

La planificación de la producción industrial y las emisiones de CO₂.

Implicaciones del Protocolo de Kyoto



The industrial production planning and CO₂ emissions. Kyoto Protocol consequences

• Ana Gessa-Perera
• Inmaculada Rabadán-Martín
• José Antonio Jurado-Martín

Doctora en Ciencias Económicas y Empresariales
Licenciada en Ciencias Económicas y Empresariales
Licenciado en Ciencias Económicas y Empresariales

Universidad de Huelva
Universidad de Huelva
Universidad de Huelva

Recibido: 01/12/08 • Aceptado: 29/01/09

ABSTRACT

- The European Emissions Trading Scheme (EETS) is regulated by the Kyoto Protocol and involves some changes in the corporate management of the industrial companies affected by Directive 2003/87/EC. The EETS is forcing to change the industrial strategic and operational approaches. In this paper we analyze the companies' available alternative to plan their production. The CO₂ emissions are no longer regarded as a waste into another input in the production process. A linear programming model is used to compute a production programme to maximize corporate profits. Therefore, the model gets us important information on possible actions by the company in relation to the purchase or sale of emission allowances in the emissions market CO₂.
- This study compares the actual emissions from the production process, with the allowed emissions, determines the theoretical maximum value to pay for an emissions permit in addition and shows processes or products that are no longer competitive because of the limited CO₂ emissions. In this way the Kyoto Protocol is an opportunity to modernize the production system into a model of sustainable production and consumption.
- The proposed model have been applied to the cement industry.
- **Keywords:** Kyoto Protocol, Emissions Trading Market, CO₂ emissions, Production Planning, Linear Programming.

RESUMEN

El mercado europeo de emisiones de CO₂, regulado en el *Protocolo de Kioto*, implica cambios en la gestión de las empresas afectadas por la *Directiva 2003/87/CE* que lo regula, obligando a sus responsables a reformular sus planteamientos estratégicos y operativos.

En este trabajo analizamos algunas de las posibles alternativas que se les pueden plantear a las empresas a la hora de planificar su producción, donde las emisiones de CO₂ procedentes de sus instalaciones dejan de considerarse como un residuo para convertirse en un *input* más del proceso productivo. Para ello, utilizaremos un modelo de programación lineal con objeto de calcular un programa de producción que optimice los beneficios empresariales y nos ofrezca información relevante sobre las posibles actuaciones de la empresa en relación a la compra o venta de derechos de emisión en el mercado de emisiones de CO₂.

Este estudio compara las emisiones reales, procedentes de la producción en sus instalaciones, con las autorizadas y determina, entre otras cosas, de forma teórica, el valor máximo a pagar por un permiso de emisiones adicional, además

de permitir a las empresas detectar aquellos procesos o productos que dejan de ser competitivos tras la entrada en funcionamiento del mercado de derechos de emisión, al tener limitadas las emisiones de CO₂. De esta manera el Protocolo de Kioto constituye una oportunidad para modernizar el sistema productivo hacia un modelo sostenible de producción y consumo.

Para ilustrar el modelo propuesto se acompaña el análisis realizado con una aplicación a la industria del cemento.

Palabras clave: Protocolo de Kioto, mercado de derechos de emisión, emisiones CO₂, planificación de producción, programación lineal.

1. INTRODUCCIÓN

Hasta fechas recientes, la empresa había gozado de libertad en su forma de operar sin restricciones ni responsabilidades para el uso de los recursos naturales. Sin embargo, esa despreocupación general ha ido desapareciendo poco a poco, a medida que va aumentando la concienciación social del agotamiento de los recursos naturales y de la dificultad que entraña su recuperación y, por tanto, la mayor

presión social y legal ejercida sobre las empresas, materializada en nuevas políticas, planes de actuación y normativas a diferentes niveles.

En este sentido, cabe resaltar por su alcance y por sus futuras implicaciones, el compromiso de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), que asumió la comunidad internacional al ratificar el *Protocolo de Kioto*, exactamente reducir, en el periodo 2008/12, las emisiones en un 5% respecto al nivel de 1990.

Con este propósito y con el fin de amortiguar el inevitable impacto económico que va a suponer el cumplimiento de sus obligaciones, la Unión Europea aprobó la *Directiva 2003/87/CE*, por la que se establece un régimen para el comercio de derechos de emisión de GEI en la Comunidad, que junto a los otros instrumentos de mercado previstos en el Protocolo de Kioto, basados en proyectos de inversión en tecnología limpia en países en vía de desarrollo (Desarrollo Limpio –MDL– y Aplicación Conjunta –MAC-¹), constituyen los llamados *mecanismos de flexibilidad* del Protocolo de Kioto.

La puesta en marcha de este mercado de derechos de emisión de CO₂ implica algunos cambios en la gestión de las empresas afectadas por la Directiva, siendo preciso pues tratar el impacto medioambiental de la actividad empresarial desde un enfoque diferente al que hasta ahora se venía haciendo. Así pues, las consecuencias de la puesta en marcha de este mercado han sido analizadas desde diferentes puntos de vista. Algunos trabajos analizan su impacto económico (Khanna, 2001; Bode, 2006; Egenhofer, 2007; Lund, 2007), así como la relación entre el mercado de derechos de emisión y los incentivos para las inversiones en tecnología (Gagelmann y Frondel, 2005; Schleich y Betz, 2005; Oberndorfer y Rennings, 2007). Otras investigaciones examinan la actitud estratégica de las empresas industriales hacia el comercio de derechos de emisión (Brewer, 2005; Gessa et al., 2007; Pinkse, 2007) y su impacto sobre la competitividad de la industria europea (Hidalgo et al., 2005; Demailly y Quirion, 2006; Smale et al., 2006).

Sin embargo, como el mercado es de reciente aplicación y las reacciones de las empresas se encuentran aún en proceso, es necesario seguir investigando en este área para conciliar los objetivos económicos y ambientales con las decisiones operativas y estratégicas de las empresas.

En este trabajo analizamos las implicaciones en el área productiva de la empresa, al considerar a ésta como una de las más implicadas en el proceso de integración medioambiental de la empresa, teniendo en cuenta que se trata de un área con competencias sobre las principales oportunidades de reducción del impacto ambiental.

Tras repasar brevemente en el siguiente apartado el funcionamiento del mercado de emisiones, pasamos a analizar en la sección 3 las implicaciones que el mismo tiene sobre la planificación de la producción de las instalaciones industriales incluidas en el ámbito de aplicación de la *Directiva 2003/87/CE*,

y, por ende, en sus resultados. Para nuestro análisis usamos un modelo de programación lineal, añadiendo la limitación de las emisiones de CO₂ al resto de restricciones de la empresa (tales como el número de trabajadores, los recursos financieros, la capacidad productiva, etc.). El resultado obtenido puede interpretarse fácilmente y se utiliza, entre otras cosas, para calcular el precio que las instalaciones estarían dispuestas a pagar en el mercado de emisiones por las unidades adicionales de derechos de emisión (precio sombra o dual). A continuación se presenta un sencillo ejemplo para ilustrar la aplicabilidad del modelo, finalizando en la última sección del trabajo con una discusión de los resultados obtenidos.

2. EL MERCADO DE CO₂ Y LOS PLANES NACIONALES DE ASIGNACIÓN DE DERECHOS DE EMISIÓN

El comercio de emisiones permite a las partes implicadas intercambiar los derechos de emisión asignados para alcanzar sus respectivos compromisos. Se trata, por consiguiente, de un mercado donde podrán negociarse las distintas unidades reconocidas por el Protocolo de Kioto, tanto los derechos de emisión (unidad de cuenta del régimen comunitario) como los créditos procedentes de los mecanismos MDL y MAC (las Reducciones Certificadas de Emisiones y las Unidades de Reducción de Emisiones respectivamente).

El funcionamiento de dicho comercio se fundamenta en las diferencias entre los derechos de emisión asignados (derecho subjetivo a emitir una tonelada equivalente de CO₂, durante un periodo determinado) y las emisiones reales de las diferentes organizaciones. Si el número de derechos asignados a una instalación es inferior a sus emisiones reales, será sancionada económicamente, no estando exenta de presentar los derechos necesarios para cubrir sus emisiones. En el caso contrario de superar los derechos asignados a las cuotas emitidas reales, la empresa tiene un excedente de emisiones que podrá vender a otras organizaciones que se encuentren en una situación deficitaria o guardarlos excepcionalmente para su utilización dentro de los años incluidos en cada etapa.

De esta manera, se permite a las instalaciones emitir CO₂ por encima de la cuota que le ha sido asignada, siempre que encuentre a otra instalación que esté dispuesta a vender su cuota sobrante. Así, se garantiza el cumplimiento de los objetivos medioambientales, pues el resultado global es el mismo que si ambas empresas consumiesen exactamente sus cuotas asignadas.

La pieza central de este nuevo mercado la constituye los llamados *Planes Nacionales de Asignación (PNA)* que cada Estado Miembro deberá elaborar y publicar (una vez aprobado por la Comisión Europea), en los cuales se asignarán los derechos de emisión entre los distintos sectores industriales e instalaciones incluidas en el mercado², de acuerdo con los objetivos de emisión que tiene fijados.

¹ Permiten la obtención de certificados de reducción de emisiones invirtiendo en proyectos en países sin compromisos de reducción, típicamente en vías de desarrollo, o posibilitan reducir las emisiones invirtiendo en proyectos de países con compromiso de reducción y economías de transición, respectivamente.

² Inicialmente, este régimen de comercio de derechos de emisión se aplicará a las emisiones de CO₂ procedentes de instalaciones que desarrollan las actividades enmarcadas en la Directiva, que son: generación de electricidad, refino, producción y transformación de metales ferreos, cemento, cal, vidrio, cerámica, pasta de papel, papel y cartón, todos ellos responsables de un porcentaje estimado entre el 40 y 50% de las emisiones de CO₂ correspondientes al año 2001.

Tabla 1 — Emisiones autorizadas y verificadas 2005/07 y propuesta de emisiones 2008/12 (toneladas de CO₂ /año)

Fuente: CITL (2006, 2007 y 2008) y Comisión Europea (2008).

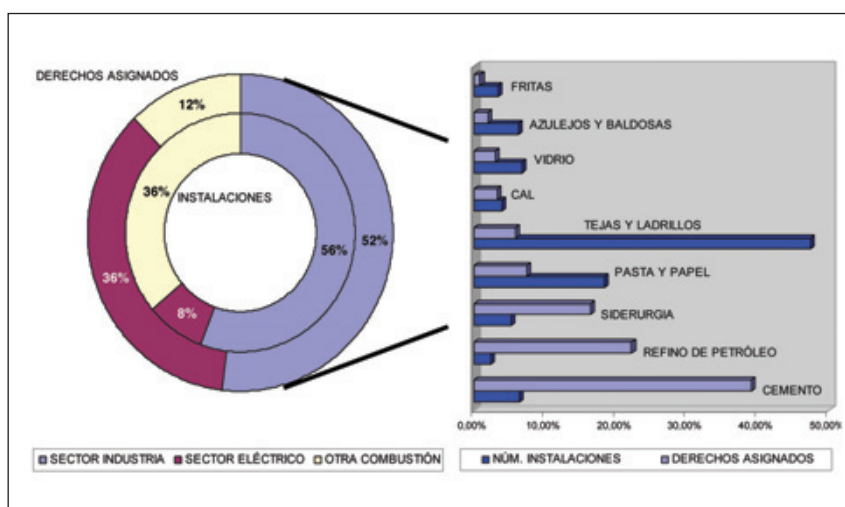
Estados miembros	2005/07			2008/12
	Emisiones verificadas ^a	Asignación de derechos	Número de instalaciones	Asignación de derechos
Alemania	1.440.011.432	498.390.019	1.851	453.070.175
Austria	97.506.837	32.900.512	203	30.729.906 ^b
Bélgica	162.933.891	62.114.734	309	58.507.703
Chipre	15.734.314	5.701.075	13	5.479.780
Dinamarca	90.082.676	33.499.530	382	24.500 ^b
Eslovaquia	75.291.846	30.489.902	169	30.912.261
Eslovenia	26.611.366	8.743.680	94	8.298.937
España	549.890.476	178.838.295	821	152.249.546 ^b
Estonia	40.061.039	18.953.000	43	12.717.058
Finlandia	120.262.466	45.499.284	590	37.557.889 ^b
Francia	384.877.666	154.909.186	1.089	132.800
Grecia	213.949.914	74.400.198	141	69.087.549
Holanda	236.927.138	88.942.336	208	85.813.458
Hungría	78.843.047	31.660.904	229	26.908.852
Irlanda	65.392.457	22.320.000	106	22.281.418 ^b
Italia	679.797.707	223.070.435	945	195.746.486
Letonia	8.644.387	4.560.191	89	3.283.303
Lituania	19.119.524	12.265.395	93	8.851.304
Luxemburgo	7.883.552	3.358.323	15	2.488.229 ^b
Malta	3.957.023	762.822	2	2.143.061
Polonia	622.384.223	237.838.568	817	208.515.395
Portugal	100.739.038	38.161.413	244	34.810.329
Reino Unido	750.254.791	224.831.370	678	245.621.900 ^b
Rep. Checa	253.914.360	97.267.991	396	86.835.264 ^b
Suecia	54.525.312	23.209.832	704	22.802.439
Total	6.099.596.482	2.152.688.994	10.231	1.804.869.542

^a Total del periodo 2005/07.^b PNAs aceptados por la Comisión Europea. El resto de PNAs no están aún ratificados por la Comisión Europea a 30 de junio de 2008.

El primer Plan aprobado regulaba, básicamente, los derechos de emisión de las empresas para el periodo 2005/07, estableciendo para dicho tiempo una estabilización de las emisiones globales (sólo bajarán un 0,2% respecto a 2002). El grueso de la reducción de los gases que contempla el *Protocolo de Kioto* se recoge en un segundo Plan, que delimita las emisiones para el periodo 2008/12, fecha en la que las emisiones no deberían sobrepasar en un 24% las del año 1990.

La Tabla 1 muestra, por una parte, el balance de la primera fase, comparando las emisiones asignadas con las verificadas y, por otro lado, la propuesta de las emisiones para el segundo periodo según el PNA de cada Estado miembro.

En lo que respecta a España, la fig. 1 recoge la distribución de las emisiones autorizadas de CO₂ por sectores implicados para el periodo 2008/12. Por un lado, se aprecia el gran peso que tiene el sector de la industria,

Figura 1. Distribución sectorial de emisiones de CO₂ en España.

Fuente: Comisión Europea (2008).

representando más del 50% del total, tanto en el número de instalaciones implicadas como en el total de derechos asignados. No obstante, debemos resaltar el gran volumen de

derechos asignados al sector eléctrico que, a diferencia del sector industrial, se reparte entre pocas instalaciones, mostrándose como el sector más contaminante. Por otra parte, centrándonos en el sector industrial, apreciamos igualmente un reparto desigual entre los sectores que lo conforman, destacando el sector del cemento como el más contaminante (36 instalaciones reciben más de 29 millones de derechos) frente al de tejas y ladrillos (266 instalaciones tienen asignado 4,5 millones de derechos). El resto de las instalaciones implicadas (36%) corresponde a las de otra combustión, con el 12% del total de las emisiones de CO₂ asignadas.

3. LA PRODUCCIÓN INDUSTRIAL Y LAS EMISIONES DE CO₂

La distribución de las emisiones de CO₂, descrita en el apartado anterior, condicionará en gran parte las estrategias o alternativas de actuación de las factorías para compatibilizar el cumplimiento del *Protocolo de Kioto* con el desarrollo de su actividad productiva, de manera que contribuya a maximizar sus beneficios.

De esta manera, a partir de enero de 2005 deja de considerarse ese contaminante como un residuo, que aparte del daño medioambiental que ocasiona, no tiene efectos directos sobre los resultados de las empresas, para convertirse en un *input* más del proceso productivo, pagando pues por ello una suma de dinero que le permita emitir a la atmósfera una cantidad determinada de CO₂, convirtiéndose así en una restricción más para su capacidad productiva.

Así pues, tras la aprobación de los PNA, las empresas implicadas, para determinar sus planes de producción, tendrán que tener en cuenta por un lado, las limitaciones de emisiones de CO₂ impuestas por el Protocolo de Kioto y por otro, las emisiones derivadas de la producción:

- **Las emisiones autorizadas (EA)**, se obtendrán a partir de las cantidades asignadas en el correspondiente PNA y de los permisos adquiridos, bien directamente en el mercado europeo de emisiones de CO₂ o a través de las otras medidas contempladas en la normativa reguladora del comercio de emisiones, siempre cumpliendo los límites vigentes de emisiones atmosféricas recogidos en las normativas aplicables a los procesos industriales implicados.

La asignación sectorial de permisos de CO₂, salvo en algunos casos³, está basada en las emisiones de las instalaciones durante el periodo 2000/02, procedentes de las mediciones directas y recogidas en el Inventario de Emisiones de GEI (1990/02), repartiéndose entre las instalaciones incluidas en el sector en función del peso que las emisiones que cada una hayan tenido sobre el total durante el periodo de referencia, garantizándose así la representatividad y la posibilidad de verificar la información de base.

- **Las emisiones reales (ER)** dependerán de la fabricación, siendo preciso determinar la cantidad de CO₂ emitido a la atmósfera por unidades fabricadas de los productos,

diferenciando los tipos de productos y las fuentes de contaminación, permitiendo así a los responsables de la producción de la empresa verificar la contribución de cada uno de los productos fabricados al total de CO₂ liberado a la atmósfera. Para el cómputo del total de las emisiones de CO₂ reales, a efectos de compararlas con las emisiones autorizadas, la empresa debe presentar un informe que ha de ser verificado por un organismo acreditado para este fin.

Una vez conocida las emisiones de CO₂ por cada unidad fabricada de los diferentes productos de la empresa y teniendo en cuenta las limitaciones de CO₂ entre las restricciones productivas, el paso siguiente será determinar el programa óptimo de producción que maximice el beneficio de la empresa, para lo que aplicamos la técnica de programación lineal⁴.

3.1. PLAN ÓPTIMO DE PRODUCCIÓN: APLICACIÓN DE UN MODELO DE PROGRAMACIÓN LINEAL

Para plantear algebraicamente el modelo de programación lineal, es preciso identificar las variables del modelo, las limitaciones que se imponen sobre dichas variables y la función objetivo que nos permita obtener una expresión matemática del objetivo que se pretende optimizar.

Las variables indican la decisión que se debe tomar, es decir, las cantidades a fabricar de cada producto para maximizar el beneficio. Así pues, X_j es la cantidad a fabricar del producto j .

Las limitaciones vendrán marcadas de un lado, por las cantidades necesarias de cada factor productivo limitado i para obtener una unidad de cada producto j (a_{ij}), y de otro, por las cantidades disponibles de cada factor productivo limitado (A_i). La entrada en vigor del Protocolo de Kioto ha hecho que sea preciso incorporar las limitaciones de emisiones de CO₂, de manera que será necesario conocer las cantidades emitidas a la atmósfera por cada unidad fabricada del producto j (a_{Cj}), así como las emisiones autorizadas de la empresa (EA).

La función objetivo, dado que pretendemos encontrar el plan de producción que maximice el beneficio de la empresa, estará compuesta por la suma de los beneficios alcanzados por la venta de los distintos productos de la empresa (beneficio unitario - C_j - por el número de unidades vendidas - X_j -).

Ante las limitaciones de emisiones impuestas por el Protocolo de Kioto las instalaciones pueden ver alterados los beneficios unitarios de sus productos ya que sobre ellos incidirán el efecto de las actuaciones de mejora de la empresa y el precio del derecho de emisión asignado.

De esta manera, el planteamiento del problema en términos de programación lineal quedaría como se ilustra en la fig. 2⁵.

3.2. INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

La resolución de este problema de programación lineal ofrecerá, como resultado, las cantidades a fabricar de cada tipo

³ Como en las instalaciones de cogeneración y las emisiones de proceso, así como en aquellas instalaciones, que por circunstancias excepcionales (como pudiera ser una parada prolongada por su mantenimiento), disponen de datos históricos de sus emisiones que no cubren el periodo considerado.

⁴ Para un análisis más exhaustivo consultar, entre otras, Hillier y Lieberman (2001) o Ríos (1996).

⁵ Las restricciones incluidas en la programación lineal generada pueden ser desigualdades de signo contrario ($\geq$) al indicado en la fig. 2 o igualdades.

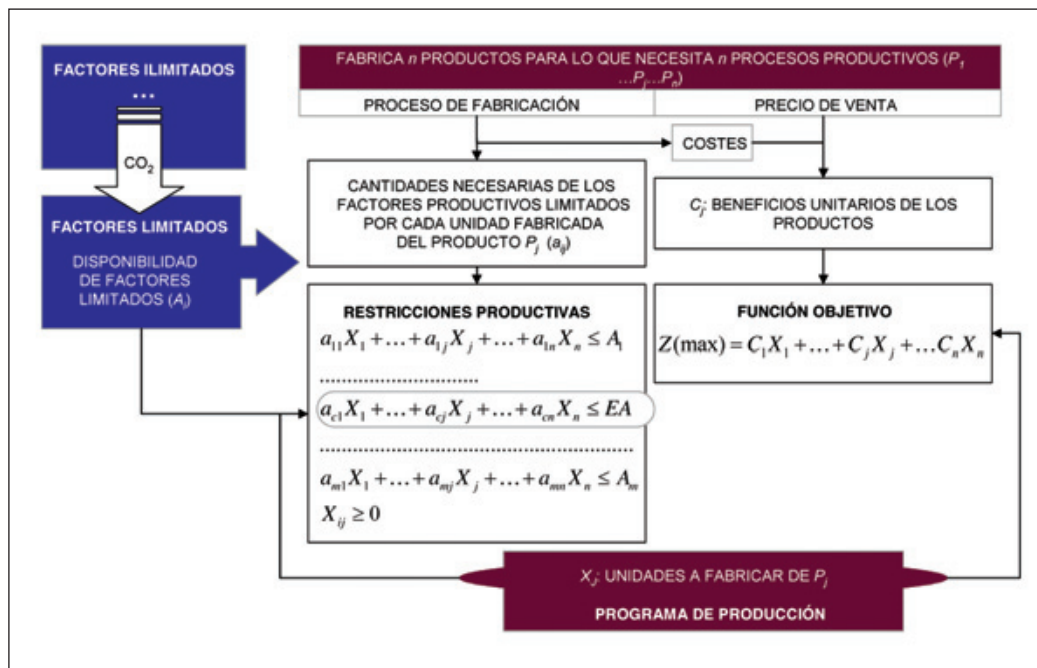


Figura 2. Planificación de la producción en términos de programación lineal.

de producto que elabora la empresa así como las cantidades sobrantes de los factores productivos limitados indicando, además, el precio máximo que estaría dispuesta a pagar la empresa por una unidad adicional de los recursos limitados (precio sombra, precio dual o coste de referencia). Así pues, en relación a la restricción de las emisiones de CO₂, nos podemos encontrar con dos casos (fig. 3): que las emisiones

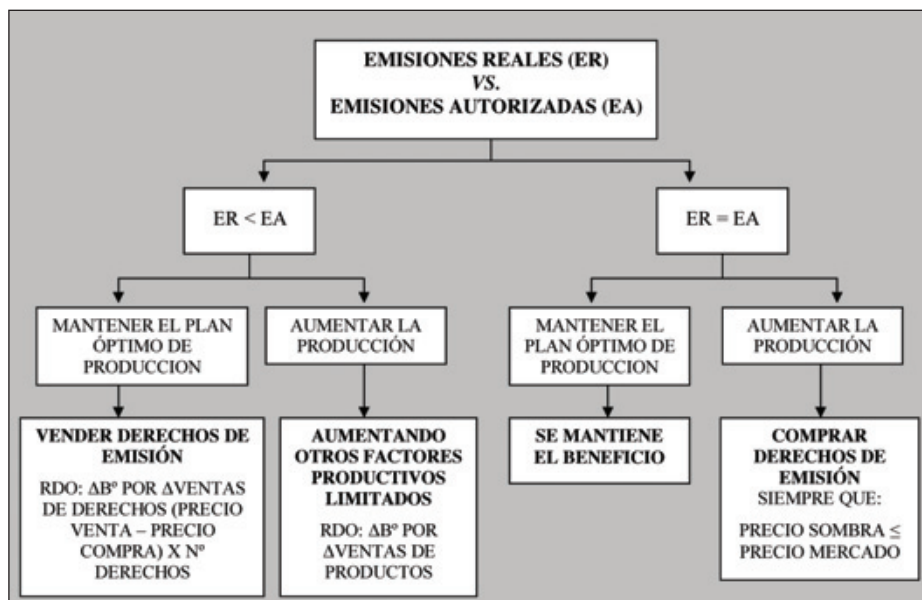


Figura 3. Emisiones reales vs. Emisiones autorizadas

reales sean iguales a las autorizadas (ER = EA) o que sean menores que éstas (ER < EA).

3.2.1. Emisiones reales iguales a las emisiones autorizadas

El programa óptimo de producción implicaría el consumo del total de las emisiones de CO₂ que la empresa tiene asignadas.

En este caso, si la empresa tiene excedente de otros factores productivos limitados podrá plantearse si le interesa comprar derechos de emisión en el mercado para aumentar las emisiones y, de esa manera, producir más e incrementar beneficios.

En este sentido, a la empresa le interesaría comprar permisos de emisión

si el precio de estos derechos es igual o inferior al beneficio que obtendría si se aumentase las emisiones autorizadas en el mismo volumen. Este último valor es reflejado por el precio sombra del derecho de emisión cuyo significado, en este caso, es el coste máximo que la empresa estaría dispuesta a pagar por el incremento unitario de las emisiones de CO₂. Así, si el precio de mercado del permiso es superior al precio sombra la empresa no comprará

derechos y, por tanto mantendrá el programa óptimo de producción; y si el precio del permiso de emisión en el mercado es igual o inferior al precio sombra a la empresa le interesaría comprar derechos de emisión, aumentando así las emisiones totales autorizadas que le permitan incrementar su producción.

3.2.2. Emisiones reales menores que las emisiones autorizadas

En este otro caso, el programa óptimo de producción no implicaría el consumo del total de las emisiones autorizadas, quedando probablemente limitada la producción por otro de los factores productivos limitados (capacidad de las instalaciones, plantilla, etc.). De esta manera, los derechos de emisión sobrantes pueden

⁶ Este coste podría ser el precio del derecho asignado o del derecho comprado en el mercado. La empresa también puede plantearse utilizar el mercado de derechos con objetivos meramente financieros, utilizando el mercado para conseguir rentabilidad financiera mediante movimientos especulativos.

Para simplificar los cálculos consideramos que la planta sólo fabrica dos tipos de cemento: blanco y gris.

ser vendidos en el mercado de derechos, obteniendo así, un incremento extraordinario de beneficios. El valor de éste se calculará por diferencia entre el coste del derecho⁶ y el precio de venta, que vendrá dado este último por la oferta y demanda de dicho mercado (fig. 4).

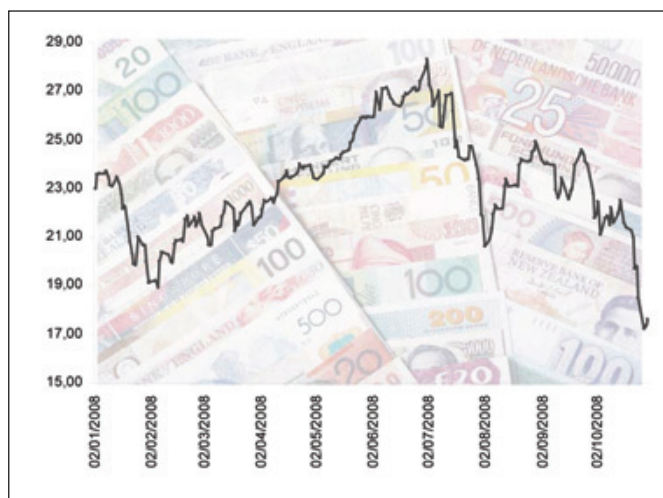


Figura 4. Cotización de los derechos (euros/tonelada CO₂).

Fuente: Elaboración propia a partir de SENDEC02 (2008).

Tal y como se recoge en la fig. 2, la función objetivo sólo incluye la consideración del beneficio unitario de los productos que fabrica la empresa, considerando la venta de derechos como un ingreso extraordinario, priorizando, por tanto, la producción. Sin embargo, el mercado de derechos de emisión ofrece a las empresas una nueva fuente de beneficios que podría competir, en determinadas ocasiones, con la fabricación de productos. De esta forma cambia el orden de prioridad utilizado anteriormente, ya que la venta de derechos se producía únicamente cuando la empresa tenía limitada su capacidad productiva.

Para tener en cuenta esta consideración será necesario incluir en la función objetivo del programa lineal el beneficio que se obtendría por la venta de cada uno de los permisos de emisión no utilizados, que se calculará como diferencia entre el coste del derecho y el precio de mercado. En tal caso sería necesario, por tanto, estimar el precio del derecho que, como se aprecia en la fig. 4, tiene un margen amplio de fluctuaciones.



A este respecto podría utilizarse el precio medio del derecho, sin embargo creemos que lo más conveniente sería estimar un precio de venta basándonos en el comportamiento del mercado.

En el caso de que la producción de la empresa se encuentre limitada por otro factor o factores productivos, la empresa se podría plantear el aumento de la disponibilidad de aquéllos que limitan la producción (según el caso, esto puede conllevar, por ejemplo, la compra de maquinaria, la contratación de trabajadores, el traslado de maquinaria o trabajadores de una planta a otra, etc.), para incrementarla y así consumir el excedente de permisos de emisión.

En este escenario, en el que las emisiones reales son menores que las autorizadas, nos podemos encontrar dos casos: que se elaboren todos los tipos de productos que ofrece la empresa o que no se fabriquen ninguna unidad de algunos de ellos. Esta circunstancia implica que a la empresa le interesa más vender derechos que fabricar determinados productos, es decir, obtiene un mayor rendimiento por la venta de permisos de emisión que por la fabricación de algunos de sus productos. Convendría analizar, por tanto, la rentabilidad de tales productos (reducción de emisiones unitarias relacionadas con mejoras tecnológicas, rediseño de productos, replanteamiento de las exigencias de calidad, etc.) y, en su caso, la conveniencia de retirarlos del mercado si no se consigue alcanzar mayores beneficios⁷.

4. UN CASO ILUSTRATIVO: LA INDUSTRIA DEL CEMENTO

En esta sección aplicamos el modelo propuesto anteriormente para planificar la producción de una empresa del

Tabla 2 — Emisiones de CO₂ de la industria del cemento (toneladas/año)

Fuente: Marland et al., 2006.

	2003	2002	2001	2000	1999
Total	1.007.600	923.328	864.704	828.064	795.088
Europa	147.030	142.031	140.596	140.942	136.750
%	14,6	15,4	16,3	17,02	17,2

En el caso de que la producción de la empresa se encuentre limitada por otro factor o factores productivos, la empresa se podría plantear el aumento de la disponibilidad de aquéllos que limitan la producción, para incrementarla y así consumir el excedente de permisos de emisión.

sector del cemento, uno de los sectores incluidos en el ámbito de aplicación de la *Directiva 2003/87/CE*, responsable aproximadamente del 15% de las emisiones de CO₂ a nivel mundial (ver Tabla 2).

Los datos a partir de los cuales se realizan los cálculos corresponden a una fábrica del Grupo CIMPOR (*Sociedad de Cementos y Materiales de Construcción de Andalucía*), sujeta al mercado de derechos de emisión, en el cual se incluyen todas aquellas instalaciones que producen cemento *clinker* en hornos rotatorios con una capacidad de producción superior a 500 toneladas por día, fabrican cal en hornos rotatorios con una capacidad de producción superior a 50 toneladas por día, o bien en otro tipo de hornos con una capacidad de producción superior a 50 toneladas por día (Anexo I, *Directiva 2003/87/CE*).

Para simplificar los cálculos consideramos que la planta sólo fabrica dos tipos de cemento: blanco y gris. Asimismo, las emisiones de CO₂ por tonelada de cada tipo de cemento producida se estiman en 0,720⁸ tCO₂ (39% por la combustión de combustibles en los hornos y el 61% por la descarbonización de la piedra caliza).

Dado que esta instalación tiene limitadas sus emisiones de CO₂, la ecuación para esta restricción para la fábrica de cemento es la siguiente:

$$0,720 X_b + 0,720 X_g \leq EA$$

donde X_b y X_g son las variables de decisión, la cantidad de cemento blanco y gris que se producen anualmente para maximizar beneficios, y EA la asignación de derechos de emisión para esta instalación según el Plan Nacional de Asignación para 2008-2012 (376.466 toneladas/año).

Suponiendo, también, que esta instalación tiene otra limitación (que puede producir alrededor de 600.000 toneladas/año) y que el beneficio estimado por la venta de una tonelada de cemento blanco y gris es 13.000 y 14.000 euros, respectivamente, el plan de producción en términos de programación lineal, quedaría recogido en el Cuadro 1.

Z (maximizar) = 13.000 X_b + 14.000 X_g (función objetivo)

Sujeto a:

$0,720 X_b + 0,720 X_g \leq 376.466$ toneladas CO₂/año (emisiones de CO₂)

$X_b + X_g \leq 600.000$ toneladas/año (capacidad de producción)

$X_b \geq 0$; $X_g \geq 0$ (condición de no negatividad)

Cuadro 1. Planteamiento del modelo de programación lineal

Tras resolver el problema, la solución óptima es $X_b^* = 522.870$ y $X_g^* = 0$, es decir, producir 522.870 toneladas de cemento blanco y cero toneladas de cemento gris. Por lo tanto, el beneficio asociado al plan óptimo de producción sería de:

$Z^* = 13.000 \times 522.870 + 14.000 \times 0 = 6.797,31$ millones de euros

Para determinar el consumo de los factores productivos limitados (emisiones de CO₂ y capacidad productiva), sustituimos en el planteamiento los valores de las variables del programa óptimo en sus respectivas restricciones:

a) Capacidad de producción

Capacidad utilizada: $522.870 + 0 = 522.870$ toneladas/año

Capacidad disponible: 600.000 toneladas/año

Exceso de capacidad: $600.000 - 522.870 = 77.130$ toneladas/año

b) Emisiones de CO₂

Emisiones utilizadas: $0,720 \times 522.870 + 0,720 \times 0 = 376.466$ toneladas/año

Emisiones autorizadas (EA) = 376.466 toneladas/año

Superávit de emisiones = 0 toneladas

En principio la empresa podría producir más toneladas de cemento (blanco y/o gris), ya que no utiliza toda la capacidad de producción (77.130 toneladas), sin embargo, sus emisiones

⁷ En el caso de que existan razones no económicas que justifiquen el mantenimiento de determinados productos en el mercado (servicio a clientes, competencia, imagen de empresa...) éstas deberían estar incluidas en las restricciones del programa lineal a través de proporciones de producción entre productos o cantidades mínimas a fabricar de cada uno de ellos. En tal caso el programa óptimo de producción reflejará el máximo beneficio que se alcanzaría cumpliendo todas las restricciones.

⁸ Las emisiones son, de media, 0,75-0,8 tCO₂ por tonelada de cemento (Lund, 2007).

de CO₂ están limitadas, por lo que nos encontramos en la situación expuesta el apartado 3.2.1 (emisiones usadas = emisiones autorizadas).

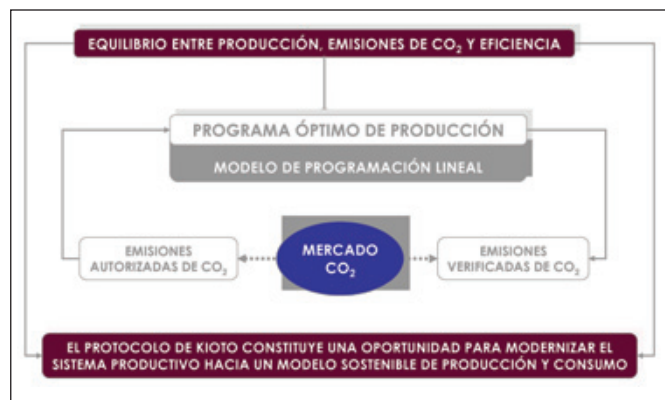


Figura 5. Producción industrial y emisiones de CO₂.

Si la empresa se plantea aumentar su producción y, por ende, las emisiones, tendría que analizar el precio sombra, que es el precio de referencia para decidir si comprar o no nuevos derechos de emisión en el mercado, siendo para este ejemplo, el precio máximo que estaría dispuesta a pagar de 65 euros por tonelada de CO₂, de manera que:

a) Si el precio de mercado de los derechos de emisión es inferior a 65 euros, la empresa estaría interesada en comprar los derechos, para así aumentar su producción. El beneficio obtenido en la producción de una tonelada más de cemento será de 65 euros menos el precio de mercado del permiso de emisión.

b) Si el precio de mercado de los derechos de emisión está por encima de 65 euros, la empresa no estaría interesada en comprar derechos de emisión, y por tanto, mantendría el programa óptimo de producción. En este caso, la empresa también podría optar por otras alternativas para reducir las emisiones de CO₂, tales como participar en otros mecanismos de flexibilidad contemplados en el *Protocolo de Kyoto*, realizar mejoras medioambientales en procesos y/o productos, etc.

5. CONCLUSIONES

Aunque aún es pronto para confirmar las consecuencias del *Protocolo de Kyoto* para el sector industrial de los países comprometidos, es indiscutible que las instalaciones implicadas, se enfrentan en los próximos años a nuevos retos para seguir siendo competitivas.

Son muchos los factores que van a condicionar el desarrollo de las estrategias medioambientales de las empresas para reducir sus emisiones de CO₂ y, por tanto, su participación en el mercado de emisiones; actuando como compradoras y/o vendedoras de permisos, en función de los derechos asignados en el PNA y de las otras posibles alternativas de actuación para mitigar su impacto (proyectos limpios, I+D, tecnologías limpias, etc.).

En cualquier caso, la búsqueda del equilibrio entre producción, emisiones de CO₂ y eficiencia constituye la base

de las actuaciones en los próximos años de la industria incluida en el ámbito de aplicación del *Protocolo de Kyoto* (fig. 5).

En este sentido, la aplicación de la programación lineal, si bien no está exenta de limitaciones (realiza un análisis estático a partir de la estimación de los valores de determinados parámetros y considera relaciones lineales entre las variables), nos puede proporcionar información útil sobre el efecto de las restricciones a las emisiones y el comportamiento de la empresa frente al mercado de derechos de emisión, dependiendo de que las emisiones reales derivadas de sus procesos productivos sean inferiores o iguales a las emisiones autorizadas inicialmente.

La inclusión del posible beneficio que se alcanzaría con la venta de los derechos permite obtener información sobre qué productos han dejado de ser competitivos y deberían ser objeto de análisis para plantearse la mejora productiva o la eliminación. En este escenario, el principal problema se centra en la adecuada estimación del precio de venta del permiso de emisión, algo que puede resultar bastante complejo.

Destacamos también del estudio realizado la interpretación de los precios sombra o de referencia en el análisis de la dualidad del programa, que permitirá a las empresas delimitar la cantidad máxima que estarían dispuestas a pagar en el mercado de emisiones por incrementos adicionales en las cantidades permitidas inicialmente y así maximizar su beneficio.

Sin duda el Protocolo de Kyoto constituye una oportunidad para modernizar el sistema productivo hacia un modelo sostenible de producción y consumo. Pero este desafío de largo



LA CUMBRE DE POZNAN

Los acuerdos a los que se ha llegado en la Cumbre de Poznan para el Cambio Climático del pasado año, no afectan a las estrategias planteadas en el artículo, puesto que en las mismas se establece la necesidad de mantener el comercio de emisiones a disposición de las Partes del Anexo I para alcanzar los compromisos de Kyoto. Por ello, se hace necesario el mantenimiento de un mercado donde las empresas puedan negociar los excedentes de derechos para que las empresas que tengan déficits puedan cubrir sus necesidades y cumplir con los requisitos establecidos.

No obstante, debemos estar pendientes de las conclusiones de los grupos de trabajos creados, y que presentarán sus informes a lo largo del 2009, pues una de las actuaciones que se pretende analizar es cómo afecta el establecimiento de políticas, tarifas y otros subsidios a la evolución de ese comercio.

Por otra parte, en cuanto a la situación de los precios, creemos que la cumbre de Poznan no ha sido la principal causa de su derrumbamiento, sino que más bien se debe a la crisis económica que estamos sufriendo desde finales del 2007. Así por ejemplo, la crisis del sector inmobiliario ha provocado la caída de las ventas (y, por ende, de la producción) de empresas proveedoras de dicho sector y que están incluidas en el comercio de derechos de emisión (cemento, tejas y ladrillos, etc.). La caída de las ventas ha provocado un excedente de derechos en estas empresas que se deriva en un incremento de la oferta, lo que puede conllevar una caída del precio de los derechos.

alcance requiere un esfuerzo importante para el sector industrial, donde el comercio de derechos de emisiones de CO₂ desempeñará un papel fundamental en los próximos años, constituyendo la base sobre la que se tomarán futuras decisiones a nivel internacional, en diferentes foros, respecto al cambio climático y que marcarán las líneas de actuación en la etapa post-Kioto.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Bode S. "Multi-period emissions trading in the electricity sector-winners and losers". *Energy Policy* 2006, Vol.34-6, p.680-691.
- Brewer T L. "Business perspectives on the EU emissions trading scheme". *Climate Policy*. 2005, Vol.5-1, p.137-144.
- Caño-González X. "Protocolo de Kyoto: ¿Una nueva esperanza para la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero?". *DYNA Ingeniería e Industria*. Marzo 2005, p. 13-16.
- CITL (Community Independent Transaction Log). 2005 *National reports on verified emission and surrendered allowances* [en línea]. European Commission Environment Directorate General, 2006 [ref. de 30 de junio de 2008]. Disponible en Web: <http://ec.europa.eu/environment/climat/emission/citl_2005_en.htm>.
- CITL (Community Independent Transaction Log). 2006 *National reports on verified emission and surrendered allowances* [en línea]. European Commission Environment Directorate General, 2007 [ref. de 30 de junio de 2008]. Disponible en Web: <http://ec.europa.eu/environment/climat/emission/citl_2006_en.htm>.
- CITL (Community Independent Transaction Log). 2007 *National reports on verified emission and surrendered allowances* [en línea]. European Commission Environment Directorate General, 2008 [ref. de 30 de junio de 2008]. Disponible en Web: <http://ec.europa.eu/environment/climat/emission/citl_en.htm>.
- Comisión Europea. *National Allocation Plans and Decisions for 2008 to 2012* [en línea]. European Commission Environment Directorate General, 2007 [ref. de 30 de junio de 2008]. Disponible en Web: <http://ec.europa.eu/environment/climat/emission/2nd_phase_ep.htm>.
- Demailly D, Quirion P. "CO₂ abatement, competitiveness and leakage in the European cement industry under the EU ETS: Grandfathering vs. output-based allocation". *Climate Policy*. 2006, Vol.6-1, p.93-113.

- Egenhofer C. "The Making of the EU Emissions Trading Scheme: Status, Prospects and Implications for Business". *European Management Journal*. 2007, Vol.25-6, p.453-463.
- Flecher A, Clarke G. *La Investigación Operativa en la Práctica de la Empresa*. 1ª edición. Barcelona: Ediciones Deusto, 1966.252 p. ISBN: 84-234-0145-6.
- Gagelmann F, Frondel M. "The Impact of Emission Trading on Innovation – Science Fiction or Reality?". *European Environment*. 2005, Vol.15-4, p.203-211.
- Gessa A, Sancha M P, García S. "Actitud y comportamiento medioambiental de la industria andaluza del cemento: estrategias para cumplir el Protocolo de Kyoto", En: *Empresa Global y mercados Locales, XXI Congreso Anual AEDEM*. Madrid: Universidad Rey Juan Carlos, 2007. ISBN: 978-84-7356-500-4
- Hidalgo I, Szabó L, Ciscar C et al. "Technological prospects and CO₂ emission trading analyses in the iron and steel industry: A global model". *Energy*. 2005, Vol.30-5, p.583-610.
- Hillier F S, Lieberman G J. *Investigación de Operaciones*. 7ª edición. México: McGraw-Hill, 2001. 998 p. ISBN: 970-10-3486-4
- Jurado-Martín J A, Rabadán-Martín I, Martín-Zamora M P. "La repercusión del mercado de emisiones en la planificación productiva de la empresa. Una aproximación". *Alta Dirección*. (En prensa).
- Khanna N. "Analyzing the economic cost of the Kyoto protocol". *Ecological Economics*. 2001, Vol. 38-1, p.59-69.
- Lund P. "Impacts of EU carbon emission trade directive on energy-intensive industries – Indicative micro-economic analyses". *Ecological Economics*. 2007, Vol.63-4, p.799-806.
- Marland, G, Boden, T A, Andres, R J. Global, Regional, and National Annual CO₂ Emissions from Fossil-Fuel Burning, Cement Manufacture, and Gas Flaring: p.1751-2003. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Environmental Sciences Division, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy. CDIA: Oak Ridge, Tennessee, USA, 2006. Disponible en Web: <<http://cdiac.esd.ornl.gov/ftp/ndp030>>.
- Oberndorfer U, Rennings K. "Costs and competitiveness effects of the European Union emissions trading scheme". *European Environment*. 2007, Vol.17-1, p. 1-17.
- Pinkse J. "Corporate intentions to participate in emission trading". *Business Strategy and the Environment*. 2007, Vol.16-1, p.12-25.
- Ríos-Insua S. *Investigación operativa: programación lineal y aplicaciones*. 1ª Edición. Madrid: Centro de Estudios Ramón Areces, 1996. 383 p. ISBN: 84-8004-206-0.
- Schleich J, Betz R. "Incentives for energy efficiency and innovation in the European Emission Trading System". En: *Proceedings of the 2005 European Council for an Energy-Efficient Economy Summer Study. Energy Savings: What Works & Who Delivers?* [en línea]. [S.l.]: [s.n.], 2005. p. 1495-1506. Disponible en Web: <http://www.eceee.org/conference_proceedings/eceee/2005c/Panel_7/7124schleich/Paper/>.
- SENDECO2 (Sistema Electrónico de Derechos de Emisión de Dióxido de Carbono). *EUA 2008-2012 Daily prices* [en línea]. 2008 [ref. de 30 de octubre de 2008]. Disponible en Web: <www.sendeco2.com>.
- Smale R, Hartley M, Hepburn C, et al. "The impact of CO₂ emissions trading on firm profits and market prices". *Climate Policy*. 2006, Vol.6-1, p.29-46.
- Tejera J L, Garre A, Carretero A. "Liderato de AENOR en la verificación de emisiones". *DYNA Ingeniería e Industria*. Junio 2006, Vol. 81-5, p. 33-36.
- Unión Europea. Directive 2003/87/EC of the European Parliament and of The Council, of 13 October, Establishing a scheme for greenhouse gas emission allowance trading within the Community and amending Council Directive 96/61/EC, Directive 2003/87/EC of the European Parliament and of the Council. *Official Journal of the European Union*, 25 de octubre de 2003, núm L 275, p. 32-46.
- Vela-Ortiz S. "Marco teórico de la Directiva de Comercio de Emisiones". *Información Comercial Española*. Mayo 2005, N° 822, p.39-50.