostCCS(fclinker,'gris'))

```

```

+
sum(fclinker, sum((mck, mck2), qrmb(mck, mck2, fclinker) * emis1(mck, mck2)) * PostCCS(fclinker, 'blanco')) * eficienciaPostCCS;

*Emisiones evitadas Oxi-CCS
rest_emisionesOxiCCS .. emisionesOxiCCS =e=

sum((comb, clinker), OxiCCS(clinker) * eficienciaOxiCCS * qcomb(comb, 'SECPP-6st', clinker) * emiscomb(comb));

*Coste instalación Post-CCS
rest_costPostCCS..costPostCCS =e=
(1-
redpreciocapt) * sum((fclinker, clinker), PostCCS(fclinker, clinker) * qclinker(fclinker, clinker) * costecapturaco2Post(fclinker, clinker));

*Coste instalación Oxi-CCS
rest_costOxiCCS..costOxiCCS =e=
(1-
redpreciocapt) * sum(clinker, OxiCCS(clinker) * qclinker('SECPP-6st', clinker) * costecapturaco2Oxi('SECPP-6st', clinker));

*Costes electricidad Oxi-combustión
rest_costelectOxiCCS..costelectOxiCCS =e=
sum(clinker, OxiCCS(clinker) * qclinker('SECPP-6st', clinker) * eleccaptOxi('SECPP-6st', clinker) * costelect('2030')/1000);

*Costes electricidad Post-combustión
rest_costelectPostCCS..costelectPostCCS =e=

sum((fclinker, clinker), PostCCS(fclinker, clinker) * qclinker(fclinker, clinker) * eleccaptPost(fclinker, clinker) * costelect('2030')/1000);

*Electricidad generada con reutilización de calor
rest_elecprodreucalor..elecprodreucalor =e=

sum((fclinker, clinker), reucalor(fclinker, clinker) * qclinker(fclinker, clinker) * elecpreucalor(fclinker, clinker));

*Inversión necesario reutilización de calor
rest_costreucalor..costreucalor =e=

sum((fclinker, clinker), reucalor(fclinker, clinker) * qclinker(fclinker, clinker) * invreucalor(fclinker, clinker));
*Ecuación de optimización
Cost.. z =e=

mpii+mpcemii+combustiblesii+clinkerii+invclinkerii+invcimientoii+impcli
nkii+impcemii+cementoii+electii+emisii+costbiomasa+costOxiCCS+costPost
CCS+costreucalor;

*RESTRICCIONES
*R1 Demanda de cemento
demandac(tcem) .. dcem('2030', tcem) =e=
sum(j, qcepr(j, tcem)) + impcem(tcem);

*R2 Consumo combustibles de cada proceso
energiatermck(fclinker, clinker) ..
qclinker(fclinker, clinker) * cotermck(fclinker, clinker) =e= sum(comb,
qcomb(comb, fclinker, clinker) * enercomb(comb));

```



```

energiatermckOxiCCS(clinker).. qclinker('SECPP-
6st',clinker)*cotercaptOxi('SECPP-
6st',clinker)*OxiCCS(clinker)=e=sum(comb,qcombOxi(comb,clinker)*enerco
mb(comb));
energiatermckPostCCS(fclinker,clinker)..
qclinker(fclinker,clinker)*cotercaptPost(fclinker,clinker)*PostCCS(fcl
inker,clinker)=e=sum(comb,
qcombPost(comb,fclinker,clinker)*enercomb(comb));

*R12 el x% del calor aportado por comb alternativos para fabricación
de clinker viene de biomasa
restric12(fclinker,clinker)..maxbiomasa*(qcomb('Comb_Alt_Fosil',fclink
er,clinker)*enercomb('Comb_Alt_Fosil')+qcomb('Comb_Alt_Bio',fclinker,c
linker)*enercomb('Comb_Alt_Bio')+
qcomb('Biomasa',fclinker,clinker)*enercomb('Biomasa'))=e=qcomb('Bimas
a',fclinker,clinker)*enercomb('Biomasa')*restriccionalternativosbiomas
a;
restric18(fclinker)..restriccionalternativosclinkertotal*(qcomb('Comb_
Alt_Fosil',fclinker,'Gris')*enercomb('Comb_Alt_Fosil')+qcomb('Comb_Alt
_Bio',fclinker,'Gris')*enercomb('Comb_Alt_Bio')+qcomb('Biomasa',fclink
er,'Gris')*enercomb('Biomasa'))=l=mincombalttotalgris*qclinker(fclinke
r,'Gris')*cotermck(fclinker,'Gris');
restric19(fclinker)..restriccionalternativosclinkertotal*(qcomb('Comb_
Alt_Fosil',fclinker,'Blanco')*enercomb('Comb_Alt_Fosil')+qcomb('Comb_A
lt_Bio',fclinker,'Blanco')*enercomb('Comb_Alt_Bio')+qcomb('Biomasa',fc
linker,'Blanco')*enercomb('Biomasa'))=l=mincombalttotalblanco*qclinker
(fclinker,'Blanco')*cotermck(fclinker,'Blanco');

*R3 consumo de materias primas gris
restric3(mck,fclinker)..qclinker(fclinker,'Gris')*porck(mck,'Gris')=l=
sum(mck2,qrmg(mck,mck2,fclinker));

*R4 consumo de materias primas blanco
restric4(mck,fclinker)..
qclinker(fclinker,'Blanco')*porck(mck,'Blanco') =l= sum(mck2,
qrmb(mck,mck2,fclinker));

*R5 cemento producido < prod max. de cemento (gris)
restric5(j)..qcepr(j,'gris_1')+qcepr(j,'gris_2')+qcepr(j,'gris_3')+qce
pr(j,'gris_4')+qcepr(j,'gris_5') =l=
procem(j,'Gris')+inqcem(j,'gris_1')+inqcem(j,'gris_2')+inqcem(j,'gris_
3')+inqcem(j,'gris_4')+inqcem(j,'gris_5');

*R6 cemento producido < prod max. de cemento (blanco)
restric6(j).. qcepr(j,'blanco_1')+qcepr(j,'blanco_2') =l=
procem(j,'Blanco')+inqcem(j,'blanco_1')+inqcem(j,'blanco_2');

*R7 clinker producido < prod max. de clinker (gris,blaco)
restric7(fclinker,clinker).. qclinker(fclinker,clinker) =l=
inqclinker(fclinker,clinker)+prock(fclinker,clinker);

*R8 la capacidad mínima renovada en la industria de cemento
restric8(clinker)..restriccionInversiones*inqclinker('SECPP-
6st',clinker)=l=minrenovado*1/29*sum(fclinker,prock(fclinker,clinker))
;

*R9 consumo de clinker (tipo de planta(j)) gris
restric9..
sum(j,qcepr(j,'gris_1')*mpclink('gris_1'))+sum(j,qcepr(j,'gris_2')*mpc
link('gris_2'))+sum(j,qcepr(j,'gris_3')*mpclink('gris_3'))+sum(j,qcepr
(j,'gris_4')*mpclink('gris_4'))+sum(j,qcepr(j,'gris_5')*mpclink('gris_

```

```

5'))+export('2030','gris')=e=qpiimpck('Gris')+sum(fclinker,qclinker(fc
linker,'Gris'));
*Pablo -> restric9(j)..      (qcepr(j,'gris_1')*mpclink ('gris_1'))+
(qcepr(j,'gris_2')*mpclink ('gris_2'))+(qcepr(j,'gris_3')*mpclink
('gris_3'))+(qcepr(j,'gris_4')*mpclink
('gris_4'))+(qcepr(j,'gris_5')*mpclink ('gris_5'))  =l=
qpiimpck(j,'Gris')+ (sum(fclinker,
qclinker(fclinker,'Gris')))$pint(j);

*R10 consumo de clinker (tipo de planta(j)) blanco
restric10.. sum(j,qcepr(j,'blanco_1')*mpclink
('blanco_1'))+sum(j,qcepr(j,'blanco_2')*mpclink('blanco_2'))+export('2
030','blanco')=e=qpiimpck('Blanco')+(sum(fclinker,
qclinker(fclinker,'Blanco')));
*Pablo -> restric10(j)..      (qcepr(j,'blanco_1')*mpclink
('blanco_1'))+ (qcepr(j,'blanco_2')*mpclink ('blanco_2'))  =l=
qpiimpck(j,'Blanco')+ (sum(fclinker,
qclinker(fclinker,'Blanco')))$pint(j)  ;

*R11  emisiones totales del sector<BAU(1-red)
restric11..bau*(1-reduccionco2) =G= emisiones;

restric13(clinker).. restriccionclinker*qpiimpck(clinker)=e=0;
restric14(tcem).. restriccioncemento*impcem(tcem)=e=0;

*El porcentaje de clinker gris/blanco afectado por oxicombustión no
puede ser mayor de 100%
restric15(clinker)..OxiCCS(clinker)=l=1*restriccionOxicombustion;

*El porcentaje de clinker gris/blanco afectado por postcombustión no
puede ser mayor de 100%
restric16(fclinker,clinker)..PostCCS(fclinker,clinker)=l=1*restriccion
Postcombustion;

file TMP /tmp.txt/
$onecho > tmp.txt
  i="Resultados_CASO_BASE_Capt25%.xlsx"
$offecho

Model CEMENTO
/cost,demandac,energiatermck,restric3,restric4,restric5,restric6,restri
c7,restric8,restric9,restric10,restric12,restric13,restric14,restric1
5,restric16,restric18,restric19,rest_consumoelectricidad,rest_emisione
s,rest_mp,rest_mpcemii,rest_combustiblesii,rest_clinker,rest_cementoii
,rest_invclinkerii,rest_invcementoii,rest_impclink,rest_impcem,rest_el
ect,rest_costbiomasa,rest_emis,rest_emisionesdescarbonatacion,rest_emi
sionesindirectas,rest_costOxiCCS,rest_emisionesOxiCCS,rest_costPostCCS
,rest_emisionesPostCCS,rest_costelectOxiCCS,rest_costelectPostCCS,ener
giatermckOxiCCS,energiatermckPostCCS,rest_elecprodreucalor,rest_costre
ucalor,rest_emisionesdirectas/;
Model CEMENTO_MAC
/cost,demandac,energiatermck,restric3,restric4,restric5,restric6,restri
c7,restric9,restric8,restric10,restric11,restric12,restric13,restric1
4,restric15,restric16,restric18,restric19,rest_consumoelectricidad,rest
_emisiones,rest_mp,rest_mpcemii,rest_combustiblesii,rest_clinker,rest
_cementoii,rest_invclinkerii,rest_invcementoii,rest_impclink,rest_impce
m,rest_elect,rest_emis,rest_costbiomasa,rest_emisionesdescarbonatacio
n,rest_emisionesindirectas,rest_costOxiCCS,rest_emisionesOxiCCS,rest_c
ostPostCCS,rest_emisionesPostCCS,rest_costelectOxiCCS,rest_costelectPo
stCCS,energiatermckOxiCCS,energiatermckPostCCS,rest_elecprodreucalor,r
est_costreucalor,rest_emisionesdirectas/;

```

*primeramente se obtiene el BAU:

```
SOLVE CEMENTO USING NLP MINIMIZING z;
abort $ (CEMENTO.modelstat > 2) "No se ha encontrado
solucion optima";
bau = emisiones.L;
```

```
inverpost(fclinker,clinker)=
PostCCS.L(fclinker,clinker)*qclinker.L(fclinker,clinker);
inveroxi(clinker)= OxiCCS.L(clinker)*qclinker.L('SECPP-6st',clinker);
$ontext
put TMP
```

```
putclose 'var=emisiones rng=EmisionesTotales!p1
var=emisionesdescarbonatacion rng=EmisionesTotales!p3
var=emisionesdirectas rng=EmisionesTotales!p5 var=emisionesindirectas
rng=EmisionesTotales!p7' / 'var=qcomb rng=Combustibles!p1
var=consumoelectricidad rng=Combustibles!p33' / 'var=qclinker
rng=InversionesTecnología!p1 var=inqclinker
rng=InversionesTecnología!p6' / 'var=z rng=CosteTotal!p1'
/'par=inverpost rng=CapturaCO2!p1 par=inveroxi rng=CapturaCO2!p6' /
```

```
execute_unload 'resultados.gdx' emisiones emisionesdescarbonatacion
emisionesdirectas emisionesindirectas qcomb consumoelectricidad
qclinker inqclinker z inverpost inveroxi
```

```
execute 'gdxrw.exe resultados.gdx SQ=n EpsOut=0
O="Resultados_CASO_BASE_XXX.xlsx" @tmp.txt';
```

Display

```
dcem, costcomb, pimpcem, prm, padic, picostf, picostv, picosti, piimpck, fabcem
, fabcemo, porck, matpricem, mpclink, elecclink, cotermck, eleccem, enercomb, p
rocm, prock, emis1, emiscomb, picostbio, costecapturaco2Oxi, costecapturaco
2Post, eleccaptOxi, cotercaptOxi, eleccaptPost, cotercaptPost, export, coste
lect, emisionesco2elec, year, inverpost, inveroxi;
```

* BUCLES:

*OBLIGAR AL MODELO A REDUCIR EMISIONES -> 30 ejecuciones reduciendo en cada una 2% adicional respecto a nivel inicial

```
loop(ejecucion,
SOLVE CEMENTO_MAC USING NLP MINIMIZING z;
abort $ (CEMENTO_MAC.modelstat > 2) "No se
ha encontrado solucion optima";
costeco2(ejecucion)= precioco2;
mac(ejecucion) = restric11.M;
emis(ejecucion) = emisiones.L;
costetotal(ejecucion)=z.l;
```

```
combustibles(ejecucion,comb,fclinker,clinker)=qcomb.L(comb,fclinker,clinker);
```

```
combustiblesPost(ejecucion,comb,fclinker,clinker)=qcombPost.L(comb,fclinker,clinker);
```

```
combustiblesOxi(ejecucion,comb,clinker)=qcombOxi.L(comb,clinker);
invtec(ejecucion,fclinker,clinker)=
inqclinker.L(fclinker,clinker);
```

```

                                invpost(ejecucion,fclinker,clinker)=
PostCCS.L(fclinker,clinker)*qclinker.L(fclinker,clinker);
                                invoxi(ejecucion,clinker)=
OxiCCS.L(clinker)*qclinker.L('SECPP-6st',clinker);
                                redpreciocapt1(ejecucion) = redpreciocapt;

consumoelectricidad1(ejecucion)=consumoelectricidad.L;
                                if
((sum((fclinker,clinker),PostCCS.L(fclinker,clinker)*qclinker.L(fclinker,clinker))/25.6) > 0.05,
                                redpreciocapt = 0.25;
                                else
                                redpreciocapt = 0;
                                );

                                reduccionco2 = reduccionco2 + CO2increment;
);

```

\$offtext

*AUMENTO GRADUAL PRECIO CO2 -> 30 ejecuciones aumentando 5% adicional respecto a precio inicial

\$ontext

```

                                loop(ejecucion,
                                SOLVE CEMENTO_MAC USING NLP MINIMIZING z;
                                abort $ (CEMENTO_MAC.modelstat > 2) "No se
ha encontrado solucion optima";
                                costeco2(ejecucion)= precioco2;
                                mac(ejecucion) = restric11.M;
                                emis(ejecucion) = emisiones.L;
                                costetotal(ejecucion)=z.1;

combustibles(ejecucion,comb,fclinker,clinker)=qcomb.L(comb,fclinker,clinker);

                                invtec(ejecucion,fclinker,clinker)=
inqlinker.L(fclinker,clinker));
                                invpost(ejecucion,fclinker,clinker)=
PostCCS.L(fclinker,clinker)*qclinker.L(fclinker,clinker);
                                invoxi(ejecucion,clinker)=
OxiCCS.L(clinker)*qclinker.L('SECPP-6st',clinker);
                                minrenovado = minrenovado+1;
                                precioco2 = precioco2*1.5;
);

```

Display

bau,dcem,costcomb,pimpcem,prm,padic,picostf,picostv,picosti,piimpck,fa
bcem,fabcemo,porck,matpricem,mpclink,elecclink,cotermck,eleccem,enerco
mb,procem,prock,emis1,emiscomb,picostbio,costecapturaco2Oxi,costecaptu
raco2Post,eleccaptOxi,cotercaptOxi,eleccaptPost,cotercaptPost,export,c
ostelect,emisionesco2elec,redpreciocapt;

```

put TMP putclose 'par=costeco2 rng=PrecioCO2!a1'/'par=mac
rng=MACCO2!a1'/'par=emis rng=EmisionesTotales!a1' / 'par=combustibles
rng=Combustibles!a1 par=combustiblesPost rng=Combustibles!f1
par=combustiblesOxi rng=Combustibles!k1'/'par=invtec
rng=InversionesTecnología!a1' / 'par=costetotal rng=CosteTotal!a1'
/'par=invpost rng=CapturaCO2!a1 par=invoxi
rng=CapturaCO2!f1'/'par=redpreciocapt1
rng=reduccion!a1'/'par=consumoelectricidad1 rng=elect!a1'/

```

```
execute_unload 'tmp.gdx' costeco2 mac emis combustibles
combustiblesPost combustiblesOxi invtec costetotal invpost invoxi
redpreciocapt1 consumoelectricidad1
```

```
execute 'gdxxrw.exe tmp.gdx SQ=n EpsOut=0
O="Resultados_CASO_BASE_Capt25%.xlsx" @tmp.txt'
```

```
execute 'del tmp.gdx
tmp.txt'
```

```
$offtext
```