

EVALUACIÓN DE TECNOLOGÍAS FOTOVOLTAICAS EN UN PROCESO DE TOMA DE DECISIÓN MULTICRITERIO

J. Miguel Sánchez-Lozano

M. Socorro García-Cascales

Dpto Electrónica, Tecnología de Computadoras y Proyectos. Universidad Politécnica de Cartagena. Murcia.

M. Teresa Lamata

Dpto Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial. Universidad de Granada.

Abstract

The high cost of solar energy is today the main reason why it is not introduced in a more widespread way. For this energy to present lower costs it is necessary to achieve continued and sustained growth of its market and at the same time, to keep a large effort in technological research aimed to progress towards much lower manufacturing costs through the learning curve of the technology.

Solar photovoltaic technology, like any other technology has travelled a long way, based mainly on experience; and in this paper, we seek to assess the leading photovoltaic technologies presently available, using multi-criteria decision making (MCDM) methods to do so.

The aim of this paper is the study and analysis of the decision criteria when searching for the best technology for manufacturing photovoltaic cells, considering both quantitative criteria such as economic and technical factors and qualitative criteria such as social and environmental factors.

Keywords: *photovoltaic cell; manufacturing technology; multi-criteria decision making (MCDM); linguistic labels*

Resumen

El alto coste de la energía de origen solar es actualmente, la razón de mayor peso por la que no se implanta de forma más extendida. Para que esta energía presente menores costes resulta necesario conseguir un crecimiento continuo y sostenido de su mercado y al mismo tiempo, mantener un gran esfuerzo en la investigación tecnológica apuntando hacia menores costes de fabricación a través de la curva de aprendizaje de la tecnología.

La tecnología solar fotovoltaica, como cualquier otra tecnología está recorriendo un largo camino basado fundamentalmente en la experiencia y en este artículo, se pretende realizar una evaluación de las principales tecnologías fotovoltaicas presentes en el panorama actual, empleando para ello métodos de decisión multicriterio.

El objetivo de este artículo es el estudio y análisis de los criterios de decisión a la hora de elegir la mejor tecnología de fabricación de células fotovoltaicas, teniendo en cuenta tanto

criterios de tipo cuantitativo como son los económicos y/o técnicos y criterios de tipo cualitativo como son los sociales y/o ambientales.

Palabras clave: *Células fotovoltaicas, tecnologías de fabricación, métodos de decisión multicriterio MDMC, etiquetas lingüísticas*

1. Introducción

La actual crisis financiera que ha afectado a la economía mundial no ha escatimado ningún sector industrial y los últimos años han sido un gran desafío para la industria fotovoltaica. A pesar de un mercado de alta incertidumbre, la excesiva dependencia en el sector energético de las fuentes de energía de origen no renovable y el cambio climático global continúan resultando fundamentos de gran consistencia que obligan a no dejar de lado las fuentes de energía de origen renovable.

La energía solar fotovoltaica se ha postulado como uno de los recursos energéticos renovables de mayor auge, esto es debido en gran parte al marco regulador a la que está sometida y a los avances tecnológicos que la están acompañando los cuales han marcado un nuevo paso adelante en el desarrollo de las energías renovables y ha establecido entornos políticos y económicos favorables para incentivar el desarrollo de la energía solar fotovoltaica; un escenario ambicioso considerado desde la EPIA es alcanzar el 12 % en el año 2020 (European Photovoltaic Industry Association [EPIA], 2009), y que el coste de la electricidad obtenida mediante energía fotovoltaica se aproxime a la tarifa residencial, lo que se denomina paridad de red (European Photovoltaic Technology Platform, 2007).

Partiendo del primer módulo solar utilizado en aplicaciones espaciales, los avances en tecnologías de semiconductores han supuesto un gran impacto en la industria fotovoltaica (Green, 2002). Sus aplicaciones varían en función de las diferentes tecnologías, en sistemas aislados, sistemas conectados a red ó sistemas híbridos.

La tecnología solar fotovoltaica, como cualquier otra tecnología está recorriendo un largo camino basado fundamentalmente en la experiencia, por ello en este artículo, se pretende realizar una evaluación de las principales tecnologías fotovoltaicas presentes en el panorama actual, empleando para ello métodos de decisión multicriterio.

El artículo está organizado de la forma siguiente: la “metodología” engloba la constitución del problema de decisión y describe las variables lingüísticas, así como los métodos sugeridos con detalle (AHP y TOPSIS) los cuales se usaran posteriormente. En el “problema de decisión de tecnologías de fabricación” se expondrá la aplicación de los citados métodos. Finalmente, en el apartado de “conclusiones” se describirán las conclusiones principales y los trabajos futuros.

2. Metodología

2.1. La constitución del problema de decisión

Cualquier problema de decisión multicriterio debe ser expresado a través de los siguientes cinco elementos, $\{C, A, r, l, \prec\}$;

Donde:

1. $C=\{C_1, C_2, \dots, C_m\}$ Corresponde con la serie de criterios que representan los instrumentos que permiten comparar alternativas desde un punto de vista concreto.

2. $A=\{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ Corresponde con la serie de alternativas factibles para el decisor, entre dichas alternativas el decisor elegirá una. En dicho caso las series C y A son finitas.
3. $r:A \times C \rightarrow R$ es una función donde en el caso que nos ocupa se corresponde con un intervalo real para cada alternativa o decisión A_i y para cada criterio C_j .

$$(A_i, C_j) \rightarrow r(A_i, C_j) \equiv [l_j, u_j]$$

Una vez que las series de criterios y alternativas han sido seleccionadas, se analizará el efecto que produce cada alternativa respecto a cada criterio.

A través de los intervalos $[l_j, u_j]$, el decisor representa la calidad de una alternativa con respecto a un criterio; los diferentes valores de r pueden ser representados por medio de una matriz denominada Matriz de decisión, como puede verse en la Tabla 1.

Tabla 1: Matriz de decisión

A\C	C ₁	C ₂	...	C _j	...	C _m
A ₁	[l ₁₁ , u ₁₁]	[l ₁₁ , u ₁₂]	...	[l ₁₁ , u ₁₁]	...	[l ₁₁ , u _{1m}]
A ₂	[l ₂₁ , u ₂₁]	[l ₂₂ , u ₂₂]	...	[l ₂₂ , u _{2j}]	...	[l ₂₂ , u _{2j}]
			
A _i	[l _{ii} , u _{i1}]	[l _{ii} , u _{i2}]	...	[l _{ii} , u _{ij}]	...	[l _{ii} , u _{im}]
			
A _n	[l _{nn} , u _{n1}]	[l _{nn} , u _{n2}]	...	[l _{nn} , u _{nj}]	...	[l _{nn} , u _{nm}]

4. Una relación de preferencias \leq realizadas por el decisor. Se supondrá que el decisor presenta un poder de decisión coherente, por lo tanto debería tratar de maximizar los beneficios o al menos reducir al mínimo las pérdidas. En este caso el decisor debe obtener la mejor alternativa en función a los criterios considerados.
5. Con la información obtenida sobre los criterios, el decisor proporciona información lingüística sobre la importancia de cada criterio.

En este caso utilizaremos la metodología AHP para la obtención del peso de los criterios y el método TOPSIS para la valoración de las alternativas, en ambos casos modelizando mediante intervalos.

2.2. Variables lingüísticas e intervalos

2.2.1. Variables lingüísticas

En la mayoría de ocasiones, el decisor no es capaz de definir la importancia de los criterios o la calidad de las alternativas respecto a cada criterio de una forma contundente. Cuando se presentan problemas en los que hay que evaluar fenómenos relacionados con percepciones y relaciones de los seres humanos (estética, gusto, etc.), se suelen utilizar palabras del lenguaje natural en lugar de valores numéricos para emitir valoraciones.

Una variable lingüística, se caracteriza por un valor sintáctico o etiqueta y por un valor semántico o significado. La etiqueta es una palabra o frase perteneciente a un conjunto de términos lingüísticos. Al resultar las palabras menos precisas que los números, el concepto de variable lingüística es una propuesta adecuada para caracterizar aquellos fenómenos que no son adecuados para poder ser evaluados mediante valores numéricos.

Por ejemplo, la altura de una persona es una variable lingüística si sus valores son lingüísticos más que numéricos, es decir, muy bajo, bajo, mediano, alto y muy alto en lugar de valores numéricos.

Definición 1.- Una variable lingüística se caracteriza por el siguiente quintuplo: $\{X; T(X); U; G; M\}$

Donde:

1. X es el nombre de la variable,
2. $T(X)$ es la serie de términos de X (el conjunto de valores lingüísticos)
3. U es el universo del discurso,
4. G es una norma sintáctica para generar los elementos de $T(X)$ y
5. M es una regla o norma semántica para asociar los valores lingüísticos de X .

En general, la toma de decisiones para el decisor resulta más sencilla si se evalúa por medio de términos lingüísticos (García-Cascales y Lamata, 2007). En este caso modelaremos estas variables lingüísticas mediante intervalos.

2.2.2. Operaciones aritméticas de intervalos

Definición 1.- Un número intervalo $[l, u]$ con $l \leq u$ es un conjunto de pares ordenados de números reales definido por:

$$[l, u] = \{x : l \leq x \leq u\} \quad (1)$$

Esta representación es muy útil en situaciones donde no somos capaces de obtener medidas precisas de una cantidad. Sea A_1 y A_2 dos números intervalo, para este caso, las operaciones aritméticas necesarias con intervalos son:

a) Suma: $A_1 \oplus A_2 = [l_1 + l_2, u_1 + u_2]$ (2)

b) Resta: $A_1 \ominus A_2 = A_1 + (-A_2)$ Como el contrario u oposición es $-A_2 = (-u_2, -l_2)$, entonces

$$A_1 \ominus A_2 = [l_1 - u_2, u_1 - l_2] \quad (3)$$

c) Multiplicación: $A_1 \otimes A_2 = [l_1 \times l_2, u_1 \times u_2]$ (4)

d) División: $A_1 \oslash A_2 = [[l_1, u_1] \cdot [1/u_2, 1/l_2]] \quad 0 \neq [l_2, u_2]$ (5)

e) Producto de un escalar: $k \circ A_1 = (k \circ l_1, k \circ u_1)$ (6)

f) Raíz: $A_1^{1/2} = [l_1^{1/2}, u_1^{1/2}]$ (7)

g) Distancia: $d(A_1, A_2) = \sqrt{\frac{1}{2} [(l_1 - l_2)^2 + (u_1 - u_2)^2]}$ (8)

2.3. Proceso Analítico Jerárquico (AHP)

La metodología AHP fue propuesta por Saaty en 1980, está basada en la idea de que un problema de toma de decisión con criterios múltiples, se puede resolver mediante la jerarquización de los problemas planteados, es decir consiste en un método de selección de alternativas en función de una serie de criterios los cuales suelen estar en conflicto.

La principal características del AHP es que el problema de decisión se modeliza mediante una jerarquía en cuyo vértice superior está el principal objetivo del problema y, en la base se sitúan las posibles alternativas a evaluar, los niveles intermedios corresponden a los criterios en base a los cuales se toma la decisión.

En cada nivel de la jerarquía se realizan comparaciones entre pares de elementos de ese nivel, en base a la importancia o contribución de cada uno de ellos al elemento del nivel superior al que están ligados.

La información que proporciona es redundante, peculiaridad que resulta ventajosa pues permite reducir los errores y obtener mayor consistencia.

La metodología AHP evalúa el impacto de cada una de las alternativas sobre el objetivo global de la jerarquía. En este caso, solo aplicaremos el método para ordenar los pesos de los criterios.

Los criterios analizados por el decisor (C_i, C_j) serán representados en una matriz de dimensión $n \times n$ de la forma siguiente:

$$C = \begin{matrix} & \begin{matrix} C_1 & C_2 & \dots & C_n \end{matrix} \\ \begin{matrix} C_1 \\ C_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ C_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2n} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ c_{n1} & c_{n2} & \dots & c_{n3} \end{bmatrix} \end{matrix}$$

El valor c_{12} indica de forma aproximada la importancia relativa de C_1 sobre C_2 , es decir, $c_{12} \approx (w_1/w_2)$. Dicha expresión puede generalizarse de la siguiente forma:

1. $c_{ij} \approx (w_i/w_j)$ $i, j = 1, 2, \dots, n$
2. $c_{ii} = 1, i=1, 2, \dots, n$
3. Si $c_{ij}=\alpha, \alpha \neq 0$, entonces $a_{ji}= 1/ \alpha, i=1, 2, \dots, n$
4. Si C_i es más importante que C_j entonces $c_{ij} \approx (w_i/w_j) > 1$

Esto implica que la matriz deberá ser positiva y recíproca con 1 en la diagonal principal, por tanto el decisor sólo necesitará analizar el triángulo superior de la matriz. Los valores asignados a c_{ij} acordes a la escala de Saaty varían en el intervalo de 1-9.

De tal forma que $C_{ij}=5$ significa que la opción C_i es más preferida que la C_j , mientras que $C_{ji}=1/5$ indicaría lo contrario.

En el caso de la utilización de intervalos; por ejemplo, para el caso de $C_{ij}=5$, su intervalo podría ser (4,6) y su inverso $C_{ji}=1/5$ sería (1/6,1/4)

La Tabla 2 presenta los intervalos asignados en función de la comparación entre pares:

Tabla 2: Escala de valoración en proceso de comparación de pares

Juicios de valor de preferencias entre la alternativa i y la alternativa j	Intervalos
A_i es igualmente importante que A_j	[1, 1]
A_i es ligeramente más/menos importante que A_j	[2, 4]
A_i es fuertemente más/menos importante que A_j	[4, 6]
A_i es fuertemente mucho más/menos importante que A_j	[6, 8]
A_i es extremadamente más/menos importante que A_j	[8, 9]

El número de valores situados en el triángulo inferior de la matriz se obtienen mediante la siguiente expresión:

$$L = n(n-1)/2 \quad (9)$$

Donde n es el tamaño de la matriz C.

En los problemas AHP, donde los valores son intervalos, en lugar de utilizar λ como estimador del peso, se utilizará la media geométrica normalizada, expresada de la forma siguiente:

$$[w_i, W_i] = \frac{\left(\prod_{j=1}^n (l_{ij}, u_{ij}) \right)^{1/n}}{\sum_{i=1}^m \left(\prod_{j=1}^n (l_{ij}, u_{ij}) \right)^{1/n}} \quad (10)$$

Donde, (l_{ij}, u_{ij}) es un intervalo.

2.4. Método TOPSIS

De entre los diversos métodos de decisión multicriterio, el método TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) es uno de los más destacados (Hwang y Yoon, 1981), está basado en el concepto de elegir la alternativa que tenga una menor distancia respecto a la solución ideal positiva y lo más alejada posible de la solución ideal negativa.

Según (Wang y Chang, 2007), este procedimiento se emplea por las siguientes razones:

- a) La lógica TOPSIS es racional y comprensible;
- b) Los procesos de cálculo son sencillos;
- c) El concepto permite la búsqueda de mejores alternativas para cada criterio, se muestra en una forma matemática simple, y la
- d) Importancia de los pesos se incorpora en los procesos de comparación

En este estudio, el método TOPSIS se utilizará para seleccionar el orden de preferencia de las alternativas. Los métodos de decisión multicriterio que incluyen etiquetas lingüísticas y numéricas pueden ser expresados mediante una matriz denominada matriz de decisión.

Los métodos TOPSIS con intervalos se derivan del método TOPSIS genérico con pequeñas diferencias, con la adaptación pertinente de las operaciones asociadas a la utilización de intervalos (García-Cascales y Lamata, 2009).

2.4.1. El algoritmo:

Paso 1.- Construcción la matriz de decisión con intervalos. Identificados los criterios de evaluación y las variables lingüísticas adecuadas en función del peso o importancia de los criterios y determinar el conjunto de alternativas viables con la valoración lingüística de alternativas en función de cada criterio. Una vez que se forma la matriz de decisión, la matriz de decisión normalizada (n_{ij} ; $i = 1, 2, \dots, m$ (número de alternativas), $j = 1, 2, \dots, n$ (número de criterios)) se construye utilizando la ecuación (11):

$$\bar{n}_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^m (x_{ij})^2}}, \quad j = 1, \dots, n; \quad i = 1, \dots, m \quad (11)$$

Donde x_{ij} es la valoración de las alternativas i en función de los criterios j .

Paso 2.- Construcción de la matriz de decisión normalizada ponderada \bar{v}_{ij} , se obtendrá aplicando la ecuación (12) donde los pesos de los criterios j se representan por w_j .

$$\bar{v}_{ij} = w_j \otimes \bar{n}_{ij}, \quad j = 1, \dots, n; \quad i = 1, \dots, m \quad (12)$$

Es bien sabido que los pesos de los criterios en los problemas de toma de decisiones no tienen la misma medida y no todos tienen la misma importancia. El peso asociado a cada criterio se obtendrá en este artículo mediante la metodología AHP, como se ha comentado con anterioridad.

Paso 3.- Determinación de la solución ideal positiva y negativa. La solución ideal positiva, \bar{A}^+ (\bar{A}_i^+ ; $i = 1, 2, \dots, m$), se obtiene a partir de aquellas valoraciones que presentan mejor rendimiento.

$$\bar{A}^+ = \{\bar{v}_1^+, \dots, \bar{v}_n^+\} = \left\{ \left(\max_i \bar{v}_{ij}, j \in J \right) \left(\min_i \bar{v}_{ij}, j \in J' \right) \right\} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (13)$$

y la solución ideal negativa, \bar{A}^- (\bar{A}_i^- ; $j = 1, 2, \dots, n$), se obtiene a partir de aquellas valoraciones que presentan peor puntuación en la matriz de decisión ponderada normalizada.

$$\bar{A}^- = \{\bar{v}_1^-, \dots, \bar{v}_n^-\} = \left\{ \left(\min_i \bar{v}_{ij}, j \in J \right) \left(\max_i \bar{v}_{ij}, j \in J' \right) \right\} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (14)$$

Ambas soluciones se calculan usando las ecuaciones (13) y (14), donde J está asociado con el criterio de beneficio (a maximizar) y J' con el criterio de coste (a minimizar).

Paso 4.- Cálculo de la separación de cada alternativa con respecto a la solución ideal positiva y a la solución ideal negativa. La distancia de una alternativa de la solución ideal \bar{d}_i^+ , se obtiene mediante la expresión (15):

$$\bar{d}_i^+ = \sum_{j=1}^n d(\bar{v}_{ij} - \bar{v}_j^+) \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (15)$$

Y la solución negativa ideal \bar{d}_i^- mediante la expresión (16)

$$\bar{d}_i^- = \sum_{j=1}^n d(\bar{v}_{ij} - \bar{v}_j^-) \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (16)$$

En ambos casos se utiliza distancias multidimensionales Euclideas.

Paso 5.- Cálculo de la proximidad relativa de cada alternativa a la solución ideal positiva y negativa mediante el índice de proximidad.

$$\bar{R}_i = \frac{\bar{d}_i^-}{\bar{d}_i^+ + \bar{d}_i^-} \quad i = 1, \dots, m \quad (17)$$

$$\text{Si } \overline{R}_i = 1 \Rightarrow A_i = \overline{A}^+ , \quad \text{Si } \overline{R}_i = 0 \Rightarrow A_i = \overline{A}^-$$

Paso 6.- Proceso de ordenación en sentido decreciente de las alternativas, comenzando con aquella que más se aproxime a la solución ideal (mayor proximidad relativa).

3. Un problema de decisión de tecnologías de fabricación de células fotovoltaicas

3.1.- Estructuración del problema

Los diferentes tipos de tecnologías de fabricación de células fotovoltaicas existentes en la actualidad serán las alternativas del problema de decisión a resolver.

Hoy en día, existen diferentes formas de clasificar las tecnologías de fabricación de células fotovoltaicas, dependiendo de las características a destacar (espesor, eficiencia, coste, etc.). Una clasificación habitual se basa en los elementos semiconductores y su espesor (Hegedus y Luque, 2003), según el mencionado criterio se clasificarán de la forma siguiente:

- **A1: Tecnología de silicio cristalino (mono-cristalino y poli-cristalino):** el material base de las células de silicio es el silicato el cual, a través de procesos de reducción, refinado, destilación fraccionada, fundición, cristalización y laminación permite obtener obleas de silicio mono-cristalino y poli-cristalino.
- **A2: Tecnología de capa delgada inorgánica (silicio amorfo):** utiliza películas delgadas de silicio amorfo (alrededor de 1-3 μm) y la adición de hidrógeno intercalado con el fin de evitar las pérdidas asociadas al efecto Stabler-Wroski.
- **A3: Tecnología con capa delgada inorgánica (CdTe y CIGS):** También presenta reducido espesor ($\sim\mu\text{m}$). Las células de telurio de cadmio están compuestas por una capa de telurio de cadmio (tipo p) unida a una capa delgada de sulfuro de cadmio (tipo n) y, finalmente una capa de óxido transparente conductor (generalmente SiO_2). Las células $\text{Cu}(\text{InGa})\text{Se}_2$ (CIGS) están compuestas por una capa delgada de sulfuro de cadmio (o ZnS), capa doble de aluminio y una capa de óxido transparente semiconductor.
- **A4: Tecnología de capa delgada avanzada III-V con sistemas de seguimiento con concentración solar:** basada en las aleaciones de los elementos pertenecientes a los grupos III-V (las aleaciones más usuales utilizan Al, As, Ga, In y P), el coste de estas células es muy elevado no obstante presentan muy altas eficiencias, especialmente cuando utilizan la tecnología tándem y los sistemas de seguimiento con concentración solar, de esta forma su coste si resulta competitivo.
- **A5: Tecnología de capa delgada avanzada de bajo coste (células híbridas y orgánicas):** se distinguen dos clases, tecnología híbrida basada en una cadena inorgánica de TiO_2 sintetizado con colorantes orgánicos y embebidos en un electrolito; o las células orgánicas completas basadas en capas poliméricas de forma que permitan reducir los costes en los procesos de fabricación

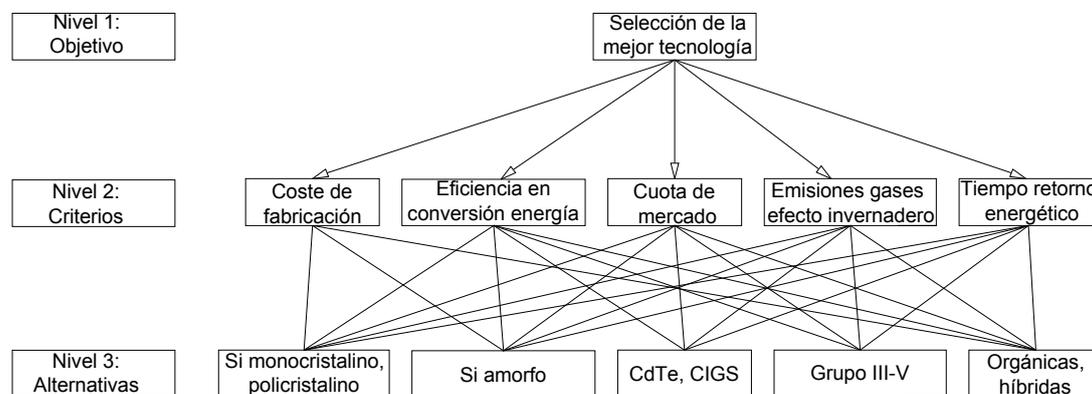
Una vez analizadas las tecnologías identificadas como alternativas a estudio, se definirán los criterios que influyen en mayor medida en los procesos de fabricación. Los criterios considerados para la evaluación del problema de decisión serán los siguientes:

- **C1: Coste de fabricación:** constituirá un criterio a minimizar, será caracterizado de forma cuantitativa mediante el siguiente término: euros por vatio pico generado en cada célula (€/Wp)

- **C2: Eficiencia en conversión de energía:** constituirá un criterio a maximizar; será caracterizado en términos cuantitativos de tanto por ciento (%)
- **C3: Cuota de mercado:** constituirá un criterio a maximizar; será caracterizado en términos cualitativos con etiquetas lingüísticas de valoración mediante intervalos.
- **C4: Emisiones de gases de efecto invernadero** (generados en la fabricación): constituirá un criterio a minimizar, de igual modo será caracterizado en términos cualitativos a través de etiquetas lingüísticas mediante intervalos.
- **C5: Tiempo de retorno energético:** se define como el tiempo que el sistema necesitaría en generar la energía consumida en la fabricación, constituirá un criterio a minimizar y será igualmente caracterizado en términos cualitativos a través de etiquetas lingüísticas de valoración mediante intervalos.

El problema a estudio presenta una estructura jerárquica con tres niveles (Fig.1)

Fig. 1: Estructura jerárquica del problema



En este caso, el método AHP se utilizará para conocer la importancia que el decisor asigna a cada criterio. Vamos a trabajar con la información proveniente de tres expertos, un físico experto en tecnologías de fabricación fotovoltaicas E1 y dos doctorandos especializados en sistemas y tecnologías fotovoltaicas E2 y E3.

Una vez seleccionados los criterios y obtenido el peso de los mismos, se necesitará conocer el efecto que produce cada criterio en cada alternativa.

El método TOPSIS se utilizará para seleccionar el orden de preferencias de las alternativas. Por medio de etiquetas lingüísticas y valores numéricos, los decisores representan la calidad de las alternativas respecto a los criterios C1, C2, C3, C4 y C5. Los criterios C1 Costes de fabricación y C2 eficiencia en la conversión energética, son criterios cuantitativos de los que se dispone información aproximada de los mismos en rango de intervalos en €/Wp y % respectivamente. Mientras que los criterios C3, C4 y C5 han sido evaluados mediante etiquetas lingüísticas por los tres expertos anteriormente mencionados. Estas valoraciones lingüísticas se han realizado con distinto tipo de etiquetas en función del tipo de criterio. Así los criterios C3 Cuota de mercado y C4 emisiones de gases de efecto invernadero se han valorado con etiquetas tipo (alto/bajo). Mientras que el criterio C5 tiempo de retorno energético ha sido valorada con etiquetas de tipo (corto/largo).

Los diferentes valores de r se representan mediante una matriz denominada Matriz de decisión (Fig.2). Con el fin de analizar la información, se usará el método TOPSIS con

intervalos para asignar la valoración de alternativas empleando las variables lingüísticas mostradas en la tabla 3.

Tabla 3: Etiquetas lingüísticas para valoración de alternativas

Etiquetas lingüísticas tipo	
Descripción	Intervalos
Muy bajo MB/ Muy corto MC	[0,1]
Bajo B/ Corto C	[0,3]
Medio bajo mB / Medio corto mC	[1,5]
Mediano m/ Mediano m	[3,7]
Medio alto mA/ Medio largo mL	[5,9]
Alto A/ Largo L	[7,10]
Muy alto MA/ Muy largo ML	[9,10]

Fig. 2: Matriz de decisión

	$C_1 (\text{€}/W_p)$	$C_2 (\%)$		C_3	C_4	C_5
A_1	0.68 ÷ 2.20	18 ÷ 24	Experto1	MA	m	m
			Experto2	MA	mA	m
			Experto3	MA	A	mC
A_2	0.40 ÷ 0.95	8 ÷ 15	Experto1	B	m	mC
			Experto2	mB	B	mC
			Experto3	mB	mB	MC
A_3	0.60 ÷ 1.20	8 ÷ 15	Experto1	B	m	mC
			Experto2	mB	mB	C
			Experto3	mB	B	MC
A_4	0.20 ÷ 0.70	25 ÷ 40	Experto1	B	A	C
			Experto2	B	mA	m
			Experto3	MB	mA	mC
A_5	0.40 ÷ 0.80	6 ÷ 12	Experto1	B	B	C
			Experto2	MB	m	mL
			Experto3	MB	B	MC

3.2. Resultados y discusión.

Usando la escala de valoración indicada en la tabla 1 en el proceso de comparación entre pares y aplicando el método AHP junto con la media geométrica normalizada, se obtendrán los resultados mostrados en la tabla 4.

Donde se aprecian variaciones entre los expertos, aunque a priori parece que los tres expertos consideran el criterio C2 como el más importante, el peso que se le asigna a este varía de unos expertos a otros, mientras que los dos primeros expertos le asignan a dicho criterio un rango de peso entre el 55-65% del peso total de los criterios, el experto E3 le otorga menor peso (38-40% aprox.). Existiendo en el resto de criterios mayores discrepancias entre los expertos.

Tabla 4: Valoración de los pesos de los criterios

Construcción de la matriz de decisión			
	Experto 1	Experto 2	Experto 3
C1	[0.0930, 0.1593]	[0.0952, 0.1622]	[0.3810, 0.4091]
C2	[0.5581, 0.6372]	[0.5714, 0.6486]	[0.3810, 0.4091]
C3	[0.0620, 0.0796]	[0.0714, 0.1081]	[0.0423, 0.0511]
C4	[0.0930, 0.1593]	[0.0714, 0.1081]	[0.0635, 0.1023]
C5	[0.0698, 0.1062]	[0.0714, 0.1081]	[0.0635, 0.1023]

Por tanto, aplicando la ecuación de la distancia para intervalos, los resultados obtenidos a través de la valoración con el Método TOPSIS son los que se observan en la tabla 5.

Tabla 5: Resultados para los tres expertos

	Experto 1	Experto 2	Experto 3
d+A1	0.2914	0.2871	0.4793
d+A2	0.3727	0.3731	0.2474
d+A3	0.3755	0.3758	0.2733
d+A4	0.1099	0.1036	0.2198
d+A5	0.4080	0.4282	0.2669
d-A1	0.2282	0.2332	0.2954
d-A2	0.0658	0.0994	0.2213
d-A3	0.0603	0.0994	0.2137
d-A4	0.4100	0.4162	0.2958
d-A5	0.1132	0.0472	0.2413
RA1	0.4391	0.4483	0.3813
RA2	0.1501	0.2104	0.4721
RA3	0.1384	0.2092	0.4388
RA4	0.7887	0.8006	0.5737
RA5	0.2172	0.0994	0.4749

En general parece que para los tres expertos la mejor opción es la alternativa A4, tanto para d+, siendo el mínimo de los posibles como para d- siendo el máximo de los posibles y para R siendo igualmente el máximo. En el resto de alternativas existe discrepancia entre los expertos, aunque se puede observar que el experto E1 y E2 tienen un criterio bastante semejante, habiendo mayor discrepancia para el experto E3.

4. Conclusiones

La desventaja más común de los métodos multicriterio existentes, por lo menos para algunas clases de problemas, es la necesidad de traducir el conocimiento de los expertos sobre un problema de decisión en números y funciones. Existen problemas de decisión donde los juicios cualitativos prevalecen sobre las evaluaciones cuantitativas más o menos exactas. Para estos problemas, una manera natural es utilizar modelos que incorporan variables cualitativas.

En este artículo, hemos estudiado la decisión multicriterio para la búsqueda de la mejor tecnología de fabricación de módulos fotovoltaicos. De manera que, a partir de la extracción

del conocimiento de los expertos hemos desarrollado el estudio mediante datos cuantitativos aproximados y variables lingüísticas, que en este caso hemos modelizado mediante intervalos.

Es posible ver como la mejor alternativa en todos los casos y para los tres expertos es la "Tecnología de capa delgada avanzada III-V con sistemas de seguimiento con concentración solar" A4.

Asimismo se han detectado discrepancias entre los expertos para el resto de las alternativas. Como trabajo futuro sería interesante plantear el problema como una decisión en grupo. Igualmente podría ser interesante analizar el problema de la decisión en grupo tanto desde un punto de vista homogéneo como desde un punto de vista heterogéneo ya que parecería lógico que el experto E1 tuviera mayor ponderación.

Agradecimientos

Este artículo se ha elaborado bajo los proyectos, TIN2008 - 06872 - C04-04, que están financiados por la DGICYT, así como por el de referencia (P07-TIC02970) de la Junta de Andalucía

Referencias

- European Photovoltaic Industry Association (EPIA), 2009. *SET For 2020 Report*.
- García-Cascales, M.S., & Lamata, M.T. (2007). Solving a decision problem with linguistic information. *Pattern Recognition Letters* vol 28, n.16 2284-2294.
- García-Cascales, M.S., & Lamata, M.T. (2009). Multi-criteria analysis for a maintenance management problem in an engine factory: rational choice. *In press Journal of Intelligent Manufacturing*.
- Green, M.A., (2002). Third generation photovoltaics: solar cells for 2020 and beyond. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*. 14(1-2): p. 65-70.
- Hegedus, E. & Luque, A. (2003). *Handbook of photovoltaic science and engineering*, Ed. Wiley.
- Hwang, C.L. & Yoon, K. (1981). *Multiple Attribute Decision Methods and Applications*., Berlin, Ed. Springer
- European Photovoltaic Technology Platform, 2007. *Strategic Research Agenda (SRA) for Photovoltaic Solar Energy Technology*.
- Saaty T.L.(1980). *The Analytic Hierarchy Process*. Ed. McGraw Hill.
- Wang T.C. & Chang T.H. (2007). Application of TOPSIS in evaluating initial training aircraft under a fuzzy environment. *Expert Systems with Applications*. 33; (4), 870-880.

Correspondencia (Para más información contacte con):

M^a del Socorro García-Cascales
Dpto Electrónica, Tecnología de Computadoras y Proyectos
Universidad Politécnica de Cartagena
C/Dr Fleming s/n 30201 Cartagena (Murcia)
Teléfono +34 968 326574
FAX +34 924 32 65 00
E-mail: socorro.garcia@upct.es