



Estudios de Economía Aplicada

ISSN: 1133-3197

secretaria.tecnica@revista-eea.net

Asociación Internacional de Economía

Aplicada

España

IGLESIAS-GÓMEZ, GUILLERMO; SEIJAS-DÍAZ, AMPARO
Evaluación de la eficiencia productiva de los parques eólicos gallegos
Estudios de Economía Aplicada, vol. 26, núm. 3, diciembre, 2008, pp. 1-26
Asociación Internacional de Economía Aplicada
Valladolid, España

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30113182008>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

Evaluación de la eficiencia productiva de los parques eólicos gallegos*

GUILLERMO IGLESIAS-GÓMEZ y AMPARO SEIJAS-DÍAZ

Departamento de Economía Aplicada

UNIVERSIDADE DA CORUÑA

e-mail: gwig@udc.es; asdeai@udc.es

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es evaluar el nivel de eficiencia en la generación de electricidad de los parques eólicos gallegos en el año 2004 mediante técnicas no paramétricas DEA como método principal, y de un modo complementario mediante técnicas paramétricas tanto determinísticas como estocásticas. Los resultados muestran que el nivel de eficiencia medio es bastante elevado aunque existen unidades que teniendo en cuenta las condiciones en que operan no alcanzan niveles adecuados de eficiencia. Esta información puede ser relevante para los promotores de los parques eólicos, el regulador del sector y la sociedad en general.

Palabras clave: Parque eólico; eficiencia, DEA.

Evaluation of the Efficiency Levels of Galician Wind Parks

ABSTRACT

The aim of this research is to evaluate the efficiency levels of Galician wind parks in the generation of electricity in the year 2004. Methodologically, the main instruments used are Data Envelopment Analysis (DEA) techniques, as complements, parametric deterministic and stochastic techniques. The results show that there is a high average level of efficiency; in general some units however, do under perform in spite of the suitability of their operating conditions. This information should be useful for corporate promoters of wind parks, the regulator of the sector and society in general.

Keywords: Wind Park; Efficiency; Data Envelopment Analysis (DEA).

Clasificación JEL: Q4.

Artículo recibido en mayo de 2007 y aceptado para su publicación en febrero de 2008.
Artículo disponible en versión electrónica en la página www.revista-eea.net, ref. 0-26309.

* Una versión preliminar de este trabajo fue presentada en el I León Workshop en Eficiencia, celebrado en septiembre de 2006.

1. INTRODUCCIÓN

Las fuentes de energía renovable, entendidas como aquellas cuyo suministro se obtiene de modo continuo y natural gracias a su capacidad de regeneración en períodos cortos de tiempo, constituyen hoy día una de las referencias en cualquier debate sobre el sistema energético a adoptar. La preocupación por la seguridad en el suministro de energía, el necesario desarrollo de los países más pobres y en especial la conciencia creciente de las consecuencias medioambientales de los procesos de transformación y uso de la energía, han traído a primera escena a las energías renovables¹.

Dentro del abanico de sectores vinculados a la energía más estudiados, destaca el sector eléctrico debido a la importancia creciente de la electricidad para cualquier economía, a los volúmenes de recursos que absorbe, a ser un sector históricamente muy regulado y que ha sufrido un proceso de privatización significativo en los últimos años, acompañado en muchos casos de la creación de mercados. A esto se añade su complejidad técnica que requiere un alto nivel de coordinación y la preocupación por sus impactos ambientales. Todo ello ha dado lugar a que tanto economistas como investigadores de otras áreas se hayan preocupado por tratar especialmente la cuestión de la eficiencia para analizar los diferentes procesos productivos que están detrás de este sector tan amplio.

La referencia inicial de los estudios de la eficiencia en la fase de generación de la electricidad nos conduce a principios de los sesenta, cuando la preocupación de los economistas era el establecimiento de una función de producción que reflejase el comportamiento productivo de las plantas de generación térmica de electricidad, para poder así analizar la evolución de la productividad en relación con el cambio tecnológico y la presencia de economías de escala.

Se suele citar el trabajo de Nerlove publicado en 1963 como punto de arranque del debate de estas cuestiones en la literatura. Esta línea es seguida posteriormente por Barzel (1964) empleando métodos paramétricos y mediante técnicas de programación lineal por Seitz (1971). También se abrió paso la posibilidad de incluir fronteras estocásticas en los estudios paramétricos con el estudio seminal de Schmidt y Lovell (1979). Y de especial interés para nuestro trabajo es el empleo de técnicas no paramétricas DEA cuyas primeras aplicaciones figuran en el trabajo de Färe, Grosskopf y Logan (1983) y de un modo marginal en un artículo de Banker (1984)².

La mayoría de los trabajos en este campo especifican una función de producción con tres inputs principales — trabajo, combustible y capital — y un output —

¹ Véase Najam y Cleveland (2003), como ejemplo de los resultados de las distintas cumbres del medio ambiente y desarrollo en relación con la energía y el papel de las energías renovables.

² Desde ese momento se han realizado múltiples estudios aplicando esta técnica en el campo de la generación de electricidad. Véanse Färe, Grosskopf y Pasurka (1986), Färe Grosskopf, Yaisawarg, Li y Wang (1990), Golany, Roll y Rybak (1994), Pollit (1996), Meibodi (1998), Chitkara (1999), Olatubu y Dismukes (2000), Park y Lesourd (2000), Sueyoshi y Goto (2001), Murillo y Vega (2001) y Lam y Shiu (2004).

la cantidad de energía eléctrica generada—. Esta estructura conceptual se mantiene hasta nuestros días, pero no son pocas las consideraciones que han surgido en torno a este núcleo básico para cualquier modelo que analice la generación de electricidad. Entre otras, la inclusión de impactos ambientales como outputs, por ejemplo el trabajo de Golany, Roll y Rybak (1994), el tipo de titularidad pública o privada de las empresas Pollit (1996), el entorno competitivo y la incidencia de la actividad de distribución de la electricidad en los resultados de eficiencia, caso analizado por Sueyoshi y Goto (2001). También cabe destacar una serie de trabajos en los que se combinan técnicas no paramétricas con paramétricas manteniéndose la estructura básica de variables input y output, por ejemplo el estudio de Meibodi (1998) para plantas de generación en Irán.

En nuestro trabajo nos centramos, dentro de las energías renovables, en la evaluación de la eficiencia productiva en la generación de electricidad mediante energía eólica. Nos ocupa esta cuestión por su escaso tratamiento en la literatura, a pesar de su repercusión sobre todo para los agentes implicados en su desarrollo. Y para ello nos apoyamos en la información disponible en Galicia sobre este tipo de generación gracias al importante desarrollo que ha tenido en la última década en esta comunidad.

Un parque eólico constituye una unidad productiva que es explotada para la producción de electricidad con unos inputs, de ahí que sea susceptible de ser analizada su eficiencia técnica. En nuestro caso partimos de la consideración como unidades de decisión y gestión de todos los parques eólicos ubicados en Galicia que han operado a lo largo de todo el año 2004. Se trata en principio de unidades homogéneas que utilizan fundamentos productivos similares y que pueden compararse entre sí en términos de eficiencia a través de algún método no frontera o frontera³.

Dada la naturaleza del proceso productivo hemos considerado adecuado emplear las técnicas DEA no paramétricas como método principal para evaluar la eficiencia productiva de los parques eólicos. A priori las características productivas de la generación de electricidad eólica apuntan a una difícil modelización bajo una forma funcional dada. En este sentido, la metodología DEA se caracteriza por su flexibilidad al necesitar pocos supuestos de partida, además de permitir la obtención de conclusiones individualizadas sobre rendimientos de escala y grupos de comparación. Los índices de eficiencia se obtienen a partir de una frontera de mejor práctica delimitada por las observaciones muestrales disponibles, lo que obliga a que alguna se sitúe sobre la misma⁴.

De todos modos también empleamos técnicas frontera paramétricas determinísticas y estocásticas, dado que permiten enriquecer la información empírica que podemos obtener de los parques eólicos gallegos, complementando los resultados de los modelos DEA, tanto en la dirección de aportar nuevas conclusiones, como en su caso reforzando la robustez de las ya obtenidas, a modo de análisis de sensibili-

³ Sobre métodos de evaluación de la eficiencia véanse Álvarez Pinilla (2001) y Coelli, Rao, O'Donnell y Battese (2005).

⁴ Este modo de operar supone que los índices obtenidos sean relativos.

dad alternativo. Con estos métodos además se supera una de las debilidades propia de los modelos DEA que es el hecho de no haber desarrollado un soporte estadístico sólido para sus resultados.

2. PROCESO PRODUCTIVO: VARIABLES OUTPUT E INPUT

El proceso productivo en la generación de electricidad eólica se puede dividir en tres fases o ámbitos diferenciados, en los cuales se toman decisiones que inciden en los resultados de eficiencia y que mostramos en el siguiente gráfico.

GRÁFICO 1
Proceso Productivo.

Fase I	Fase II	Fase III
Determinación del recurso	Diseño y construcción	Explotación

Fuente: Elaboración propia.

Fase I: Determinación del recurso eólico del enclave.

Se selecciona una zona en base a información general de mapas eólicos, a resultados de estaciones meteorológicas cercanas y a la experiencia de los habitantes de la zona. Delimitada la ubicación potencial para el parque se destinan recursos a la medición de las velocidades y direcciones del viento en aquellos puntos que se consideren representativos incluyendo un estudio topográfico detallado del terreno. Finalmente procede el estudio de la información sobre el recurso eólico que ha de conducir a la decisión de construir o no el parque.

Fase II: Diseño del proyecto y construcción.

Se trata de una fase básicamente de ingeniería en la cual las decisiones más relevantes son el tipo de máquina a utilizar, potencia eléctrica nominal, altura de buje y diámetro del rotor; y a nivel agregado decidir la superficie a ocupar, la potencia total a instalar y la disposición de las máquinas sobre el terreno. Todas estas decisiones vienen determinadas en gran medida por el tratamiento y seguimiento de la información obtenida en la fase anterior y por las características específicas de la máquina tipo seleccionada.

Fase III: Explotación.

En esta fase es donde se determinan los resultados productivos del parque, si bien están condicionados por las decisiones adoptadas en las fases previas. El objetivo principal es lograr la mayor tasa de disponibilidad optimizando las paradas técni-

cas obligadas para el mantenimiento, y actuando con la mayor rapidez y efectividad ante cualquier avería o desconexión de un aerogenerador o de cualquier fallo de un elemento de la instalación.

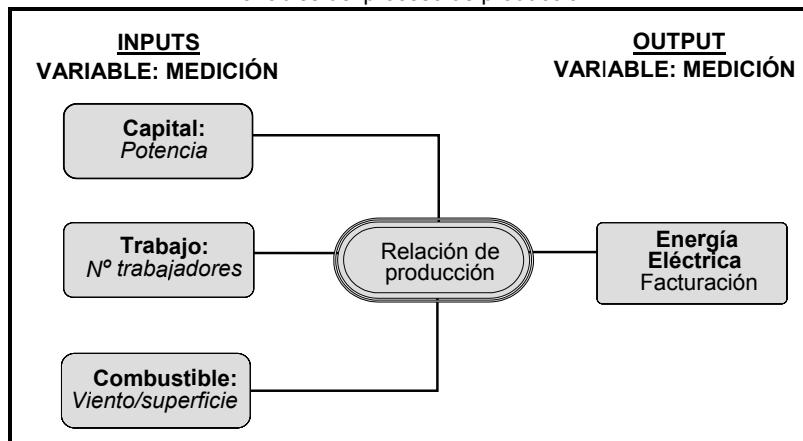
El output del proceso productivo sería la cantidad de energía eléctrica entregada a la red, siendo los inputs fundamentales el capital que incluye básicamente a los aerogeneradores, el factor trabajo y el viento que actúa a modo de combustible y que es captado mediante la superficie barrida por los rotores. Se puede por lo tanto establecer una relación de producción muy parecida a la de cualquier tecnología tradicional de generación de electricidad y presentar las variables que formarían parte de una función de producción microeconómica. En este caso la formulación general sería:

$$E = f(K, L, C)$$

Siendo: E la energía eléctrica; K el capital; L el trabajo y C el combustible.

Esquemáticamente la adaptación para la energía eólica puede representarse del siguiente modo:

GRÁFICO 2
Variables del proceso de producción.



Fuente: Elaboración propia.

El output se relaciona de forma general con la cantidad de electricidad generada por cada parque. En nuestro trabajo vamos a incluir un concepto amplio que engloba dos componentes uno de energía activa y otro de energía reactiva, siendo el principal el primero⁵. Para agrupar estos dos componentes, optamos por considerar como output la facturación estimada en miles de euros de los parques eólicos. Para

⁵ La energía reactiva acompaña como un vector perpendicular al componente principal de energía activa. Se trata de un subproducto que tiene importancia para mantener la estabilidad del sistema eléctrico, pudiendo darse situaciones de consumo de reactiva y de aporte de reactiva.

su determinación aplicamos la remuneración promedio del kWh de estas instalaciones pertenecientes al Régimen Especial según los datos elaborados por la CNE (2005), obteniéndose los complementos de energía reactiva a partir de lo estipulado por la Orden del Ministerio de Industria de 12 de Enero de 1995, de modo que se resumen en una cifra ambos componentes de energía.

En cuanto a los inputs, el factor capital lo asociamos con la potencia instalada en MW de los parques, que obtenemos como producto del número de aerogeneradores por la potencia nominal de cada uno de ellos. Respecto al factor trabajo hemos considerado el número de hombres año a tiempo completo empleado en las tareas de operación, mantenimiento y control de los parques⁶. En este punto cabe destacar que se dan distintas formas de asignación del trabajo, entre ellas operarios fijos en parque, parques cabecera, patrullas que se desplazan desde un centro logístico, mantenimiento a cargo del tecnólogo, modelos combinados de gestión y sistemas de subcontratación. Hemos homogeneizado en la medida de lo posible esta información basándonos en criterios de asignación facilitados por los promotores.

Finalmente el combustible que alimenta a las instalaciones depende del viento y es dado exógenamente por la naturaleza. El promotor trata de aprovechar la ubicación de sus aerogeneradores orientando una superficie hacia la dirección del viento para transformar su energía mecánica en energía eléctrica, por lo tanto nuestro input es la energía que nos aporta el viento de un determinado enclave multiplicada por la superficie interpuesta. Siguiendo los principios de la generación eólica el combustible se calcularía del siguiente modo⁷:

$$C = \frac{1}{2} \times \rho \times S \times v_m^3$$

Siendo: ρ la densidad del aire, S la superficie y v_m la velocidad media del viento.

En nuestro estudio contamos con los datos técnicos de los aerogeneradores gallegos, en términos de longitud de pala y por lo tanto de superficies barridas por cada rotor, con lo cual aproximamos de un modo inmediato la superficie interpuesta. En relación con el viento y su velocidad, partimos de la información obtenida del Instituto Nacional de Meteorología (datos de las estaciones de Cabo Vilano, Estaca de Bares e históricos de Monteventoso), de estaciones de medida del Sistema de Información Ambiental de la Xunta (Muralla y Alto do Rodicio), y de la información de tres parques eólicos localizados respectivamente, uno al norte de la provincia de A Coruña, otro en la zona centro de la región lindando las provincias de Pontevedra y A Coruña y por último el parque experimental de Sotavento situado también en el interior en el límite de la provincia de Lugo y A Coruña (Xerma-

⁶ Hemos optado por la definición tradicional, si bien pueden resultar de interés otras como la proporción entre trabajadores y número de aerogeneradores.

⁷ Véase Rodríguez, Arnalte y Díaz (2003).

de-Monfero). De este modo tenemos una medida aproximada del contenido energético del viento en la mayoría de las zonas de influencia donde están los parques⁸.

A la hora de precisar las velocidades del viento para cada parque hemos ponderado tres elementos que son: la proximidad a la costa, la altitud y la experiencia de las medidas de viento en Galicia. Es un hecho constatado y que se cumple con la información de velocidades de viento que disponemos que la velocidad del viento aumenta con la proximidad a la costa y cuanto mayor es la altitud del enclave. Respecto a la experiencia histórica de los mapas eólicos se puede observar que la zona norte de la provincia de A Coruña es la que cuenta con velocidades medias más elevadas descendiendo éstas a medida que nos desplazamos más al sur y más hacia el interior de Galicia. En la tabla 1 resumimos las características de los parques.

TABLA 1
Características de los parques eólicos gallegos (valores medios).

Año	Potencia ^a	Trabajo	Velocidad del viento	Superficie interpuesta	Factura estimada	Número de parques
2004	27,80 (11,46)	3,86 (1,48)	7,52 (0,32)	6,90 (3,04)	4538 (1961)	56

Entre paréntesis desviación típica

^a La potencia se mide en MW, el factor trabajo se aproxima por el número de trabajadores a tiempo completo, la velocidad del viento en m/s, superficie expuesta en hectáreas y la factura en miles de €.

Fuente: Elaboración propia.

3. RESULTADOS DE LOS MODELOS DEA APLICADOS

La aplicación de la metodología DEA requiere decidir la forma del espacio de producción. En este sentido, hay que valorar las distintas opciones de rendimientos variables a escala, la presencia o no de disponibilidad débil en los inputs o si es asumible el supuesto de convexidad para la frontera. Posteriormente es preciso determinar si los modelos son orientados al input o al output, o bien se prefiere que no tengan ningún tipo de orientación⁹.

En nuestro caso hemos optado por comprobar las dos opciones tradicionales en las modelizaciones DEA respecto a los rendimientos a escala. Por una parte la propuesta de Banker, Charnes y Cooper (1984), abreviadamente *BCC*, que permite la presencia de rendimientos variables a escala en la frontera, y por otra, el programa de producción de Charnes, Cooper y Rhodes (1978), conocido como *CCR*, que

⁸ Dada la información de la que disponemos, la velocidad media anual es la variable que tomamos como referencia para nuestros cálculos del combustible. Si contásemos con información sobre la distribución de velocidades del viento a lo largo de un año, podríamos adaptarnos mejor a la definición teórica del combustible mediante aproximaciones estadísticas como la distribución de Weybull.

⁹ Véase Cooper, Seiford y Tone (2002).

contempla rendimientos constantes a escala¹⁰. En cuanto a la disponibilidad débil, no creemos que exista ningún inconveniente para adoptar la opción de disponibilidad fuerte tanto en inputs como en el output. Respecto al supuesto de convexidad tampoco encontramos problemas, puesto que es factible cualquier combinación de inputs dentro del espacio de producción que determinan los parques eólicos.

En los modelos orientados hemos optado por las versiones en dirección al output, debido a que el objetivo en el período analizado de los promotores de los parques es producir la máxima energía sin ningún tipo de restricción. El comportamiento productivo no está motivado por factores exógenos como sucede en otros modelos, en los que la provisión de electricidad está condicionada por la demanda, o por lo que decida un gestor del sistema, ni tampoco por una situación de competencia en el mercado de producción con los demás promotores ni con otras tecnologías¹¹.

Desde otro punto de vista, dada la naturaleza de esta forma de producción creamos más adecuado este enfoque debido a que tenemos dos inputs de difícil modificación cuando menos en el corto plazo como son la potencia instalada y el contenido energético o combustible. Junto a ello, parece razonable pensar en términos de output que se ha dejado de producir en referencia a unidades similares, más que en reducciones de inputs para lograr la misma producción. En todo caso, también utilizamos un modelo no radial y no orientado basado en el trabajo de Tone (2001) que denominamos *MBH*¹², para incorporar la presencia de holguras en las variables y así distinguir el grado de aprovechamiento de los inputs y diferenciar un componente de eficiencia mixta.

En la tabla 2 se resumen los resultados con los programas *BCC* y *CCR* con una orientación al output. Las unidades figuran ordenadas en función de la eficiencia *BCC-O* lograda, asimismo se muestra el ranking de las unidades obtenido con cada modelo y en las dos últimas columnas la información sobre la eficiencia de escala de las unidades y sobre el tipo de rendimientos a escala de la unidad virtual de referencia de cada parque eólico en el modelo *BCC-O*.

La eficiencia relativa promedio de las unidades bajo el modelo *BCC-O* es de un 86,25%, que tal y como prevé la teoría es superior al promedio *CCR-O*, dado que se está incorporando una restricción adicional a los programas de optimización. La relación entre ambos grupos de índices nos la da la eficiencia de escala que se obtiene mediante la expresión:

$$\theta_{EE} = \frac{\theta_{CCR}}{\theta_{BCC}}$$

¹⁰ El uso conjunto de los dos permite realizar comparaciones sobre la dimensión óptima de operación y delimitar el concepto de eficiencia técnica.

¹¹ Cuando menos en el período considerado en el cual estaba en vigor el Real Decreto 2818/1998 de apoyo a las renovables. A partir de marzo de 2004 con el Real Decreto 436/2004 los parques eólicos se han ido incorporando al mercado de ofertas aunque siguen contando con las ventajas de su pertenencia al Régimen Especial, teniendo como objetivo alcanzar la máxima generación posible.

¹² Modelo Basado en Holguras.

Donde se recoge la relación entre la eficiencia técnica total medida con el índice θ_{CCR} y la eficiencia técnica pura obtenida mediante el índice θ_{BCC} . En nuestra población de parques eólicos la eficiencia media de escala es de un 94,74%, con lo que se puede decir que **el componente principal de la ineficiencia total observada es atribuible a ineficiencia técnica pura**.

En el análisis por unidades se observa como todas las unidades mejoran o mantienen su eficiencia al aplicar el modelo *BCC-O*, contando con siete unidades que alcanzan el máximo de eficiencia *BCC*, siendo el mínimo un 64,56%. En cuanto al ranking logrado las posiciones no son muy diferentes con una correlación de Pearson de 0,9657 entre las posiciones *BCC* y *CCR*, lo que avala la ordenación obtenida.

En relación con la columna de rendimientos a escala destacamos el predominio de los rendimientos decrecientes, con un total de 51 unidades entre eficientes y proyectadas que presentan esa característica, frente a cinco con rendimientos constantes. Este resultado se interpreta analizando las unidades *CCR-O* eficientes 4B4N1M31 y 4B4M1S03, que son las que delimitan el espacio de producción con rendimientos constantes¹³. Se trata de dos unidades de pequeña dimensión, concretamente están entre las 10 más pequeñas de la población de parques eólicos, utilizando menos potencia, menos trabajadores y también un menor combustible en relación con la mayoría. Este hecho es el que marca que el resto de unidades se sitúen en rendimientos decrecientes a escala al compararse con una frontera definida por estas unidades.

TABLA 2
Resultados *BCC-O*, comparación *CCR-O* y eficiencia de escala.

DMU	θ_{BCC}	θ_{CCR}	Puesto	Puesto	θ_{EE}	Rendimientos
4B4N1M31	1,0000	1,0000	1	1	1,0000	constantes
4B4M1S03	1,0000	1,0000	1	1	1,0000	constantes
4D7V6M53	1,0000	0,9890	1	3	0,9890	decrecientes
4A6N4G09	1,0000	0,9822	1	4	0,9822	decrecientes
4B4M1M15	1,0000	0,9611	1	6	0,9611	decrecientes
4G8M4G46	1,0000	0,9591	1	7	0,9591	decrecientes
4J3N5G28	1,0000	0,9141	1	15	0,9141	decrecientes
4B4V1M54	0,9934	0,9270	8	12	0,9331	constantes
4B6M1S20	0,9792	0,9633	9	5	0,9837	decrecientes
4A3V4G18	0,9757	0,8825	10	18	0,9044	decrecientes
4K1V6M02	0,9701	0,9378	11	11	0,9668	decrecientes
4D7M6S29	0,9694	0,9515	12	8	0,9816	decrecientes
4B6M1M48	0,9645	0,9450	13	10	0,9797	decrecientes
4B4V1M21	0,9629	0,9485	14	9	0,9850	decrecientes
4A5V4G06	0,9604	0,8626	15	22	0,8982	decrecientes
4B4V1M43	0,9475	0,9220	16	14	0,9731	constantes
4F4V6M24	0,9468	0,9222	17	13	0,9740	decrecientes
4A3M4S47	0,9328	0,8473	18	23	0,9084	decrecientes
4A6V4G55	0,9219	0,8870	19	17	0,9621	decrecientes

¹³ Formando parte de la frontera de mejor práctica.

TABLA 2 (Continuación)
Resultados BCC-O, comparación CCR-O y eficiencia de escala.

DMU	θ_{BCC}	θ_{CCR}	Puesto	Puesto	θ_{EE}	Rendimientos
4A6M4S01	0,9194	0,8327	20	27	0,9057	decrecientes
4A4M4S52	0,9148	0,8182	21	30	0,8944	decrecientes
4A9M4S57	0,9118	0,9084	22	16	0,9962	decrecientes
4A6V4G26	0,9041	0,8673	23	21	0,9593	decrecientes
4F5M6M40	0,8965	0,8773	24	19	0,9786	decrecientes
4F5V6M30	0,8934	0,8772	25	20	0,9818	decrecientes
4C4M5G04	0,8888	0,8354	26	26	0,9399	decrecientes
4A3V4G33	0,8765	0,7928	27	34	0,9044	decrecientes
4C3N5G44	0,8753	0,7965	28	33	0,9100	decrecientes
4G9M4S51	0,8743	0,8405	29	25	0,9614	decrecientes
4A6N4G19	0,8587	0,8435	30	24	0,9822	decrecientes
4C5V5P50	0,8573	0,8283	31	28	0,9662	decrecientes
4B4V1M23	0,8538	0,7967	32	32	0,9331	constantes
4F5N6M25	0,8425	0,8223	33	29	0,9761	decrecientes
4H3N3G45	0,8328	0,8098	34	31	0,9723	decrecientes
4C1V5P14	0,8321	0,7434	35	40	0,8934	decrecientes
4C3M5G39	0,8308	0,7779	36	36	0,9363	decrecientes
4E3V2P12	0,8285	0,7625	37	37	0,9204	decrecientes
4A3V4G49	0,8282	0,7491	38	38	0,9044	decrecientes
4C4M5G22	0,8246	0,7923	39	35	0,9609	decrecientes
4C3N5G37	0,8242	0,7252	40	43	0,8799	decrecientes
4K1V6M41	0,8215	0,7441	41	39	0,9057	decrecientes
4C3V5P13	0,8095	0,7370	42	42	0,9104	decrecientes
4D3M1S07	0,7877	0,7004	43	46	0,8891	decrecientes
4B3V1M16	0,7495	0,7383	44	41	0,9850	decrecientes
4D3M1S27	0,7470	0,6895	45	48	0,9230	decrecientes
4A2V4G34	0,7425	0,6722	46	51	0,9053	decrecientes
4F5V6M36	0,7361	0,7211	47	44	0,9796	decrecientes
4H3N3M05	0,7304	0,6692	48	52	0,9163	decrecientes
4F4M6M10	0,7292	0,7159	49	45	0,9818	decrecientes
4D4N4G17	0,7276	0,6727	50	50	0,9246	decrecientes
4G9M4S08	0,6976	0,6916	51	47	0,9914	decrecientes
4F4M6M56	0,6920	0,6806	52	49	0,9836	decrecientes
4J3V3P11	0,6709	0,6216	53	53	0,9265	decrecientes
4A2N4G42	0,6699	0,6161	54	54	0,9198	decrecientes
4E4V2P32	0,6519	0,6006	55	55	0,9213	decrecientes
4H3M3G35	0,6456	0,5927	56	56	0,9180	decrecientes
Promedios	0,8625	0,8172			0,9474	

Fuente: Elaboración propia.

El resultado anterior responde a la lógica productiva de la generación eólica de electricidad, dado que los parques eólicos se enfrentan a ley de los rendimientos decrecientes y tienen entre sus fuentes de ineficiencia el diseño de las ubicaciones dentro del parque para evitar apantallamientos. La disposición de los aerogeneradores resulta decisiva a la hora de lograr el máximo nivel de producción del parque en función de las posibilidades individuales de cada turbina, reflejadas de forma

agregada en lo que se puede denominar curva de potencia bruta del parque. Lógicamente se intenta alinear al mayor número de aerogeneradores en filas perpendiculares a la dirección del viento incidente de más intensidad y mayor frecuencia, separando en la medida de lo posible las filas entre sí¹⁴. La situación ideal de un enclave supondría que hubiese sólo una dirección dominante, o en caso de haber dos que éstas fuesen opuestas.

La proporción entre la producción teórica de un parque eólico respecto a la producción agregada de los aerogeneradores considerados aisladamente en las mismas posiciones que tienen en el parque sin ninguna perturbación, se considera un indicador de la eficiencia en el diseño del parque. De ahí que a mayor número de aerogeneradores en un parque sea habitual que se den pérdidas de eficiencia.

La constatación en nuestro estudio de este hecho nos hace pensar que **resultan más adecuadas las comparaciones de comportamientos productivos bajo el supuesto de rendimientos variables a escala que incluye el modelo BCC**, puesto que las unidades de gran dimensión difícilmente pueden alcanzar las proporciones de output respecto a los inputs que alcanzan las unidades de menor dimensión por el límite que marca el efecto diseño¹⁵. De todos modos la información de los índices de eficiencia CCR es muy útil para aproximar la eficiencia en el diseño que podemos asociar con la eficiencia de escala de las unidades con eficiencia técnica pura máxima.

Los programas DEA facilitan otra información de interés como son las holguras en inputs y los grupos de comparación de las unidades (tabla 3). De este modo el gestor puede identificar los inputs que no utiliza eficientemente y también puede conocer cuáles son las unidades de referencia respecto a las que se evalúa su eficiencia.

Las holguras presentes señalan al input trabajo como el que presenta un mayor exceso, con un valor promedio de 9,61% y con la mitad de las unidades con alguna holgura¹⁶. La potencia instalada es la variable input que incide más en los resultados de eficiencia alcanzados presentando un exceso promedio de 2,16% y sólo catorce unidades con holguras. Respecto al combustible las holguras indican un aprovechamiento inadecuado por parte de los parques de la energía del viento captada por los aerogeneradores, con un exceso en promedio de 3,24%.

¹⁴ El terreno ocupado por el parque tiene un valor económico, de ahí la necesidad de optimizar las distancias entre aerogeneradores dentro de cada fila y entre filas. Incluso sería lógico, dado el tipo de producción, emplear para la especificación del input combustible sólo la superficie de ese terreno.

¹⁵ En este sentido sería razonable un modelo que sólo permitiese rendimientos no crecientes a escala.

¹⁶ La especificación alternativa del input trabajo como número de trabajadores por aerogenerador no reduce significativamente las holguras. En el caso del modelo BCC, las holguras de este input supondrían en promedio un 9,48%. En cuanto al valor promedio de eficiencia de las unidades se vería incrementado en un 1,4%, gracias al aumento en sus índices que tienen con esta especificación los parques más antiguos, que son los que cuentan con más trabajadores y aerogeneradores para potencias instaladas similares.

TABLA 3
Holguras y grupos comparación BCC.

DMU	Hipotencia	h _{trabajo}	h _{combustible}	Grupo comparación y λ_j	
				4B4N1M31	4B4M1S03
4B4N1M31	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	1,0000
4B4M1S03	0,00%	0,00%	0,00%	4D7V6M53	1,0000
4D7V6M53	0,00%	0,00%	0,00%	4A6N4G09	1,0000
4A6N4G09	0,00%	0,00%	0,00%	4B4M1M15	1,0000
4B4M1M15	0,00%	0,00%	0,00%	4G8M4G46	1,0000
4G8M4G46	0,00%	0,00%	0,00%	4J3N5G28	1,0000
4J3N5G28	0,00%	0,00%	-12,59%	4B4N1M31	0,6667
4B4V1M54	-11,46%	0,00%	0,00%	4A6N4G09	0,6757
4B6M1S20	-14,49%	0,00%	0,00%	4G8M4G46	0,2609
4A3V4G18	0,00%	-7,15%	-9,51%	4J3N5G28	0,7391
4K1V6M02	0,00%	0,00%	-8,95%	4B4M1S03	0,8796
4D7M6S29	-3,12%	-1,72%	0,00%	4D7V6M53	0,8835
4B6M1M48	-11,29%	0,00%	0,00%	4A6N4G09	0,3628
4B4V1M21	0,00%	0,00%	-0,33%	4A6N4G09	0,0110
4A5V4G06	0,00%	-8,99%	-3,28%	4G8M4G46	0,6542
4B4V1M43	-4,04%	0,00%	-4,51%	4B4N1M31	0,8533
4F4V6M24	0,00%	-21,84%	0,00%	4B4M1S03	0,3532
4A3M4S47	0,00%	0,00%	-4,96%	4A6N4G09	0,0657
4A6V4G55	0,00%	-32,06%	0,00%	4B4M1S03	0,2022
4A6M4S01	0,00%	-7,18%	-3,17%	4G8M4G46	0,7240
4A4M4S52	0,00%	-8,63%	-10,61%	4C8M4G46	0,6680
4A9M4S57	-20,07%	-46,87%	0,00%	4B4M1S03	0,7656
4A6V4G26	0,00%	-18,25%	0,00%	4B4M1S03	0,0215
4F5M6N40	0,00%	-28,92%	0,00%	4B4M1S03	0,0088
				4D7V6M53	0,0088
				4D7V6M53	0,8161
				4G8M4G46	0,9750
				4G8M4G46	0,1752

TABLA 3 (Continuación)
Holguras y grupos comparación BCC

DMU	h_{Potencia}	h_{Trabajo}	$h_{\text{Combustible}}$	Grupo comparación y λ_j		
4F5/6M30	0,00%	-22,33%	0,00%	4B4M1S03	0,1321	4D7V6M53
4C4M5G04	-4,21%	0,00%	0,00%	4A6N4G09	0,4391	4G8M4G46
4A3V4G33	0,00%	-7,15%	-9,51%	4G8M4G46	0,2609	4J3N5G28
4C3N5G44	0,00%	0,00%	-7,13%	4A6N4G09	0,6176	4G8M4G46
4G9M4S51	-21,73%	-3,16%	0,00%	4D7V6M53	0,1724	4G8M4G46
4A6N4G19	0,00%	0,00%	0,00%	4A6N4G09	1,0000	0,8276
4C5V5P50	-3,86%	-3,45%	0,00%	4D7V6M53	0,4376	4G8M4G46
4B4V1M23	-11,46%	0,00%	-12,58%	4B4N1M31	0,6667	4B4M1S03
4F5/6M25	-1,77%	-29,30%	0,00%	4D7V6M53	0,7674	4G8M4G46
4H3N3G45	0,00%	0,00%	-1,59%	4A6N4G09	1,0000	0,2326
4C1V5P14	0,00%	-7,35%	-5,79%	4G8M4G46	0,7774	4J3N5G28
4C3M5G39	0,00%	0,00%	-5,70%	4A6N4G09	0,8571	4G8M4G46
4E3V2P12	0,00%	-46,01%	-0,48%	4B4M1S03	0,1706	4J3N5G28
4A3V4G49	0,00%	-19,22%	-0,16%	4G8M4G46	0,2609	4J3N5G28
4C4M5G22	-4,72%	0,00%	0,00%	4A6N4G09	0,0179	4B4M1S03
4C3N5G37	0,00%	-16,67%	-5,70%	4A6N4G09	0,9524	4G8M4G46
4K1V6M41	0,00%	0,00%	-12,56%	4B4N1M31	0,1259	4B4M1S03
4C3V5P13	0,00%	-16,67%	-3,47%	4A6N4G09	0,3535	4G8M4G46
4D3M1S07	0,00%	0,00%	-5,72%	4A6N4G09	0,0231	4B4N1M31
4B3V1M16	0,00%	0,00%	-0,33%	4A6N4G09	0,0110	4B4N1M31
4D3M1S27	0,00%	0,00%	-4,15%	4B4N1M31	0,0466	4B4M1S03
4A2V4G34	0,00%	-19,94%	-17,30%	4G8M4G46	0,2332	4J3N5G28
4F5/6M36	0,00%	-21,81%	0,00%	4B4M1S03	0,0499	4D7V6M53
					0,7937	4G8M4G46
						0,1564

TABLA 3 (Continuación)
Holguras y grupos comparación BCC.

DMU	h_{potencia}	h_{trabajo}	$h_{\text{combustible}}$		Grupo comparación y λ_i
4H3N3M05	-0,20%	0,00%	-10,24%	4A6N4G09	1,0000
4F4M6M10	0,00%	-25,42%	0,00%	4B4M1S03	0,5593
4D4N4G17	0,00%	0,00%	-6,56%	4B4NM31	0,0406
4G5M4S08	-8,57%	-34,80%	0,00%	4B4M1S03	0,3170
4F4M6M56	0,00%	-23,75%	0,00%	4B4M1S03	0,5703
4J3V3P11	0,00%	-4,29%	-8,04%	4B4M1S03	0,3069
4A2N4G42	0,00%	-0,67%	-4,70%	4B4M1S03	0,1564
4E4V2P32	0,00%	-54,30%	0,00%	4B4M1S03	0,2150
4H3M3G35	0,00%	0,00%	-1,78%	4B4M1S03	0,3426
Promedio	-2,16%	-9,61%	-3,24%	4G8M4G46	0,1731

Fuente: Elaboración propia.

El siguiente tipo de métodos DEA que hemos aplicado trata de incluir en las medidas de eficiencia el componente de ineficiencia mixta que hemos detectado por las holguras que presentan en algunos inputs los parques eólicos, lo que hace que las medidas radiales de eficiencia discutidas hasta ahora, no incorporen todas las ineficiencias en los índices. Con este fin, hemos elegido un modelo no radial y no orientado y que se puede especificar para obtener índices de eficiencia en un espacio de producción con rendimientos variables $MBH-V(\rho_V)$ o bien con rendimientos constantes a escala $MBH-C(\rho_C)$.

En la tabla 4 se muestran los principales resultados obtenidos con ambos modelos. Las unidades se han ordenado en función del índice de eficiencia ρ_V alcanzado y se incorpora información sobre la eficiencia mixta de las unidades y el cambio de puesto en el paso del modelo radial al no radial y no orientado. Los índices de eficiencia mixta se obtienen con la siguiente expresión que relaciona una medida no radial con una radial:

$$E_{MIX} = \frac{\rho}{\theta}$$

La comparación entre el modelo no radial $MBH-V$ y su correspondiente versión radial $BCC-O$, indica que la eficiencia radial es superior con un valor medio de un 86,25% frente al 76,82%. La diferencia es importante tal y como se muestra en el valor de la eficiencia mixta promedio de las unidades que es de un 88,60%. Las unidades eficientes son las mismas que en el caso BCC , siendo éstas las que conforman los distintos grupos de comparación para cada unidad ineficiente.

En relación con los cambios de puesto, el coeficiente de correlación de Pearson entre la ordenación de unidades $MBH-V$ y la ordenación BCC toma un valor de 0,8986, siendo superior la correspondencia que en el caso de los modelos con rendimientos constantes. Destaca la pérdida de ranking de la unidad 4A9M4S57 con veintitrés puestos de diferencia, motivada por sus holguras en input de ahí una alta ineficiencia mixta (tabla 3), mientras que en los avances de puestos se puede destacar a las unidades 4A6N4G19 y 4H3N3G45 con quince, debido a que prácticamente no presentaban holguras, por lo que alcanzan elevados índices de eficiencia mixta.

Con el modelo $MBH-C$ en términos agregados la eficiencia media de las unidades es de un 73,82%, que por definición es un valor menor que el obtenido con el modelo radial $CCR-O$ de 81,72%. En la columna E_{MIX} se incluye el valor de la eficiencia mixta alcanzada resultando un promedio de un 90,33%. Los comentarios individualizados serían similares al caso de rendimientos variables a escala en función de las holguras del modelo radial. En todo caso, señalar la escasa diferencia entre los dos modelos MBH que se refleja en una elevada eficiencia de escala promedio de los parques de un 96,1% y en las ordenaciones de las unidades obtenidas que presentan un coeficiente de correlación de Pearson de 0,9743.

TABLA 4
Índices MBH, eficiencia mixta y cambio de puesto respecto a modelos radiales.

DMU	ρ_{MBH-V}	E_{MIX}	<i>Cambio Puesto</i>	ρ_{MBH-C}	E_{MIX}	<i>Cambio Puesto</i>
4A6N4G09	1,0000	1,0000	0	0,9478	0,9649	-1
4B4M1M15	1,0000	1,0000	0	0,9567	0,9954	3
4B4M1S03	1,0000	1,0000	0	1,0000	1,0000	0
4B4N1M31	1,0000	1,0000	0	1,0000	1,0000	0
4D7V6M53	1,0000	1,0000	0	0,8034	0,8124	-11
4G8M4G46	1,0000	1,0000	0	0,8866	0,9245	-3
4J3N5G28	1,0000	1,0000	0	0,8017	0,8771	-1
4B4V1M21	0,9572	0,9941	6	0,9480	0,9995	5
4B6M1S20	0,9306	0,9503	0	0,8891	0,9230	-4
4B6M1M48	0,9238	0,9578	3	0,8838	0,9353	-1
4B4V1M43	0,9205	0,9715	5	0,9172	0,9948	8
4B4V1M54	0,9138	0,9198	-4	0,9049	0,9762	5
4K1V6M02	0,8918	0,9193	-2	0,8905	0,9495	3
4A3M4S47	0,8524	0,9138	4	0,8159	0,9629	11
4A6N4G19	0,8513	0,9914	15	0,8062	0,9558	11
4A5V4G06	0,8351	0,8696	-1	0,7971	0,9240	5
4C4M5G04	0,8342	0,9385	9	0,8018	0,9597	11
4C3N5G44	0,8223	0,9394	10	0,7844	0,9849	15
4H3N3G45	0,8195	0,9841	15	0,7770	0,9595	10
4D7M6S29	0,8120	0,8376	-8	0,7838	0,8237	-11
4A6M4S01	0,8068	0,8776	-1	0,7721	0,9272	4
4F4V6M24	0,8057	0,8510	-5	0,7731	0,8383	-9
4A6V4G26	0,8001	0,8850	0	0,7572	0,8731	-5
4C3M5G39	0,7967	0,9589	12	0,7573	0,9735	11
4A3V4G18	0,7929	0,8126	-15	0,7658	0,8677	-6
4A6V4G55	0,7865	0,8531	-7	0,7401	0,8344	-11
4B4V1M23	0,7854	0,9198	5	0,7777	0,9762	12
4A4M4S52	0,7711	0,8428	-7	0,7402	0,9047	3
4C3N5G37	0,7529	0,9134	11	0,7198	0,9926	11
4C4M5G22	0,7428	0,9008	9	0,7267	0,9171	5
4C5V5P50	0,7415	0,8648	0	0,7230	0,8729	-3
4B3V1M16	0,7379	0,9845	12	0,7379	0,9995	12
4G9M4S51	0,7281	0,8327	-4	0,7056	0,8395	-9
4C3V5P13	0,7182	0,8872	8	0,6858	0,9305	3
4C1V5P14	0,7172	0,8619	0	0,6913	0,9299	3
4F5V6M30	0,7171	0,8027	-11	0,6948	0,7921	-15
4K1V6M41	0,7168	0,8726	4	0,7165	0,9629	6
4F5M6M40	0,7090	0,7909	-14	0,6795	0,7746	-22
4D3M1S07	0,7089	0,8999	4	0,6917	0,9877	10
4A3V4G33	0,7068	0,8064	-13	0,6879	0,8677	-4
4H3N3M05	0,6892	0,9436	7	0,6575	0,9825	8
4D3M1S27	0,6839	0,9155	3	0,6810	0,9877	8

TABLA 4 (Continuación)
Índices *MBH*, eficiencia mixta y cambio de puesto respecto a modelos radiales.

DMU	ρ_{MBH-V}	E_{MX}	<i>Cambio Puesto</i>	ρ_{MBH-C}	E_{MX}	<i>Cambio Puesto</i>
4A3V4G49	0,6778	0,8184	-5	0,6494	0,8670	-7
4F5N6M25	0,6657	0,7901	-11	0,6382	0,7761	-17
4A9M4S57	0,6621	0,7261	-23	0,6588	0,7252	-26
4D4N4G17	0,6605	0,9078	4	0,6585	0,9788	7
4E3V2P12	0,6180	0,7460	-10	0,5882	0,7714	-11
4F4M6M10	0,6028	0,8267	1	0,5953	0,8316	-2
4F5V6M36	0,5864	0,7966	-2	0,5716	0,7927	-5
4F4M6M56	0,5729	0,8279	2	0,5697	0,8370	-1
4A2V4G34	0,5586	0,7524	-5	0,5419	0,8062	-1
4H3M3G35	0,5523	0,8554	4	0,5460	0,9213	5
4A2N4G42	0,5421	0,8092	1	0,5343	0,8671	1
4J3V3P11	0,5376	0,8013	-1	0,5317	0,8554	-1
4G9M4S08	0,5083	0,7286	-4	0,5075	0,7338	-8
4E4V2P32	0,4968	0,7620	-1	0,4724	0,7865	-1
Promedio	0,7682	0,8860		0,7382	0,9033	

Los cambios de puesto se refieren respectivamente al paso del modelo BCC al *MBH-V* y del CCR al *MBH-C*

Fuente: Elaboración propia.

Una cuestión adicional a valorar es que a pesar de los índices de eficiencia promedio alcanzados mediante los diferentes modelos, existen unidades que operando con inputs muy parecidos y en ubicaciones próximas muestran variaciones significativas en los índices de eficiencia. En la tabla 5 se resumen los índices de eficiencia de tres parejas de parques prácticamente iguales en cuanto a características productivas, donde se puede comprobar la disparidad en los índices que atestigua un comportamiento inefficiente, cuando menos en la unidad que logra los índices más bajos de la pareja.

TABLA 5
Comparación parques.

DMU	θ_{CCR}	θ_{BCC}	ρ_{MBH-C}	ρ_{MBH-V}
4F5V6M30	0,8772	0,8934	0,6948	0,7171
4F5V6M36	0,7211	0,7361	0,5716	0,5864
4A3V4G18	0,8825	0,9757	0,7658	0,7929
4A3V4G33	0,7928	0,8765	0,6879	0,7068
4C4M5G04	0,8354	0,8888	0,8018	0,8342
4C4M5G22	0,7923	0,8246	0,7267	0,7428

Fuente: Elaboración propia.

4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD Y ROBUSTEZ

La comprobación de la robustez de nuestros resultados constituye un paso necesario para completar las conclusiones de los modelos empleados. Para ello es habitual con las técnicas no paramétricas utilizar el análisis de sensibilidad de los resultados obtenidos ante diferentes modificaciones en los modelos DEA¹⁷. Nosotros hemos comprobado el efecto de variaciones en las unidades de decisión y gestión empleadas y en las cantidades de inputs y output de las mismas.

En primer lugar retiramos una unidad eficiente del conjunto de unidades para comprobar el grado en el que ésta condiciona los índices alcanzados por el resto de unidades y también especialmente la ordenación por puestos de los parques¹⁸. La unidad seleccionada es la 4B4M1S03 dado que es la que aparece un mayor número de veces en los grupos de comparación con los modelos utilizados.

De los resultados podemos concluir que los modelos DEA son robustos tanto en las eficiencias obtenidas como en las ordenaciones. En el modelo *BCC* el efecto sobre las eficiencias es mínimo por la naturaleza del modelo que permite más unidades eficientes, con lo que la retirada de una, y más sino es una observación extrema, no altera mucho los resultados. El promedio de eficiencia aumenta en el modelo *CCR* algo más de un 3% mostrando el carácter eficiente de la unidad retirada pero sin significar una gran alteración, además aparecen cuatro unidades distintas como plenamente eficientes. En cuanto a las ordenaciones, éstas se mantienen en gran medida avalando la robustez de los resultados, con coeficientes de correlación de Pearson para el modelo *CCR* de 0,9770 y para el *BCC* de 0,9797.

También se puede comprobar la sensibilidad de los resultados a errores de medición en las variables. Para ello se pueden cambiar las cantidades de las mismas y analizar los efectos tanto sobre el ranking como sobre los índices de eficiencia del conjunto de unidades. En nuestro caso comprobamos que la mayoría de las unidades eficientes de los diferentes modelos lo siguen siendo cuando les reducimos en un 1% y en un 2% el output, o cuando les aumentamos en un 1% todos los inputs. También comprobamos como se mantienen básicamente las ordenaciones de las unidades.

Evaluación mediante métodos paramétricos

Empleamos también técnicas estadísticas determinísticas y estocásticas para la evaluación de la eficiencia mediante una frontera de referencia. En primer lugar aplicamos la **técnica determinística de Mínimos Cuadrados Ordinarios Corregidos (MCOC)**. Este desarrollo teórico para el establecimiento de fronteras determinísticas se atribuye a Richmond (1974), siendo bastante simple en su operativa.

¹⁷ En el texto de Cooper, Seiford y Tone (2002) se exponen algunas de estas opciones y sus implicaciones.

¹⁸ La retirada de una unidad ineficiente no tiene ninguna consecuencia sobre el resto, dado que no forma parte de ningún grupo de comparación al no pertenecer a la frontera de producción.

Primero se obtienen de un modo consistente por mínimos cuadrados ordinarios (*MCO*) todos los parámetros excepto el término de intercepción con el eje de ordenadas. A continuación se corrige el término de intercepción mediante la adición del error más alto obtenido mediante la regresión, siendo este un estimador consistente del mismo. Finalmente para la obtención de los índices de eficiencia técnica se emplean los nuevos errores corregidos como distancias a la frontera eficiente¹⁹.

La aplicación de este método requiere especificar una forma funcional. Nosotros hemos comprobado las tradicionales incluyendo las mismas variables que en los modelos DEA, con una variable output correspondiente a la facturación estimada de los parques en euros (*F*) y como inputs la potencia instalada en MW (*P*), la cantidad de trabajadores (*L*) y el combustible valorado por la potencia del viento incidente en MW (*C*). Encontramos que la función que mejor se adapta a nuestra relación de producción es la función Cobb-Douglas que incluye únicamente a los inputs potencia y combustible, en la que ambas variables son significativas al 1% dado su valor *t* y con un valor de *R*² ajustado para la regresión de 0,9164.

$$\begin{aligned} \ln F = & 12,0919 + 0,6649 \ln(P) + 0,3548 \ln(C) \\ & (78,76) \quad (5,04) \quad (2,70) \end{aligned}$$

De este modo la expresión de nuestra función de producción es:

$$F = 178.260 P^{0,6649} C^{0,3548}$$

A continuación partiendo de esta expresión y basándonos en el método *MCOC* obtenemos unos índices de eficiencia para cada parque y una frontera determinística. Para ello se parte de los residuos de la estimación *MCO* ($\hat{\varepsilon}_i$) a los que se les resta el valor más elevado de todas las unidades, que se corresponde con la unidad 4B4M1S03, y con los nuevos términos de error respecto a la frontera eficiente ($\hat{u}_{i MCOC}$) se obtienen los valores de eficiencia técnica (ET_i) mediante la expresión $ET_i = e^{\hat{u}_{i MCOC}}$. En la tabla 6 se resume la información con los parques ordenados de más a menos eficientes. En cuanto a la frontera de producción su expresión presenta como novedad, respecto a la función de producción, la corrección del término independiente β_0 mediante el residuo de la unidad más eficiente, siendo su formulación:

$$F = 245.192 P^{0,6649} C^{0,3548}$$

¹⁹ Una aplicación puede consultarse en el trabajo de Murillo y Vega (2001).

TABLA 6
Resultados MCOC, MBH-C y MCOM.

DMU	$\hat{\varepsilon}_{iMCOC}$	$\hat{u}_i _{MCOC}$	$ET_i = e^{u_i _{MCOC}}$	ρ_{MBH-C} sin trabajo	$E[u_i _{\varepsilon_{iMCOC}}]$	$ET_i = e^{-E[u_i _{\varepsilon_i}]}$
4B4M1S03	0,3179	0,0000	1,0000	1,0000	0,0586	0,9431
4K1V6M02	0,2167	-0,1012	0,9037	0,8977	0,0749	0,9278
4G8M4G46	0,1970	-0,1209	0,8862	0,9239	0,0784	0,9246
4J3N5G28	0,1804	-0,1375	0,8715	0,8786	0,0815	0,9218
4B4N1M31	0,1662	-0,1517	0,8592	0,8664	0,0842	0,9193
4A6N4G09	0,1515	-0,1664	0,8467	0,8885	0,0870	0,9166
4A5V4G06	0,1407	-0,1772	0,8376	0,8609	0,0892	0,9147
4F4V6M24	0,1312	-0,1867	0,8297	0,8636	0,0912	0,9129
4A3V4G18	0,1264	-0,1915	0,8258	0,8311	0,0922	0,9120
4A6V4G55	0,1219	-0,1960	0,8220	0,8538	0,0931	0,9111
4B4V1M21	0,1113	-0,2065	0,8134	0,8223	0,0954	0,9090
4B4M1M15	0,1102	-0,2077	0,8124	0,8270	0,0957	0,9088
4A3M4S47	0,1055	-0,2124	0,8086	0,8367	0,0967	0,9078
4A6M4S01	0,0984	-0,2195	0,8029	0,8270	0,0983	0,9064
4A6V4G26	0,0968	-0,2211	0,8017	0,8355	0,0986	0,9061
4D7V6M53	0,0897	-0,2282	0,7959	0,8568	0,1003	0,9046
4B4V1M43	0,0783	-0,2396	0,7869	0,7926	0,1030	0,9022
4A4M4S52	0,0644	-0,2535	0,7761	0,7894	0,1063	0,8991
4D7M6S29	0,0623	-0,2556	0,7744	0,8320	0,1069	0,8987
4B4V1M54	0,0562	-0,2616	0,7698	0,7744	0,1084	0,8973
4B6M1M48	0,0288	-0,2891	0,7490	0,7873	0,1156	0,8908
4C4M5G04	0,0273	-0,2906	0,7479	0,7885	0,1160	0,8905
4B6M1S20	0,0272	-0,2907	0,7477	0,8019	0,1161	0,8904
4A3V4G33	0,0192	-0,2987	0,7418	0,7466	0,1183	0,8884
4F5V6M30	0,0185	-0,2994	0,7412	0,7856	0,1185	0,8882
4F5M6M40	0,0164	-0,3015	0,7397	0,7857	0,1191	0,8877
4C3N5G44	0,0065	-0,3114	0,7324	0,7581	0,1220	0,8852
4E3V2P12	0,0016	-0,3163	0,7288	0,7332	0,1234	0,8839
4A6N4G19	-0,0008	-0,3187	0,7271	0,7630	0,1241	0,8833
4A3V4G49	-0,0025	-0,3204	0,7258	0,7396	0,1247	0,8828
4A9M4S57	-0,0081	-0,3260	0,7218	0,7771	0,1263	0,8813
4C5V5P50	-0,0101	-0,3280	0,7203	0,7613	0,1270	0,8807
4C1V5P14	-0,0111	-0,3290	0,7197	0,7381	0,1273	0,8805
4C4M5G22	-0,0185	-0,3364	0,7143	0,7478	0,1296	0,8784
4K1V6M41	-0,0306	-0,3485	0,7057	0,7122	0,1335	0,8750
4H3N3G45	-0,0371	-0,3550	0,7012	0,7339	0,1357	0,8731
4C3V5P13	-0,0460	-0,3639	0,6949	0,7223	0,1388	0,8704
4C3M5G39	-0,0496	-0,3675	0,6925	0,7194	0,1400	0,8694

TABLA 6 (Continuación)
Resultados MCOC, MBH-C y MCOM.

DMU	$\hat{\varepsilon}_{IMCO}$	$\hat{u}_i _{MCOC}$	$ET_i = e^{u_i _{MCOC}}$	p_{MBH-C} sin trabajo	$E[u_i _{MCOM}]$	$ET_i = e^{-E[u_i _i]}$
4F5N6M25	-0,0497	-0,3676	0,6924	0,7364	0,1400	0,8693
4C3N5G37	-0,0610	-0,3789	0,6846	0,7116	0,1441	0,8658
4D3M1S07	-0,0671	-0,3850	0,6804	0,7004	0,1463	0,8639
4D3M1S27	-0,0691	-0,3870	0,6791	0,6895	0,1471	0,8632
4B4V1M23	-0,0952	-0,4131	0,6616	0,6656	0,1572	0,8545
4D4N4G17	-0,1023	-0,4202	0,6569	0,6643	0,1601	0,8520
4G9M4S51	-0,1090	-0,4269	0,6525	0,7190	0,1629	0,8496
4F4M6M10	-0,1168	-0,4347	0,6474	0,6704	0,1663	0,8468
4B3V1M16	-0,1392	-0,4571	0,6331	0,6400	0,1763	0,8384
4F4M6M56	-0,1663	-0,4842	0,6162	0,6374	0,1892	0,8276
4F5V6M36	-0,1790	-0,4969	0,6084	0,6458	0,1956	0,8223
4A2V4G34	-0,1792	-0,4971	0,6083	0,6060	0,1957	0,8222
4H3N3M05	-0,2023	-0,5202	0,5944	0,6138	0,2079	0,8123
4E4V2P32	-0,2259	-0,5438	0,5806	0,5952	0,2209	0,8018
4J3V3P11	-0,2268	-0,5447	0,5800	0,5774	0,2214	0,8014
4A2N4G42	-0,2273	-0,5452	0,5797	0,5802	0,2217	0,8012
4H3M3G35	-0,2360	-0,5539	0,5747	0,5816	0,2266	0,7972
4G9M4S08	-0,2854	-0,6033	0,5470	0,5916	0,2560	0,7741
Promedios			0,7313	0,7551		0,8766

Fuente: Elaboración propia.

El siguiente paso en nuestro análisis consiste en comparar los resultados con nuestros diferentes modelos DEA para comprobar el grado de correspondencia. El hecho de utilizar una ecuación sin el factor trabajo nos obliga a emplear modelos DEA que no incluyen este factor. De la comparación observamos como el mayor nivel de correspondencia se da entre los modelos MCOC-MBH-C, con un coeficiente de correlación de Pearson de 0,9799 entre los puestos de la ordenación y una elevada correspondencia entre los índices de eficiencia. Así una regresión entre las eficiencias de ambos modelos da una pendiente de 0,9634 pasando prácticamente por el origen y con un valor de R^2 de 0,9638.

De los resultados individuales destaca la diferencia lograda en términos de índice de eficiencia, del primer parque respecto a los demás, con el segundo situado casi a un 10% de distancia. Este hecho puede plantearnos dudas acerca de si se trata de una observación extrema, cuestión que es una de las principales críticas tanto a los métodos DEA como en especial a la metodología MCOC. Debido a esto también hemos efectuado una estimación de nuestra función de producción sin incluir a la unidad 4B4M1S03 con 55 parques, con el siguiente resultado de la forma linealizada:

$$\begin{aligned} \ln F = & 12,075 + 0,669 \ln(P) + 0,3555 \ln(C) \\ & (77,52) \quad (5,05) \quad (2,71) \end{aligned}$$

Tal y como puede verse, se trata de una expresión muy parecida que conduce a unos términos de error similares a los alcanzados para cada unidad con la regresión que incluye a las 56 unidades. La ordenación de las unidades por puestos en función de las eficiencias se mantendría, siendo este dato el que afirma la robustez de nuestras estimaciones. Por el contrario, el principal cambio que se observa es el aumento de la eficiencia técnica tanto individual como promedio de la muestra de parques que llega al 80%, señalando la sensibilidad de este método a la presencia de este tipo de unidades lo que podría limitar su validez.

Si efectuamos el mismo análisis con el modelo DEA *MBH-C* excluyendo a la unidad eficiente observamos el mismo fenómeno, con prácticamente la misma ordenación de unidades y un aumento de la eficiencia promedio hasta el 81,5%. Lo que nos indican estos resultados es que la unidad retirada es especialmente eficiente sin el factor trabajo y que además por su dimensión domina al resto de unidades en las especificaciones que contemplan rendimientos constantes a escala. Esta última situación ya la discutimos, concluyendo que son más idóneos para evaluar la eficiencia los modelos DEA con rendimientos variables a escala dada la naturaleza del proceso de generación de electricidad eólica en un parque. Así mediante el programa DEA *MBH-V* que incluye a toda la población de parques, vimos como había un mayor número de unidades eficientes y como el promedio de eficiencia se situaba en un 80,5%, superando el efecto de esa observación que se podría considerar extrema.

Para la estimación paramétrica de la eficiencia respecto a una frontera estocástica empleamos un método de error compuesto, concretamente el de **Mínimos Cuadrados Ordinarios Modificados (MCOM)**, también conocido como método de los momentos, y que se desarrolla a partir de la estimación *MCO*. Por su carácter estocástico permite discernir en el componente de error de las regresiones, tanto el ruido blanco como un término de ineficiencia técnica, y así obtener evaluaciones de cada unidad frente a su propia frontera. Su resolución requiere suponer una distribución del componente de error atribuible a la ineficiencia técnica que nosotros elegimos como seminormal²⁰.

En la Tabla 6 se presentan los resultados a partir de la misma especificación que excluye el input trabajo. En la misma figuran en las dos últimas columnas el valor esperado para cada unidad del componente de error u_i que mide la ineficiencia técnica $E[u_i | \varepsilon_{iMCOM}]$ y el valor de la eficiencia técnica lograda ET_i por cada parque. Como se puede comprobar existe una importante presencia de ruido blanco lo que aumenta la eficiencia promedio de los parques eólicos analizados hasta un

²⁰ La base teórica de las fronteras estocásticas fue desarrollada por Aigner, Lovell y Schmidt (1977) y Meeusen y Van den Broeck (1977). Para el desarrollo del método véanse Jondrow, Lovell, Merton y Schmidt (1982) y Greene (1993).

87,66% frente al 73,13% del método determinístico. En cuanto al ranking de los parques, este se mantiene por la propia formulación del método que parte de la misma estimación que el *MCO*.

A nivel individual se observa como las unidades que más progresan son las que se encontraban peor situadas en la estimación determinística, con mejoras que superan el 20%. En otro sentido destaca el hecho, habitual en esta metodología, de que ninguna unidad es plenamente eficiente al contemplar los factores estocásticos en la frontera. De este modo la unidad 4B4M1S03 pasa a tener un índice de eficiencia de 0,9431 si bien mantiene su primer puesto en el ranking.

Con el proceso de cálculo también podemos formular la frontera estocástica que delimita el espacio de producción y que sirve de referencia para la evaluación de la eficiencia de las unidades. El hecho de que se pueda calcular esta frontera mediante este método confirma la correcta especificación de la relación de producción utilizada en nuestra aplicación, tal y como señalaron Schmidt y Lovell (1979). Con la corrección del término independiente y la incorporación del término de error aleatorio v_i , la frontera para cada unidad sería:

$$F_i = 196.935 P_i^{0,6649} C_i^{0,3548} e^{v_i}$$

El resto de la información derivada del proceso de obtención de la frontera y de los índices de eficiencia es:

$$E[u_i] = \left(\frac{2}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \sigma_u = 0,09873; \lambda = \frac{\sigma_u}{\sigma_v} = 1,392; \sigma^2 = \sigma_v^2 + \sigma_u^2 = 0,02322.$$

El valor esperado de u_i permite obtener el error estocástico conjunto restándolo del término de error *MCO*. El valor de λ de 1,392 nos refleja de otro modo la importancia del componente aleatorio en el error, lo que cuestiona mucho las aproximaciones determinísticas que hemos empleado hasta ahora. En último lugar se muestra el término de varianza conjunta.

En cuanto a la comparación con los modelos DEA, ésta no tiene mayor sentido dado que las ordenaciones por puestos de las unidades coinciden con el modelo determinístico, dando lugar a los mismos coeficientes de correlación de Pearson. Además, su naturaleza estocástica diferencia claramente las metodologías. De todos modos, dado que en algunos trabajos se realiza su comparación, nosotros simplemente apuntamos que la mayor correspondencia de eficiencias se da con los modelos basados en holguras. Y dentro de los radiales el mejor ajuste se alcanza con los índices *BCC* con los siguientes resultados:

$$ET_{MCOM} = 0,5781 + 0,3493 \theta_{BCC} \\ (37,75) \quad (19,63)$$

Con un valor R^2 ajustado de 0,8748. En nuestro caso, además el modelo DEA *BCC* presenta un promedio de eficiencia más parecido al resultado del método estocástico, con un valor de un 85,45%, con lo que se puede considerar, bajo este punto de vista, que se refuerzan ambos modelos.

5. CONCLUSIONES

La unidad de producción de generación de electricidad eólica es el parque. En sus resultados productivos son decisivas las decisiones tomadas en las tres fases del proceso de producción, que se identifican con la determinación del recurso, el diseño y construcción del parque y por último la fase de explotación, con un conjunto de fuentes de ineficiencia asociado a cada una de ellas. La relación de producción básica en la generación de electricidad eólica, vincula el output energía producida con los inputs capital, trabajo y combustible. Estando el combustible caracterizado por la potencia incidente del viento y la superficie interpuesta para su captación mediante los aerogeneradores.

La técnica DEA facilita índices de eficiencia relativa y resultados complementarios que permiten discriminar el comportamiento productivo de los parques. Hemos comprobado que el nivel de eficiencia promedio de los parques eólicos gallegos es de un 81,72% con el modelo *CCR*. El índice de eficiencia logrado se explica fundamentalmente por la eficiencia técnica pura *BCC* que es de un 86,25% y en menor medida por la eficiencia de escala que alcanza un valor de 94,74%. Adicionalmente los índices disminuyen empleando modelos que contemplan el efecto de las holguras, con valores promedio de eficiencia mixta del 90,33% para el modelo *MBH-C* y de 88,6% para el modelo *MBH-V*, que se explican en gran medida por el factor trabajo.

También hemos contrastado la robustez de la metodología mediante análisis de sensibilidad no paramétrico y econométrico, superando de este modo alguno de los inconvenientes característicos de la técnica DEA. Las técnicas econométricas además cuestionan la inclusión del factor trabajo en la relación de producción y en el caso estocástico muestran una elevada incidencia del componente de ruido blanco.

Los modelos para el análisis de corte transversal más adecuados son aquellos con una orientación al output y que suponen una tecnología de producción con rendimientos variables a escala. Este hecho se justifica por la relación de producción de la energía eléctrica mediante generación eólica, que está determinada por la localización y la distribución de los aerogeneradores dentro del parque.

La información obtenida con los modelos puede ser interesante para posibles mejoras en los parques, o bien para la construcción y operación de parques en el futuro, por el conocimiento de su diseño, tipo de máquina, modelo de mantenimiento y demás características. En su caso y conociendo el trasfondo teórico de los modelos también pueden utilizarse los índices de eficiencia por parte del regulador del sector en el establecimiento de incentivos en función del modelo de concesión de la explotación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AIGNER, D. J.; LOVELL C. A. K. y SMITH P. J. (1977): "Formulation and Estimation of Stochastic Frontier Production Function Models", *Journal of Econometrics*, nº 6, pp. 21-37.
- ÁLVAREZ PINILLA, A. coord. (2001): *La medición de la eficiencia y la productividad*, Pirámide, Madrid.
- BANKER, R. D. (1984): "Estimating Most Productive Scale Size Using Data Envelopment Analysis", *European Journal of Operational Research*, nº 17, pp. 35-44.
- BANKER, R. D.; CHARNES, A. y COOPER, W. W. (1984): "Some Models for Estimating Technical and Scale Inefficiencies in DEA", *Management Science*, vol. 30, nº 9, pp. 1078-1092.
- BARZEL, Y. (1964): "The Production Function and Technical Change in the Steam-Power Industry", *The Journal of Political Economy*, vol. 72, nº 2, pp. 133-150.
- CHARNES, A.; COOPER, W. W. y RHODES, E. (1978): "Measuring the Efficiency of Decision Making Units", *European Journal of Operational Research*, vol. 2, nº 3, pp. 429-444.
- CHITKARA, P. (1999): "A Data Envelopment Analysis Approach to Evaluation of Operational Inefficiencies in Power Generating Units: a Case Study of Indian Power Plants", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 14, nº 2, pp. 419-425.
- CNE (2005): *Información Estadística sobre las ventas de energía del Régimen Especial*, Comisión Nacional de la Energía, Madrid.
- COELLI, T. J.; RAO D. S. P.; O'DONNELL C. J. y BATTESE, G. (2005): *An Introduction to Efficiency and Productivity Analysis*, 2^a Edición, Springer, New York.
- COOPER, W. W.; SEIFORD, L. M. y TONE, K. (2002): *Data Envelopment Analysis. A Comprehensive Text with Models, Applications, References and DEA-Solver Software*, 3^a Edición, Kluwer Academic Publishers, Boston.
- FÄRE, R.; GROSSKOPF, S. y LOGAN J. (1983): "The Relative Efficiency of Illinois Electric Utilities", *Resources and Energy*, nº 5, pp. 349-367.
- FÄRE, R.; GROSSKOPF, S. y PASURKA, C. (1986): "Effects on Relative Efficiency in Electric Power Generation Due to Environmental Controls", *Resources and Energy*, vol. 8, nº 2, pp. 167-184.
- FÄRE, R.; GROSSKOPF, S.; YAISAWARNG, S.; LI, S. K. y WANG Z. (1990): "Productivity Growth in Illinois Electric Utilities", *Resources and Energy*, vol. 12, nº 4, pp. 383-398.
- GOLANY, B.; ROLL, Y. y RYBAK, D. (1994): "Measuring Efficiency of Power Plants in Israel by Data Envelopment Analysis", *IEEE Transactions on Engineering Management*, vol. 41, nº 3, pp. 291-301.
- GREENE, W. (1993): "Frontier Production Functions", en: H. O. Fried; C.A.K. Lovell y S.S. Schmidt (eds), *The Measurement of Productive Efficiency. Techniques and Applications*, Oxford University Press, New York.
- JONDROW, J.; LOVELL C. A. K.; MATEROV, I. S. y SCHMIDT, P. (1982): "On the Estimation of Technical Inefficiency in the Stochastic Frontier Production Function Model", *Journal of Econometrics*, nº 19, pp. 233-238.
- LAM, P-L. y SHIU, A. (2004): "Efficiency and Productivity of China's Thermal Power Generation", *Review of Industrial Organization*, nº 24, pp. 73-93.
- MEEUSEN, W. y VAN DEN BROECK, J. (1977): "Efficiency Estimation from Cobb-Douglas Production Functions with Composed Error", *International Economic Review*, vol. 18, nº 2, pp. 435-444.
- MEIBODI, A. E. (1998): *Efficiency Considerations in the Electricity Supply Industry the Case of Iran*, Surrey Energy Economics Discussion Paper Series, nº 95, University of Surrey, UK.
- MURILLO, L. R. y VEGA, J. A. (2001): "The Use of Parametric and Non-Parametric Frontier Methods to Measure the Productive Efficiency in the Industrial Sector A comparative Study", *International Journal of Production Economics*, vol. 69, pp. 265-275.

- NAJAM, A. y CLEVELAND, C. J. (2003): "Energy and Sustainable Development at Global Environmental Summits An Evolving Agenda", *Environment, Development and Sustainability*, nº 5, pp. 117-138.
- NERLOVE, M. (1963): "Returns to Scale in Electricity Supply", en Zellner R. (ed.), *Readings in Economic Statistics and Econometrics*, Little Brown, Boston.
- OLATUBI, W. O. y DISMUKES, D. E. (2000): "A Data Envelopment Analysis of the Levels and Determinants of Coal-Fired Electric Power Generation Performance", *Utilities Policy*, nº 9, pp. 47-59.
- PARK, S. y LESOURD J. (2000): "The Efficiency of Conventional Fuel Power Plants in South Korea: a Comparison of Parametric and Non-parametric Approaches", *International Journal of Production Economics*, vol. 63, pp. 59-67.
- POLLITT, M. G. (1996): "Ownership and Efficiency in Nuclear Power Production", *Oxford Economic Papers, New Series*, vol. 48, nº 2, pp. 342-360.
- RICHMOND, J. (1974): "Estimating the Efficiency of Production", *International Economic Review*, vol. 15, nº 2, pp. 515-521.
- RODRÍGUEZ, J. L.; ARNALTE, S. y DÍAZ, J.C. (2003): *Sistemas eólicos de producción de energía eléctrica*, Editorial Rueda, Madrid.
- SCHMIDT, P. y LOVELL, C. A. K. (1979): "Estimating Technical and Allocative Inefficiency relative to Stochastic Production and Cost Frontiers", *Journal of Econometrics*, nº 9, pp. 343-366.
- SEITZ, W. D. (1971): "Productive Efficiency in the Steam-Electric Generating Industry", *Journal of Political Economy*, vol. 79, nº 4, pp. 878-886.
- SUEYOSHI, T. y GOTO M. (2001): "Slack-Adjusted DEA for Time Series Analysis Performance Measurement of Japanese Electric Power Generation Industry in 1984-1993", *European Journal of Operational Research*, vol. 133, pp. 232-259.
- TONE, K. (2001): "A Slack-based Measure of Efficiency in Data Envelopment Analysis", *European Journal of Operational Research*, nº 130, pp. 498-509.