

## **Metodología integrada multicriterio para la jerarquización de tecnologías de energía renovable a utilizar para la producción de energía eléctrica**

César A. Yajure R.

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

**Resumen.** En el siguiente trabajo se presenta una metodología integrada multicriterio FAHP – PROMETHEE para la jerarquización de tecnologías de energía renovable a utilizar en la producción de energía eléctrica. Para el establecimiento de los pesos de importancia relativa de los criterios considerados, se trabajó con la técnica del Proceso de Jerarquización Analítico, en su versión difusa, mientras que la herramienta de soporte de decisión principal utilizada fue la técnica de sobre-clasificación PROMETHEE. 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. Las tecnologías consideradas fueron: Térmica solar, Térmica fotovoltaica, Geotérmica, Biomasa, Eólica, e Hidro. La metodología planteada se ilustra a través de un caso de estudio que ha sido utilizado en anteriores investigaciones.

*Palabras Clave:* Multicriterio, Promethee, AHP, conjuntos difusos, energía renovable, energía eléctrica.

### **ABSTRACT**

In this paper it presents a multicriterio integrated approach FAHP – PROMETHEE for the classification, from the best to the worst, renewable energy technologies for the production of electricity. To establish the relative importance weight of the considered criteria, we used the method Analytic Hierarchy Process, in its fuzzy version, while as a technique for supporting the decision making, outranking method PROMETHEE is used. The used decision criteria were: efficiency in percentage, installation cost in dollars per kilowatt, electricity cost in cents of dollar per kilowatt-hour, CO<sub>2</sub> emissions in kilograms per kilowatt-hour, life cycle in years, and used area in squared kilometers per kilowatt. The considered technologies were: Solar Thermal, Photovoltaic Thermal, Geothermal, Biomass, Wind, and Hydro. The proposed approach was illustrated throughout a case used in previous investigations.

*Keywords:* Multicriteria, Promethee, AHP, fuzzy sets, renewable energy, electrical energy.

## **1. INTRODUCCIÓN**

La energía eléctrica es un servicio público de vital importancia en las sociedades actuales, puesto que coadyuva, tanto en el desarrollo económico e industrial de los países, como en el bienestar de la población en general. Usualmente, mientras mayor es el desarrollo de un país, mayor es su consumo energético, y por lo tanto mayor es su demanda de energía eléctrica. Por tal razón, es indispensable una adecuada planificación del sistema eléctrico, incorporando paulatinamente a la matriz energética, energías primarias provenientes de fuentes renovables tales como: el sol, el viento, biomasa, entre otras.

Las fuentes de energías primarias típicas, para la producción de energía eléctrica, a nivel mundial incluyen combustibles fósiles provenientes del petróleo, gas natural, y el carbón mineral. Estas fuentes son de producción limitada, lo que eventualmente las hace costosas, y adicionalmente son contaminantes, por lo que en los últimos años ha aumentado el desarrollo de tecnologías basadas en las fuentes de energías renovables para la producción de energía eléctrica.

De acuerdo con [14], para el año 2012 la capacidad instalada de sistemas renovables para la producción de energía eléctrica representó el 26,9% del total mundial de capacidad de generación eléctrica instalada. De esos sistemas renovables, el 18,1% del total mundial está asociado sólo a hidroelectricidad. Por otra parte, desde el año 2000 hasta el año 2012 el incremento porcentual de la capacidad instalada de sistemas renovables fue del 50%, destacándose incrementos porcentuales continuos en energía eólica, biomasa y solar fotovoltaica, y decrecimiento en la hidroelectricidad.

Entonces, dada la preponderancia que han tomado las energías renovables en la producción de energía eléctrica, es importante hacer la selección adecuada de la tecnología a implementar en un determinado país, de acuerdo a su planificación energética. Para ello se debe hacer inicialmente una jerarquización de éstas tecnologías, considerando tanto criterios técnicos como económicos, y posteriormente, conocidos los potenciales de las fuentes renovables, hacer la selección definitiva. Por lo anterior, en esta investigación se plantea una metodología multicriterio para realizar la jerarquización de tecnologías de energías renovables para la producción de energía eléctrica, la cual sería el punto de partida para realizar la selección de la mejor tecnología a utilizar.

En ese sentido, 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 la metodología planteada basada en técnicas de toma de decisiones multicriterio, 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

### *Conjuntos Difusos*

Los conjuntos difusos son una generalización de la teoría de conjuntos clásicos que introdujo Zadeh en 1965, como una manera matemática de representar la vaguedad del lenguaje ordinario. Según Javanbarg [7], un conjunto difuso es una clase de objetos con un continuo de grados de membresía, en los que los términos lingüísticos se representan por medio de las funciones de membresía, valoradas en intervalos de los números reales, los cuales traducen la vaguedad e imprecisión del pensamiento humano relacionado con el problema propuesto.

Éstos conjuntos serán un par ordenado compuesto por el elemento y un valor entre cero y uno que indica que tanto pertenece dicho elemento a la clase definida por el conjunto. Entonces, dado un Universo  $X$ , la pertenencia o no de un elemento  $x$  a un conjunto  $A$  específico queda determinada por la función de membresía que se presenta en la ecuación (1).

$$A = \{x, \mu_A(x) / x \in X\} \quad (1)$$

Ahora, desde un punto de vista matemático existe una variedad de funciones de membresía, de las cuales las más utilizadas son la función Gamma, la función Lambda o Triangular, y la función Pi o Trapezoidal. Para reflejar la vaguedad de los parámetros presentes en la Toma de Decisiones, generalmente se han utilizado los números difusos triangulares y trapezoidales.

### *Toma de Decisiones Multicriterio*

La toma de decisiones consiste en seleccionar una alternativa, dentro de un conjunto de alternativas, considerando uno o varios criterios para realizar tal selección.

Cuando se tiene un problema de selección de alternativas, sujeto a varios criterios, se tiene un problema de toma de decisiones multicriterio. De acuerdo con el autor en [6], tomar decisiones “es el estudio de identificar y seleccionar alternativas basados en los valores y preferencias del tomador de decisiones. Tomar una decisión implica que hay varias alternativas de las cuales seleccionar la preferida, y en tal caso no solo queremos identificar tantas alternativas como sea posible sino también seleccionar aquella que mejor satisfaga nuestras metas, objetivos, deseos, valores, etc.”.

Las situaciones de decisión reales por lo general involucran problemas de toma de decisiones multicriterio, por lo que se han desarrollado métodos de toma de decisiones multicriterio (MCDM), de los cuales históricamente han surgido dos escuelas de pensamiento, la escuela norteamericana y la escuela francesa o europea. La primera incluye los métodos basados en la teoría de utilidad, mientras que la escuela europea incluye los métodos de sobre-clasificación.

### ***Método Promethee***

Dentro de los métodos de sobre-clasificación se tiene el método de organización y jerarquización por preferencias PROMETHEE, el cual fue propuesto por J. Brans y PH. Vincke en 1985, en [3]. A partir de esa investigación se han desarrollado variantes del método, sin embargo, se siguen utilizando las versiones originales Promethee I y Promethee II.

Los autores de [10] plantean que para aplicar el método Promethee se debe, en primer lugar, determinar el desempeño de las alternativas para cada uno de los criterios considerados. Seguidamente, se utilizan funciones de preferencia generalizadas para comparar las alternativas en pares, para cada uno de los criterios. Con la información anterior, se calculan flujos de sobre-clasificación, positivos y negativos, para ser utilizados como medidas de dominancia de las alternativas. Finalmente, basándose en éstos flujos, se obtiene un pre-ordenamiento parcial de las alternativas, en el que adicionalmente se puede observar cuales alternativas son incomparables entre sí. Hasta este punto el método se conoce como Promethee I.

Al combinar los flujos de sobre-clasificación positivos y negativos de cada una de las alternativas, se obtiene lo que los autores en [3] llamaron flujo de sobre-clasificación neto, el cual se utiliza para obtener un pre-ordenamiento total de las alternativas, que es el producto que se obtiene al aplicar Promethee II.

Entonces, Promethee I permite obtener un pre-ordenamiento parcial de las alternativas con información sobre las incomparabilidades entre éstas. Mientras que Promethee II permite obtener una jerarquización completa de las alternativas, pero no se observa información con respecto a las posibles incomparabilidades. Por esta razón, los autores en [10] recomiendan aplicar ambas versiones del Promethee a los problemas de decisión multicriterio considerados.

En cualquier caso, es necesario determinar los pesos de cada uno de los criterios considerados, que reflejen la importancia relativa de dichos criterios. Para la determinación de éstos pesos, los autores en [9] recomiendan utilizar la técnica de las comparaciones pareadas propuesta por Saaty en el método Proceso Jerárquico Analítico (AHP).

### ***Pesos Difusos***

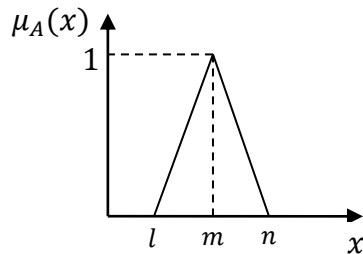
Para realizar las comparaciones de pares de los criterios se necesita una escala numérica que indique cuantas veces es más importante un elemento sobre otro En la tabla 1 se muestra la escala propuesta por Saaty en [13].

**Tabla 1.** Escala de Valores de Importancia de Saaty.

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 $i$ .

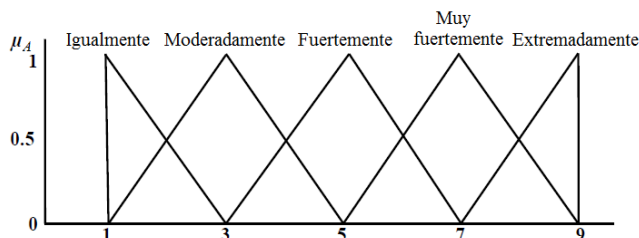
Sin embargo, esta variante consiste en incorporar los números difusos o triangulares a la técnica AHP tradicional. Específicamente, se utilizan los números difusos para indicar la importancia relativa que un factor de jerarquía tiene sobre otro, y así construir las matrices de comparaciones con números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

Un número difuso del tipo triangular ( $\tilde{A}$ ) se representa usualmente como una tripleta  $(l, m, n)$  donde  $m$ ,  $n$ , y  $l$  corresponden al valor medio, y a los límites superior e inferior, respectivamente, de la función de membresía triangular, tal como se observa en la figura 1.



**Fig. 1.** Función de membresía triangular.

Para la determinación de las matrices de comparaciones pareadas existen varias propuestas. En esta investigación se utiliza la planteada por Kabir y Hasin en [8], en la cual proponen variables lingüísticas para los pesos de importancia de cada criterio. En la figura 2 y en la tabla 2 se muestra esta información.



**Fig. 2.** Función de membresía comparaciones pareadas.

**Tabla 2.** Escala de Comparación AHP Difuso.

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 $\tilde{M}_i^{-1} = (1/n_i, 1/m_i, 1/l_i)$	

Una vez obtenida la matriz de comparaciones pareadas, el siguiente paso consiste en determinar la media geométrica difusa para cada criterio. De acuerdo con [12], la técnica geométrica se utiliza para calcular la media geométrica ( $\tilde{r}_i$ ) de los valores de comparación difuso del criterio  $i$  con respecto a cada uno de los otros criterios, tal como se muestra en la ecuación (2), donde  $\tilde{a}_{in}$  es el valor difuso de la comparación pareada del criterio  $i$  con respecto al criterio  $n$ .

$$\tilde{r}_i = [\tilde{a}_{i1} \otimes \dots \otimes \tilde{a}_{in}]^{1/n} \tag{2}$$

Seguidamente se calculan los pesos difusos de cada uno de los criterios. Para conseguir el peso difuso del criterio  $i$  se aplica la ecuación (3).

$$\tilde{w}_i = \tilde{r}_i \otimes (\tilde{r}_1 \oplus \tilde{r}_2 \oplus \dots \oplus \tilde{r}_n)^{-1} \tag{3}$$

El peso difuso del criterio  $i$  se transforma posteriormente en un número equivalente positivo, aplicando la expresión dada por la ecuación (4).

$$M_i = \frac{l \cdot w_i + m \cdot w_i + n \cdot w_i}{3} \quad (4)$$

Los resultados obtenidos a partir de la ecuación (4) se normalizan utilizando la expresión de la ecuación, para generar así el listado de pesos difusos para los criterios.

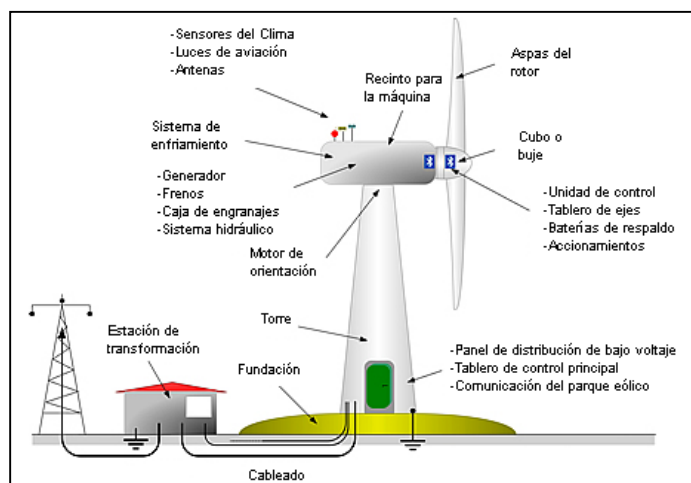
$$N_i = \frac{M_i}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad (5)$$

### 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 la turbina. En la figura 3 se muestra el esquema de un sistema eólico conectado a la red.



**Fig. 3.** Esquema de un Sistema Eólico.

Adaptado de: <https://evolucaoenergiaeolica.wordpress.com>

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.

#### Solar Fotovoltaica

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.

#### Solar Térmica

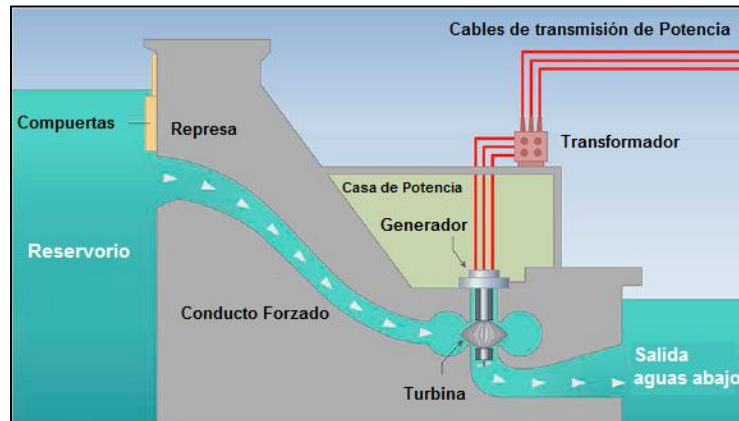
Estos sistemas convierten el calor del sol en electricidad. Se conocen usualmente como tecnologías de potencia solar concentrada (Concentrating Solar Power, CSP). Utilizan espejos para concentrar la radiación solar en un componente llamado receptor. El calor se utiliza entonces para producir vapor, que 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. En la figura 4 se muestra el esquema de un sistema hidroeléctrico.



**Fig. 4.** Esquema de un Sistema Hidroeléctrico.

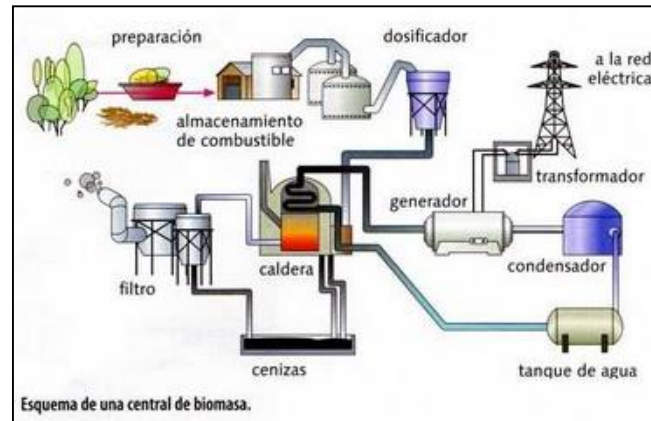
Adaptado de: NREL. Renewable Electricity Generation and Storage Technologies.

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



**Fig. 5.** Esquema Sistema de Generación con Biomasa.

Adaptado de [www.empresariosagrupados.es](http://www.empresariosagrupados.es)

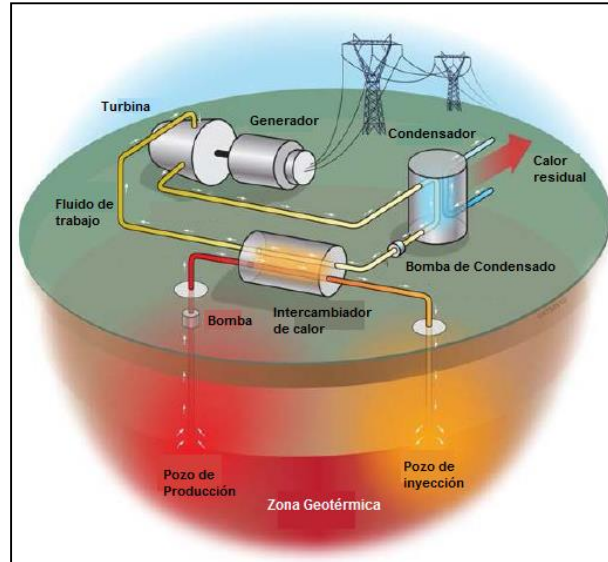
En [4] los autores indican que la biomasa se puede quemar directamente como un combustible sólido o ser convertidos a líquidos o gas, lo cual es llamado biofuels. Entonces, las tecnologías incluyen las que queman directamente la biomasa en un horno para producir vapor que se utilizaría en un sistema 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. En la figura 5 se muestra un esquema de generación con biomasa.

### 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 [15], 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.

Según [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.

En la figura 6 se muestra un esquema de una planta para producir energía eléctrica a partir de la energía geotérmica, utilizando el ciclo binario.



**Fig. 6.** Esquema Sistema de Generación geotérmico.

Adaptado de NREL. Renewable Electricity Generation and Storage Technologies

### 3. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PLANTEADA

#### *Metodología Planteada*

La metodología propuesta consiste en utilizar de manera integrada las técnicas de toma de decisiones multicriterio AHP, en su versión difusa, y Promethee, con el fin de obtener la mejor tecnología de energía renovable para la producción de energía eléctrica.

La técnica Promethee se utiliza para jerarquizar las tecnologías propuestas, de acuerdo a su desempeño con respecto a un conjunto de criterios determinados, mientras que la técnica AHP en su versión difusa se utiliza para obtener los pesos de importancia relativa de cada uno de los criterios considerados. La determinación de los pesos de importancia relativa de los criterios, utilizando los conjuntos difusos, permite minimizar la subjetividad de los mismos, que incorpora por naturaleza, el tomador de 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, en [1] se realiza 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. De igual manera, 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, mientras que en [2] los autores utilizaron la técnica AHP para seleccionar la mejor planta de potencia en cada una de las seis zonas geopolíticas de Nigeria. Asimismo, en [11] los autores 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.

Entonces, 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*

El primer paso consistió en aplicar la técnica de las comparaciones pareadas de Saaty

a los criterios que se consideraron en el estudio, dando los resultados que se presentan 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
EF	1	1/3	1/3	3	3	3	1
FC	3	1	3	3	3	3	3
VU	3	1/3	1	3	3	3	1
CI	1/3	1/3	1/3	1	1	3	1/5
CG	1/3	1/3	1/3	1	1	3	1/5
EM	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1	1/5
AU	1	1/3	1	5	5	5	1

Seguidamente, a partir de los datos de la tabla 4, y de acuerdo a lo establecido en la tabla 2, se obtiene la matriz de comparaciones pareadas asociadas a los números triangulares difusos, la cual se muestra en la tabla 5.

**Tabla 5.** Matriz de comparaciones pareadas difusa.

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

Con la información presente en la tabla 5, se aplica el procedimiento para obtener los pesos de importancia relativa difusos, los cuales se muestran en la tabla 6. Se puede observar que el criterio que resultó con mayor peso fue el de factor de capacidad, mientras que el criterio con el peso más bajo resultó ser las emisiones de CO<sub>2</sub>. De igual manera, se puede notar que los criterios asociados a costos resultaron con igual peso.

**Tabla 6.** Pesos de importancia relativa difusos.

Criterios	Pesos
EF	0,14
FC	0,26
VU	0,19
CI	0,08
CG	0,08
EM	0,05
AU	0,20

*Aplicación de Promethee*

Una vez obtenidos los pesos de importancia relativa de los criterios el siguiente punto consistió en aplicar del método multicriterio Promethee, en sus versiones I y II. Se consideró el criterio tipo “usual” para efectos de determinar la función de preferencia. En primer lugar, se calculan lo que los autores en [3] llamaron Índices de Preferencia, los cuales se presentan en la tabla 7, donde las  $a_i$ , representan cada una de las alternativas consideradas, es decir:

- $a_1$ : Tecnología Solar Térmica
- $a_2$ : Tecnología Solar Fotovoltaica
- $a_3$ : Tecnología Geotérmica
- $a_4$ : Tecnología Biomasa
- $a_5$ : Tecnología Eólica
- $a_6$ : Tecnología Hidro

**Tabla 7.** Índices de Preferencia  $\pi_i(a_i, a_j)$ .

Alternativas	a1	a2	a3	a4	a5	a6
a1		0,079	0,000	0,037	0,029	0,029
a2	0,044		0,000	0,037	0,029	0,029
a3	0,143	0,143		0,106	0,113	0,040
a4	0,080	0,080	0,011		0,037	0,000
a5	0,050	0,050	0,029	0,079		0,029
a6	0,114	0,114	0,077	0,106	0,113	

Con éstos índices de Preferencia se calculan los flujos de entrada y salida

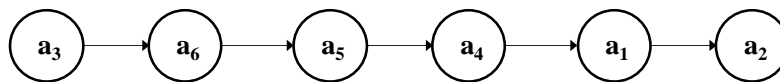
asociados a cada una de las alternativas. Dichos flujos son los que se obtienen al aplicar Promethee I. Esta información se presenta en la tabla 8.

**Tabla 8.** Flujos de las alternativas.

Flujo	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>4</sub>	a <sub>5</sub>	a <sub>6</sub>
$\phi^+$	0,174	0,139	0,545	0,208	0,238	0,523
$\phi^-$	0,431	0,466	0,117	0,364	0,322	0,128

De la tabla 8 se puede observar que la alternativa a<sub>3</sub> (tecnología geotérmica) sobre-clasifica a cada una de las otras alternativas, pues cumple con la condición de que su flujo positivo es el máximo y su flujo negativo es el mínimo. De igual manera, se puede ver, que de las cinco alternativas sobre-clasificadas por a<sub>3</sub>, la alternativa a<sub>6</sub> (tecnología hidro) sobre-clasifica a las restantes. Luego, a<sub>5</sub> sobre-clasifica a a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub> y a<sub>4</sub>.

Las relaciones parciales así obtenidas se presentan en la figura 5, en la que se puede observar que todas las alternativas son comparables entre sí.



**Fig. 5.** Relaciones parciales de las alternativas.

Con la información presentada en la tabla 8 se pueden calcular los flujos netos, los cuales son los resultados que se obtienen al aplicar Promethee II. Esta información se presenta en la tabla 9.

**Tabla 9.** Flujos netos.

Flujo	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>4</sub>	a <sub>5</sub>	a <sub>6</sub>
$\phi_i$	-0,257	-0,326	0,428	-0,156	-0,084	0,395

De la tabla 9 se puede observar que la técnica Promethee II permite obtener un orden total de las alternativas consideradas, al jerarquizarlas de acuerdo al mayor valor de flujo neto. En ese sentido, se puede notar que el orden total de las alternativas es el que se muestra a continuación:

- a<sub>3</sub>: Tecnología Geotérmica
- a<sub>6</sub>: Tecnología Hidro
- a<sub>5</sub>: Tecnología Eólica
- a<sub>4</sub>: Tecnología Biomasa
- a<sub>1</sub>: Tecnología Solar Térmica
- a<sub>2</sub>: Tecnología Solar Fotovoltaica

## 4. CONCLUSIONES

Al aplicar al caso de estudio la metodología FAHP-Promethee, se pudo obtener una jerarquización de las tecnologías de energías renovables para la producción de energía eléctrica, como paso previo para hacer la selección de la mejor tecnología a utilizar.

La combinación de dos técnicas multicriterio, AHP y Promethee, resulta útil para determinar la mejor tecnología para obtener energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables, siendo AHP bastante útil para obtener los pesos de importancia relativa de los criterios.

La metodología Promethee es una técnica multicriterio útil para la toma de decisiones en presencia de múltiples criterios, por lo general contrapuestos entre sí. En la versión Promethee I se obtiene un orden parcial de las alternativas, y se puede analizar la comparabilidad entre ellas, mientras que con la versión Promethee II, se puede obtener un orden total de las alternativas.

La valoración de las importancias relativas de los criterios fue realizado de una manera consistente por los expertos consultados, de acuerdo al procedimiento de verificación propuesto por Saaty.

El uso de los conjuntos difusos para la obtención de los pesos de importancia relativa de los criterios, permitió reducir la subjetividad propia de los tomadores de decisión, al pasar de un valor simple de comparación de criterios a un rango de valores.

La jerarquización obtenida al aplicar la metodología propuesta, indica de manera preliminar, que la mejor tecnología renovable es la Geotérmica, seguida por la tecnología hidro. De igual manera, indica que las peores tecnologías renovables son la solar térmica y la solar fotovoltaica.

## 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. Brans, J.P.; PH. Vincke: A Preference Ranking Organisation Method (The PROMETHEE Method for Multiple Criteria Decision-Making). Management Science, Vol. 31, No 6, June 1985.



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. Javanbarg, M. y otros, "Fuzzy AHP-based multicriteria decision making systems using particle swarm optimization", *Expert Systems with Applications*, 39 (2012), 960–966.
8. 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.
9. Macharis C, y otros: PROMETHEE and AHP: The design of operational synergies in multicriteria analysis. Strengthening PROMETHEE with ideas of AHP. *European Journal of Operational Research*. N° 153 (2004), pp. 307–317.
10. Oberchmidt J., Geldermann J., Ludwig J.: Modified Promethee approach for assessing energy technologies. *International Journal of Energy Sector Management*, Vol. 4 No. 2, 2010, pp. 183-212.
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. Rostamy, A. y otros, "Using fuzzy analytical hierarchy process to evaluate main dimensions of business process reengineering", *Journal of Applied Operational Research*, 4(2), 69–77, 2012.
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. U.S. Department of Energy: 2012 Renewable Energy Data Book. 2013.
16. U.S. Department of Energy: Renewable Energy, An Overview. March 2001.