

## **Comparación de técnicas de ponderación de criterios en metodologías de toma de decisiones multicriterio aplicadas a la jerarquización de tecnologías renovables.**

César A. Yajure Ramírez

Universidad Central de Venezuela. Escuela Básica de Ingeniería.  
e-mail: cyajure@gmail.com

**Resumen.** En la presente investigación se realiza una comparación de diferentes técnicas para la determinación de la importancia relativa de criterios de decisión, a ser utilizados en la jerarquización de tecnologías de energías renovables para la producción de electricidad, por medio de métodos de toma de decisiones multicriterio. Para la ponderación de los criterios se consideran la técnica de comparaciones pareadas de Saaty, la comparación pareada con números difusos, la ponderación igualitaria de los criterios, y la ponderación por jerarquización. Las tecnologías consideradas fueron: Térmica solar, Térmica fotovoltaica, Geotérmica, Biomasa, Eólica, e Hidráulica; mientras que los criterios de decisión utilizados fueron: eficiencia en porcentaje, costo de instalación en dólares por kilovatio, costo de la electricidad en centavos de dólar por kilovatio-hora, emisiones de CO<sub>2</sub> en kilogramos por kilovatio-hora, vida útil en años, y área utilizada en kilómetros cuadrados por kilovatio. Como método de soporte a la toma de decisión, se trabajó con TOPSIS, y la metodología propuesta se aplica a un caso de estudio ya tratado en anteriores investigaciones por diversos autores.

*Palabras Clave:* Ponderación de criterios, TOPSIS, conjuntos difusos, energía renovable, energía eléctrica.

**Abstract.** In this research a comparison of different techniques for determining the relative importance of decision criteria to be used in the ranking of renewable energy technologies for electricity production, by methods of multi-criteria decision-making, is presented. For the weighting of the criteria were considered the technique of paired comparisons of Saaty, the paired comparison with fuzzy numbers, the equal weighting of the criteria, weighting by ranking. The technologies considered were: Solar Thermal, Solar photovoltaic, Geothermal, Biomass, Wind, and Hydraulics; while the decision criteria used were: efficiency in percentage, installation cost in dollars per kilowatt, electricity cost in cents per kilowatt hour, CO<sub>2</sub> emissions in kilograms per kilowatt-hour, life in years, and used area in square kilometers per kilowatt. As a method of supporting decision making, we worked with TOPSIS, and the proposed methodology is applied to a case study already discussed in previous research by various authors.

*Keywords:* Criteria Weighting, TOPSIS, fuzzy sets, renewable energy, electrical energy.

## 1. Introducción

En las últimas décadas las energías renovables han tomado un impulso considerable en la producción de energía eléctrica, principalmente porque sus fuentes primarias son muchos menos contaminantes que las fuentes de las energías primarias convencionales, tales como las fuentes de energías fósiles. Spiegel y McArthur en [14], plantean que para el año 2012 la capacidad instalada de sistemas renovables para la producción de energía eléctrica representó el 26,9% del total mundial. De esos sistemas renovables, el 18,1% del total mundial está asociado sólo a hidroelectricidad. Por otra parte, entre los años 2000 y 2012 el incremento porcentual de la capacidad instalada de sistemas renovables fue del 50%, destacándose incrementos continuos en energía eólica, biomasa y solar fotovoltaica, y decrecimiento en hidroelectricidad.

Existe una variedad de energías renovables, cuyas tecnologías tienen un nivel de costos determinado, una eficiencia específica, o un impacto al ambiente, entre otros atributos. Por tal razón, cada país debe seleccionar adecuadamente la o las energías renovables que incorporará a su planificación energética, por medio de una metodología que incorpore los atributos de interés.

Las metodologías de toma de decisiones multicriterio han resultado herramientas adecuadas para la jerarquización de tecnologías de energías renovables a ser utilizadas en la producción de electricidad. Por ejemplo, en [8] se presenta una metodología integrada multicriterio para la planificación de energías renovables, utilizando las técnicas AHP y VIKOR, en [17] se hace una revisión de los métodos de soporte a la decisión multicriterio para las energías renovables en islas, y en [18] se presenta una metodología integrada multicriterio para jerarquizar tecnologías de energías renovables a utilizar en la producción de electricidad.

Uno de los pasos más importantes en las metodologías de toma de decisiones multicriterio, es la determinación de la importancia relativa de los criterios de decisión, puesto que usualmente reflejan los intereses del tomador de decisión, y por consiguiente presentan cierto nivel de subjetividad. En ese sentido, Roszkowska en [12], desarrolla una comparación de las técnicas de ponderación por jerarquización, utilizando AHP como herramienta de soporte a la decisión. Esta autora considera que obtener los pesos a partir de fórmulas matemáticas es más confiable que asignar los pesos directamente. Por otra parte, en [9] se plantea que los pesos de los criterios son las entradas subjetivas que se requieren de los tomadores de decisión, y por lo tanto presenta en su estudio una comparación de distintas técnicas de ponderación de criterios de decisión cuando se utiliza TOPSIS como herramienta de soporte. Este autor considera que la herramienta TOPSIS es la que menos información requiere del tomador de decisión, y por lo tanto los aspectos subjetivos presentes en el procedimiento son mínimos. En ese mismo orden de ideas, a continuación se realiza una comparación de técnicas de ponderación de criterios, la cual incluye, a diferencia de los estudios mencionados anteriormente, las comparaciones pareadas difusas, utilizada para minimizar la subjetividad presente en la determinación de la importancia relativa de los criterios.

La presente investigación se dividió en 5 secciones. En la sección II se presentan los conceptos básicos necesarios para comprender el estudio desarrollado, en la sección III se presenta el estudio comparativo de las técnicas de ponderación de criterios, luego en la sección IV se presentan las conclusiones, para finalmente presentar las referencias bibliográficas utilizadas a lo largo de la investigación.

## 2. Conceptos básicos

### *Toma de Decisiones Multicriterio*

De acuerdo con [3], el análisis multicriterio es un enfoque que permite determinar las preferencias del decisor entre un conjunto de opciones o alternativas. Mientras que el análisis de decisión multicriterio es tanto un enfoque como un conjunto de técnicas, cuya meta es proporcionar un orden global a un grupo de opciones, desde la opción más preferida hasta la opción menos preferida. Las opciones podrían diferir en cuanto al nivel de alcance de los objetivos, y ninguna opción es obviamente la mejor en el alcance de todos los objetivos.

Por otra parte, Harris [6] plantea que tomar decisiones es el estudio de identificar y seleccionar alternativas basados en los valores y preferencias del tomador de decisiones. Se parte de la existencia de varias alternativas, de las cuales se quiere seleccionar la preferida, en el sentido de que sea la que mejor satisfaga nuestros intereses.

Debido a que en la práctica surgen situaciones de decisión que por lo general involucran problemas de toma de decisiones multicriterio, se han desarrollado métodos de toma de decisiones multicriterio (MCDM), entre los cuales se tiene TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution). De acuerdo con Olson [9], TOPSIS es un método multicriterio para identificar soluciones a partir de un conjunto de alternativas basada en la minimización simultánea de la distancia a un punto ideal, y la maximización de la distancia al punto anti ideal.

Opricovic [10] plantea que esta técnica fue desarrollada por Hwang y Yoon en 1981 como una alternativa al método ELECTRE. Fue luego presentada por Chen y Hwang haciendo referencia al trabajo de 1981. La regla de decisión de este método es que la alternativa seleccionada debería tener la distancia más corta hasta la solución ideal y la distancia más grande hasta la solución negativa-ideal, en un sentido geométrico.

El método supone que cada atributo tiene la tendencia de incrementar o decrementar de manera monótona una función de valor o de utilidad. Para evaluar la cercanía de cada alternativa al valor ideal se utiliza el enfoque que considera la distancia euclidiana como indicador.

Estos autores indican que el método consta de los siguientes pasos:

- Calcular la matriz de decisión normalizada.
- Calcular la matriz de decisión normalizada ponderada.
- Calcular las soluciones ideal e ideal-negativa.
- Calcular las medidas de separación.
- Calcular la cercanía relativa a la solución ideal.
- Jerarquizar por orden de preferencia.

Para el segundo paso del método, es necesario haber definido los pesos de importancia relativa de cada uno de los criterios de decisión, los cuales podrían ser la única fuente de subjetividad de TOPSIS, por tal razón esta investigación se centra en las técnicas de ponderación de criterios.

### ***Ponderación de Criterios***

La ponderación de criterios de decisión consiste en establecer la importancia relativa de dichos criterios, asignándole un valor entre “0” y “1”, por medio de algún procedimiento determinado. Mientras más cercano a “1” sea el peso de un criterio, más importante es este con respecto al resto de los criterios, y mientras más cercano se encuentre a “0”, menos importante será el criterio bajo estudio. Los procedimientos para la ponderación son las llamadas técnicas de ponderación de criterios, entre las que destacan las comparaciones pareadas propuesta por Saaty, las comparaciones pareadas difusas, la ponderación por jerarquización, entre otras.

- ***Comparaciones pareadas***

Thomas Saaty [13] propuso su metodología para la ponderación de criterios utilizando matrices de comparaciones pareadas, la cual se basa en la escala numérica que se presenta en la tabla 1. Utilizando dicha tabla, se comparan los criterios por pares, asignándole una intensidad de importancia a uno de ellos con respecto al otro. Este paso se repite para todas las combinaciones de criterios, para así crear la matriz de comparaciones pareadas.

Una vez obtenida la matriz de comparaciones pareadas, se procede a obtener los pesos de importancia relativa de cada uno de los criterios utilizando la técnica de los autovectores. Seguidamente, se determina la consistencia de los resultados obtenidos, por medio de un procedimiento propuesto por Saaty, y planteado por los autores en [15].

**Tabla 1.** Escala numérica para comparaciones pareadas.

Intensidad de Importancia	Definición
1	Igual Importancia
3	Importancia moderada
5	Fuerte Importancia
7	Muy fuerte o importancia demostrada
9	Importancia extrema
2,4,6,8	
Valores Recíprocos	Si la actividad $i$ tiene uno de los números diferente de cero ya nombrados, cuando se compara con la actividad $j$ , entonces la actividad $j$ tiene el valor recíproco correspondiente cuando se compara con la actividad $i$ .

- *Comparaciones pareadas difusas*

Esta variante consiste en incorporar los números difusos o triangulares a la técnica de comparaciones pareadas tradicional. Específicamente, se utilizan los números difusos para indicar la importancia relativa que un factor de jerarquía tiene sobre otro, y así construir las matrices de comparaciones con números triangulares.

Para la determinación de las matrices de comparaciones pareadas existen varias propuestas. En esta investigación se utiliza la planteada por Kabir y Hasin en [7], en la cual proponen variables lingüísticas para los pesos de importancia de cada criterio. En la tabla 2 se muestra esta información.

**Tabla 2.** Escala para comparaciones pareadas difusas.

Escala lingüística para la importancia	Número Difuso	Función de Membresía	Dominio	Escala difusa triangular ( $l, m, n$ )
Exactamente Igual	$\tilde{1}$			(1,1,1)
Igual Importancia		$\mu_M(x) = (3 - x)/(3 - 1)$	$1 \leq x \leq 3$	(1,1,3)
Moderadamente importante	$\tilde{3}$	$\mu_M(x) = (x - 1)/(3 - 1)$	$1 \leq x \leq 3$	(1,3,5)
		$\mu_M(x) = (5 - x)/(5 - 3)$	$3 \leq x \leq 5$	
Fuerte Importancia	$\tilde{5}$	$\mu_M(x) = (x - 3)/(5 - 3)$	$3 \leq x \leq 5$	(3,5,7)
		$\mu_M(x) = (7 - x)/(7 - 5)$	$5 \leq x \leq 7$	
Muy fuerte importancia	$\tilde{7}$	$\mu_M(x) = (x - 5)/(7 - 5)$	$5 \leq x \leq 7$	(5,7,9)
		$\mu_M(x) = (9 - x)/(9 - 7)$	$7 \leq x \leq 9$	
Extremadamente preferido	$\tilde{9}$	$\mu_M(x) = (x - 7)/(9 - 7)$	$7 \leq x \leq 9$	(7,9,9)
Si la actividad $i$ tiene uno de los números diferente de cero ya nombrados, cuando se compara con la actividad $j$ , entonces la actividad $j$ tiene el valor recíproco cuando se compara con la actividad $i$ .			Valores Recíprocos $\tilde{M}_1^{-1} = (1/n_1, 1/m_1, 1/l_1)$	

- *Ponderación por Jerarquización*

Consiste de un conjunto de métodos que convierten una jerarquía ordinal de un conjunto determinado de criterios, en pesos numéricos. Es decir, parten de un ordenamiento jerárquico de los criterios para determinar su importancia relativa, y por lo general este ordenamiento jerárquico es establecido por el tomador de decisión.

Entre los métodos de ponderación por jerarquización se tienen: suma de rangos, ponderación recíproca, y ponderación de centroide. En las expresiones matemáticas de éstos métodos se cumple que  $n$  es el número de criterios, y  $r_j$  la posición del  $j$ -ésimo criterio en la jerarquía correspondiente.

En la ponderación de suma de rangos los pesos son los rangos individuales, normalizados al dividir por la suma de los rangos. La expresión matemática correspondiente se presenta en la ecuación (1).

$$w_j(RS) = \frac{n - r_j + 1}{\sum_{k=1}^n n - r_k + 1} = \frac{2 \cdot (n + 1 - r_j)}{n \cdot (n + 1)} \quad (1)$$

Por otra parte, en la ponderación recíproca se utiliza el recíproco de los rangos, los cuales son normalizados al dividir cada término por la suma de los recíprocos. La expresión matemática se presenta en la ecuación (2).

$$w_j(RR) = \frac{1/r_j}{\sum_{k=1}^n (1/r_k)} \quad (2)$$

Por último, en la ponderación de centroide se produce un estimado de los pesos de ponderación que minimiza el error máximo de cada peso, identificando el centroide de todos los posibles pesos. La expresión matemática se presenta en la ecuación (3).

$$w_j(ROC) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{k=j}^n \frac{1}{r_k} \quad (3)$$

- *Ponderación Igualitaria*

Consiste simplemente en asignar igual peso a cada uno de los criterios. Si se tienen  $n$  criterios, la expresión matemática se presenta en la ecuación (4).

$$w_j(EW) = \frac{1}{n} \quad (4)$$

### ***Tecnologías de Energías Renovables***

Las energías renovables son aquellas que utilizan fuentes primarias de energía que están presentes en la naturaleza, y que son repuestas de manera continua, y en períodos de tiempo relativamente cortos en comparación con las llamadas fuentes no renovables. Ejemplos de fuentes de energías renovables son el sol, el aire, el agua, el calor de la tierra, las plantas, entre otras.

- ***Tecnología Eólica***

En general, un sistema eólico convierte la energía cinética del viento en energía eléctrica, a través de un generador acoplado al rotor de una turbina.

En este sistema, las aspas del rotor reciben la fuerza del viento (energía cinética), la cual se convierte en energía rotacional, y seguidamente en torque mecánico (fuerza de accionamiento o energía mecánica). Ese torque mecánico se utiliza para accionar un generador, para la producción de energía eléctrica. Este tipo de sistema puede ser de dos tipos: costa adentro (on-shore), en la que las turbinas eólicas se ubican en tierra firme, mientras que en la tecnología costa afuera (off-shore) las torres se ubican dentro del océano.

- ***Tecnología Solar***

Las tecnologías solares apuntan a aprovechar la potencia infinita del sol, para producir calor, luz y energía eléctrica. Desde el punto de vista de la generación de electricidad se tienen dos opciones, la solar fotovoltaica, y la solar térmica.

La *tecnología solar fotovoltaica* convierte directamente la radiación solar en electricidad. Consisten básicamente de tres componentes principales: módulos, inversores y baterías. Los módulos convierten la radiación solar en electricidad, poseen paneles fotovoltaicos, en los cuales la radiación solar excita los electrones de un dispositivo semiconductor generando una pequeña diferencia de potencial. Al conectar en serie estos dispositivos se obtienen diferencias de potencial mayores.

Los inversores se utilizan para convertir la señal en corriente continua generada en una señal de corriente alterna, y las baterías se utilizan para almacenar el exceso de electricidad producida en un período determinado. El resto del sistema incluye elementos tales como: cableado, interruptores, estructuras de soporte, entre otras.

Con respecto a la *tecnología solar térmica*, estos sistemas convierten el calor del sol en electricidad. Se conocen usualmente como tecnologías de potencia solar concentrada (Concentrating Solar Power, CSP). Utilizan espejos para concentrar la radiación solar en un componente llamado receptor. El calor se utiliza entonces para producir vapor, que a su vez acciona un sistema turbina-generador convencional.

En la actualidad existen cinco tipos de tecnologías solar térmica, dependiendo de la manera en que se captura la radiación solar: torres de potencia, parabólico, cilindro cerrado, reflectores Fresnel, y disco Stirling.

- *Tecnología Hidráulica*

Consiste en la extracción de energía a partir de grandes caídas de agua, cuando se pasa dicho fluido a través de un dispositivo de conversión de energía.

El agua almacenada detrás de la represa contiene energía potencial, la cual se convierte en energía cinética cuando esta agua pasa a través de un conducto forzado. La energía cinética del agua se convierte en energía mecánica a medida que el agua hace rotar una turbina. Esta última está conectada mecánicamente a un generador, el cual convierte la energía mecánica en energía eléctrica.

Por otra parte, una manera adicional de generar hidroelectricidad sería extrayendo la energía a partir de las corrientes de un río, ubicando en este último una turbina de corriente de agua o turbina de “cabezal cero”.

- *Tecnología Biomasa*

La biomasa es aquella materia orgánica de origen animal o vegetal, que eventualmente pudiera ser aprovechada energéticamente. No se incluye en esta definición los combustibles fósiles y las materias orgánicas derivadas de éstos ya que, aunque aquellos tuvieron un origen biológico, su formación tuvo lugar en tiempos remotos. La biomasa es una energía renovable de origen solar a través de la fotosíntesis de los vegetales.

Según los autores en [4], la biomasa se puede quemar directamente como un combustible sólido o ser convertida a líquidos o gas, lo cual es llamado biofuels. Entonces, las tecnologías incluyen las que queman directamente la biomasa en un horno para producir vapor que se utilizaría en un sistema turbina-generador (STG), y aquellas que convierten biomasa sólida en un gas intermedio o en un líquido que posteriormente es utilizado en un sistema de accionamiento para producir electricidad.

- *Tecnología Geotérmica*



La energía geotérmica es la energía disponible en forma de calor dentro de la tierra, usualmente en la forma de agua caliente o vapor. De acuerdo con [16], el núcleo de la tierra puede alcanzar los 9.000 °F, este calor fluye fuera del núcleo, calentando el área circundante, lo cual puede crear reservorios subterráneos de agua caliente y vapor.

De acuerdo con [4], hay tres métodos para producir energía eléctrica a partir de la energía geotérmica. El primero de éstos llamado vapor seco, consiste en utilizar directamente el vapor geotérmico, de 150 °C o más, para accionar las turbinas. El método de vapor flash, en el cual el vapor de alta presión es empujado a un separador de baja presión donde crea un poderoso vapor flash, se requieren temperaturas geotérmicas naturales de 180 °C o superiores. El tercer método, llamado ciclo binario, consiste en utilizar el calor del agua a bajas temperaturas, de alrededor de 57 °C, para generar vapor en un fluido secundario con un punto de ebullición bajo.

### **3. Estudio comparativo de técnicas de ponderación**

#### ***Metodología Planteada***

La metodología propuesta consiste en evaluar distintas técnicas de ponderación de criterios, obteniendo una jerarquización de estos últimos por cada una de las técnicas consideradas. Las técnicas utilizadas fueron: comparaciones pareadas, comparaciones pareadas difusas, ponderación igualitaria, y ponderación por jerarquización.

Posteriormente, se utilizan cada una de las jerarquizaciones obtenidas para, a su vez, jerarquizar distintas tecnologías de energías renovables a usar en la producción de electricidad. Para ello se trabaja con la técnica TOPSIS como herramienta de soporte a la decisión.

Las alternativas tomadas en cuenta en la presente investigación son: Tecnología Eólica, Tecnología Solar Térmica, Tecnología Solar fotovoltaica, Tecnología Hidráulica, Tecnología Biomasa, y Tecnología Geotérmica. Mientras que los criterios utilizados para evaluar las distintas alternativas abarcan el área ambiental, el área técnica y el área económica. Estos criterios son: eficiencia en %, factor de capacidad en %, costo de instalación en US\$/kW, costo de la electricidad en c\$/kWh, emisiones de CO<sub>2</sub> en Kg/kWh, vida útil en años, y área utilizada en km<sup>2</sup>/kW.

#### ***Caso de Estudio***

Los datos de desempeño de cada una de las tecnologías fueron tomados de distintas investigaciones realizadas previamente. Por ejemplo, Ghaderi y otros, en [5] utilizan una metodología multicriterio que incluye el uso de AHP para seleccionar la mejor

tecnología renovable que pudiera coadyuvar en la disminución del uso de energías fósiles, y Ajayi y Olamide [2] utilizaron la técnica AHP para seleccionar la mejor planta de potencia en cada una de las seis zonas geopolíticas de Nigeria. De igual manera, Agfan y Carvalho [1] realizan una evaluación multicriterio de nuevas plantas de generación con energías renovables, calculando un indicador de sostenibilidad para cada alternativa, el cual permite jerarquizarla para su posterior selección. Asimismo, Ribeiro y otros [11] diseñan una herramienta de análisis de decisión multicriterio para apoyar la evaluación de diferentes escenarios de producción de electricidad, los cuales incluyen tanto energías fósiles como energías renovables. Finalmente, el autor en [18] presenta una metodología integrada multicriterio para la jerarquización de tecnologías de energías renovables para la producción de energía eléctrica.

En ese sentido, en la tabla 3 se presentan los valores de los atributos considerados para evaluar cada una de las alternativas bajo estudio.

**Tabla 3.** Desempeño de las alternativas.

Tecnología	Solar Térmica	Solar Fotovoltaica	Geotérmica	Biomasa	Eólica	Hidro
Eficiencia (%)	15	10	36	25	28	80
Factor de Capacidad (%)	30	30	90	90	30	90
Vida Útil (Años)	25	25	30	25	25	50
Costos de Instalación (US\$/kW)	3500	4500	2500	2500	1100	2000
Costos de Generación (c\$/kWh)	17	75	8	14	7	8
Emisiones CO <sub>2</sub> (kg/kWh)	0,1	0,1	0,06	1,18	0,02	0,04
Área Utilizada (km <sup>2</sup> /kW)	0,08	0,12	0,03	1,18	0,79	0,13

#### *Determinación de los pesos de importancia de los criterios*

- *Comparaciones Pareadas (CP)*

Para obtener la matriz de comparaciones pareadas se consultó con especialistas en el área acerca de la importancia de los criterios considerados en la selección de tecnologías de energías renovables para la producción de electricidad. Los resultados se muestran en la tabla 4, en donde: Eficiencia=EF, Factor de Capacidad=FC, Vida Útil=VU, Costos de Instalación= CI, Costos de Generación=CG, Emisiones de CO<sub>2</sub>=EM, Área Utilizada=AU.

**Tabla 4.** Matriz de comparaciones pareadas.

Criterios	EF	FC	VU	CI	CG	EM	AU
<b>EF</b>	1	1/3	3	3	3	3	3
<b>FC</b>	3	1	3	5	5	5	3
<b>VU</b>	1/3	1/3	1	3	3	3	1/3
<b>CI</b>	1/3	1/5	1/3	1	1	3	1/3
<b>CG</b>	1/3	1/5	1/3	1	1	3	1/3
<b>EM</b>	1/3	1/5	1/3	1/3	1/3	1	1/3
<b>AU</b>	1/3	1/3	3	3	3	3	1

A partir de la matriz presentada en la tabla 4 y aplicando la técnica de los autovectores, se obtienen los pesos de importancia relativa de los criterios, con una razón de consistencia de 7,46%. Los resultados se muestran en la tabla 5.

**Tabla 5.** Pesos de importancia por comparaciones pareadas.

Criterios	EF	FC	VU	CI	CG	EM	AU
<b>Pesos</b>	0,2159	0,3474	0,1127	0,0634	0,0634	0,0414	0,1560

- *Comparaciones Pareadas Difusas (CPD)*

En este caso se incorporan los números difusos. La matriz de comparaciones pareadas se presenta en la tabla 7.

**Tabla 7.** Matriz de comparaciones pareadas difusa.

Criterios	EF	FC	VU	CI	CG	EM	AU
<b>EF</b>	1,1,1	1/5,1/3,1/1	1,3,5	1,3,5	1,3,5	1,3,5	1,3,5
<b>FC</b>	1,3,5	1,1,1	1,3,5	3,5,7	3,5,7	3,5,7	1,3,5
<b>VU</b>	1/5,1/3,1/1	1/5,1/3,1/1	1,1,1	1,3,5	1,3,5	1,3,5	1/5,1/3,1/1
<b>CI</b>	1/5,1/3,1/1	1/7,1/5,1/3	1/5,1/3,1/1	1,1,1	1,1,3	1,3,5	1/5,1/3,1/1
<b>CG</b>	1/5,1/3,1/1	1/7,1/5,1/3	1/5,1/3,1/1	1,1,3	1,1,1	1,3,5	1/5,1/3,1/1
<b>EM</b>	1/5,1/3,1/1	1/7,1/5,1/3	1/5,1/3,1/1	1/5,1/3,1/1	1/5,1/3,1/1	1,1,1	1/5,1/3,1/1
<b>AU</b>	1/5,1/3,1/1	1/5,1/3,1/1	1,3,5	1,3,5	1,3,5	1,3,5	1,1,1

Con la información presente en la tabla 7, se aplica el procedimiento para obtener los pesos de importancia relativa difusos, los cuales se muestran en la tabla 8.

**Tabla 8.** Pesos de importancia relativa difusos.

Crterios	EF	FC	VU	CI	CG	EM	AU
<b>Pesos</b>	0,2020	0,3107	0,1232	0,0774	0,0774	0,0516	0,1577

- *Ponderación por Jerarquización*

Para este caso se utilizaron las ecuaciones (1), (2), y (3), y las posiciones de los criterios obtenidas en las técnicas de comparaciones pareadas. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 9.

**Tabla 9.** Pesos de importancia por ponderación de jerarquización.

Posición	Criterio	ROC	RR	RS
<b>1</b>	<b>FC</b>	0,3704	0,3857	0,2500
<b>2</b>	<b>EF</b>	0,2276	0,1928	0,2143
<b>3</b>	<b>AU</b>	0,1561	0,1286	0,1786
<b>4</b>	<b>VU</b>	0,1085	0,0964	0,1429
<b>5</b>	<b>CI</b>	0,0728	0,0771	0,1071
<b>6</b>	<b>CG</b>	0,0442	0,0643	0,0714
<b>7</b>	<b>EM</b>	0,0204	0,0551	0,0357

Finalmente, en la tabla 10 se presentan los resultados obtenidos en cada una de las técnicas de ponderación, incluyendo la ponderación igualitaria (PI) obtenida al aplicar la ecuación (4).

**Tabla 10.** Pesos de importancia obtenidos.

Criterio	CP	CPD	ROC	RR	RS	PI
<b>FC</b>	0,3474	0,3107	0,3704	0,3857	0,2500	0,1429
<b>EF</b>	0,2159	0,2020	0,2276	0,1928	0,2143	0,1429
<b>AU</b>	0,1560	0,1577	0,1561	0,1286	0,1786	0,1429
<b>VU</b>	0,1127	0,1232	0,1085	0,0964	0,1429	0,1429
<b>CI</b>	0,0634	0,0774	0,0728	0,0771	0,1071	0,1429
<b>CG</b>	0,0634	0,0774	0,0442	0,0643	0,0714	0,1429
<b>EM</b>	0,0414	0,0516	0,0204	0,0551	0,0357	0,1429

De la tabla 10 se puede observar que para cada una de las técnicas de ponderación consideradas, los resultados son diferentes entre sí desde el punto de vista cuantitativo. También se observa que la jerarquización obtenida con comparaciones pareadas coincidió con la obtenida al aplicar comparaciones pareadas difusas, más no así los valores de los pesos.

#### *Aplicación de la técnica TOPSIS al caso de estudio*

Se aplicó la técnica TOPSIS al caso de estudio, utilizando cada uno de los conjuntos de pesos de importancia relativa obtenidos con las técnicas de ponderación, y presentados en la tabla 10. Los valores de los indicadores correspondientes se muestran en la tabla 11, mientras que en la tabla 12 se muestran las posiciones ocupadas por cada una de las alternativas, de acuerdo al valor del indicador obtenido.

**Tabla 11.** Indicadores TOPSIS.

Alternativas	Técnicas de Ponderación					
	CP	CPD	ROC	RR	RS	PI
<b>Solar Térmica</b>	0,4054	0,4372	0,3776	0,3823	0,4563	0,6072
<b>Solar Fotovoltaica</b>	0,3621	0,3812	0,3452	0,3370	0,4021	0,4706
<b>Geotérmica</b>	0,6598	0,6678	0,6494	0,6825	0,6473	0,7397
<b>Biomasa</b>	0,4343	0,4221	0,4401	0,4848	0,3689	0,3878
<b>Eólica</b>	0,3272	0,3713	0,2863	0,3424	0,3730	0,6129
<b>Hidráulica</b>	0,9473	0,9413	0,9457	0,9464	0,9286	0,9226

**Tabla 12.** Posición de las Alternativas.

Alternativas	Técnicas de Ponderación					
	CP	CPD	ROC	RR	RS	PI
<b>Solar Térmica</b>	4	3	4	4	3	4
<b>Solar Fotovoltaica</b>	5	5	5	6	4	5
<b>Geotérmica</b>	2	2	2	2	2	2
<b>Biomasa</b>	3	4	3	3	6	6
<b>Eólica</b>	6	6	6	5	5	3
<b>Hidráulica</b>	1	1	1	1	1	1

De las tablas 11 y 12 se puede observar que la tecnología hidráulica ocupa la primera posición y la tecnología geotérmica la segunda posición, para cada una de las técnicas

de ponderación de criterios consideradas. Las otras tecnologías varían su posición en la jerarquía dependiendo de la técnica de ponderación considerada.

#### 4. Conclusiones

Los valores de pesos de importancia relativa de los criterios obtenidos al aplicar cada una de las técnicas de ponderación de criterios, fueron diferentes entre sí. Por otra parte, las jerarquías de los criterios obtenidas con las técnicas de comparaciones pareadas y comparaciones pareadas difusas fueron idénticas.

La jerarquía de los criterios obtenida al aplicar la técnica de ponderación igualitaria resultó ser diferente a cada una de las otras jerarquías obtenidas.

Los valores de los pesos obtenidos a partir de las técnicas de ponderación por jerarquización difieren significativamente de los valores obtenidos a partir de las técnicas de comparaciones pareadas.

Al aplicar la técnica TOPSIS utilizando cada uno de los conjuntos de pesos de importancia relativa de los criterios, se puede observar que la tecnología hidráulica siempre ocupa la primera posición en la jerarquización, y la tecnología geotérmica la segunda posición.

Para la mayoría de las tecnologías de energía renovables consideradas en el caso de estudio, no se tiene una posición fija en la jerarquización, sino que varían dependiendo de la técnica de ponderación considerada.

El establecimiento de los pesos de importancia relativa de los criterios de decisión es un paso determinante en la toma de decisiones multicriterio cuando se trabaja con la técnica TOPSIS, puesto que además de reflejar los intereses del tomador de decisión, los pesos son ponderantes en la jerarquización de las alternativas.

#### 5. Referencias

1. Agfan N., Carvalho M.: Multi-criteria assessment of new and renewable energy power plants. Elsevier Energy, 27, 2002. 739-775.
2. Ajayi K.T., Olamide O.O.: Multi-criteria Analysis of Power Plants in Nigeria. Global Science and Technology Journal. Vol 2, N°2, Pp 1-22. September 2014.
3. Department for communities and local government. Multi-criteria analysis: a manual. Communities and Local Government Publications (2009) [Online]. Disponible: [www.communities.gov.uk](http://www.communities.gov.uk).

4. Ferry R., Monoain E.: A field guide to renewable energy technologies. Land art generator initiative. 1<sup>st</sup> Edition. February 2012. Disponible en: [www.landartgenerator.org](http://www.landartgenerator.org).
5. Ghaderi S.F., Tanha R., Karimi A.: Capacity planning for fossil fuel and renewable energy resources power plants. University of Tehran. 2008.
6. Harris, R.: Introduction to Decision Making. Virtual Salt. Junio 2012. <http://www.virtualsalt.com/crebook5.htm>.
7. Kabir, G., Hasin, A.: Comparative Analysis of AHP and Fuzzy AHP Models for Multicriteria Inventory Classification. *International Journal of Fuzzy Logic Systems (IJFLS)*, Vol.1, No.1, October 2011.
8. Kaya T., Kahraman A.: Multicriteria renewable energy planning using an integrated fuzzy VIKOR & AHP methodology: The case of Istanbul. *Elsevier Energy*, 35, 2010. 2517-2527.
9. Olson D.L.: Comparison of Weights in TOPSIS Models. *Elsevier Mathematical and Computer Modelling* 0 (2004).
10. Opricovic S., Tzeng G.: Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *European Journal of Operational Research* 156 (2004) 445–455.
11. Ribeiro F., Ferreira P., Araujo M.: Evaluating future scenarios for the power generation sector using a Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) tool: The Portuguese case. *Elsevier Energy*, 52, 2013. 126-136.
12. Roszkowska E.: Rank Ordering Criteria Weighting Methods - A Comparative Overview. *OPTIMUM. STUDIA EKONOMICZNE NR 5 (65)* 2013.
13. Saaty T.L.: Decision making with the analytic hierarchy process. *Int. J. Services Sciences*, Vol. 1, No. 1, 2008.
14. Spiegel E., McArthur N.: La nueva era del cambio energético. Opciones para impulsar el futuro del planeta. Editorial McGraw Hill, 2010.
15. Triantaphyllou E., Mann S.: Using the analytical hierarchy process for decision making in engineering applications: Some challenges. *Inter'l Journal of Industrial Engineering: Applications and Practice*, Vol. 2, No. 1, pp.35-44, 1995.
16. U.S. Department of Energy: 2012 Renewable Energy Data Book. 2013.

17. Wimmmler, C., y otros: Multi-Criteria Decision Support Methods for Renewable Energy Systems on Islands. *Journal of Clean Energy Technologies*, Vol. 3, No. 3, May 2015.
18. Yajure C.: Metodología integrada multicriterio para la jerarquización de tecnologías de energía renovable a utilizar para la producción de energía eléctrica. *Revista Tecnológica ESPOL – RTE*, Vol. 28, N.2, 62-78, (Septiembre 2015).