

MULTIPLE CRITERIA DECISION MAKING (MCDM) EVALUATION OF A SYSTEM TO PRODUCE DOMESTIC HOT WATER IN A DETACHED HOUSE. COMPARATIVE STUDY

Aragonés Beltrán, Pablo; Moya de Los Reyes, Jesús; Cerezo Vicente, Ana Cristina

Universitat Politècnica de València

The main goal of this study is to perform a multi-criteria evaluation of different systems of domestic hot water (DHW) for a detached house. The most popular tools of discrete decision making (AHP/ANP, PROMETHEE and TOPSIS) are going to be used and a comparative study of the results is going to be done.

The project comes up from the proposal of several alternative solutions of standard facilities to supply DHW to a detached house. Then, different criteria are going to be studied and proposed to do the evaluation. Subsequently, different MCDM tools are applied to, finally, make a comparative study of the results.

Keywords: *Domestic hot water facilities; Multiple Criteria Decision Making; MCDM*

EVALUACIÓN MULTICRITERIO DE UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE AGUA CALIENTE SANITARIA PARA UNA VIVIENDA UNIFAMILIAR. ESTUDIO COMPARATIVO

El objetivo de este trabajo es realizar una evaluación multicriterio de varios sistemas diferentes de producción de agua caliente sanitaria (ACS) para una vivienda unifamiliar. Para ello se van a utilizar las técnicas de toma de decisiones multicriterio discretas más utilizadas en la literatura (AHP/ANP, PROMETHEE y TOPSIS) y se va a realizar un estudio comparativo de los resultados.

El trabajo parte de la propuesta de varias soluciones alternativas de instalaciones tipo para suministrar ACS a una vivienda unifamiliar. A continuación se estudian y se proponen diferentes criterios para evaluarlas. Posteriormente se aplican las diferentes técnicas MCDM mencionadas para, al final, realizar un estudio comparativo de los resultados.

Palabras clave: *Instalaciones de agua caliente sanitaria; ACS; Toma de decisiones multicriterio; MCDM*

1. Introducción

Desde finales del año 2007 el hundimiento del sector de la edificación ha orientado casi todos los esfuerzos de innovación hacia la eficiencia energética de los edificios existentes. Según el Segundo Plan de Ahorro y Eficiencia Energética 2011-2020, aprobado por Consejo de Ministros de 29 de julio de 2011, en el ámbito de la edificación y equipamiento, los servicios que tienen un mayor peso sobre el consumo energético de los edificios son: las instalaciones térmicas de calefacción, climatización, ventilación y producción de agua caliente sanitaria.

En el sector doméstico, la calefacción supone un 47% y el agua caliente sanitaria (ACS) un 27,4% del consumo de energía final. El aire acondicionado, dada su estacionalidad no supone un porcentaje de consumo importante (IDAE, 2011).

El presente trabajo se centra en el problema de selección de un sistema de producción de ACS, mediante técnicas de Análisis Multicriterio de Decisiones (MCDA). Se van a analizar tres sistemas tipo para una vivienda unifamiliar y, en función de los criterios propuestos por dos expertos en este tipo de instalaciones, se estudiarán y compararán los resultados obtenidos.

2. Objetivos

El objetivo principal de este estudio es “seleccionar el sistema de producción de agua caliente sanitaria (ACS) que permita al propietario de una vivienda unifamiliar aislada mejorar la eficiencia energética de su vivienda, realizando una comparativa de los resultados obtenidos tras aplicar las diferentes herramientas basadas en el Análisis Multicriterio de Decisiones (siglas en inglés de Multiple Criteria Decision Making, MCDA).

Como posibles soluciones al problema se proponen tres alternativas diferentes, las cuales representan los principales sistemas de producción de ACS. Estos sistemas son los siguientes:

- Quema de algún combustible
- Calentamiento de una resistencia eléctrica en contacto con el agua
- Por transferencia del calor absorbido por las radiaciones solares.

Dentro de cada sistema se ha buscado la mejor solución, eligiendo finalmente entre una caldera de condensación, un termo eléctrico cuyo suministro proviene de paneles fotovoltaicos y un inter-acumulador con un captador solar. Todo el proceso de análisis se ha desarrollado con la ayuda de dos técnicos, expertos en sistemas de producción de agua caliente sanitaria (ACS). Las técnicas MCDA estudiadas han sido: Proceso Analítico Jerárquico (AHP), Proceso Analítico en Red (ANP), TOPSIS, PRES Y PROMETHEE.

3. Metodología

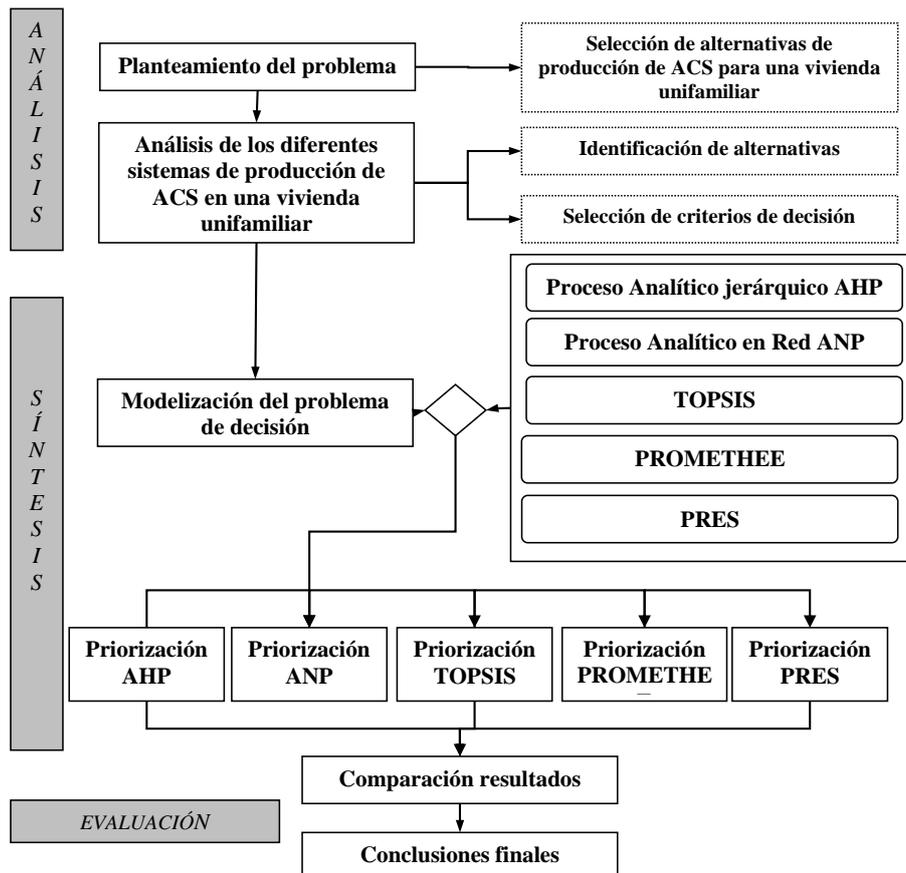
La pregunta que se plantea es: ¿Cuál es el sistema de producción de ACS más adecuado para que hacer más eficiente energéticamente el sistema de producción de ACS de una vivienda unifamiliar, teniendo en cuenta diferentes criterios y técnicas de ayuda a la decisión?

Para responder a esta pregunta, se seleccionan dos expertos conocedores del problema que actuarán, por consenso, como responsables del proceso de toma de decisión. A continuación, se realiza un análisis de las diferentes alternativas existentes en el mercado para la producción de ACS, comparando las ventajas e inconvenientes de cada uno de ellos, así como su funcionalidad. En segundo lugar, los expertos proponen los criterios en base a

los cuales se evaluarán las alternativas. Conocidos los criterios, se realizará la ponderación de estos. En tercer lugar se procederá a la valoración de las alternativas según el grado de satisfacción de cada criterio.

Una vez realizada la valoración de alternativas, se procederá a la aplicación de los diferentes métodos para la toma de decisiones. Los métodos que utilizados son AHP, ANP, Promethee, Topsis y Pres. Finalmente se realizará un análisis de sensibilidad de los resultados. El proceso que se ha seguido está representado en la figura 1.

Figura 1. Proceso de toma de decisiones (adaptado de Aragonés et al, 2010)



Belton y Stewart (2002) definen MCDA como "un término amplio que incluye una colección de conceptos, métodos y técnicas que persiguen ayudar a los individuos o grupos a tomar decisiones que implican diferentes puntos de vista en conflicto y múltiples agentes interesados". Una amplia revisión de estos métodos se puede encontrar en Figueira et al, (2005). Entre los métodos MCDA más conocidos y utilizados destacan los siguientes (Wallenius et al, 2008):

- AHP (Analytic Hierarchy Process) fue propuesto por Th. Saaty en 1980. Es una teoría de la medida de intangibles. Se basa en el hecho de que la complejidad inherente a todo proceso MCDM se puede resolver mediante la descomposición jerárquica del problema en su objetivo (goal), criterios y sub-criterios de decisión y alternativas. En cada nivel jerárquico se le pide al decisor que establezca las preferencias entre los elementos del mismo nivel (criterios o alternativas) mediante comparaciones pareadas. Para valorar la intensidad de estas preferencias se utiliza una escala de comparación que adopta valores entre 1 y 9. Las matrices generadas

son recíprocas y a partir de los valores que da el decisor se calculan las prioridades de los elementos. Estas prioridades se agregan de modo aditivo para obtener una prioridad final de las alternativas. Todos los detalles del método se pueden encontrar en (Saaty, 1980) y (Saaty, 1994).

- ANP (Analytic Network Process). Es una generalización de AHP. Se utiliza para abordar problemas de decisión más complejos en los que los elementos del problema (criterios y alternativas) se agrupan y se identifican interacciones e influencias entre ellos, formando una red de influencias. Estas influencias se cuantifican mediante comparaciones pareadas cuyas prioridades se introducen en supermatrices, a partir de las cuales se calculan las preferencias finales. Más detalles en (Saaty, 2001).
- TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution). Este método se basa en establecer unas alternativas ideal y antiideal que se escogen con los mejores y peores valores de preferencia de las alternativas para cada criterio. La ordenación de las alternativas se calcula mediante un índice que tiene en cuenta la distancia euclídea más corta a la solución ideal y la más lejana a la solución anti-ideal. El método originariamente fue propuesto por Hwang y Yoon en 1981. (Cheng et al., 2002).
- PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations). Se trata de una familia de métodos, aunque los más utilizados son PROMETHEE I y II. Este método analiza las preferencias del decisor comparando las alternativas entre sí dos a dos, teniendo en cuenta las valoraciones que cada alternativa tiene para cada criterio. En cada comparación cuantifica la fuerza, basada en su peso, que tiene cada criterio en el que una alternativa es mejor que la otra. Para establecer esa fuerza introduce unas funciones que tienen en cuenta umbrales de indiferencia y de preferencia que permitan establecer con mayor o menor claridad las preferencias del decisor. Fue propuesto en 1986 por Brans, Vincke y Mareschal (Brans et al., 1986).
- El método PRES fue propuesto por Gómez-Senent en 1989. El método se basa en comparar las alternativas de modo pareado, teniendo en cuenta las diferencias entre valoraciones de las mismas para cada criterio, para después obtener un índice de dominación de unas alternativas respecto a otras (Aragónés et al, 2001)

4. Caso de estudio

4.1. Datos

Se plantea el análisis de tres sistemas de producción ACS en una vivienda unifamiliar de forma que se mejore la eficiencia energética de ésta. Los expertos que actuarán con responsables del proceso de decisión son dos técnicos con amplios conocimientos en este campo, un Arquitecto técnico y un Ingeniero de la Edificación con amplia experiencia en este tipo de instalaciones.

4.2. Alternativas

Tras realizar el análisis correspondiente, se proponen tres alternativas diferentes, que representan los principales sistemas de producción de ACS existentes en el mercado. A continuación se explican las alternativas seleccionadas:

1. *Caldera de condensación*. Este sistema de caldera, si utiliza gas natural como combustible, es el más eficiente de este tipo que actualmente hay en el mercado. Permite la producción de ACS y calefacción, alcanzando altos rendimientos, y

ofreciendo la posibilidad de añadir un termo acumulador para reducir el consumo de agua y energía. Por otra parte, el consumo de agua hasta que se alcanza la temperatura deseada o mayor a la deseada es considerable, necesita de un mayor número de encendidos y apagados y presenta limitaciones a la hora de abastecer agua caliente a dos puntos a la vez.

2. *Calentamiento de una resistencia en contacto con el agua.* Más concretamente, se selecciona un termo eléctrico cuyo suministro proviene de paneles fotovoltaicos. Este tipo de sistemas permiten la acumulación de agua para su uso, por lo que ésta está disponible desde que se abre el grifo y no requiere inspecciones anuales como los sistemas de gas. En cambio, son sistemas poco eficientes tanto por su alto consumo energético como por los costes y deben de disponer de un buen aislamiento térmico.
3. *Sistema de producción de ACS por transferencia del calor absorbido de las radiaciones solares.* Más específicamente, se propone un interacumulador con captadores solares. Este tipo de sistemas utiliza una tecnología limpia, obteniendo la energía de una fuente renovable. Su principal aplicación es la producción de ACS, utilizándose también en calefacción, calentamiento de piscinas y refrigeración. Además, la implantación de esta tecnología está altamente recomendada en España por su alta incidencia de energía solar por m².

4.3. Criterios

Los criterios, que los dos expertos consideraron fueron los siguientes:

C1 – Aceptación social. Una mayor aceptación de un sistema se traduce en una mayor facilidad de reparación, mayor rapidez en aprovisionamiento de recambios o un mayor número de profesionales competentes.

- C11 – Unidades similares implantadas. Mide en valor absoluto el número, aproximado, de unidades similares existentes en todo el territorio nacional. Es un criterio a maximizar.

C2 – Ahorro. Un aspecto básico a la hora de determinar la eficiencia de cualquier sistema energético.

- C21 – Ahorro económico. Expresa mediante ratings el ahorro que supone el uso de un sistema con respecto a otro. Es a maximizar.
- C22 – Ahorro energético. Expresa mediante ratings el ahorro que supone el uso de un sistema con respecto a otro. Es a maximizar.

C3 – Costes. Determina los costes de los diferentes conceptos que suponen la implantación de un sistema.

- C31 – Coste de mantenimiento. Muestra en valor absoluto las unidades monetarias que supone este concepto anualmente.
- C32 – Coste de funcionamiento. Desembolso que supone que esté funcionando el sistema debido a sus consumos. Se muestra mediante el costo que supone la producción de un litro de ACS.
- C33 – Inversión inicial. Coste en valor absoluto que supone la adquisición, montaje y puesta en funcionamiento del sistema.

C4 – Impacto ambiental. Mide la cantidad de emisiones que los diferentes sistemas proyectan al medio.

- C41 – Impacto acústico. Evalúa los decibelios producidos por el funcionamiento del sistema.

- C42 – Valora, durante el funcionamiento del sistema, la emisión de sustancias nocivas al medio.
 - C43 – Impacto estético. Mide el impacto visual que genera cada sistema en su entorno.
- C5 – Rendimiento. Datos técnicos extraídos de los catálogos de los fabricantes.
- C51 – Vida útil. Intrínseco del sistema. Indicado en años.
 - C52 – Producción de ACS. Determina el rendimiento al que estará sometido el sistema en función de los requerimientos que tenga. Se mide en caudal por unidad de tiempo.
 - C53 – Temperatura que alcanza. Crucial a la hora de determinar el rendimiento ya que una mayor temperatura máxima hará que con un rendimiento bajo se consiga una buena temperatura en la producción de ACS. Se mide en grados centígrados.

La Tabla 1 muestra las unidades y la forma de medir cada una de las alternativas respecto a cada criterio.

Tabla 1. Criterios, subcriterios, unidades en las que se miden y si son a maximizar o a minimizar

Criterios	Subcriterios	Unidades	Max/min
C1 – Aceptación social	C11. Unidades similares implantadas	Uds.	Max
C2 - Ahorro	C21. Ahorro económico	Tanto por uno	Max
	C22. Ahorro energético	Tanto por uno	Max
C3 - Costes	C31. Coste de mantenimiento	€/año	Min
	C32. Coste de funcionamiento	€/hora	Min
	C33. Inversión inicial	€ totales	Min
C4 - Impactos	C41. Impacto acústico	Ratings	Min
	C42. Impacto ambiental	Ratings	Min
	C43. Impacto estético	Ratings	Min
C5 - Rendimiento	C51. Vida útil	Años	Max
	C52. Producción ACS	L / h	Max
	C53. Temperatura que alcanza	° C	Max

4.4. Valoración de alternativas

La Tabla 2 muestra las valoraciones de las alternativas. Los criterios que evalúan los impactos (C41, C42 y C43) se evalúan mediante Ratings. Esta forma de evaluar alternativas, propuesta por Saaty en el AHP se basa en establecer y ponderar mediante comparación pareada unas categorías, por ejemplo, impacto nulo, bajo medio alto o muy alto. A continuación a cada alternativa se le asocia el rating correspondiente con el valor asignado a ese rating. Posteriormente se vuelven a normalizar los valores para que se muestren en la misma escala de preferencia que el resto de alternativas.

Tabla 2. Valoración de alternativas

Criterios de primer nivel	Criterios de segundo nivel	Alternativas		
		A	B	C
C1	C11	275.000	600.000	225.000
C2	C21	0,063	0,265	0,672
	C22	0,079	0,659	0,263
	C31	150	200	400
C3	C32	1,58	0	0
	C33	2.350	4.315	2.715
	C41	BAJO	NULO	NULO
C4	C42	BAJO	NULO	NULO
	C43	MEDIO	MUY ALTO	ALTO
	C51	15	20	25
C5	C52	900	90	48
	C53	60	50	70

4.5. Resolución analítica

4.5.1. Pesos de los criterios

Para obtener los pesos de los criterios se utilizarán matrices de comparación pareada, tal y como se realiza en el método AHP. Estos pesos son los que se utilizarán en el resto de métodos. La información para calcularlos se obtiene través de un cuestionario realizado a los expertos. Cada uno de ellos propuso sus juicios, que se agregaron por media geométrica para obtener un nuevo decisor que es la agregación de los juicios de los dos expertos. La Tabla 3 muestra los pesos locales y globales obtenidos:

Tabla 3. Pesos de los criterios

Criterios	Peso	Subcriterios	Peso local	Peso Global
C1	0,042	C11	1,000	0,042
C2	0,323	C21	0,500	0,161
		C22	0,500	0,161
		C31	0,345	0,094
C3	0,271	C32	0,470	0,128
		C33	0,185	0,050
		C41	0,454	0,037
C4	0,082	C42	0,454	0,037
		C43	0,093	0,008
		C51	0,347	0,098
C5	0,281	C52	0,372	0,104
		C53	0,281	0,079

4.5.2. Matriz de decisión con valores normalizados y a maximizar.

Para obtener la matriz de decisión se utilizó el método AHP. Los criterios de impactos se calcularon mediante Ratings y el resto, al ser cuantitativos, se normalizaron, dividiendo cada valor por su suma, tal y como se realiza en AHP

Tabla 4. Matriz de decisión

	C1		C2			C3			C4			C5		
	C11	C21	C22	C31	C32	C33	C41	C42	C43	C51	C52	C53		
Peso	0,042	0,161	0,161	0,094	0,128	0,050	0,037	0,037	0,008	0,098	0,104	0,079		
A	0,250	0,063	0,079	0,471	0,053	0,415	0,205	0,205	0,572	0,250	0,867	0,333		
B	0,545	0,265	0,659	0,353	0,474	0,226	0,398	0,398	0,146	0,333	0,087	0,278		
C	0,205	0,672	0,263	0,176	0,474	0,359	0,398	0,398	0,282	0,417	0,046	0,389		

5. Resultados

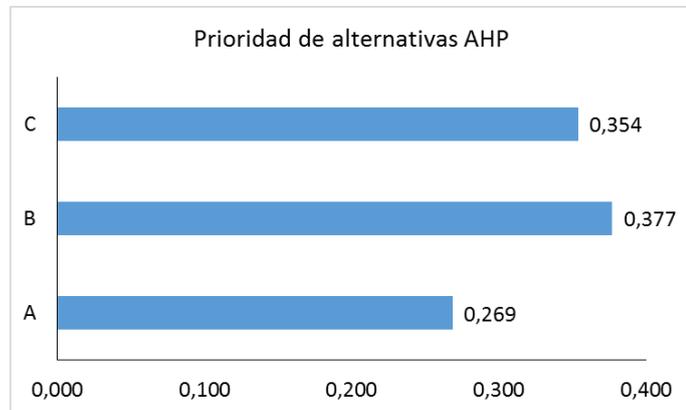
5.1. AHP

A partir de la matriz de decisión, en la que ya todos los valores de las alternativas han sido normalizados del mismo modo, se realiza una agregación mediante suma ponderada. La Tabla 5 muestra las valoraciones finales de las alternativas que se representan a modo de gráfico en la Figura 2. Los cálculos se han realizado con ayuda del programa Superdecisions.

Tabla 5. Prioridad alternativas AHP método aproximado

Alternativas	Prioridad
A	0,269
B	0,377
C	0,354

Figura 2. Gráfica prioridad alternativas AHP método aproximado



5.2. ANP

El primer paso a seguir a la hora de desarrollar este método consiste en definir las relaciones existentes entre los distintos elementos que conforman la red. Los decisores analizaron cómo influyen los elementos entre sí, obteniendo la Tabla 6.

Mediante el método y con ayuda del programa Superdecisions generan tres matrices:

- La Matriz Unweighted que muestra el peso que tiene un elemento sobre otro en relación a los de su mismo cluster, Tabla 7.
- La Matriz Weighted que contiene el peso que de cada elemento sobre otro con respecto a todos los criterios, Tabla 8

- La Matriz Limit que presenta las prioridades de cada elemento, sin distinguir entre criterios y alternativas, Tabla 9

La Tabla 6 muestra la matriz de influencias entre unos elementos y otros (criterios y alternativas. Todas estas tablas se muestran como imágenes obtenidas a partir del programa Superdecisions.

Tabla 6. Matriz de relaciones

	A	B	C	C11	C21	C22	C31	C32	C33	C41	C42	C43	C51	C52	C53
A	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
C	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
C11	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
C21	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
C22	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1
C31	1	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
C32	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1
C33	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1
C41	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0
C42	1	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0
C43	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
C51	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
C52	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0
C53	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0

Tabla 7. Matriz Unweighted

	A1	A2	A3	C11	C21	C22	C31	C32	C33	C41	C42	C43	C51	C52	C53
A1	0,00000	0,00000	0,00000	0,25000	0,06300	0,07892	0,47059	0,05269	0,41491	0,20497	0,20497	0,57230	0,25000	0,86705	0,33333
A2	0,00000	0,00000	0,00000	0,54546	0,26500	0,65834	0,35294	0,47365	0,22596	0,39752	0,39752	0,14588	0,33333	0,08671	0,27778
A3	0,00000	0,00000	0,00000	0,20454	0,67200	0,26274	0,17647	0,47366	0,35913	0,39752	0,39752	0,28182	0,41667	0,04624	0,38889
C11	1,00000	1,00000	1,00000	0,00000	1,00000	0,00000	1,00000	0,00000	1,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
C21	0,83333	0,20000	0,12500	0,87500	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,25000	0,00000
C22	0,16667	0,80000	0,87500	0,12500	1,00000	0,00000	1,00000	0,00000	0,00000	1,00000	1,00000	0,00000	0,00000	0,75000	1,00000
C31	0,08795	0,34582	0,34582	0,00000	0,08795	0,00000	0,00000	0,00000	0,25000	0,00000	0,00000	0,00000	0,85714	0,00000	0,00000
C32	0,24264	0,05724	0,05724	0,16667	0,24264	0,00000	0,00000	0,00000	0,75000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,75000	0,25000
C33	0,66942	0,59693	0,59693	0,83333	0,66942	0,00000	1,00000	1,00000	0,00000	0,00000	0,00000	1,00000	0,14286	0,25000	0,75000
C41	0,17818	0,08795	0,08795	0,00000	0,00000	0,16667	0,00000	0,00000	0,20000	0,00000	0,00000	0,00000	0,50000	0,00000	0,00000
C42	0,75140	0,24264	0,24264	1,00000	0,00000	0,83333	0,00000	0,00000	0,60000	0,00000	0,00000	0,00000	0,50000	0,00000	0,00000
C43	0,07042	0,66942	0,66942	0,00000	0,00000	0,00000	1,00000	0,00000	0,20000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
C51	0,22965	0,10945	0,24264	0,50000	0,00000	0,00000	0,10945	0,00000	0,10945	0,06878	0,08161	0,00000	0,00000	0,12500	0,00000
C52	0,64833	0,58155	0,66942	0,50000	0,00000	0,25000	0,30900	0,83333	0,58155	0,68128	0,76079	0,00000	0,25000	0,00000	0,00000
C53	0,12202	0,30900	0,08795	0,00000	0,00000	0,75000	0,58155	0,16667	0,30900	0,24995	0,15760	0,00000	0,75000	0,87500	0,00000

Tabla 8. Matriz Weighted

	A1	A2	A3	C11	C21	C22	C31	C32	C33	C41	C42	C43	C51	C52	C53
A1	0,00000	0,00000	0,00000	0,08301	0,01327	0,03609	0,11768	0,01501	0,10723	0,10248	0,10248	0,19077	0,06896	0,25391	0,18605
A2	0,00000	0,00000	0,00000	0,18112	0,05582	0,30106	0,08826	0,13496	0,05840	0,19876	0,19876	0,04863	0,09195	0,02539	0,15504
A3	0,00000	0,00000	0,00000	0,06792	0,14155	0,12015	0,04413	0,13496	0,09281	0,19876	0,19876	0,09394	0,11493	0,01354	0,21706
C11	0,04218	0,04218	0,04218	0,00000	0,05913	0,00000	0,07474	0,00000	0,07724	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
C21	0,26911	0,06459	0,04037	0,10245	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,01283	0,00000
C22	0,05382	0,25834	0,28256	0,01464	0,36614	0,00000	0,03238	0,00000	0,00000	0,25000	0,25000	0,00000	0,00000	0,03849	0,09781
C31	0,02386	0,09381	0,09381	0,00000	0,03202	0,00000	0,00000	0,00000	0,10520	0,00000	0,00000	0,00000	0,14574	0,00000	0,00000
C32	0,06582	0,01553	0,01553	0,03118	0,08834	0,00000	0,00000	0,00000	0,31559	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,13538	0,08601
C33	0,18160	0,16194	0,16194	0,15589	0,24373	0,00000	0,40717	0,46392	0,00000	0,00000	0,00000	0,66667	0,02429	0,04513	0,25803
C41	0,01470	0,00725	0,00725	0,00000	0,00000	0,00939	0,00000	0,00000	0,00315	0,00000	0,00000	0,00000	0,05320	0,00000	0,00000
C42	0,06198	0,02001	0,02001	0,03174	0,00000	0,04696	0,00000	0,00000	0,00944	0,00000	0,00000	0,00000	0,05320	0,00000	0,00000
C43	0,00581	0,05521	0,05521	0,00000	0,00000	0,00000	0,01522	0,00000	0,00315	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
C51	0,06456	0,03077	0,06821	0,16603	0,00000	0,00000	0,02413	0,00000	0,02493	0,01719	0,02040	0,00000	0,00000	0,05942	0,00000
C52	0,18227	0,16349	0,18819	0,16603	0,00000	0,12159	0,06811	0,20929	0,13248	0,17032	0,19020	0,00000	0,11193	0,00000	0,00000
C53	0,03430	0,08687	0,02472	0,00000	0,00000	0,36476	0,12819	0,04186	0,07039	0,06249	0,03940	0,00000	0,33580	0,41591	0,00000

Tabla 9. Matriz Limit

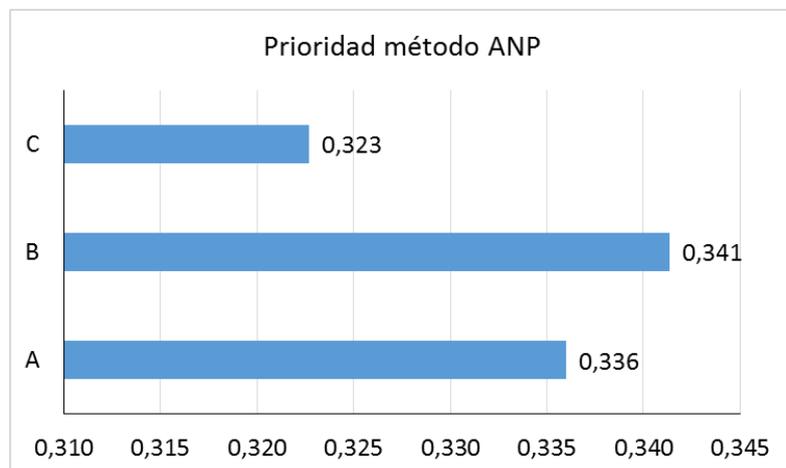
	A1	A2	A3	C11	C21	C22	C31	C32	C33	C41	C42	C43	C51	C52	C53
A1	0,08698	0,08698	0,08698	0,08698	0,08698	0,08698	0,08698	0,08698	0,08698	0,08698	0,08698	0,08698	0,08698	0,08698	0,08698
A2	0,08836	0,08836	0,08836	0,08836	0,08836	0,08836	0,08836	0,08836	0,08836	0,08836	0,08836	0,08836	0,08836	0,08836	0,08836
A3	0,08353	0,08353	0,08353	0,08353	0,08353	0,08353	0,08353	0,08353	0,08353	0,08353	0,08353	0,08353	0,08353	0,08353	0,08353
C11	0,02846	0,02846	0,02846	0,02846	0,02846	0,02846	0,02846	0,02846	0,02846	0,02846	0,02846	0,02846	0,02846	0,02846	0,02846
C21	0,03683	0,03683	0,03683	0,03683	0,03683	0,03683	0,03683	0,03683	0,03683	0,03683	0,03683	0,03683	0,03683	0,03683	0,03683
C22	0,08827	0,08827	0,08827	0,08827	0,08827	0,08827	0,08827	0,08827	0,08827	0,08827	0,08827	0,08827	0,08827	0,08827	0,08827
C31	0,04065	0,04065	0,04065	0,04065	0,04065	0,04065	0,04065	0,04065	0,04065	0,04065	0,04065	0,04065	0,04065	0,04065	0,04065
C32	0,08856	0,08856	0,08856	0,08856	0,08856	0,08856	0,08856	0,08856	0,08856	0,08856	0,08856	0,08856	0,08856	0,08856	0,08856
C33	0,15957	0,15957	0,15957	0,15957	0,15957	0,15957	0,15957	0,15957	0,15957	0,15957	0,15957	0,15957	0,15957	0,15957	0,15957
C41	0,00549	0,00549	0,00549	0,00549	0,00549	0,00549	0,00549	0,00549	0,00549	0,00549	0,00549	0,00549	0,00549	0,00549	0,00549
C42	0,01702	0,01702	0,01702	0,01702	0,01702	0,01702	0,01702	0,01702	0,01702	0,01702	0,01702	0,01702	0,01702	0,01702	0,01702
C43	0,01112	0,01112	0,01112	0,01112	0,01112	0,01112	0,01112	0,01112	0,01112	0,01112	0,01112	0,01112	0,01112	0,01112	0,01112
C51	0,03079	0,03079	0,03079	0,03079	0,03079	0,03079	0,03079	0,03079	0,03079	0,03079	0,03079	0,03079	0,03079	0,03079	0,03079
C52	0,11154	0,11154	0,11154	0,11154	0,11154	0,11154	0,11154	0,11154	0,11154	0,11154	0,11154	0,11154	0,11154	0,11154	0,11154
C53	0,12281	0,12281	0,12281	0,12281	0,12281	0,12281	0,12281	0,12281	0,12281	0,12281	0,12281	0,12281	0,12281	0,12281	0,12281

La Tabla 10 y la Figura 3 muestran los resultados obtenidos mediante ANP

Tabla 10. Prioridad alternativas AHP método aproximado

Alternativas	Prioridad
A	0,266
B	0,371
C	0,363

Figura 3. Gráfica prioridad alternativas AHP método aproximado



5.3. Topsis

El método TOPSIS se ha aplicado tomando como punto de partida la matriz de decisión de AHP, con el fin de poder comparar resultados entre ambos métodos. La Tabla 11 muestra la distancia al ideal, al antiideal y la TOPSIS:

Tabla 11: Resultados Topsis

Alternativas	diM(ni)	dim(ni)	Di(ni)
A	0,16623	0,09203	0,35633
B	0,10614	0,13965	0,56816
C	0,11236	0,14045	0,55555

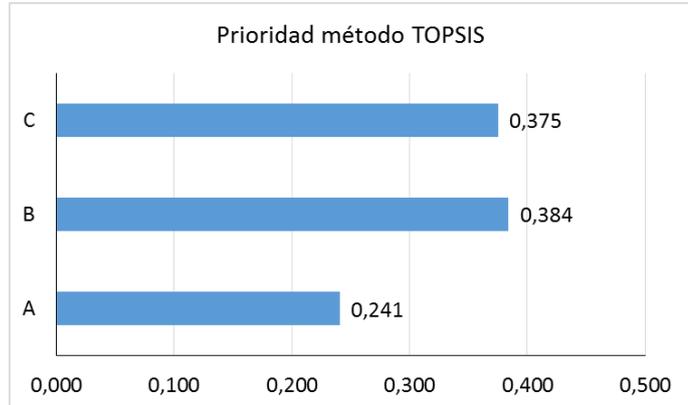
- diM(ni) es la distancia al ideal
- dim(ni) es la distancia al antiideal
- Di(ni) es la distancia TOPSIS

La tabla 12 y la Figura 4 muestran los resultados obtenidos con este método

Tabla 12. Prioridades Topsis

Alternativa	Prioridad
A	0,241
B	0,384
C	0,375

Figura 4. Gráfica Prioridades Topsis



5.4. Pres

De nuevo, tomando como partida la matriz de decisión del método AHP, con el fin de comparar resultados se obtiene en la Tabla 13 la Matriz de dominación y en la Tabla 14 la ordenación final, representada en la Figura 5

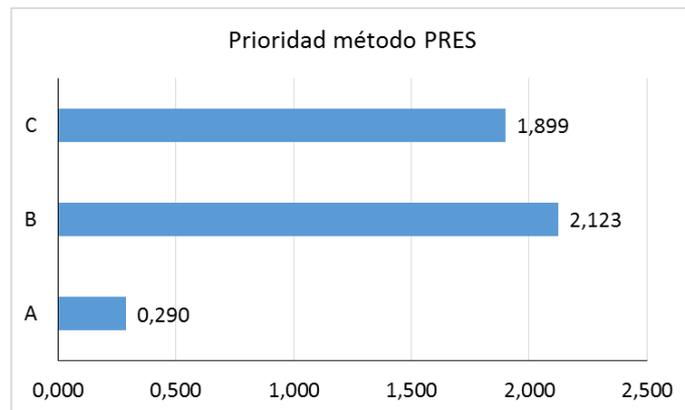
Tabla 13. Matriz de dominación

Alternativas	A	B	C	D (Suma de filas)	Índice Pres
A	--	0,013038	0,016181	0,029219	0,289587
B	0,049478	--	0,021667	0,071145	2,123305
C	0,051422	0,020469	--	0,071891	1,899432
D (Suma de columnas)	0,1009	0,03351	0,03785		

Table 14. Prioridades Pres

Alternativa	Prioridad
A	0,290
B	2,123
C	1,899

Figure 5. Gráfica Prioridades Pres



5.5. Promethee II

Aplicando el método de toma de decisiones Promethee II la Tabla 15 muestra la matriz de decisión. La Tabla 16 muestra la matriz de índices de preferencia. La Tabla 17 la matriz de flujos. La Tabla 18 muestra la matriz de prioridades y la Figura 6 su gráfica.

Tabla 15. Matriz de valoración

	C11	C21	C22	C31	C32	C33	C41	C42	C43	C51	C52	C53
	w1=0,0422	w2=0,1615	w3=0,1615	w4=0,0936	w5=0,1275	w6=0,0502	w7=0,0374	w8=0,0374	w9=0,0076	w10=0,0976	w11=0,1045	w12=0,0790
	max	max	max	min	min	min	min	min	min	max	max	max
	Tipo lineal (5)	Tipo V (3)	Tipo V (3)	Tipo nivel (4)	Tipo lineal (5)	Tipo lineal (5)	Tipo V (3)	Tipo V (3)	Tipo V (3)	Tipo U (2)	Tipo lineal (5)	Tipo U (2)
	q=200,000 p=400,000	p=0,5	p=0,5	q=50 p=100	q=0,4 p=0,8	q=500 p=1000	p=0,04	p=0,04	p=0,3	q=5	q=100 p=500	q=10
A	275000	0,063	0,079	150	0,818	2350	0,064	0,064	0,13	15	900	60
B	600000	0,265	0,659	200	0,091	4315	0,033	0,033	0,51	20	90	50
C	225000	0,672	0,263	400	0,091	2715	0,033	0,033	0,264	25	48	70

Tabla 16. Matriz de índices de preferencia

	A	B	C
A	0	0,209	0,201
B	0,552	0	0,258
C	0,481	0,391	0

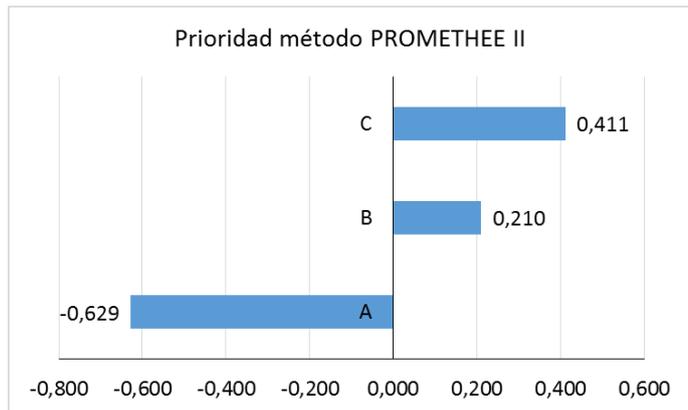
Tabla 17. Matriz de flujos

	ϕ^+	ϕ^-	ϕ_{NETO}
A	0,41052	1,03240	-0,62187
B	0,81000	0,59957	0,21043
C	0,87129	0,45982	0,41144

Tabla 18. Prioridades Promethee II

Alternativa	Prioridad
A	-0,629
B	0,210
C	0,411

Figure 6. Gráfica de prioridades Promethee



5.6. Comparación de resultados

La Tabla 19 muestra los resultados obtenidos a través de los diferentes métodos, incluyendo una identificación cromática que indica la posición. Hay que indicar que los únicos índices comparables en escala de preferencia son AHP y ANP.

Tabla 19. Orden de preferencia de cada método

Alternativas	AHP	ANP	TOPSIS	PRES	PROMETHE II
A	0,269	0,266	0,241	0,29	-0,629
B	0,377	0,371	0,384	2,123	0,21
C	0,354	0,363	0,375	1,899	0,411

6. Conclusiones

En todos los métodos, excepto en PROMETHE II, la alternativa más preferida es la B. En AHP, ANP y TOPSIS, le sigue de cerca la alternativa C. Con el método PRES se observa una mayor diferencia entre las tres alternativas, ya que por la forma de medir las preferencias, este método realiza un cociente entre el valor que indica hasta qué punto una

alternativa es más dominante que dominada. B es algo más de dos veces más dominante que dominada, mientras que C es 1,9 veces. Aunque esta diferencia no es excesiva.

En el caso de PROMETHEE, la alternativa C es más dominante que dominada respecto a cómo lo es la B, cambiándose la ordenación, Esto se debe al efecto de los umbrales tenidos en cuenta a la hora de determinar los criterios generalizados.

Las técnicas de Análisis Multicriterio de Decisiones (MCDA) son una valiosa ayuda que permiten a los responsables de la decisión gestionar toda la información que disponible en su mente y que a ésta le resulta difícil gestionar. En este caso se han considerado 12 criterios y tres alternativas, generando un profundo conocimiento en los dos expertos sobre sus preferencias y juicios. Esto les ha permitido tener en cuenta aspectos que de otro modo les hubiera resultado difíciles de gestionar.

El empleo de una u otra técnica depende del conocimiento que el decisor y sus asesores tengan de la misma. No hay una mejor que otra, porque el calcular las preferencias del decisor es diferente. Por tanto puede resultar interesante, en proyectos complejos, utilizar diversas técnicas y comparar resultados, pero esto se ha de hacer con cuidado de modo que las preferencias de partida sean las mismas y así se puedan comparar los resultados.

En este caso los expertos parecen tener claro su esquema de preferencias y el sistema de agregación de las mismas no ha tenido una influencia decisiva.

7. Referencias

- Aragonés-Beltrán, P., Chaparro-González, F., Pastor-Ferrando, J.P., Rodríguez-Pozo, F. (2010). An ANP-based approach for the selection of the photovoltaic solar power plant investment projects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14: 249-264.
- Aragonés P., Gómez-Senent, E., Pastor, J.P. (2001). Ordering the alternatives of a Strategic Plan for Valencia (Spain). *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis* 10: 153-171.
- Belton, V; Stewart, B. (2002). *Multiple Criteria Decision Analysis. An Integrated Approach*. Kluwer Academic Publishers, Massachusetts.
- Brans, J.P., Vincke, P., Mareschal, B., 1986. How to select and how to rank projects: The PROMETHEE Method. *Eur. J. Opl. Res.* 24, 228-238.
- Chen, S., Chan, C.W., Huang, G.H., 2002. Using multiple criteria decision analysis for supporting decisions of solid waste management. *Journal of environmental science and health. Part A* 37 (6), 975-990.
- Figueira, J; Greco, S; Ehrgott, M. (2005). *Multiple Criteria Decision Analysis: The State of the Art Surveys*. Springer Science+Business Media, Inc., New York.
- IDAE Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía. (2011) Plan de Ahorro y Eficiencia Energética 2011-20. Aprobado en Consejo de Ministros de 29 de julio de 2011. Madrid.
- Saaty, T.L., 1980. *The Analytic Hierarchy Process*. Mc Graw-Hill.
- Saaty, T.L., 1994. *Fundamentals of decision making and priority theory with the AHP*. RWS Publications. Pittsburgh.
- Saaty, T.L., 2001. *Decision making with independence and feedback: The Analytic Network Process*. RWS Publications. Pittsburgh.
- Wallenius, J; Dyer, J.S; Fishburn, P.C; Steuer, R.E; Zionts, S; Deb, K. (2008). Multiple Criteria Decision Making, Multiattribute Utility Theory: Recent Accomplishments and What Lies Ahead. *Management Science* 54(7):1336-1349