

# Toma de decisiones mediante metodología multicriterio (carbón nacional y seguridad energética).

## Decision-making through multi attribute utility methodology (domestic coal and energy security)

Pablo Cansado-Bravo y Carlos Rodríguez-Monroy. ETSII - UPM

### ABSTRACT

The evolution of the coal mining industry in Spain until today has resulted in a totally restructured sector. At the same time, Spain is highly dependent on imported oil and natural gas makes coal resources a key aspect to ensure secure energy supplies to Spanish citizens.

This article investigates into the feasibility of long term alternatives of Spanish coal through a MCDM (Multi-Criteria Decision Making) process. The main contribution of this research is twofold. Firstly, to evaluate long term performance of existing coal deposits in Spain using MAUT methodology within three distinctive areas of competence: geographical location, coal mining technology and coal type. Secondly, to assess opportunities for coal resources that can be considered a means of ensuring energy supply security in the future.

Our investigation shows that in spite of the reasonable availability of coal resources in the North of Spain, the only alternative that can be regarded commercially viable on an ongoing basis, seems to be coal production in Teruel. Production costs of anthracite and bituminous coal in Castilla y León and Asturias, both in the area of 90 Eur/tce, seem to be far from being in a position to compete against imported coal in the future. In our view, the future design of an Emergency Plan for security of supply reasons using coal as back-up fuel should take into account that the referred production costs could be not achievable if those mines were not functioning on an ongoing basis.

- Keywords: Coal, Energy resources, Mining, Security of supply.

### RESUMEN

La evolución de la minería del carbón en España hasta nuestros días ha dado lugar a un sector totalmente reestructurado. Al mismo tiempo, España depende en gran medida del petróleo y el gas natural importado, por lo que los recursos de carbón son un elemento clave para garantizar el suministro seguro de energía a los ciudadanos españoles.

Este artículo investiga la viabilidad de alternativas a largo plazo del carbón español a través de un proceso MCDM (Toma de decisiones multicriterio). La principal contribución de esta investigación es doble. En primer lugar, evaluar el comportamiento a largo plazo de los yacimientos de carbón existentes en España utilizando la metodología MAUT dentro de tres ámbitos de competencia diferenciados: ubicación geográfica, tecnología minera del carbón y tipo de carbón. En segundo lugar, evalúa las oportunidades de recursos de carbón que pueden

considerarse un medio para garantizar la seguridad del abastecimiento energético en el futuro. Nuestra investigación muestra que, a pesar de la razonable disponibilidad de recursos carboníferos en el norte de España, la única alternativa que puede considerarse comercialmente viable de forma continuada, parece ser la producción de carbón en Teruel. Los costes de producción de antracita y carbón bituminoso en Castilla y León y Asturias, ambos en la zona de los 90 Eur/tce, parecen estar lejos de poder competir con el carbón importado en el futuro. En nuestra opinión, el diseño futuro de un Plan de Emergencia por razones de seguridad del suministro utilizando carbón como combustible de reserva debería tener en cuenta que los costes de producción mencionados no podrían alcanzarse si esas minas no estuvieran funcionando de forma continua.

Palabras clave: Carbón, Recursos energéticos, Minería, Seguridad de abastecimiento.

## 1. INTRODUCCION

### 1.1. RECURSOS ENERGETICOS Y ESTRUCTURA DEL MERCADO

Como en la mayoría de los países de la OCDE, los combustibles fósiles constituyen la mayor parte del mix energético en España aportando un 72,20/o del suministro total de energía primaria (TPE)<sup>1</sup> en 2014, incluyendo productos petrolíferos (41,20/o), gas natural (20,80/o) y carbón (10,30/o), todo ello a pesar del impresionante crecimiento de capacidad para producir energía renovable desde 2008, un 14,90/o del total de electricidad generada en 2014. Por otro lado, el consumo de energía primaria ha ido disminuyendo notablemente desde 2007 como consecuencia de la crisis económica española y en menor medida como resultado de cambios estructurales y la integración efectiva de fuentes de generación renovable. Resulta interesante observar, no obstante, que la cuota de combustibles fósiles en la generación de electricidad se ha mantenido estable y aunque el uso del petróleo ha disminuido, su efecto se ha visto compensado ampliamente por el crecimiento de consumo de gas natural y carbón (Figura 1).

<sup>1</sup> TPES se compone de Producción + importaciones - exportaciones - transporte marítimo internacional, aviación internacional bunkers ± variación de las existencias. El TPES es igual al total de energía que se consume, bien a través de transformación (por ejemplo refinado) o bien como uso final. Agencia Internacional de Energía (AIE)

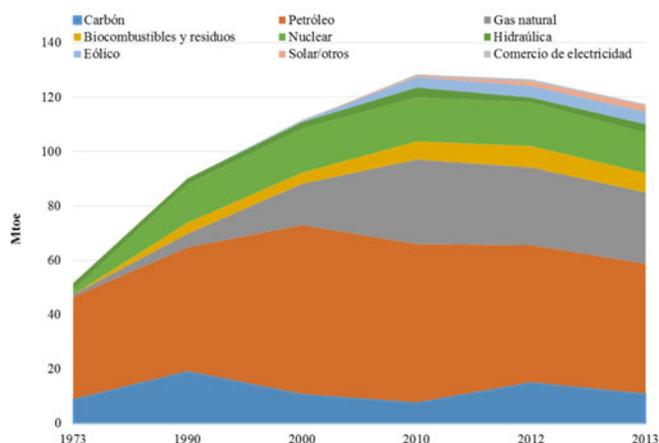


Figura 1: El suministro total de energía primaria en España  
Fuente: AIE/Carbuni3n

Dentro de este marco, y a pesar de las ventajas del precio del carb3n, su alta fiabilidad de suministro y la amplia oferta, el reto para el carb3n en la Uni3n Europea (UE) se traduce fundamentalmente en la posibilidad de llegar a ser un producto m3s limpio, como admite Eurocoal (1). En este sentido, la fuerte presi3n de las pol3ticas ambientales de la UE, especialmente desde la publicaci3n de la Directiva 2010/75/EU para centrales t3rmicas, ha creado una situaci3n especialmente dif3cil para la operaci3n de la flota de plantas de carb3n existente en Espa1a. En 3ltimo t3rmino, la situaci3n de altos costes de las explotaciones mineras aut3ctonas, tambi3n en Espa1a, culminar3 con toda seguridad en una disminuci3n dr3stica de la producci3n nacional de carb3n en la UE en su conjunto.

## 1.2. OBJETIVOS Y BENEFICIOS DEL ESTUDIO

El objetivo principal de este art3culo es la evaluaci3n de la viabilidad de posibles alternativas para el sector de la miner3a de carb3n en Espa1a a trav3s de un an3lisis de recursos disponibles utilizando MAUT, i.e. metodolog3a multi-criterio, inspirada en la conocida teor3a de la utilidad. Para ello, el estudio diferencia entre tres grandes 3mbitos de competencia: regi3n minera, tecnolog3a empleada y tipo de carb3n, para analizar de forma objetiva la mejor alternativa dentro de cada 3rea y en funci3n de una amplia variedad de criterios. De esta forma, el estudio proporciona una perspectiva a futuro de la hoja de ruta m3s probable para el sector carb3n asociada a varios escenarios alternativos. Como segundo objetivo se plantea investigar sobre los costes de producci3n que pueden considerarse realistas y que podr3an servir como punto de referencia para el futuro dise1o de un plan de emergencia por razones de seguridad de suministro nacional.<sup>2</sup>

En cuanto a la aplicabilidad del estudio creemos que puede englobarse dentro de estudios m3s gen3ricos sobre planificaci3n

Capacidad producci3n anual (Kt)	N3mero de empresas	Producci3n total (Kt/y)	Cuota de producci3n (%)
<25	3	31	0,8
25-100	3	215	5,5
>100	7	3.657	93,7
<b>Total</b>	<b>13</b>	<b>3.904</b>	<b>100</b>

Tabla 1: Productores de carb3n en Espa1a 2014  
Fuente: Ministerio. 2014

energ3tica as3 como dentro de las ramas del conocimiento relacionadas con la sostenibilidad de sistemas energ3ticos (2) con el objetivo de facilitar decisiones m3s adecuadas para el sector de la miner3a aut3ctona. Para ello, el estudio considera los principales factores que determinan las diferentes alternativas, atributos en el modelo, y que posibilitan dise1ar dicho plan. En particular, el recientemente aprobado Plan de Cierre de instalaciones mineras por parte de la UE y que establece los requisitos necesarios para el cierre de minas de carb3n en el futuro, es de especial relevancia para nuestro estudio. Seg3n este plan y la legislaci3n anterior, las minas que se acogen a este plan y que han sido beneficiarias de ayudas, deben proceder al cierre de instalaciones a finales de 2018. En este sentido, parece razonable suponer que, en consonancia con las pol3ticas de seguridad de abastecimiento energ3tico de la UE, el Gobierno espa1ol decida elaborar un nuevo mecanismo ampliando el mencionado Plan de Cierre, que permita dar utilidad a la reserva existente de carb3n nacional. Este plan de acci3n permitir3a a su vez, a las empresas mineras que sean seleccionadas, mantener ciertas condiciones de operatividad por razones de seguridad de suministro.

Asimismo, es necesario poner de relieve que la intenci3n del estudio no es 3nicamente num3rico con el fin de resolver un problema de asignaci3n de recursos energ3ticos y estimar futuros vol3menes de producci3n, sino tambi3n ofrecer una visi3n objetiva del sector del carb3n que sirva para la toma de decisiones estrat3gicas en el futuro, todo sin menosprecio de la influencia de factores dif3cilmente evaluables anal3ticamente, como son las cuestiones particulares que afectan a la responsabilidad ambiental y social.

En t3rminos de los beneficios proporcionados por el estudio, creemos que, en primer lugar podr3 ser de utilidad a los agentes involucrados para, por un lado, comprender mejor las repercusiones de la reestructuraci3n del sector en Espa1a y por otro lado evaluar el papel del carb3n nacional en el mix energ3tico durante los pr3ximos a1os. En un sentido amplio, el estudio intenta contribuir a entender mejor las posibles decisiones del Gobierno en el futuro as3 como a anticipar pol3ticas que puedan afectar al sector minero en Espa1a.

## 1.3. EL SECTOR DE LA MINER3A DEL CARB3N EN ESPA1A

La historia de la miner3a en Espa1a revela las dificultades del sector para conseguir una adecuada escala de operaciones como resultado por un lado de propiedades mineras dispersas y por otro lado de una baja competitividad en comparaci3n con carbones procedentes de otros pa3ses (3). Hoy en d3a, la transformaci3n de la industria minera del carb3n ha dado lugar a un sector totalmente reestructurado y con niveles de producci3n seriamente mermados con ca3das del 60% en el a1o 2014 con respecto a los niveles de producci3n de 2004. Como resultado de esta reestructuraci3n, en 2014 s3lo 13 compa1as mineras de carb3n operaban en Espa1a (en comparaci3n con 234 en 1990), manteniendo niveles de producci3n de tan solo 3,9 Mt en ese mismo a1o. De esas 13 compa1as, 7 producen casi el 95% del total. La Tabla 1 muestra este hecho de acuerdo a las 3ltimas informaciones facilitadas por el Ministerio.<sup>3</sup>

En general, la explotaci3n de la reserva nacional del carb3n ha estado hist3ricamente asociada con la construcci3n de centrales t3rmicas, siendo el desarrollo minero altamente favorecido por la primera crisis del petr3leo de los a1os 70s y la amplia variedad

<sup>2</sup> El significado de este t3rmino en el contexto de la toma de decisiones multicriterio hace referencia principalmente a la optimizaci3n del uso de recursos escasos como el carb3n a la luz de criterios espec3ficos (atributos).

<sup>3</sup> <http://www.minetad.gob.es/es-es/gabineteprensa/notasprensa/2015/Paginas/20151124-libro-energia.aspx>

de carbones encontrada en el país durante esos años, i.e. desde antracitas y bituminosos de alto poder calorífico hasta sub-bituminosos (lignitos pardos) de calidad media pero abundantes. Las minas de carbón bituminoso se ubican en la región de Castilla y León, en particular en las provincias de Palencia y León, con una producción aproximada de 0,95 Mt en 2013. Con características similares, también en el norte de España, en Asturias, la producción minera alcanzó los 0,97 Mt en ese año. La minería es un sector importante en Puertollano en la provincia de Ciudad Real, al sur de Madrid, con una producción de 0,65 Mt en 2013 así como en la parte oriental del país, en la provincia de Teruel donde la producción de carbón sub-bituminoso en ese año fue de 1.8 Mt.

En relación con el uso del carbón autóctono, en el año 2015, la capacidad de generación eléctrica, originalmente diseñada para utilizar carbón nacional, todavía representaba casi la mitad de la actual capacidad de generación con carbón en el país. A pesar de ello el carbón nacional en nuestros días desempeña cada vez más un papel secundario, no sólo por el deterioro de las condiciones de rentabilidad del sector sino también debido a los esfuerzos de la UE por impulsar el cierre de minas de carbón no competitivas en 2018. Como se ha comentado, en un esfuerzo por dar cierta estabilidad al sector, la CE ha aprobado recientemente el Plan de Cierre de minas de carbón en España previamente presentado por el Gobierno, sobre la base del Plan Marco de 2010 que establecía los requerimientos principales para el cierre definitivo de las minas. En ese sentido el plan confirma el cierre de 26 unidades mineras de carbón de España a finales de 2018.

#### 1.4. VENTAJA DEL COSTE DEL CARBÓN IMPORTADO

En términos generales se puede afirmar que desde la década de los 80, el principio de funcionamiento de la industria minera en España se ha basado en el compromiso por parte de las plantas térmicas de carbón de asegurar los volúmenes de producción, muy a menudo sobre un acuerdo de largo plazo a la vez que se favorecían condiciones ventajosas de operación por parte del Ministerio para las plantas. En paralelo, las minas de carbón recibían una subvención a la producción real para equilibrar sus cuentas de explotación. El diseño de un sistema así establecido pretendía asegurar la operatividad de un sector estructuralmente deficitario pero altamente eficaz para mantener el objetivo final de mejorar la seguridad del abastecimiento de electricidad en el país. Dentro de este esquema, y a través de medidas liberalizadoras en el sector, en 1998 las ventas de carbón nacional inicialmente pactadas con los productores de electricidad fueron formalmente liberalizadas de forma que las centrales de carbón podían considerar nuevas alternativas de suministro, obviamente limitadas por la distancia geográfica y por las especificaciones de diseño de la planta. Coincidiendo con este proceso de liberalización y la creciente competencia, especialmente de ciclos combinados de gas (CCGT), la dinámica de negocio en el sector se tradujo en una presión creciente sobre las empresas mineras para obtener condiciones más favorables tanto de precio como de calidad de producto. En algunos casos, como en las plantas de Galicia, As Pontes y Meirama, los propietarios de las plantas decidieron en último término reconvertir las plantas existentes y utilizar carbón importado exclusivamente.

## 2. DEFINICIÓN DE DATOS Y METODOLOGÍA

Los datos utilizados en este estudio son los proporcionados por el *Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital* (MINETAD) en relación con la producción de carbón en España en los años 2008 y

2013<sup>4</sup> desglosados por producto, es decir, antracita, hulla bituminosa ('hulla') y lignito sub-bituminoso ('lignito negro'). Los datos son publicados por provincia, agregados por región, es decir, Asturias, Castilla y León, Castilla La Mancha y Aragón e incluyen un desglose por tecnología, es decir, cielo abierto (CA) o subterránea (SUB). Los costes operativos publicados incluyen todos los gastos de operación, como por ejemplo la mano de obra, materiales y suministros, equipos y gastos diversos de funcionamiento incurrido así como también los costes de supervisión y administración. Los costes indicados, sin embargo, no incluyen los gastos de exploración y obtención de permisos.

### 2.1. COSTES DE FUNCIONAMIENTO Y LA PRODUCTIVIDAD POR PRODUCTO

En términos de eficiencia y productividad de la industria minera del carbón en España, las instalaciones analizadas muestran una amplia variedad de resultados. La figura 2 muestra la evolución de la productividad resultante en función de los costes operativos<sup>5</sup> y diferenciando en función de los tres tipos de carbón genérico producidos en España desde 2008 hasta 2013. Los costes unitarios y resultados mostrados en el cuadrante inferior derecho representan el resultado más deseable (menores costes unitarios y al aumento de la producción por empleado y año). La cuota de mercado relativa de cada producto está representada por el tamaño de la burbuja.

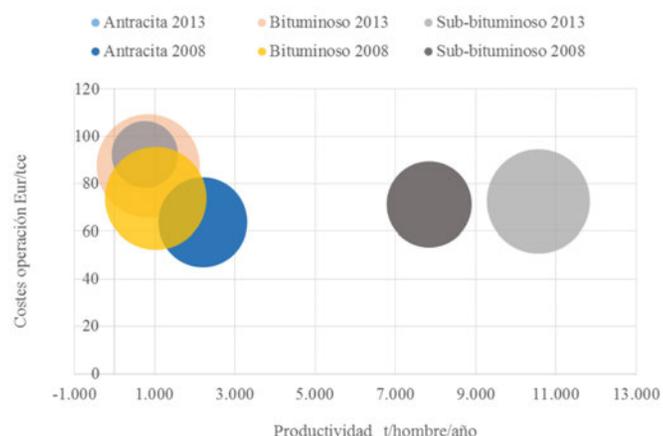


Figura 2: La minería del carbón vs productividad costos operativos por producto en 2008 y 2013.

Fuente: Ministerio/autores

El análisis en detalle de cada uno de la evolución de los productos de carbón proporciona resultados interesantes en relación a la productividad esperada. Claramente la producción de sub-bituminosos consigue importantes logros en cuanto a mejora de productividad desde 2008 al mismo tiempo que mantiene un nivel similar de costes operativos. Sin embargo, la productividad del carbón bituminoso y especialmente de la antracita, que representa alrededor del 17% del total de la producción, no mejora, es más, los costes operativos entre 2008 y 2013 aumentan alrededor de un 15% y un 30% CAGR, respectivamente. Estos resultados muestran

<sup>4</sup> Es preciso señalar que, si bien los datos para 2014 están disponibles a finales de 2016, los datos utilizados son de 2013. El hecho de que 2014 sea un año particularmente controvertido debido a cambios regulatorios súbitos y a condiciones climáticas anormales, lo que conduce a irregularidad de operaciones por parte de las centrales eléctricas que utilizan carbón autóctono en ese año, lo justifica.

<sup>5</sup> Para el análisis de los costes operativos en esta sección, se ha utilizado un valor calorífico equivalente de 6,257 kcal/kg para obtener el resultado en toneladas equivalentes de carbón (tec)

claramente que el efecto de la reducción de escala de las operaciones mineras, ha tenido repercusiones económicas indeseables relacionadas con la productividad para ambos tipos de carbón (4).

## 2.2. COSTE OPERATIVO POR REGIÓN Y POR LAS OPERACIONES MINERAS

En relación a los costes de explotación por tipo de operación minera y por región, la figura 3 muestra una comparativa entre la antracita (mayores costes de operación a cielo abierto) versus subbituminoso (menor coste en todos los tipos de operación).

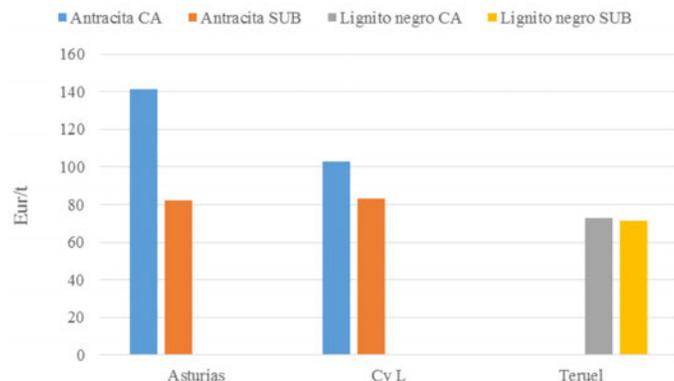


Figura 3: Producción de la minería del carbón por región. El carbón importado equivalente 2013  
Fuente: Ministerio de 2013. CA: la explotación a cielo abierto. SUB: Subterráneo

Como puede observarse, Asturias refleja claramente los costes más altos, curiosamente a cielo abierto no en subterráneo, y en cualquier caso lejos de costes que podrían considerarse razonables en el largo plazo. La hulla bituminosa presenta costes equivalentes<sup>6</sup> (no se muestran en el gráfico) de entre 83 euros/tec para operaciones subterráneas y de 91 euros/tec para la explotación a cielo abierto, lo que posibilitaría la continuidad de operaciones en el norte de España y Puertollano aunque lejos de la ventaja competitiva del precio del carbón sub-bituminoso en la zona de Teruel.

## 2.3. EL MODELO

La *toma de decisiones multicriterio* (MCDM) es una conocida rama incluida dentro de un grupo genérico de modelos de investigación operativa que analiza problemas de decisión estimando la influencia de criterios específicos. En este sentido a lo largo de los últimos años se han ido desarrollando una serie de métodos a su vez agrupados en diferentes categorías i.e. *priority based*, *outranking*, distancias óptimas, etc. (5). Cada categoría en general considera técnicas similares en relación con el objetivo final de evaluar las alternativas en conflicto pero también en cuanto al proceso de selección y valoración de opciones alternativas. En particular, en nuestro caso, se escoge la metodología multi-atributo (MADA) que establece prioridades para las diversas alternativas en función de un conjunto definido de atributos, algunos de los cuales pueden ser difíciles de cuantificar. De forma secuencial, la mejor alternativa se selecciona con respecto a cada atributo. El proceso MADA, generalmente consta de cuatro fases (6): elaboración de la decisión y determinación de los objetivos, identificación de las alternativas que pueden deducirse de la decisión y atributos relevantes, especificación de preferencias y por último calificación de las alternativas para decisión.<sup>7</sup>

En este sentido, una amplia variedad de métodos dentro del marco MADA ha sido desarrollada en el pasado, métodos que difieren principalmente en el proceso de selección utilizado para llegar a la selección final de alternativas. Entre ellos, hemos seleccionado la teoría de la utilidad multiatributo (MAUT) (7) tanto para establecer la estructura común de evaluación, como para determinar la importancia relativa de cada atributo en relación con la utilidad potencial considerada. Este método permite asimismo una evaluación objetiva del resultado a través de datos cuantificables, al ser la información analizada también cuantificable. En nuestro caso hemos considerado en primer lugar tanto los costes de operación como la productividad, parámetros directamente cuantificables en función de los datos proporcionados por el Ministerio. De forma paralela, se puede cuantificar la información específica sobre la capacidad instalada en cada región que utiliza carbón doméstico o la distancia promedio de la explotación minera a los puertos más cercanos (8). Es preciso señalar que la metodología MAUT ha sido ampliamente verificada durante décadas de forma que se ha creado una amplia literatura sobre este tema, por lo que creemos que el modelo seleccionado incorpora los elementos necesarios para llegar a un buen juicio sobre el objeto de la investigación (8). Otros métodos disponibles basados en diferentes postulados de evaluación como el *outranking procedure* (ELECTRE y PROMETHEE), el establecimiento de preferencias (AHP y ANP), o incluso los basados en el concepto de análisis de distancias óptimas, como TOPSIS (9) también podrían ser considerados en futuras revisiones de este estudio.

Es importante señalar asimismo que las prioridades utilizadas para facilitar la toma de decisiones a través de MAUT, suponen el desarrollo de una función de utilidad concreta que se define sobre cada atributo. En general, las funciones de utilidad transforman matemáticamente los valores iniciales, por ejemplo, costes de operación, en valores de utilidad equivalente que se identifican a lo largo de una escala normalizada, de 0 a 5 en nuestro caso. Una vez que las preferencias para atributos individuales han sido especificadas, el decisor puede establecer preferencias entre los atributos especificando el peso por atributo en función de una multi-función de utilidad. La forma multiplicativa de la ecuación para la utilidad generalmente se define como:

$$1 + ku(x_1, x_2, \dots, x_n) = \prod_{j=1}^n (1 + k_j u_j(x_j))$$

donde  $j$  es el índice del atributo,  $k_j$  es la constante de escala que atribuye un peso a la importancia del criterio (o atributo)  $j$  y  $u_j(\cdot)$  es la función de utilidad siendo  $u_j(\cdot)$  el operador de la función de utilidad de alternativa  $x$  para cada atributo  $j$  (10).

Por último, en base a las conclusiones, se crean dos escenarios diferentes: alta demanda (corto plazo) y baja demanda (medio y largo plazo), alternativas consolidadas en función de las condiciones de demanda que determinan a su vez la evolución esperada de la producción de carbón autóctono en el futuro.

## 3. RESULTADOS EMPÍRICOS

En esta sección examinamos el potencial esperado para las operaciones de las instalaciones mineras en España en el largo

<sup>6</sup> En cuanto a coste de carbón bituminoso los datos facilitados por el Ministerio de Industria Turismo y Comercio no diferencian por región.

<sup>7</sup> Otra conocida rama de la toma de decisiones es la basada en objetivos múltiples en cuyo caso las alternativas no están predeterminados, sino que

por el contrario de determinan un conjunto de funciones objetivo a optimizar sujetas a un conjunto de restricciones.

plazo utilizando la metodología MAUT. Como se ha comentado previamente, se han analizado tres categorías que determinan el rango de las diferentes alternativas, i.e. ubicación geográfica, la tecnología de la minería y el tipo de carbón. Por cada una de las clases el número de opciones sería el siguiente:

1. Ubicación geográfica: Asturias, Castilla y León (CyL), Castilla La Mancha (CM) y Aragón.
2. Tecnología minera: la minería a cielo abierto (CA) y minería subterránea (SUB).
3. Tipo de carbón: antracita, bituminoso y sub-bituminoso.

Con el fin de evaluar el rendimiento de cada alternativa, se definen un conjunto de criterios concretos (atributos) que pro-

porcionan una evaluación para cada opción individualmente. La Tabla 2 muestra las definiciones de los diferentes criterios considerados.

Con el fin de iniciar el proceso de optimización, se realiza una evaluación preliminar de las diferentes alternativas consideradas. Es necesario destacar que los resultados obtenidos muestran valores numéricos de forma individualizada y en función de las unidades apropiadas, i.e. euros/tonelada para parámetros de producción, MW equivalentes al evaluar dependencia de la planta más cercana o kilómetros desde puerto por MW equivalente para analizar la proximidad de instalaciones de importación. La Tabla 3 muestra los datos correspondientes a diferentes alternativas dentro de cada clase.

La Tabla 4 muestra los valores normalizados obtenidos en una escala de 0 a 5 usando un factor de escala apropiado mediante interpolación lineal. También se muestra la ponderación relativa de cada criterio, a fin de asignar su prioridad relativa en la decisión. Un enfoque simplificado basado en criterios utilizados en la literatura considera que el criterio más relevante debe tener un peso del 25% para a continuación, asignar pesos al resto de criterios de forma ordenada. La Tabla 4 enumera los criterios y pesos desarrollados según este proceso, basados en la experiencia de los autores y las opiniones de los expertos en el sector. Como se puede observar el factor que incorpora la dificultad de acceso al carbón importado es el criterio más importante en la decisión, mientras los costes operacionales por región tienen un bajo peso relativo.

Como puede apreciarse en la tabla, el resultado de la investigación muestra que la minería de sub-bituminoso en Aragón tiene el mejor comportamiento y al mismo tiempo ofrece condiciones óptimas de operación muy por delante de cualquier otra región (verde oscuro). En cuanto a la consideración sobre cuál de las tres regiones podría suponer una alternativa realista de largo plazo con un enfoque en la seguridad del suministro energético, posiblemente Castilla y León sería la opción preferida (verde claro). Resulta interesante resaltar que cuando se considera la tecnología como factor, tanto la minería subterránea como la de superficie muestran un grado similar de atractivo lo que revela que los factores tecnológicos muestran una capacidad limitada para discriminar entre alternativas. En este sentido, sería de esperar que las variaciones de este criterio, por ejemplo, a través de un análisis de sensibilidad, no influyan de forma decisiva en la decisión final.

Criterio	Definición
Costes de operación	Coste en eur/ton equiv de operación considerando la media ponderada de la producción por región, por tecnología o por producto
Productividad por tipo de carbón	Media de eficiencia de producción expresada como el ratio de volumen de producto por hombre/año, i.e. producción por unidad de recursos. (Ton/manyear)
Costes de operación/minería CA	Coste en eur/ton equiv de operación de minería a cielo abierto (CA) considerando la media ponderada de producción por región o por producto
Costes de operación/minería SUB	Coste en eur/ton equiv de operación de minería subterránea (SUB) considerando la media ponderada de producción por región o por producto
Costes de operación Asturias	Coste en eur/ton equiv de operación de minería en Asturias considerando la media ponderada de producción por tecnología o por producto
Costes de operación CyL	Coste en eur/ton equiv de operación de minería en Castilla y León considerando la media ponderada de producción por tecnología o por producto
Costes de operación CM	Coste en eur/ton equiv de operación de minería en Castilla La Mancha considerando la media ponderada de producción por tecnología o por producto
Costes de operación Aragón	Coste en eur/ton equiv de operación de minería en Aragón considerando la media ponderada de producción por tecnología o por producto
Dependencia de Planta de carbón	Dependencia estimada de las plantas de carbón cercanas en MW. Un alto grado de dependencia es positivo para la supervivencia de las minas cercanas
Dif. acceso carbón de importación	Costes logísticos en función de la distancia media al puerto mas cercano. Valores altos son positivos para la supervivencia de las minas cercanas

Tabla 2: Descripción de los criterios

Fuente: Costes de operación proporcionados por el Ministerio y cálculos elaborados por los autores. Datos sobre la dependencia de la planta de carbón basados en los datos de capacidad instalada proporcionados por el Ministerio. Datos sobre dificultad de acceso proporcionados por el Ministerio

Alternativa	Minería Asturias	Minería Castilla y León	Minería Castilla La Mancha	Minería Aragón	Minería cielo abierto (CA)	Minería subterránea (SUB)	Minería antracita	Minería bituminosos	Minería sub-bituminosos
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Costes de operación	88,7	90,1	87,5	72,6	82,0	81,1	92,3	87,5	72,6
Productividad por tipo de carbón	-	-	-	-	-	-	749	1.032	10.555
Costes de operación/minería CA	141,4	95,9	87,5	72,9	-	-	112,3	91,1	72,9
Costes de operación/minería SUB	83,1	83,7	-	71,2	-	-	82,5	83,8	71,2
Costes de operación Asturias	88,7	-	-	-	141,4	83,1	80,4	87,5	-
Costes de operación CyL	-	90,1	-	-	95,9	83,7	96,5	87,5	-
Costes de operación CM	-	-	87,5	-	87,5	-	-	87,5	-
Costes de operación Aragón	-	-	-	72,6	72,9	71,2	-	-	72,6
Dependencia de Planta de carbón	714	1.761	312	1.050	-	-	929	929	1.050
Dif. acceso carbón de importación	0,2	0,6	0,7	0,8	-	-	0,5	0,5	0,8

Tabla 3: MAUT unidades originales

Fuente: Autores

Alternativa		Minería Asturias	Minería Castilla y León	Minería Castilla La Mancha	Minería Aragón	Minería cielo abierto (CA)	Minería subterránea (SUB)	Minería antracita	Minería bituminosos	Minería sub-bituminosos
Criterio	Weight	Localización geográfica				Tecnología		Tipo producto		
Costes de operación	10%	2	1	2	4	2	2	1	2	4
Productividad por tipo de carbón	13%	-	-	-	-	-	-	0	0	4
Costes de operación/minería CA	8%	0	1	2	4	-	-	0	1	4
Costes de operación/minería SUB	8%	2	2	-	4	-	-	2	2	4
Costes de operación Asturias	4%	2	-	-	-	0	2	2	2	-
Costes de operación CyL	4%	-	1	-	-	1	2	1	2	-
Costes de operación CM	4%	-	-	2	-	2	-	-	2	-
Costes de operación Aragón	4%	-	-	-	4	4	4	-	-	4
Dependencia de Planta de carbón	20%	2	5	1	3	-	-	3	3	3
Dif. acceso carbón de importación	25%	1	4	4	5	-	-	2	2	3
Valor ponderado		1,1	2,3	1,7	3,1	0,5	0,5	1,6	1,9	3,1

Tabla 4: Unidades normalizadas MAUT  
Fuente: Autores

En cuanto al tipo de producto, la producción de carbón sub-bituminoso es, sin duda alguna, el claro vencedor.

Como se ha comentado anteriormente, estos resultados se pueden utilizar para anticipar la posible evolución del sector de la minería del carbón autóctono en el futuro. Como premisa, se han considerado tres escenarios posibles con el fin de incorporar tanto las diferentes condiciones de demanda esperadas como la posible respuesta del sector:

### 3.1. ESCENARIO DE ALTA DEMANDA. A CORTO PLAZO.

En el escenario de alta demanda, la elevada disponibilidad de carbón autóctono es capaz de mantener un ritmo constante de operación en las minas del norte de España y, eventualmente, el suministro de carbón nacional alcanza una cuota razonable del total para generación de electricidad. En esta situación, el carbón nacional se puede considerar como un complemento importante al carbón importado, a la vez que proporciona cobertura para la seguridad de suministro cuando es necesario. Bajo este escenario, las actividades mineras en Asturias y Castilla y León mantienen un volumen de producción razonable, tanto en explotaciones subterráneas como a cielo abierto. En el caso de Teruel, el nivel de producción se mantiene estable.

### 3.2. ESCENARIO DE BAJA DEMANDA. A MEDIANO Y LARGO PLAZO

En el escenario de baja demanda, las centrales de carbón se adaptan con el fin de utilizar prioritariamente carbón importado a la vista de la baja competitividad del carbón nacional, exceptuando el carbón sub-bituminoso en Aragón. En este escenario de operaciones restringidas en el norte del país, solamente las minas en Castilla y León permanecen a la espera como respaldo de garantía de suministro y por razones de seguridad energética.

## 3. CONCLUSIÓN

La utilización de metodologías multicriterio MCDM y multiatributo MAUT con el fin de anticipar la posible evolución del sector del carbón en España, nos permite elaborar posibles alternativas para analizar esta cuestión. El alcance de la investigación se amplía con el fin de aportar ideas útiles sobre la contribución del carbón nacional a la seguridad energética de España en el futuro.

Los resultados indican que, a pesar de la razonable disponibilidad de recursos en el norte de España, tanto en Asturias como en Castilla y León, la única alternativa que puede considerarse comercialmente viable de forma sostenible, es la producción de carbón sub-bituminoso a cielo abierto en Aragón. Los costes de producción de carbón en todas las regiones excepto en Aragón, se sitúan en una banda en torno a 90 euros/tec<sup>8</sup>, lo que está lejos de precios de carbón importado. Además es previsible que sólo las minas en Castilla y León, aparte de los de Aragón, podrían permanecer operativas en la práctica con el fin principal de garantizar la seguridad del suministro eléctrico en el país. La proximidad de las minas en Asturias a la costa, sitúa estas instalaciones en una difícil posición para continuar operando en el futuro.

Sobre la base de estos resultados se puede avanzar que aunque en el corto plazo las zonas mineras en el norte de España podrían seguir produciendo una cantidad limitada de carbón, en el medio y largo plazo, sólo las actividades dirigidas a la producción de carbón sub-bituminoso a cielo abierto en Aragón son viables.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] European Commission. Eurocoal. 2014. Transforming energy supply in the EU: what can coal and clean coal technologies deliver?. 10th Coal Dialogue. 11 June 2014. Brussels.
- [2] Cartelle-Barros, J. et al. 2016. Sostenibilidad de los sistemas de generación eléctrica. Revista DYNA. <http://dx.doi.org/10.6036/7932>
- [3] Rabanal, N.G., 2009. Coal restructuring in Spain: Continuity and uncertainty? Energy Policy 37 (11), 4373-4378.
- [4] Kuby, M., Xie, Z., 2001. The effect of restructuring on US coal mining labour productivity, 1980-1995. Energy Journal 26, 1015-1030.
- [5] Pohekar, S.D., Ramachandran, M. 2004. Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning—A review. Birla Institute of Technology and Science (BITS), India. Renewable and Sustainable Energy Reviews 8 (2004) 365-381
- [6] Clemen, R. T. and T. Reilly. 2001. Making Hard Decisions with Decision Tools. Mason, OH: South-Western Cengage Learning, 2001.
- [7] Wallenius, J. et al.. 2008. Multiple criteria decision making, multiattribute utility theory: Recent accomplishments and what lies ahead. Management Science, 54(7), 1336-1349.
- [8] Keeney, R. and Raiffa H., 1976. Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs. New York, NY, USA: Wiley.
- [9] Munier, N., 2011. A Strategy for Using Multicriteria Analysis in Decision-Making. Springer Science and Business Media B.V. 2011
- [10] Vincke, P., 1992. Multicriteria decision aid. New York: Wiley.

<sup>8</sup> 6,257 Kcal/Kg de alto poder calorífico, equivalente a alrededor de 80 euros/tec calidad del carbón importado en 2014