

Aplicación de la programación lineal en la planificación de la producción. Implicaciones del Protocolo de Kioto

Ana Gessa Perera¹, Inmaculada Rabadán Martín¹, José A. Jurado Martín¹

¹ Dpto. de Economía Financiera, Contabilidad y D. de Operaciones. Facultad de Empresariales. Universidad de Huelva. Plaza de la Merced, s/n 21002.Huelva. gessa@uhu.es, rabadan@uhu.es, jose.jurado@decd.uhu.es

Resumen

La puesta en marcha del mercado europeo de emisiones de CO₂, regulado en el Protocolo de Kioto, implica algunos cambios en la gestión de las empresas afectadas por la Directiva 2003/87/CE que lo regula, obligando a los responsables de su gestión a reformular sus planteamientos estratégicos y operativos en las diferentes áreas empresariales. En este trabajo nos centramos en la función productiva de la empresa, tras considerar a ésta como una de las más implicadas en el proceso de integración medioambiental de la empresa, al tener competencias sobre las principales oportunidades de reducción del impacto medioambiental. Concretamente, en la implicación que el cumplimiento del Protocolo, en lo que a emisiones de CO₂ se refiere, puede tener en la planificación de la producción de las empresas. Nos centraremos en el proceso de obtención de los planes de producción mediante un modelo general de programación lineal, aplicable a cualquiera de las empresas implicadas, resaltando el papel que va a jugar las emisiones de CO₂ procedentes de sus instalaciones, que dejan de considerarse como un residuo para convertirse en un input más del proceso productivo.

Palabras clave: Programación lineal, Producción, Protocolo de Kioto, Derechos de emisión.

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 invernadero⁵⁷ (GEI), que asumió la comunidad internacional al ratificar el Protocolo de Kioto (en adelante, PK), exactamente reducir, en el periodo 2008/12, las emisiones en un 5% respecto al nivel de 1990.

⁵⁷ Los gases considerados son los de efecto directo, los que provocan este fenómeno por si mismos debido a su carácter termoactivo. Concretamente son seis: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), carbonos hidrofluorados (HFC), carburos perfluorados (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF₆).

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 PK, basados en proyectos de inversión en tecnología limpia en países en vía de desarrollo (Desarrollo Limpio –MDL- y Aplicación Conjunta –MAC-⁵⁸), constituyen los llamados mecanismos de flexibilidad del PK.

La puesta en marcha de este novedoso mercado de derechos de emisión de CO₂ implica algunos cambios en la gestión de las empresas afectadas por la Directiva, siendo preciso pues tratar la perspectiva medioambiental de la actividad empresarial desde un enfoque diferente al que hasta ahora se venía haciendo.

Por ello y bajo estas consideraciones abordamos en este trabajo las implicaciones de la puesta en marcha de este mercado de CO₂ 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.

Para ello, y tras repasar brevemente en el siguiente apartado el funcionamiento del mercado de emisiones y el panorama sectorial industrial de nuestro país regulado en la Directiva, pasamos a analizar las implicaciones que el mismo tiene sobre la planificación de la producción de las instalaciones industriales incluidas en el ámbito de aplicación del REAL DECRETO 1866/2004. Para ello, aplicamos un modelo de programación lineal, añadiendo la restricción relativa a las emisiones de CO₂ al resto de las limitaciones productivas de la empresa.

2. El mercado de CO₂ y los Planes Nacionales de Asignación de Derechos de Emisión

El comercio de emisiones, regulado en el artículo 17 del PK, permite a las partes 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 PK, tanto los derechos de emisión (unidad de cuenta del régimen comunitario) como los créditos procedentes de los mecanismos de Desarrollo Limpio y de Aplicación Conjunta (las Reducciones Certificadas de Emisiones y las Unidades de Reducción de Emisiones⁵⁹ respectivamente). En este último caso, los titulares de las instalaciones podrán utilizar directamente en el mercado comunitario los créditos de dichos mecanismos, y será el Estado

⁵⁸ Conocidos también por sus siglas en inglés: Clean Development Mechanism (CDM), que permite la obtención de certificados de reducción de emisiones invirtiendo en proyectos en países sin compromisos de reducción, típicamente en vías de desarrollo, como los latinoamericanos, y Join Implementation (JI), que posibilita reducir las emisiones invirtiendo en proyectos de países con compromiso de reducción y economías de transición como son los de Europa del Este.

⁵⁹ Las Reducciones Certificadas de las Emisiones (RCEs) y las Unidades de Reducción de Emisiones (UREs) son unidades expedidas de conformidad con los artículos 12 y 6 del PK, respectivamente, así como con las disposiciones pertinentes de las modalidades y procedimientos del MDL y del MAC, que corresponden a una tonelada métrica de CO₂ equivalente.

Miembro el responsable de expedir un derecho de emisión a cambio de los créditos de derechos que el titular tenga en su cuenta del Registro Nacional⁶⁰.

El funcionamiento de dicho comercio se fundamenta en las diferencias entre los derechos de emisión asignados (derecho subjetivo a emitir una tonelada equivalente de dióxido de carbono, durante un periodo determinado⁶¹) 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 gases de efecto invernadero 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, además de la flexibilidad aportada por el mecanismo que beneficia tanto a la empresa compradora como a la vendedora sin consecuencias medioambientales. Asimismo, los otros mecanismos de flexibilidad (Desarrollo Limpio y Aplicación Conjunta) permitirán a las empresas reducir el volumen de CO₂ emitido, si llevan a cabo proyectos de reducción de emisiones en otros países.

La pieza central de este nuevo mercado la constituye los llamados Planes Nacionales de Asignación (PNA) que, según el apartado 2 del artículo 11 de la Directiva 2003/87/CE, cada Estado Miembro deberá elaborar y publicar (una vez aprobado por la Comisión), en los cuales se asignarán los derechos de emisión entre los distintos sectores industriales e instalaciones incluidas en el mercado, de acuerdo con los objetivos de emisión que tiene fijados.

En lo que respecta a España, el PNA, aprobado por Real Decreto 1866/2004, junto con la Ley 1/2005 que regula el régimen del comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero⁶² y por el que se transpone al ordenamiento jurídico español la Directiva 2003/87/CE sobre este comercio, sienta las bases para la asignación individual de derechos a todas las instalaciones antes de la puesta en marcha de un novedoso mercado europeo, con el fin de contribuir a la reducción de emisiones que causan el cambio climático, cumpliendo así el compromiso asumido por nuestro país con el PK.

⁶⁰ Para entrar en funcionamiento este mercado de emisiones es imprescindible que esté operativo el Registro Nacional de Derechos de Emisión (RENADE), una base de datos de actualización permanente y accesible al público vía internet en la que aparecerá el volumen de derechos de emisión asignado a cada empresa afectada por la Directiva 2003/87/CE y por el Real Decreto Ley 5/2005, así como todas las operaciones que se realicen con ellos, como la expedición, titularidad, transmisión, transferencia, entrega, retirada y cancelación de los mismos.

⁶¹ Según el artículo 2 del Real Decreto Ley 5/2004, de 27 de agosto, por el que se regula el régimen del comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero.

⁶² Actualmente regulado por la Ley 1/2005, 9 de marzo, del régimen del comercio de derechos de emisión de GEI.

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 férreos, 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.

El primer Plan aprobado regula, 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 PK 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.

Finalizado el plazo de la primera etapa (2005/07) podemos analizar el grado de cumplimiento de las instalaciones⁶³. Como se recoge en la Tabla 1, si bien para ambos años, a nivel agregado, se ha emitido más CO₂ del permitido, se ha producido una disminución de 2006 respecto a 2005. El responsable de esta situación, a pesar de ser el que menos instalaciones tiene implicada (aproximadamente el 8% del total) es el sector eléctrico, que en ambos años ha emitido más CO₂ del permitido (más de 30 millones de Tn), puesto que el resto de las instalaciones de los demás sectores (a excepción del refino de petróleo) no han superado las autorizadas en ninguno de los dos años.

Tabla 1. Estado de cumplimiento de las instalaciones sujetas a la Ley 1/2005.

Sector	2005		2006	
	Nº instalaciones	Superávit/Déficit ¹ (Tn CO ₂) (Grado de cumplimiento)	Nº instalaciones	Superávit/Déficit ¹ (Tn CO ₂) (Grado de cumplimiento)
Industria²	577 71,95%	5.545.725 (92,18%)	586 57,45%	6.448.069 (90,79%)
Eléctrico	67 8,35%	-17.863.360 (120,73%)	77 7,55%	-13.114.325 (118,12%)
Otra combustión	158 19,7%	1.771.541 (88,88%)	357 35,00%	4.392.898 (78,96%)
TOTAL	802	-10.546.094 (106,09%)	1.020	-2.273.358 (101,39%)

Fuente: Elaboración propia a partir de los Informes Anuales del Cumplimiento elaborados por RENADE.

¹Emisiones reales-Emisiones autorizadas.

² Incluye los subsectores de refino, producción y transformación de metales férreos, cemento, cal, vidrio, cerámica, pasta de papel, papel y cartón.

Por otro lado, la Tabla 2 refleja las limitaciones de emisiones fijadas por el gobierno con la aprobación del segundo PNA, actualmente vigente y que abarca el periodo 2008/12. En términos totales, presenta una tendencia decreciente en cuanto al volumen de emisión autorizado, pasando de casi 152 millones de toneladas en 2008 a algo más de 143 millones en 2012, reducción soportada íntegramente por el sector eléctrico, pues el resto de los sectores mantienen prácticamente constante las emisiones autorizadas en dicho periodo.

⁶³ Al cierre del presente trabajo, no se había publicado el informe de cumplimiento correspondiente al año 2007.

En relación al número total de instalaciones implicadas, si bien se ha reducido respecto a la etapa anterior, no ocurre igual por sectores. A pesar de que el sector industrial ha experimentado un descenso del número de instalaciones (25 factorías menos), se han incrementando ligeramente el total de emisiones autorizadas, pasando de casi 70 millones de toneladas a un valor medio aproximado de 74 millones de toneladas anuales para este segundo periodo. El sector eléctrico presenta una tendencia contraria a la expuesta, dado que a pesar del incremento de instalaciones que se ha experimentado durante estos años (7 instalaciones), el número de permisos se han reducido en 34,7 millones de toneladas. Y por último, las instalaciones de otra combustión han experimentado un aumento similar a las del sector eléctrico, manteniéndose las emisiones de forma constante durante esta segunda etapa.

Tabla 2. PNA aprobado para el periodo 2008/12 (toneladas de CO₂).

Sector	2008	2009	2010	2011	2012	Nº instalaciones
Industria¹	73.539.923	73.712.660	73.883.467	74.056.100	74.230.581	561
Eléctrico	60.929.805	56.089.185	53.243.735	51.535.931	51.402.888	84
Otra combustión	17.445.015	17.462.087	17.440.353	17.445.318	17.445.684	363
TOTAL	151.914.743	147.263.932	144.567.555	143.037.349	143.079.153	1.008

Fuente: Elaboración propia a partir de la Orden Pre/3420/2007, de 14 de noviembre de 2007.

¹Incluye los subsectores de refino, producción y transformación de metales férreos, cemento, cal, vidrio, cerámica, pasta de papel, papel y cartón.

3. La planificación de la producción y las emisiones de CO₂. Aplicación de un modelo de programación lineal

La distribución sectorial 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 PK 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 una cantidad determinada de ese contaminante, convirtiéndose así en una restricción más para su capacidad productiva.

Para aproximarnos a esta problemática planteada, se tratarán las emisiones autorizadas de CO₂ como una restricción más para la empresa, que incorporamos en un modelo de programación lineal. Se trata de obtener un plan de producción que, sometido a las restricciones a que dan lugar los recursos limitados de la empresa (incluidas las emisiones), proporcione un resultado óptimo (maximizar beneficios o minimizar costes), bajo la consideración de que todas las funciones matemáticas del modelo son lineales y el rendimiento del proceso, así como el beneficio, son directamente proporcionales a las unidades de producto fabricadas⁶⁴.

⁶⁴ En general, las suposiciones de partida de la programación lineal son: **proporcionalidad**, lo que supone que el consumo de cada recurso es directamente proporcional al nivel de actividad y que éste incide proporcionalmente en la función objetivo; **aditividad**, por la que se supone que el consumo de cada factor limitado y la función objetivo es igual a la suma de las cantidades correspondientes a cada producto o actividad; **divisibilidad**, es

3.1. Planteamiento del problema

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 son las que señalan la decisión que se debe tomar. Son las incógnitas del problema, 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). Estas últimas constituyen el denominado vector existencias (P_0), al que, tras la entrada en vigor del PK, habrá que incorporarle, como nueva limitación, las emisiones autorizadas (EA), incluyendo dentro de éstas las asignadas en el PNA y otras emisiones permitidas gracias al uso de mecanismos de desarrollo limpio. De esta manera, para m recursos limitados, el vector existencias será:

$$P_0 = \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \dots \\ EA \\ \dots \\ A_m \end{pmatrix} \quad (1)$$

Asimismo, los vectores procesos (P_j) también se verán afectados por las limitaciones de emisiones de CO_2 , de manera que, si llamamos a_{cj} a la cantidad de CO_2 emitida a la atmósfera por cada unidad fabricada del producto j , aquellos vendrán dados, para n productos, por:

$$P_1 = \begin{pmatrix} a_{11} \\ a_{21} \\ \dots \\ a_{c1} \\ \dots \\ a_{m1} \end{pmatrix} \quad P_2 = \begin{pmatrix} a_{12} \\ a_{22} \\ \dots \\ a_{c2} \\ \dots \\ a_{m2} \end{pmatrix} \quad \dots \quad P_j = \begin{pmatrix} a_{1j} \\ a_{2j} \\ \dots \\ a_{cj} \\ \dots \\ a_{mj} \end{pmatrix} \quad \dots \quad P_n = \begin{pmatrix} a_{1n} \\ a_{2n} \\ \dots \\ a_{cn} \\ \dots \\ a_{nn} \end{pmatrix} \quad (2)$$

Dado que pretendemos encontrar el plan de producción que maximice el beneficio de la empresa, los rendimientos de los procesos (C_j) reflejarán los beneficios asociados a la venta de los productos elaborados. Así, antes de la firma del PK, **la función objetivo** a maximizar sería la siguiente:

$$Z(\max) = C_1X_1 + \dots + C_jX_j + \dots + C_nX_n \quad (3)$$

Ante las limitaciones de emisiones impuestas por el PK la empresa puede ver alterados los beneficios unitarios de sus productos, lo que incidirá en la función objetivo de la programación lineal. En este sentido y bajo la premisa de estabilidad de los precios de venta,

decir, los niveles de actividad pueden ser valores no enteros; y **certidumbre**, lo que implica que los parámetros del modelo son constantes y conocidos (Flecher y Clarke, 1966; Churchman et al., 1971; Hillier y Lieberman, 1989; Ríos, 1996).

$$a_{c1}X_1 + \dots + a_{cj}X_j + \dots + a_{cn}X_n + h_c = EA \quad (7)$$

donde $a_{c1}X_1 + \dots + a_{cn}X_n$ recoge las emisiones reales de la empresa, según la producción determinada en el programa óptimo, y h_c refleja el volumen de emisión sobrante con respecto a las emisiones autorizadas.

Tras la aplicación del método simplex tabulado, mediante sucesivas iteraciones, se llegará a una tabla que reflejará el programa óptimo de producción (en donde todos los rendimientos marginales $-w_j$ son menores o iguales que cero) que maximiza el beneficio de la empresa. Aquél estará formado por las variables principales (X_j), que indicarán las cantidades a fabricar de los productos, y por las variables de holgura (h_j), que dependiendo del signo ($\#$ ó \exists) de la restricción relativa al factor productivo correspondiente, tendrán un significado diferente (sobrante respecto al consumo permitido o consumo por encima del mínimo establecido, respectivamente). Así pues, en relación a la restricción de las emisiones de CO₂, nos podemos encontrar con dos casos:

a) **Las emisiones reales son iguales a las emisiones autorizadas ($h_c = 0$).** En este caso el valor del rendimiento marginal de la variable de holgura (Wh_c) nos permitirá determinar el precio que estaría dispuesta a pagar la empresa por cada permiso de emisión adicional que adquiriera para buscar un nuevo programa óptimo de producción. La empresa acudirá al mercado de derechos de emisión y establecerá una orden de compra de permisos por el valor de Wh_c , de manera que si el precio de mercado es superior al rendimiento marginal de la variable de holgura, no comprará derechos y, por tanto mantendrá el programa óptimo; y si el precio del permiso de emisión en el mercado es igual o inferior a Wh_c la empresa comprará derechos de emisión, aumentando así las emisiones totales autorizadas. El volumen de derechos que la empresa adquirirá en el mercado, a un precio máximo de Wh_c , está limitado por el resto de las restricciones productivas de la empresa. En concreto, será necesario observar si existe alguna variable de holgura, de otra restricción productiva, cuyo valor sea también cero, en cuyo caso la compra de derechos no cambiará el programa óptimo, ya que a la empresa no le interesará comprar permisos mientras que no aumente las disponibilidades del factor productivo más restrictivo.

En el caso de adquirir los permisos de emisión, el total de CO₂ que la empresa puede emitir a la atmósfera queda aumentado en la misma cuantía que el volumen de derechos comprados (D), lo que incide sobre la restricción de las emisiones, cuya expresión quedaría de la siguiente manera:

$$a_{c1}X_1 + \dots + a_{cj}X_j + \dots + a_{cn}X_n \leq EA + D \quad (8)$$

La nueva función objetivo reflejará la reducción del beneficio por el importe de los derechos adquiridos, por lo que resultará:

$$Z(\max) = C_1'X_1 + \dots + C_j'X_j + \dots + C_n'X_n - P_{DM}D \quad (9)$$

donde P_{DM} es el precio del derecho de emisión comprado en el mercado, que será $\# Wh_c$.

b) **Las emisiones reales son menores a las autorizadas ($h_c > 0$).** Esto quiere decir que la empresa tiene limitada su capacidad productiva, pero no por las emisiones de CO₂, sino por otros factores productivos (como pueden ser el número de trabajadores o máquinas disponibles, el volumen de productos que pueden procesar las máquinas, etc.). En este caso no

se consumen la totalidad de permisos de emisión autorizados, indicando el valor que toma la variable de holgura en el programa óptimo, la cantidad de emisiones de CO₂ que se podrían comercializar obteniendo un beneficio con ello. Suponiendo que se pueden vender todos los derechos sobrantes (existe demanda para la compra y no hay limitaciones en la venta volúmenes inferiores a una tonelada de emisiones de CO₂), que los permisos de emisión se adquirieron a un precio de P_{DA} y se venden al precio de mercado P_{DM} , el beneficio conseguido con la venta de los permisos no utilizados será:

$$(P_{DM} - P_{DA})h_c \quad (10)$$

4. Conclusiones

Son muchos los factores que van a condicionar el desarrollo de las estrategias medioambientales de las empresas españolas 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 PK.

En este sentido, la aplicación de la programación lineal, si bien no está exenta de limitaciones, 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.

Si bien el valor de las emisiones autorizadas es conocido a priori, será 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. No todos los productos fabricados por la empresa contaminan el aire de la misma manera, depende principalmente de la materia prima y el combustible empleados directa o indirectamente en sus procesos de fabricación.

Por su aportación a la comprensión de las decisiones de las empresas implicadas respecto a la compra de nuevos derechos para producir más y por tanto, emitir más CO₂ a la atmósfera, destacamos del estudio realizado la interpretación de los precios sombra o de referencia en el análisis de la dualidad del programa (representados en las tablas del método simplex por el rendimiento marginal de la variable de holgura correspondiente a la restricción relativa a las emisiones de CO₂), que permitirá a las empresas delimitar la cantidad máxima que estarían dispuesta a pagar en el mercado de emisiones por incrementos adicionales en las cantidades permitidas inicialmente y así maximizar su beneficio.

Sin duda el PK constituye una oportunidad para modernizar el sistema productivo hacia un modelo sostenible de producción y consumo. Pero este desafío de largo alcance requiere un esfuerzo importante para el sector industrial español, 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.

Referencias

Churchman, C.W.; Ackoff, R.L.; Arnoff, E.L. (1971). *Introducción a la Investigación Operativa*. Aguilar.

Directiva 2003/87/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 13 de octubre de 2003 por la que se establece un régimen para el comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero en la Comunidad y por la que se modifica la Directiva 96/61/CE del Consejo, (DOCE L275, de 10 de octubre de 2003).

Domínguez, J.A.; García, S.; Domínguez, M.A.; Ruíz, A.; Álvarez, M.J. (1995). *Dirección de Operaciones. Aspectos tácticos y operativos en la producción y los servicios*. McGraw-Hill, Madrid.

Flecher, A.; Clarke, G. (1966). *La Investigación Operativa en la Práctica de la Empresa*. Deusto.

Hillier, F.S.; Lieberman, G.J. (1989). *Introducción a la Investigación de Operaciones*. McGraw-Hill.

Ley 1/2005, de 9 de marzo, por la que se regula el régimen del comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero (BOE nº 59 de 10/04/05).

Miranda, F.J.; Rubio, S.; Chamorro, A.; Bañeguil, T. (2004). *Manual de dirección de operaciones*. Thomson.

Orden Pre/3420/2007, de 14 de noviembre, por la que se publica el Acuerdo de Consejo de Ministros por el que se aprueba la asignación individual de derechos de emisión de GEI a las instalaciones incluidas en el PNA de derechos de emisión de GEI, 2008-2012.

Real Decreto 1866/2004, de 6 de septiembre, por el que se aprueba el Plan Nacional de asignación de derechos de emisión, 2005-07 (BOE nº 216 de 7/09/04).

Real Decreto 777/2006, de 23 de junio, por el que se modifica el Real Decreto 1866/2004, de 6 de septiembre, por el que se aprueba el Plan Nacional de Asignación de Derechos de Emisión, 2005-07 (BOE nº 150 de 24/06/06).

Real Decreto Ley 5/2004, de 27 de agosto, por el que se regula el régimen del comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero (BOE nº 208 de 28/08/04).

Real Decreto Ley 5/2005, de 11 de marzo, de reformas urgentes para el impulso a la productividad y para la mejora de la contratación pública (BOE nº 62, de 12/03/05).

Resolución de 26 de enero de 2005, de la Subsecretaría, por la que se publica el Acuerdo del Consejo de Ministros, de 21/01/2005, por el que se aprueba la asignación individual de derechos de emisión a las instalaciones incluidas en el ámbito de aplicación de la Ley 1/2005.

Ríos Insua, S. (1996). *Investigación operativa: programación lineal y aplicaciones*. Centro de Estudios Ramón Areces, D.L.