

# Costes de reducción de CO<sub>2</sub> en la industria española

## 1. Introducción

Desde la aparición del nuevo mercado europeo de emisiones de gases de efecto invernadero (EU-ETS), los sectores industriales tienen un incentivo explícito a controlar sus emisiones de estos gases. Los objetivos de reducción acordados para 2020, o la posibilidad de abandono del mecanismo de asignación gratuita de permisos a ciertas industrias a partir de 2013 son, entre otros, retos que introducen nuevas incertidumbres en una industria que aún no se ha repuesto de los efectos de la crisis económica presente en nuestro país. Es precisamente en este marco donde se encuadra la necesidad de evaluar el potencial de las medidas de reducción de emisiones y los costes que éstas implican. Este análisis de costes de mitigación de CO<sub>2</sub> tiene especial relevancia en España, donde la tendencia de emisiones de los últimos veinte años no es alentadora y el margen de maniobra para cumplir los compromisos internacionales adquiridos en Kioto y Europa se va reduciendo cada día.

El enfoque utilizado habitualmente para la estimación de los costes de mitigación de CO<sub>2</sub> es la construcción de curvas de costes marginales de reducción (curvas MAC): son curvas que relacionan distintos grados de reducción en las emisiones, con el coste marginal de dicha reducción. Las curvas pueden construirse mediante la estimación de expertos (McKinsey & Company, 2007), mediante modelos de equilibrio general (Paltsev y cols., 2005), o mediante modelos *bottom-up* (Hidalgo y cols., 2005; Szabo y cols., 2006). Evidentemente, cada aproximación tiene ventajas e inconvenientes (Kesicki, 2010). Este artículo muestra una primera estimación, mediante modelos *bottom-up*, de los costes marginales de abatimiento de CO<sub>2</sub> en España para los sectores industriales más intensivos en consumo de energía y emisiones: eléctrico, acero y cemento. El conjunto de dichos sectores representan el 30% del total de emisiones nacionales.

En la sección 2 se presenta una breve descripción de cuál es la situación de España en cuanto a emisiones de GEI se refiere. El apartado 3 describe una serie de modelos de los sectores que han sido analizados y cuyos resultados se presentan en el epígrafe 4. La sección 5 enumera las conclusiones.

## 2. Situación de las emisiones en España

Desde 1990 las emisiones de GEI en España han seguido una trayectoria creciente e impar-

Alberto Santamaría

Pedro Linares

Instituto de Investigación Tecnológica,  
Universidad Pontificia Comillas

**CUADRO 1**  
**EMISIONES DE GEI EN ESPAÑA EN 2008**

Fuente de emisiones de GEI	[kton CO <sub>2</sub> eq]	[Porcentaje sobre el total]
Industrial dentro de ETS	163.457	40,13
Generación eléctrica	88.730	21,78
Cemento	23.400	5,75
Refino de petróleo	14.600	3,58
Siderurgia	7.970	1,96
Otros procesos e industrias	31.085	7,06
Industrial fuera de ETS	31.167	7,65
Combustión no industrial	29.605	7,27
Transporte	116.346	28,56
Agricultura	33.531	8,23
Tratamiento residuos	16.941	4,16
Otras fuentes	16.262	3,99
<b>Total</b>	<b>407.309</b>	<b>100,00</b>

Fuente: Ministerio de Medio Ambiente.

ble que sólo se ha visto frenada en estos últimos años por causas no deseables, como la actual crisis económica y financiera. A finales de 1990 las emisiones registradas fueron de 286,62 Mton CO<sub>2</sub>eq y en aquel momento España contaba con el permiso, acordado en Kioto, de aumentar sus emisiones un 15% respecto a ese nivel en 2020, pudiendo llegar sin penalización a los 330 Mton CO<sub>2</sub>eq. En la actualidad, las emisiones registradas (405,7 Mton CO<sub>2</sub>eq en 2008), cuya descomposición se muestra en el cuadro 1, superan ampliamente los objetivos propuestos.

Se puede apreciar en el cuadro 1 que los sectores eléctrico, cemento, refino y siderúrgico son responsables de más del 80% de las emisiones sujetas al comercio europeo. Por otro lado, es destacable el papel del sector transporte en el total de emisiones de GEI.

### 3. Modelos sectoriales

Para tratar de estimar los costes de la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> en los principales sectores emisores de la industria se han utilizado modelos *bottom-up* que tratan de simular el comportamiento de cada uno de estos sectores. Dichos modelos tratan de minimizar los costes de producción teniendo en cuenta la demanda a cubrir y un objetivo de reducción en las emisiones, permitiendo cambios en las tecnologías empleadas, el uso de combustibles y materias primas, o la inversión en nuevas tecnologías.

Los sectores analizados son el cemento, acero y eléctrico.

#### 3.1. Modelo de cemento

La industria del cemento en España, representada esquemáticamente en el gráfico 1, cuenta con dos tipos de centrales: aquellas que se dedican al proceso productivo completo (fabricación de clínker y cemento) y aquellas que sólo fabrican cemento a partir de clínker importado (fábricas de molienda). Una vez producido el clínker (o importado), éste se mezcla con otras adiciones en unos molinos eléctricos rotatorios para producir cemento.

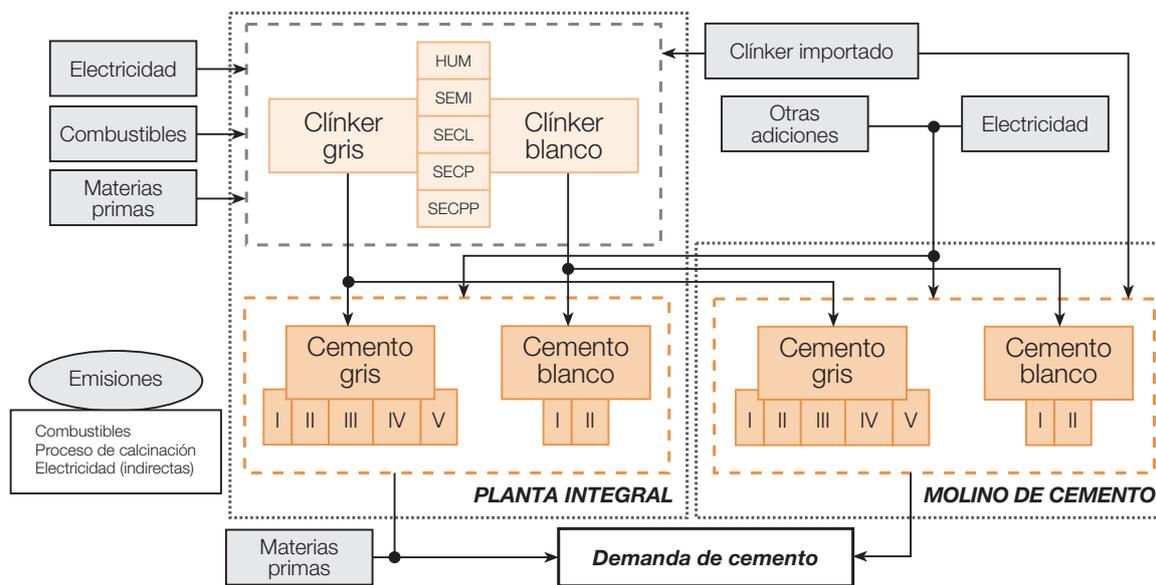
No existe diferenciación en el proceso de producción de cemento. Sin embargo, para producir clínker sí existen diferentes tecnologías disponibles en función de la sequedad de las materias primas empleadas. En España la mayor parte de los hornos de clínker son de tecnología seca con precalentador (SECP) o precalentador + precalcinador (SECPP), las cuales presentan los rendimientos más altos de la industria. Por otro lado, cabe mencionar los focos de emisiones de GEI en este sector. La producción de clínker es la responsable del total de emisiones directas en esta industria. Aproximadamente el 60% de estas emisiones son debidas a las reacciones químicas que sufren las materias primas en el horno, y el 40% restante son debidas a la combustión. Además se tienen en cuenta también las emisiones indirectas causadas por el consumo eléctrico en hornos y moliendas.

#### 3.2. Modelo de acero

El sector del acero en España se puede modelar con los dos tipos de hornos existentes: hornos de oxígeno básico (BOF) y hornos por arco eléctrico (EAF). El proceso que se lleva a cabo en ambos es completamente distinto: mientras que en los altos hornos de fundición se parte de mineral de hierro para producir arrabio, el cual se introduce en los hornos BOF para fabricar acero, en los hornos de arco eléctrico se suele introducir chatarra, quizá con ciertas cantidades de arrabio u otros constituyentes como el DRI (*direct reduced iron*), que se funden para producir el material final. El gráfico 2 esquematiza el proceso.

La electricidad consumida por los hornos eléctricos es cinco veces superior a la consumida por la vía integral, lo que implica un aumento de las emisiones indirectas de este sector. Por el con-

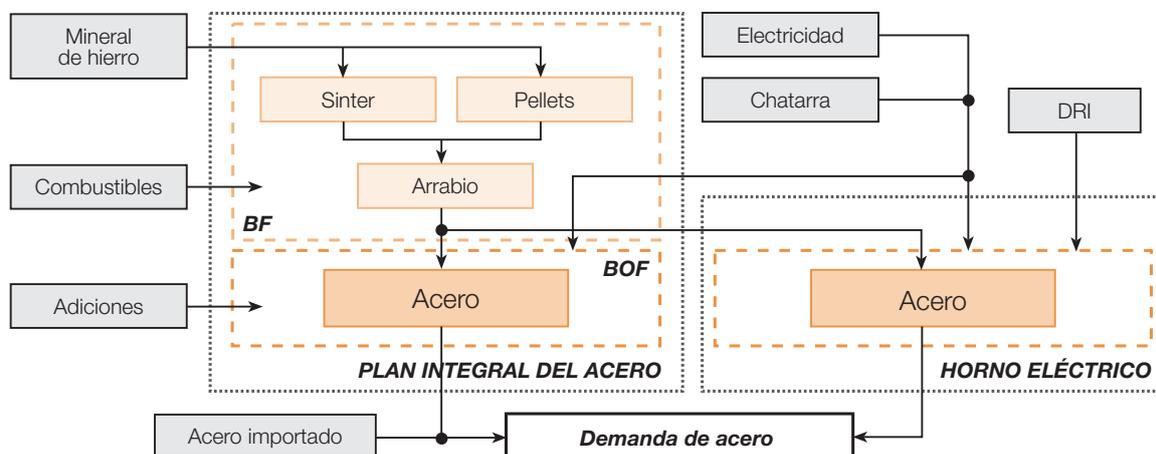
GRÁFICO 1  
ESQUEMA DEL MODELO DEL SECTOR CEMENTERO



trario, la actividad más intensiva en emisiones se da en las plantas BF-BOF, debido al uso de combustibles fósiles, donde se debe transformar el mineral de hierro en arrabio, consumiendo gran cantidad de energía, y posteriormente en acero.

Una característica importante de la industria siderúrgica en España es que, al contrario que en el resto de Europa, la vía principal de producción de acero es la eléctrica, con un 75% del total de la capacidad instalada (EUROFER-www.eurofer.org).

GRÁFICO 2  
ESQUEMA DEL MODELO DE ACERO



**CUADRO 2**  
**DEMANDA DE CEMENTO EN ESPAÑA EN 2008**

Tipo de cemento	Cemento Gris					Cemento Blanco	
	I	II	III	IV	V	I	II
Demanda (Mton)	7	25	1,4	1,8	0,2	0,2	0,88

Fuente: OFICEMEN.

### 3.3. Modelo de sector eléctrico

El modelo de generación eléctrica es una versión simplificada del modelo desarrollado en el IIT (Linares y cols., 2008) en el que se analizan la operación del sistema y las nuevas inversiones necesarias para cubrir la demanda eléctrica durante un período determinado. Este modelo considera catorce tipos de tecnologías caracterizadas en función del combustible usado y su factor de eficiencia, a saber, nuclear, carbón nacional e importado, fuel, gas, ciclos combinados, cogeneración, hidráulica, bombeo, mini hidráulica, biomasa, eólica terrestre y marina, y solar fotovoltaica y térmica. El mix energético resultante es el que minimiza los costes variables y de inversión, cumpliendo además una restricción en el nivel de emisiones permitidas por esta industria.

## 4. Resultados

En primer lugar se presenta una sección con los parámetros de entrada más relevantes usados en el estudio, así como sus fuentes. Los modelos del sector cemento y acero optimizan la operación de 2008. El análisis presentado para el sector eléctrico corresponde a 2020.

### 4.1. Parámetros de entrada

La demanda del sector cementero, como se muestra en el cuadro 2, se descompone en los siete grupos de cemento tipo.

Debido al supuesto de que la demanda de cemento debe ser cubierta en todo caso, es posible que bajo una restricción fuerte en el nivel de emisiones de CO<sub>2</sub> permitidas, la única alternativa viable sea la importación, bien de clínker o de cemento. Los precios estimados por el autor, basados en informes procedentes de Oficemen, se muestran en el cuadro 3.

Por otro lado, la capacidad máxima de producción al año, tanto de clínker como de cemento, queda expresada en el cuadro 4.

Por último, cabe citar el valor fijado como referencia base para las emisiones del sector (BAU) que alcanza las 23,7 Mton CO<sub>2</sub> al año.

En cuanto al sector del acero, la demanda total de acero bruto considerada para el período de estudio es de 18 Mton, la cual implica un volumen base de emisiones de CO<sub>2</sub> de 14,16 Mton. Los costes de importación ascienden a 491,5 €/ton de acero y 206,15 €/ton de chatarra importada (Evans Miranda, 2009). En cuanto al consumo eléctrico, se considera que un horno BOF y un horno de arco eléctrico consumen una media de 0,128 MWh y 0,544 MWh por tonelada de acero producida respectivamente (Meyers & Buen, 1993). Los consumos de combustible sólo se consideran necesarios en el proceso BOF, y su coste se incluye como coste variable dentro de la estructura de costes de esta tecnología.

El modelo del sector eléctrico devuelve el mix óptimo (menor coste) de generación para cubrir la demanda de energía eléctrica en 2020. La demanda supuesta es de 295,4 TWh (estimación reali-

**CUADRO 3**  
**PRECIO DE IMPORTACIÓN DE CLÍNKER Y CEMENTO**

	Clínker	Cemento					
		I	II	III	IV	V	
Precio (€/ton)	Gris	47	55	50	52	55	55
	Blanco	55	66	58	—	—	—

**CUADRO 4**  
**CAPACIDAD MÁXIMA DE PRODUCCIÓN DE CLÍNKER Y CEMENTO**

Tecnología		Clínker					Cemento	
		HUM	SEMI	SECL	SECP	SECPP	Planta integral	Molienda
Capacidad (Mton)	Gris	0,9	0,9	7	10	10	30	10
	Blanco	0,1	0,1	0,5	2	2	1	1

Fuente: Estimación realizada por el autor a partir del Ministerio de Medio Ambiente, 2003.

zada con datos de demanda de REE para 2008 con un 0,5% de crecimiento anual), parte de la cual debe ser cubierta con renovables de acuerdo al objetivo planteado por el Gobierno para 2020. Las diferentes centrales de generación, cuyas características fundamentales se exponen en el cuadro 5, han sido agrupadas en función del tipo de combustible que utilizan. Además, el nivel de emisiones base considerado para este sector es de 91,5 Mton CO<sub>2</sub>.

Bajo estos supuestos, los costes marginales de abatimiento para los distintos sectores estudiados se presentan a continuación.

## 4.2. Curvas MAC

### 4.2.1. Cemento

La industria del cemento en España es una de las industrias más eficientes a nivel global ya que la gran mayoría de sus fábricas integran la tec-

nología más eficiente disponible actualmente (Ministerio de Medio Ambiente, 2003). Este hecho ha sido favorecido gracias a la baja humedad de las materias primas disponibles en España (que evitan un proceso previo de secado necesario en la fabricación del clínker), pero hace que las alternativas de reducción de emisiones se limiten a cambios en el mix de combustibles empleados y materias primas alternativas con menor contenido en carbono, o a la importación tanto de clínker como de cemento. El gráfico 3 muestra la curva de costes marginales de abatimiento para la industria cementera.

Se puede apreciar un rango moderado y relativamente bajo de variación en el coste de reducción de CO<sub>2</sub>. Este valor es fuertemente dependiente de los precios de importación del clínker. Cuando el nivel de emisiones tope fijado para esta industria decrece un 6% la alternativa más rentable consiste en importar parte de la demanda de cemento gris tipo I (mayor contenido de clínker) con el consiguiente ahorro en combustibles y materias primas para la producción de esa parte de clínker. Si la restricción se endurece, alcanzando una reducción del 15%, los resultados muestran que la quinta parte de la producción de cemento gris se cubriría con importaciones. Además, reducciones superiores al 20% obligarían también a prescindir de la producción de cemento blanco, cubriendo la totalidad de su demanda con importaciones, como se indica en el gráfico 4. Para restricciones más elevadas en el nivel permitido de emisiones, el resultado que se observa es que cuanto más estricto es el límite permitido, mayor volumen de clínker es importado.

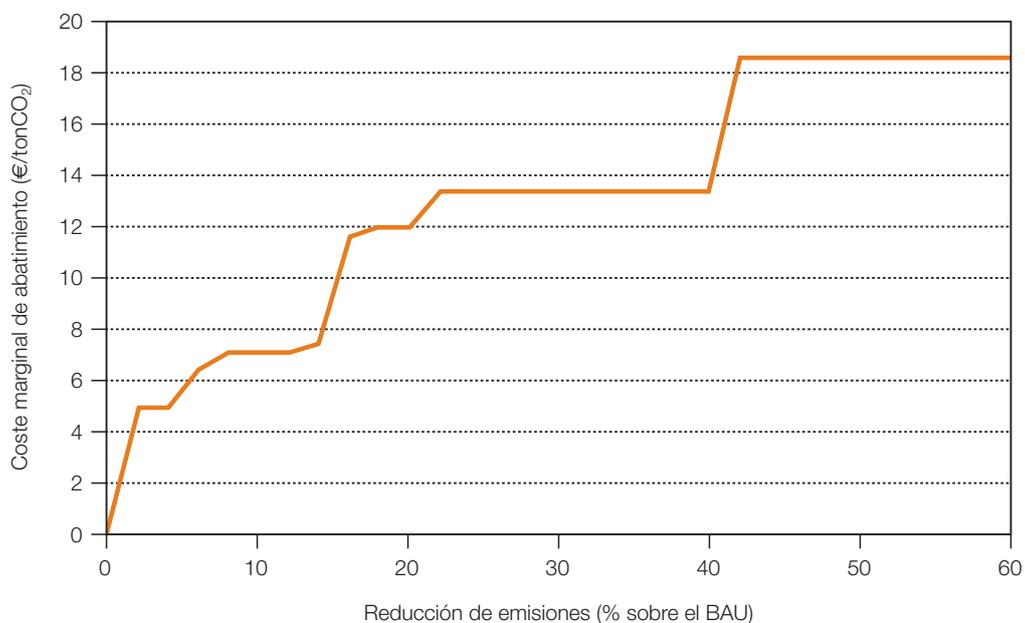
Es importante resaltar que desde el punto de vista de las emisiones, el elemento clave en la industria del cemento es el clínker. Las restricciones en el nivel máximo de emisiones afectan directamente a la producción nacional de clínker, mientras que la producción de cemento se ve indirectamente afectada por este hecho. La ren-

**CUADRO 5**  
**POTENCIA INSTALADA EN ESPAÑA A 2008**

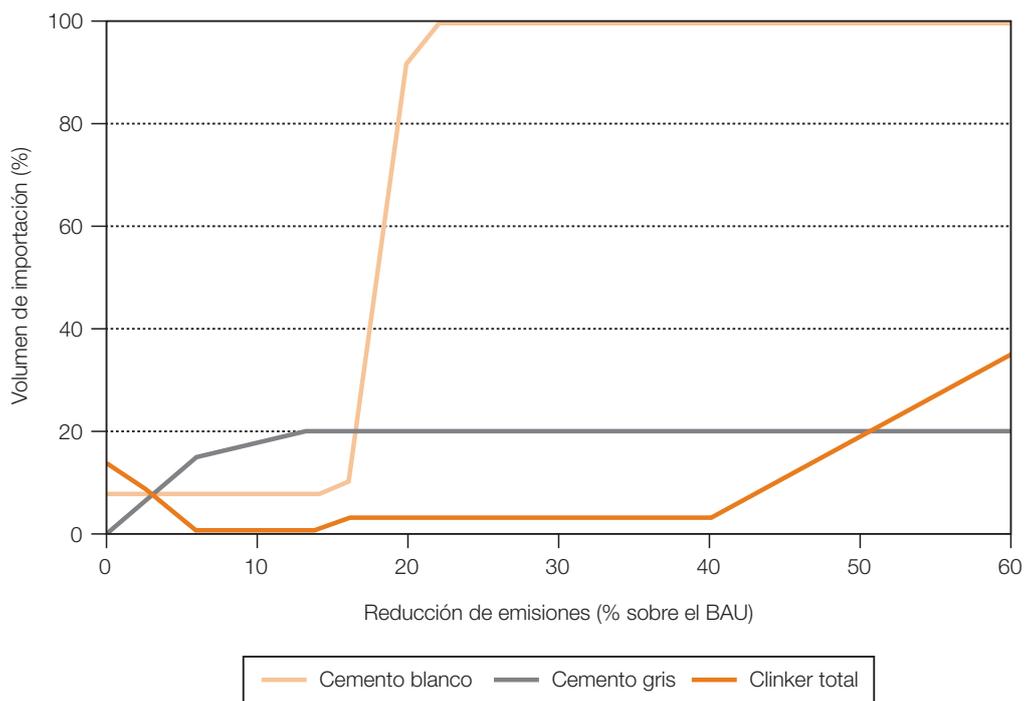
Central	Capacidad (MW)	Eficiencia térmica (pu)	Factor de emisiones (ton CO <sub>2</sub> /MWh)
Nuclear	7.716	0,32	—
Fuel/Gas	4.401	0,40	0,780
Carbón	11.359	0,38	0,920
Ciclo combinado	21.667	0,50	0,400
Cogeneración	7.132	0,55	0,550
Biomasa	578	0,27	0,005
Hidráulica	13.910	—	—
Mini hidráulica	1.938	—	—
Bombeo	2.747	—	—
Eólica	16.187	—	—
Solar	3.270	—	—

Fuente: REE.

**GRÁFICO 3**  
**CURVA MAC DEL SECTOR DEL CEMENTO EN ESPAÑA**



**GRÁFICO 4**  
**VOLUMEN DE IMPORTACIONES DE CEMENTO Y CLÍNKER**



tabilidad en la producción de este último dependerá fuertemente del incremento del coste asociado a su materia prima fundamental, el clínker, como consecuencia de la severidad de la normativa medioambiental que sea establecida.

#### 4.2.2. Acero

El sector del acero presenta aún menos elasticidad que la industria cementera. Como puede apreciarse en el gráfico 5, el coste de reducción de las emisiones presenta un perfil bastante plano y elevado.

En primer lugar, y para reducciones menores al 10% en este sector, se intenta minimizar el uso de mineral de hierro para la producción de arrabio, sustituyendo éste por otras adiciones. Sin embargo, el potencial de esta medida es limitado debido a la calidad exigida en el producto final, y los altos costes que conllevarían nuevas inversiones en hornos eléctricos (bajos factores de emisiones directas) hacen que para cumplir una restricción decreciente en el nivel máximo de emisiones, la alternativa sea, como se aprecia en el gráfico 6, la de abandonar paulatinamente la producción de acero en hornos BOF y cubrir esa demanda con acero procedente del extranjero,

de forma que para reducciones superiores al 40% en las emisiones del sector, la producción en horno tradicional sea nula. En este caso, y quizá análogamente al papel que desempeña el clínker en la industria cementera, el arrabio es un derivado del mineral de hierro y el componente fundamental del acero producido en altos hornos. Su producción es el factor que más emisiones directas introduce en el proceso de fabricación de acero, sin embargo, la posibilidad de importación de arrabio no ha sido considerada en este estudio porque no se conocen datos reales de industrias siderúrgicas que lleven a cabo esta práctica.

Por otro lado, hay que destacar la importancia del precio y disponibilidad de la chatarra en el análisis de beneficios de la industria siderúrgica española. La chatarra es el componente fundamental para la producción de acero en hornos EAF y la fuerte volatilidad que presenta su precio ([www.steelonthenet.com](http://www.steelonthenet.com)) hace difícil su modelado y posterior análisis. Aún así, la conclusión que puede extraerse a la vista del gráfico 6 es que sólo para reducciones muy severas de emisiones de CO<sub>2</sub>, por encima del 50%, el volumen de producción de acero en hornos de arco eléctrico se vería reducido.

GRÁFICO 5  
CURVA MAC DEL SECTOR DEL ACERO

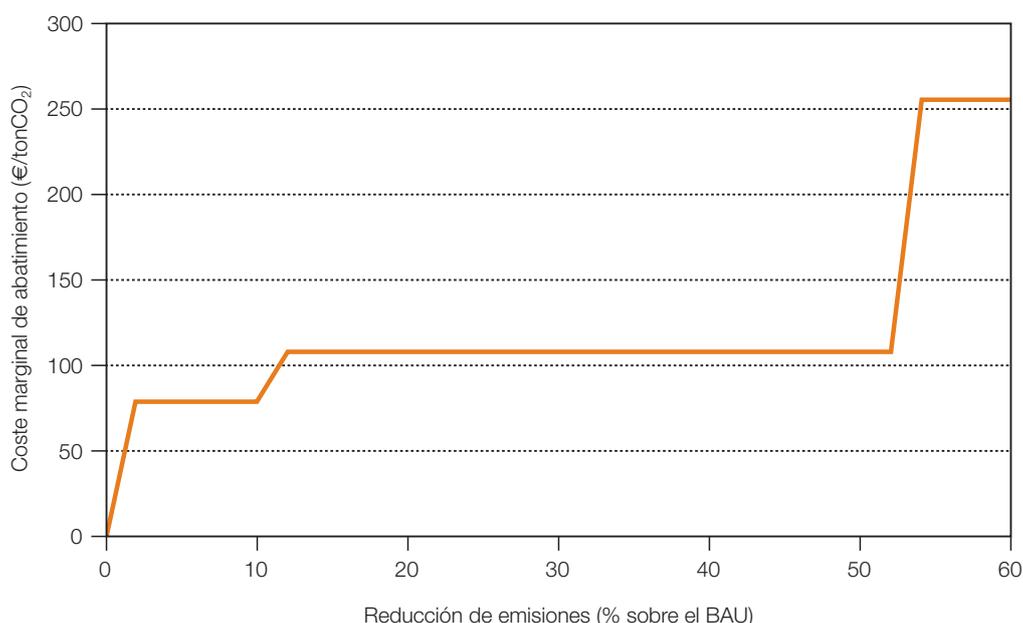
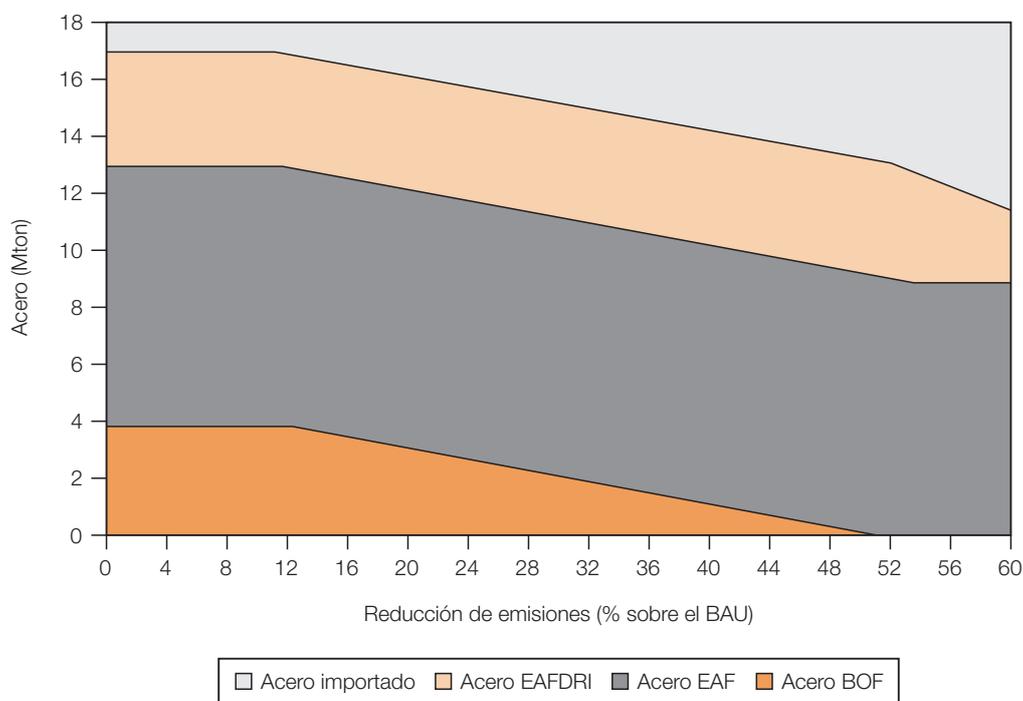


GRÁFICO 6  
EVOLUCIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE ACERO ANTE RESTRICCIÓN EN LAS EMISIONES



#### 4.2.3. Electricidad

El sector eléctrico presenta una mayor elasticidad a la reducción en las emisiones que los sectores expuestos previamente, y a la vista del gráfico 7 se puede observar un rango amplio en el coste marginal en función de diferentes niveles de reducción.

Como se aprecia en el gráfico 8, las tecnologías de generación renovables así como la nuclear, no ven afectado su aporte al mix energético para los diferentes escenarios de reducción de emisiones propuestos. No así ocurre con el carbón, cuya tendencia es claramente decreciente ante reducciones en el nivel tope de emisiones, y se presenta como la primera medida de reducción. La parte de demanda que deja de ser atendida por centrales térmicas de carbón pasa a cubrirse con centrales de ciclo combinado, alimentadas con gas, combustible de alto poder calorífico y menor contenido en carbono, aunque algo más caro. A la vista de los resultados, y teniendo en cuenta el objetivo de renovables propuesto por el Gobierno a 2020, las centrales térmicas de carbón desapa-

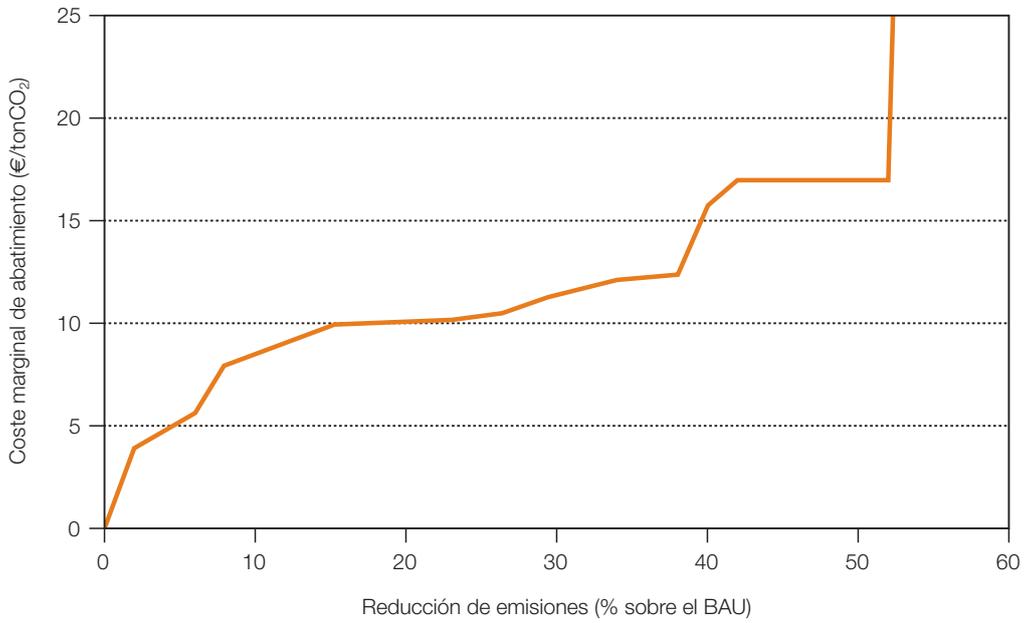
recerían del mix energético si las exigencias medioambientales obligasen a reducir las emisiones del sector por encima del 50%, momento a partir del cual, además, los ciclos combinados también verían reducido su aporte en pro de un aumento sostenido de las energías renovables.

## 5. Conclusiones

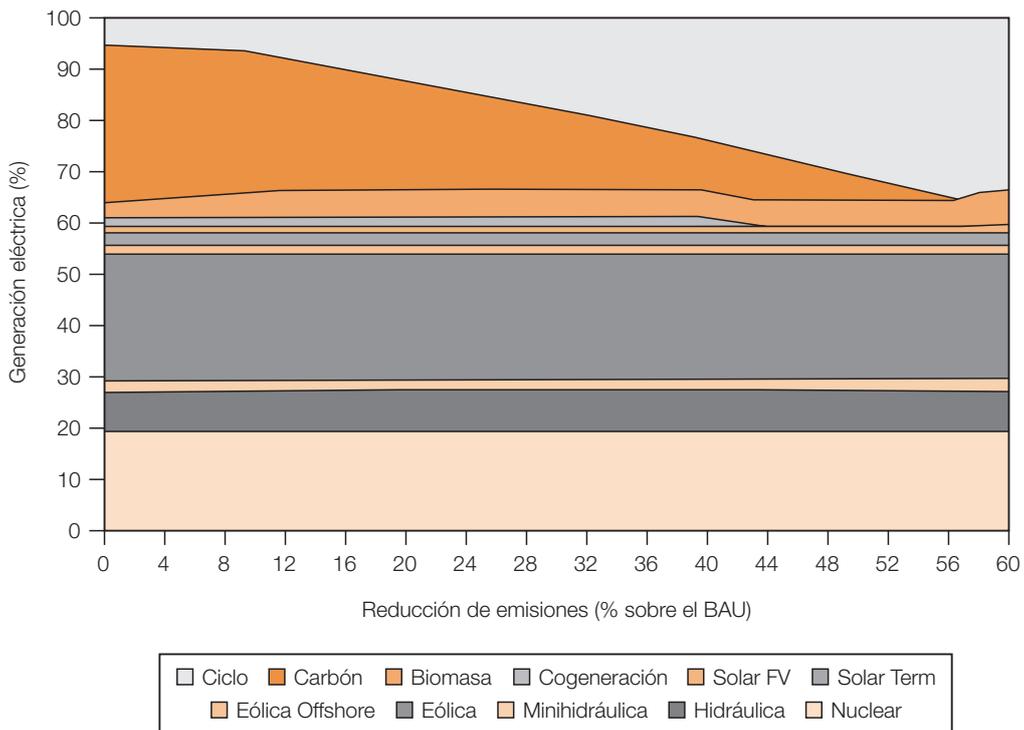
El objetivo de este artículo es el de presentar a grandes rasgos el funcionamiento de las principales industrias intensivas en emisiones en España y dar una primera aproximación de en qué nivel y a qué precios pueden afectarles las diferentes imposiciones medioambientales que se prevén en un futuro próximo.

Analizando la industria por sectores, se observa que el grueso de emisiones en España lo compone el sector eléctrico (22%), el sector cementero (5,8%), el refino de petróleo (3,6%) y la siderurgia (2%). Estos cuatro sectores cubren más del 80% de las emisiones del sector industrial y un 34% de las emisiones totales nacionales.

**GRÁFICO 7**  
**CURVA MAC DEL SECTOR ELÉCTRICO**



**GRÁFICO 8**  
**MIX DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A 2020 BAJO DIFERENTES NIVELES DE EMISIONES**



El sector del cemento en España está caracterizado por un nivel de eficiencia muy alto en casi todas sus fábricas, ya que la mayoría pueden considerarse dentro de las mejores técnicas disponibles (Ministerio de Medio Ambiente, 2003), y por tanto, con la tecnología disponible tiene poco margen de maniobra para afrontar restricciones severas en el nivel de emisiones. Los resultados muestran que los cambios en el uso de combustibles, o en las adiciones del cemento, son medidas con un potencial muy limitado y la importación de clínker, constituyente fundamental del cemento, se presenta como la solución más evidente para lograr reducciones de emisiones.

Análogamente a lo que ocurre con el sector del cemento, el sector siderúrgico en España es uno de los menos intensivos en emisiones directas de Europa debido a la gran penetración del horno de arco eléctrico en la producción de acero. Esta tecnología presenta ventajas desde el punto de vista medioambiental con respecto a la tecnología tradicional de alto horno, de manera que incrementos en la severidad de las restricciones ambientales involucran una caída paulatina de la producción de acero en horno clásico. Por lo tanto, en estos dos sectores, se puede concluir que la aplicación de medidas de reducción de emisiones, bajo los supuestos citados, podría derivar hacia una deslocalización de una parte de la industria, y una posible fuga de emisiones a otros países con regulaciones menos exigentes en este aspecto.

Por último, un análisis del sector eléctrico muestra que la alternativa para reducir emisiones en este sector es la progresiva disminución del uso del carbón en pro de un aumento de las plantas de ciclo combinado cuyo combustible es el gas natural. Además, la integración de renovables en el sistema, medida quizá menos rentable desde un punto de vista puramente económico, ayuda considerablemente a la reducción de las emisiones de GEI en el sector. □

## BIBLIOGRAFÍAS

Evans Miranda, F. J. (2009): *Escenarios de evolución de precio del mercado EU-ETS. Fase II*, Instituto de Investigación Tecnológica, Universidad Pontificia Comillas, Madrid, España.

Hidalgo, I.; Szabo, L.; Ciscar, J. C. y Soria, A. (2005): «Technological prospects and CO<sub>2</sub> emission trading analyses in the iron and steel industry: A global model», *Energy*, vol. 30, págs. 583-610.

Kesicki, F. (2010): *Marginal Abatement Cost Curves for Policy Making – Expert-Based vs Model-Derived Curves*, Energy Institute, University College London, Londres, UK.

Linares, P.; Santos, F. J.; Ventosa, M. y Lapiedra, L. (2008): «Incorporating oligopoly, CO<sub>2</sub> emissions trading and green certificates into a power generation expansion model», *Automatica*, vol. 44, págs. 1.608-1.620.

McKinsey & Company (2007): *Reducing US Greenhouse Gas Emissions: How Much at What Cost?*, McKinsey & Company, US.

Meyers, S. y Buen, O. D. (1993): *Uso de la electricidad en las industrias del acero, cemento y papel: una perspectiva internacional*, Berkeley, University of California, US.

Ministerio de Medio Ambiente (2003): *Guía de mejores técnicas disponibles en España de fabricación de cemento*, Ministerio de Medio Ambiente, Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental, España.

Paltsev, S.; Reilly, J. M.; Jacoby, H. D.; Eckaus, R. S.; McFarland, J.; Sarofim, M. y cols. (2005): *The MIT Emissions Prediction and Policy Analysis (EPPA) Model: Version 4*, Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, USA.

Szabo, L.; Hidalgo, I.; Ciscar, J. y Soria, A. (2006): «CO emission trading within the European Union and Annex B countries: the cement industry case», *Energy Policy*, vol. 34, págs. 72-87.

## RESUMEN

A las puertas del comienzo de la tercera fase (2013-2020) del proceso de implantación del mercado de emisiones en Europa (EU-ETS) y con numerosas cuestiones aún por determinar, la estimación de los costes de mitigación de CO<sub>2</sub> constituye un elemento importante para evaluar el coste y el potencial de las diferentes medidas reductoras, analizar los impactos de posibles políticas medioambientales, y por último, determinar los riesgos de fuga de emisiones debida a la posible pérdida de competitividad de las empresas europeas en los mercados mundiales. Este artículo presenta los resultados obtenidos al llevar a cabo este ejercicio por primera vez en España y para los sectores más intensivos en emisiones de la industria: eléctrico, cemento y acero.

**Palabras clave:** Costes marginales de abatimiento, Emisiones de CO<sub>2</sub>, Sectores industriales en España.