

Diseño y aplicación de un modelo de diagnóstico de eficiencia energética en municipios de Andalucía

Gabriel Villa Caro¹, Sandra Redondo Martínez², Jesús Racero Moreno¹, David Canca Ortíz¹

¹ Dpto. de Organización Industrial y Gestión de Empresas. Escuela Superior de Ingenieros. Universidad de Sevilla. Camino de los Descubrimientos, s/n. 41092. Sevilla. gvilla@esi.us.es, jrm@esi.us.es, dco@esi.us.es

² Dpto. de Energía. Sociedad Andaluza de Ingenieros Consultores, S.L. Calle Cojinete, 1. 41020. Sevilla. energia@saincosa.com

Resumen

El presente artículo aborda el estudio sobre la implicación de los procesos de consumo energético y emisión de contaminantes en el ámbito provincial. El desarrollo de un conjunto de técnicas que permitan evaluar energéticamente las instalaciones existentes en un municipio de estudio, permitirá el posterior análisis de estrategias de reducción del consumo en dependencias municipales y el nivel de emisiones contaminantes a las que podría llegar una vez aplicadas. Para tal fin se utilizará la técnica Análisis por Envoltura de Datos.

Palabras clave: Eficiencia energética, emisión de gases contaminantes, DEA

1. Introducción

El desarrollo de las energías renovables constituye actualmente un objetivo central de la política energética española. Como consecuencia, el 26 de agosto de 2005 fue aprobado por Acuerdo del Consejo de Ministros el Plan de Energías Renovables para el período 2005-2010, en el que se especifica que los objetivos prioritarios de la política energética, son la garantía de la seguridad y calidad del suministro eléctrico y el respeto al medio ambiente (“Plan de Energías Renovables 2005-2010”). Así, una estrategia general para las fuentes de energías renovables se ha convertido en algo esencial. Dentro de esta línea, la política de fomento se ha encaminado hacia iniciativas globales que abarquen un amplio abanico de campos como energía, medio ambiente, empleo, investigación y políticas de relaciones.

Por otro lado, los máximos alcanzados por los precios del petróleo plantean preocupaciones sobre el equilibrio de la oferta y la demanda a largo plazo. Las emisiones de CO₂ se han incrementado en más de un 20% durante la última década, y de hecho, si el futuro se desarrolla en concordancia con las tendencias actuales, tal y como se reseña en el Escenario de Referencia del World Energy Outlook 2006 (publicación de la Agencia Internacional de la Energía), las emisiones de CO₂ y la demanda de petróleo seguirán creciendo exponencialmente durante los próximos 25 años. Así, los estudios a desarrollar se encaminan hacia un futuro energético más sostenible, proponiendo las medidas de eficiencia energética como recurso favorable para disminuir la demanda de electricidad.

Actualmente, la mitad del consumo energético en Europa procede de la importación de combustibles fósiles. Éstos son la primera causa de las emisiones atmosféricas de CO₂. En este sentido, cabe destacar que la Unión Europea firmó en 1997 el Protocolo de Kyoto y se comprometió a reducir en un 8% de las emisiones de gases de efecto invernadero en 2012, respecto a los niveles de emisión en 1990. Los objetivos europeos que enmarcan dichos compromisos son los de garantizar la seguridad del abastecimiento, disminuir el impacto medioambiental del

uso y producción de energía, reducir la demanda energética mediante la introducción y el uso de técnicas y herramientas de ahorro de energía.

Los estudios actuales se centran en los análisis de escenarios que propongan fuertes aumentos de la eficiencia energética en los sectores del transporte, residenciales, industriales y del sector terciario, así como la eliminación significativa de emisiones de CO₂ en la generación de electricidad.

Es por esto que el objetivo fundamental sea la obtención de datos finales que permitan la comparación energética entre municipios, aportando soluciones en materia de eficiencia energética, consumos sostenibles y reducción de emisiones de gases contaminantes.

Una técnica que parece adecuada para determinar la eficiencia energética es el Análisis por Envoltura de Datos. En esta comunicación se aplicará esta herramienta al consumo energético de algunos municipios andaluces, pudiéndose extraer algunas conclusiones interesantes sobre el caso.

La estructura del presente artículo queda de la siguiente forma: en el segundo apartado se presenta la bibliografía asociada al Análisis por Envoltura de Datos y a sus aplicaciones en gases contaminantes. El tercer apartado se realizará un estudio sobre el caso a tratar, concluyendo el tipo de modelo más adecuado. En el cuarto apartado se mostrarán un análisis de los resultados obtenidos, y se realizarán algunas conclusiones sobre ellos.

2. Revisión de la literatura

El Análisis por Envoltura de Datos (DEA) es una herramienta basada en modelos de programación matemática que evalúan la eficiencia de unidades productivas a partir del conocimiento de las cantidades de los recursos que consumen y de los productos que generan. Los trabajos iniciales sobre esta técnica fueron desarrollados por los autores Charnes, Cooper y Rhodes (1978), y continuado por otros autores de relevancia científica mundial en este campo, Banker et al. (1984) y Cooper et al. (2000). Desde entonces, se han llevado a cabo más de mil artículos y publicaciones que demuestran la aplicabilidad y el interés científico por esta herramienta.

Existen numerosos estudios de ámbito internacional que avalan la determinación de niveles óptimos de gases contaminantes a partir de herramientas como el Análisis por Envoltura de Datos (DEA). En dicho ámbito caben destacar dos tipos de investigación: (a) el desarrollo de teorías y modelos generales capaces de incorporar en el análisis salidas no deseables como son las emisiones de gases contaminantes, y (b) la aplicación concreta de modelos novedosos o ya existentes en la literatura sobre casos reales.

Con respecto al primer tipo de investigación, son relevantes los estudios realizados por Cheng et al. (1997); Zhou et al. (2006); o Färe et al. (1989), en donde se prueban y contrastan diferentes tipos de modelos DEA que incorporan en su estudio el caso de unidades productoras de salidas indeseables (como son los gases contaminantes) y cuyo nivel quiere ser minimizado con criterios de eficiencia.

Respecto al segundo tipo de estudios, podemos comentar el desarrollo de un modelo de medición de eficiencia medioambiental referido a las emisiones de CO₂ en los países de la OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development), en Zaim y Taskin (2000); una aplicación desarrollada sobre instalaciones eléctricas de combustible fósil en Färe et al. (1996); una evaluación de eco-eficiencia en plantas de potencia, en Korhonen y Luptacik (2004); o el

caso de la industria del papel y cartón en Suecia, en Brännlund et al. (1998), entre otros.

3. Formulación del modelo

El problema que se pretende solucionar es la medición de la eficiencia a diferentes municipios a través del consumo energético que generan. Es claro que las estimaciones asociadas a cada municipio dependerán en gran medida del número de habitantes que presente, de la extensión del municipio, y de las instalaciones dependientes de suministros eléctricos o térmicos que el municipio posea.

En la siguiente figura se muestra un esquema de las variables que el problema contiene.



Figura 1. Representación de las entradas y salidas del problema

Como entradas se han considerado el consumo energético de los municipios, distinguiendo entre alumbrado público y otros consumos, entre los que destacan consumo en edificios públicos y en semáforos si los hubiera. Las salidas son la población y la extensión que deben ser atendidas en el municipio en estudio. Hay que hacer notar que las salidas expuestas son no discrecionales, ya que el municipio no las puede modificar.

Para que el estudio de emisión de contaminantes se centre principalmente en gases de efecto invernadero, derivados de instalaciones de consumo térmico y eléctrico, los consumos eléctricos y térmicos del municipio de estudio serán transformados en toneladas equivalentes de petróleo. La eficiencia energética se basará en reducir globalmente el número de toneladas equivalente de petróleo (TEP) consumido.

Los datos observados se muestran en la tabla 1. Se han omitido los nombres de los municipios que intervienen por motivos de confidencialidad, por lo que se ha decidido escalar las salidas del problema. Esta acción no desvirtúa los resultados reales debido a que las salidas son no discrecionales.

De la tabla 1 se desprenden las notables diferencias existentes tanto en las entradas como en las salidas entre los municipios estudiados, con lo que se ha optado por escoger un modelo de retornos de escala variable. Por otro lado, la pretensión de este estudio por disminuir los consumos energéticos de los municipios en la medida de lo posible, hace que la elección de una orientación de entrada sea obligada en el modelo. Con todo ello, se está en condiciones de desarrollar el modelo que soluciona el problema planteado.

Tabla 1. Consumos energéticos, población y extensión de los municipios objeto de estudio

MUNICIPIO	Consumo en alumbrado	Consumo en otras	Población	Extensión
M1	68.718	74.976	605.4	4.05
M2	102.153	103.602	1603.2	15.87
M3	81.978	50.996	1086.6	6.3
M4	335.318	379.676	3549.3	60.72
M5	187.691	102.713	2247.3	45.03
M6	145.443	73.726	1264.2	23.1
M7	50.013	47.379	240.9	5.4
M8	1152.981	585.761	18242.1	59.4
M9	54.615	48.138	667.5	36.3
M10	672.980	405.392	6261.3	99.6
M11	239.281	94.412	3840.3	79.2

Sean:

- j : índices para los municipios.
 x_{ALUj} : cantidad de TEP consumida en alumbrado público por el municipio j .
 x_{OTROSj} : cantidad de TEP consumida en otras instalaciones eléctricas por el municipio j .
 y_{POBJ} : población del municipio j .
 y_{EXTj} : extensión del municipio j .
 θ_j : reducción radial de los consumos energéticos del municipio J .
 h_{ALU}^- : holgura de reducción adicional del consumo de alumbrado.
 h_{OTROS}^- : holgura de reducción adicional del consumo de alumbrado.
 $(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$: vector para la proyección del municipio j .

El modelo que resuelve el problema planteado es el siguiente:

$$\begin{aligned}
 &\text{Minimizar} && \theta_j - \varepsilon [h_{ALU}^- - h_{OTROS}^-] \\
 &\mathbf{a} : && \\
 &&& \sum_{j=1}^1 x_{ALUj} \lambda_j = \theta_j x_{ALUj} - h_{ALU}^- \\
 &&& \sum_{j=1}^1 x_{OTROSj} \lambda_j = \theta_j x_{OTROSj} - h_{OTROS}^- \\
 &&& \sum_{j=1}^1 y_{POBJ} \lambda_j \geq y_{POBJ} \\
 &&& \sum_{j=1}^1 y_{EXTj} \lambda_j \geq y_{EXTj} \\
 &&& \sum_{j=1}^1 \lambda_j = 1 \\
 &&& \lambda_j, h_{ALU}^-, h_{OTROS}^- \geq 0 \\
 &&& \theta_j \text{ libre}
 \end{aligned} \tag{1}$$

Obsérvese que se ha modelado la situación de salidas no discretas, omitiendo las holguras correspondientes.

4. Análisis de resultados

Aplicando como datos los consumos de gases contaminantes de los diferentes municipios estudiados debidos a la las instalaciones de alumbrado público y dependencias municipales, se se obtiene los siguientes resultados.

Tabla 2. Resultados obtenidos. Variables y referentes

MUNICIPIO	θ_j	h_{ALU}	h_{OTROS}	Referentes
M1	0.79	0	10.83	7 (0.15) 9 (0.85)
M2	1.00			2
M3	1.00			1
M4	0.66	0	155.13	2 (0.13) 11 (0.87)
M5	0.77	0	0	2 (0.20) 9 (0.36) 11 (0.44)
M6	0.74	17.19	0	3 (0.60) 9 (0.29) 11 (0.11)
M7	1.00			1
M8	1.00			0
M9	1.00			3
M10	1.00			0
M11	1.00			3

De la tabla puede deducirse que existen siete municipios eficientes, y cuatro no eficientes. Asimismo, puede observarse que los municipios 9 y 10 son los que en más ocasiones actúan de referentes para el resto de municipios ineficientes. Los municipios 8 y 10, sin embargo, están posicionados en un punto de operación que no es similar al resto de municipios del problema. Por otro lado, es el municipio 4 el que se revela como el más alejado de la frontera eficiente, tanto por su la reducción radial que debería efectuarse, así como por la magnitud de la holgura correspondiente a otros consumos diferentes del alumbrado público.

Para obtener una medida de los municipios ineficientes es conveniente la utilización de alguna métrica que involucre tanto la reducción radial como las obtenidas a través de las variables de holgura. Se ha escogida la propuesta por Bardhan et al. (1996), denominada Measure of Efficiency Dominance (MED), y que corresponde a la siguiente expresión:

$$MED_j^{BCC} = 1 - \frac{1}{m+p} \left[\sum_{i=1}^m \frac{x_j - x_j^{BCC}}{x_j} + \sum_{k=1}^p \frac{y_k^{BCC} - y_k}{y_k^{BCC}} \right] \tag{2}$$

donde m es el número de entradas, p el número de salidas, y x_{ij}^{BCC} e y_{kj}^{BCC} son los valores eficientes hacia donde habría que tender obtenidos de aplicar el modelo (1) para los diferentes municipios j.

Tabla 3. Valores de consumos eficientes y MED asociados a los municipios ineficientes

MUNICIPIO	Consumo en	Consumo en otras	MED
M1	53.944	48.026	0.856
M4	221.444	95.608	0.728
M5	145.198	79.459	0.887
M6	91.122	54.904	0.843

Como se refleja de la tabla 3, los diferentes municipios a los que se ha aplicado este estudio, tienen un valor de eficiencia muy aceptable, todos por encima de 0.70, lo que demuestra la preocupación que evidencian las autoridades municipales respecto al tema del consumo energético.

Se ha calculado la eficiencia media por tamaño de población y extensión con los siguientes resultados:

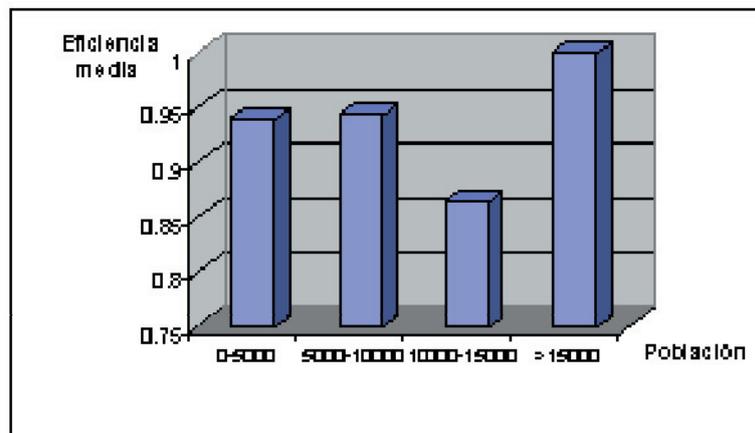


Figura 2. Representación de eficiencia media por población

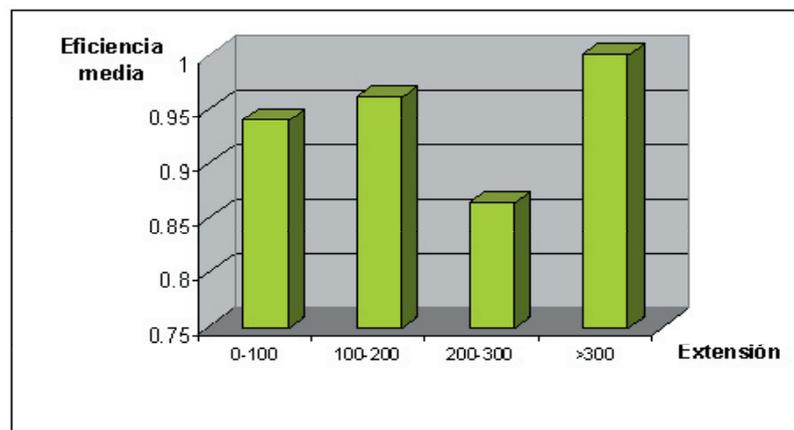


Figura 3. Representación de eficiencia media por extensión

De ambos gráficos se muestran como eficientes aquellos municipios con mayor número de población y mayor extensión. Sin embargo se puede observar que no se puede deducir un comportamiento proporcional de ambos factores con respecto a la eficiencia. Los municipios situados entre 10.000 y 15.000 habitantes y cuya extensión está entre los 200 y 300 km², son en media los más ineficientes.

5. Conclusiones

Se ha determinado la eficiencia energética de algunos municipios andaluces con el fin de identificar qué municipios están actuando de forma eficiente, y qué grado de ineficiencia están teniendo los restantes.

El estudio presentado en este artículo es preliminar, ya que al término de la redacción de esta comunicación, las labores de auditorías energéticas realizadas por la empresa SAINCOSA, S.L. estaban siendo iniciadas. Por tanto, este análisis pretende ser la introducción a estudios más completos de al menos 50 municipios andaluces de diferentes provincias. De esta forma podrán realizarse no sólo los cálculos obtenidos en los apartados anteriores, sino análisis más complejos, como la determinación de modelos centralizados (Lozano y Villa (2004)) dependientes de cada

una de las provincias que determinen cuál debería ser el consumo energético de cada municipio para obtener una reducción de consumo provincial previamente establecida.

Además, la incorporación de más municipios al estudio podrá detallar más el análisis en lo que respecta a la introducción desagregada de consumos energéticos.

Referencias

Brännlund, R.; Chung, Y.; Färe, R.; Grosskopf, S. (1998). Emissions Trading and Profitability: The Swedish Pulp and Paper Industry, *Environmental and Resource Economics*, Vol. 12, pp. 345-356.

Banker, R.D.; Charnes, A.; Cooper, W.W. (1984). Some Models for Estimating Technical and Scales Inefficiencies in Data Envelopment Analysis. *Management Science*, 30, 1078-1092.

Bardhan, I.; Bowlin, W.F.; Cooper, W.W.; Sueyoshi, T. (1996). Models and Measures for Efficiency Dominance in DEA. *Journal of the Operational Research Society of Japan*, 39, 322-332.

Charnes, A.; Cooper, W. W.; Rhodes, E. (1978). Measuring the efficiency of decision making units. *European Journal of Operational Research*, Vol. 2, pp. 429-444.

Cheng, Y.R.; Färe, R.; Grosskopf, S. (1997). Productivity and Undesirable Outputs: A Directional Distance Function Approach, *Journal of Environmental Management*, Vol. 51, pp. 229-240.

Cooper, W.W.; Seiford, L.M.; Tone, K. (2000). *Data Envelopment Analysis*. Kluwer Academic Publishers: Boston.

Färe, R.; Grosskopf, S.; Lovell, C. A.K.; Pasurka, C. (1989). Multilateral Productivity Comparisons when some Outputs are Undesirable: A Nonparametric Approach, *The Review of Economics and Statistics*, Vol. 71, pp. 90-98.

Färe, R.; Grosskopf, S.; Tyteca, D. (1996). An activity analysis model of the environmental performance of firms--application to fossil-fuel-fired electric utilities, *Ecological Economics*, Vol. 18, N° 2, pp. 161-175.

Korhonen, P.J.; Luptacik, M. (2004). Eco-efficiency analysis of power plants: An extension of data envelopment analysis, *European Journal of Operational Research*, Vol. 154, pp. 437-446.

Lozano, S.; Villa, G. (2004). Centralized Resource Allocation Using Data Envelopment Analysis, *Journal of Productivity Analysis*, Vol. 22, pp. 143-161.

Plan de Energías Renovables 2005-2010. (2005). Documento resumen aprobado por el Consejo de Ministros el 26/08/2005. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio.

World International Outlook 2006 (2006). Ed. International Press. Londres.

Zaim, O.; Taskin, F. (2000). Environmental efficiency in carbon dioxide emissions in the OECD: A non-parametric approach, *Journal of Environmental Management*, 58, 2, 95-107.

Zhou, P.; Ang, B.W.; Poh, K.L. (2006). Slacks-based efficiency measures for modeling environmental performance. *Ecological Economics*, Vol. 60, pp. 111-118.