

Estudio comparativo de técnicas de toma de decisiones multicriterio para la jerarquización de tecnologías de energías renovables a utilizar en la producción de electricidad.

Comparative study of multicriteria decision making methods for renewable energy technologies ranking in electricity production

César Aristóteles Yajure Ramírez¹, Yaismir Arlenis Guzman²

¹Ingeniería eléctrica, Universidad Central de Venezuela, Venezuela

²Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional Experimental de la Fuerza Armada, Venezuela.

cyajure@gmail.com
yaismir80@gmail.com

Resumen— En la siguiente investigación se hace un estudio comparativo de distintas técnicas de toma de decisiones multicriterio para la jerarquización de tecnologías de energías renovables, a utilizar en la producción de electricidad. Se analizan tres diferentes métodos, AHP de la escuela americana, PROMETHEE de la escuela europea, y TOPSIS. 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 CO₂ en kilogramos por kilovatio-hora, vida útil en años, y área utilizada en kilómetros cuadrados por kilovatio. La metodología propuesta se aplica a un caso de estudio ya tratado en anteriores investigaciones por diversos autores.

Palabras clave— Multicriterio, Promethee, AHP, TOPSIS, Energías Renovables, Electricidad.

Abstract— This paper presents a comparative study of different techniques of multicriteria decision making for ranking renewable energy technologies to be used in the production of electricity. Three different methods, AHP American School, PROMETHEE European School, and TOPSIS are analyzed. 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, CO₂ emissions in kilograms per kilowatt-hour, life in years, and used area in square kilometers per kilowatt. The proposed methodology is applied to a case study already discussed in previous research by various authors.

Key Word —Multicriteria, Promethee, AHP, TOPSIS, Renewable Energies, Electricity.

I. INTRODUCCIÓN

Es un hecho indiscutible que la energía eléctrica es fundamental para el desarrollo de cualquier país, puesto que impulsa los sectores industrial y comercial, además que proporciona bienestar y confort a la población. Para la producción de esta energía eléctrica se podrían utilizar variadas fuentes de energía primaria, por ejemplo, los combustibles fósiles, entre los que destacan el gasoil y el fueloil, el gas natural, el carbón mineral, y las energías renovables, entre las que destacan solar, eólica, hidráulica, biomasa, geotérmica, entre otras.

La tecnología de generación eléctrica basada en los combustibles fósiles está ampliamente desarrollada, pero sobresalen por su alto nivel de contaminación ambiental. A pesar de esto, son las de principal uso a nivel mundial, puesto que son abundantes y la tecnología está lo suficientemente madura. Por otra parte, la generación de energía eléctrica a partir de las fuentes de energías renovables está desarrollada en algunos casos, como lo es la tecnología para energía hidráulica, pero en otros casos aún requiere mayor desarrollo, como es el caso de la geotérmica. Sin embargo, las fuentes de energía renovable se caracterizan por tener un menor impacto ambiental, una vez que están operativas las plantas asociadas.

De acuerdo con [1], 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 importancia que han tomado las fuentes renovables, al realizar la planificación energética se debe considerar tanto el uso tanto de fuentes convencionales, tales como las basadas en combustibles fósiles, como de fuentes renovables, dependiendo de las políticas ambientales del país. En ese sentido, es necesario tener una metodología para la selección correcta de la mejor tecnología para la producción de energía eléctrica a partir de las fuentes de energías renovables, considerando las técnicas de decisión multicriterio. Es así como en [2] Demirtas propuso una metodología para evaluar la mejor tecnología de energía renovable para una planificación energética sostenible, utilizando como técnica de soporte de decisión, el Proceso Analítico Jerárquico. En [3] Yajure propuso una metodología integrada multicriterio para la jerarquización de tecnologías de energía renovables para la producción de energía eléctrica, para la cual utilizó la técnica PROMETHEE en combinación con la técnica AHP en su versión difusa, para obtener la importancia relativa de los criterios de decisión. Por otra parte, en [4], los autores desarrollan un estudio de los métodos de soporte de decisión multicriterio para el uso de sistemas de energía renovable en islas.

En ese mismo orden de ideas, en la presente investigación se realiza un estudio comparativo de las técnicas de toma de decisiones multicriterio para la jerarquización de tecnologías de energías renovables a ser usadas en la producción de energía eléctrica, el cual se dividió en cinco secciones. En la sección II se presentan los conceptos básicos asociados a los métodos de toma de decisiones multicriterio, en la sección III se tratan las tecnologías de fuentes renovables, en la sección IV se presenta e ilustra con un ejemplo el estudio comparativo, las conclusiones se presentan en la sección V, y finalmente las referencias bibliográficas se presentan en la sección VI de la investigación.

II. MÉTODOS DE TOMA DE DECISIONES MULTICRITERIO

Toma de Decisiones Multicriterio

De acuerdo con [5], 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), 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 sobreclasificación, sin menoscabar la posibilidad de la existencia de otros métodos fuera de estas escuelas de pensamiento.

Dentro de la escuela norteamericana sobresalen el Proceso Jerárquico Analítico (AHP por sus siglas en inglés), Ponderación Aditiva Simple (SAW por sus siglas en inglés), Técnica de Ponderación Multiatributo Simple (SMART por sus siglas en inglés), entre otras. Mientras que por la escuela europea se distinguen los métodos PROMETHEE y ELECTRE. Fuera de éstas escuelas han surgido otros métodos entre los que destaca la Técnica para orden de preferencias por similitud con soluciones ideales (TOPSIS por sus siglas en inglés).

De acuerdo con [7], los métodos AHP, PROMETHEE y TOPSIS, se pueden utilizar para jerarquizar alternativas de decisión, mientras que en [8], los autores plantean que estos tres métodos han sido utilizados en aplicaciones que implican manejo de distintos tipos de recursos, así como aplicaciones relacionadas con energía.

Proceso Analítico de Jerarquización (AHP)

El Proceso Analítico de (AHP) es una técnica de soporte para la toma de decisiones multicriterio el cual se basa en la jerarquización, comparación pareada, y en los pesos de importancia, de los criterios considerados. Fue propuesto por Thomas Saaty en 1980, y consiste en convertir evaluaciones subjetivas de importancia relativa, en un conjunto de pesos totales, que servirán posteriormente para hacer la selección de la mejor alternativa.

En [9] Saaty plantea que para tomar una decisión de una manera organizada, se debe descomponer el problema de decisión en una serie de pasos:

- 1) Definir el problema y determinar el tipo de conocimiento que se genera.
- 2) Estructurar la jerarquía de decisión desde la parte superior con la meta que se busca alcanzar, luego los objetivos desde una perspectiva amplia, para seguir con los niveles intermedios,

hasta los niveles más bajos, los cuales usualmente son el conjunto de alternativas.

3) Construir un conjunto de matrices de comparaciones pareadas. Cada elemento en un nivel superior se usa para comparar los elementos en el nivel inmediatamente inferior con respecto a él.

4) Utilizar las prioridades obtenidas de las comparaciones para pesar las prioridades en el nivel inmediatamente inferior. Continúe este proceso de pesa y suma hasta que se obtengan las prioridades finales de las alternativas en el nivel más bajo de la jerarquización.

Para realizar las comparaciones de pares mencionada en el punto 3 se necesita una escala numérica que indique cuantas veces es más importante un elemento sobre otro elemento, con respecto al criterio o propiedad con el cual están siendo comparados. En la tabla 1 se muestra la escala propuesta por Saaty (2008).

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.

Tabla 1. Escala de Comparación del método AHP.

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. Éstos resultados se someten a un procedimiento propuesto por Saaty, y planteado por Triantaphyllou y otros en [10], para determinar su consistencia.

Finalmente, se multiplica cada peso de cada alternativa con cada uno de los criterios correspondientes, para obtener la puntuación de cada alternativa, y así proceder a la toma de decisión.

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 [11]. 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 [12] 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 [11] 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 [12] 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 [13] recomiendan utilizar la técnica de las comparaciones pareadas propuesta por Saaty en el método Proceso Jerárquico Analítico (AHP).

TOPSIS

De acuerdo con [14] 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.

III. 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.

En [15] los autores indican que 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 formar 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.

Según [15], 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.

IV. DESARROLLO DEL ESTUDIO COMPARATIVO

Metodología Planteada

La metodología propuesta consiste en utilizar tres técnicas de toma de decisiones multicriterio con el fin de jerarquizar tecnologías de energía renovable para la producción de energía eléctrica. Posteriormente, se comparan los resultados obtenidos con cada una de las técnicas utilizadas, las cuales son: AHP, PROMETHEE y TOPSIS, en base a la posición que toman las alternativas consideradas. Para la determinación de los pesos de importancia relativa de los criterios considerados, se utiliza el procedimiento propuesto por Saaty en [9].

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 CO₂ en Kg/kWh, vida útil en años, y área utilizada en km²/kW.

Caso de Estudio

Los datos de desempeño de cada una de las tecnologías fueron tomados de distintas investigaciones realizadas previamente. Por ejemplo, en [17] 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 [18] 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 [19] 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 [20] 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. Finalmente, Yajure en [3] presenta una metodología integrada multicriterio para la jerarquización de tecnologías de energías renovables para la producción de energía eléctrica.

Entonces, en la tabla 2 se presentan los valores de los atributos considerados para evaluar cada una de las alternativas bajo estudio.

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 ₂ (kg/kWh)	0.1	0.1	0.06	1.18	0.02	0.04
Área Utilizada (km ² /kW)	0.08	0.12	0.03	1.18	0.79	0.13

Tabla 2. Desempeño de las alternativas.

Aplicación de AHP a Caso de Estudio

Para la aplicación de ésta técnica se siguieron los pasos propuesto por Saaty en su investigación. En ese sentido, en la tabla 3 se presenta la matriz de comparaciones pareadas de los criterios, y en la figura 1 se presenta la jerarquización de los criterios del caso en estudio.

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	1/3
CG	1/3	1/3	1/3	1	1	3	1/3
EM	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1	1/3
AU	1	1/3	1	3	3	3	1

Tabla 3. Matriz de comparaciones pareadas.

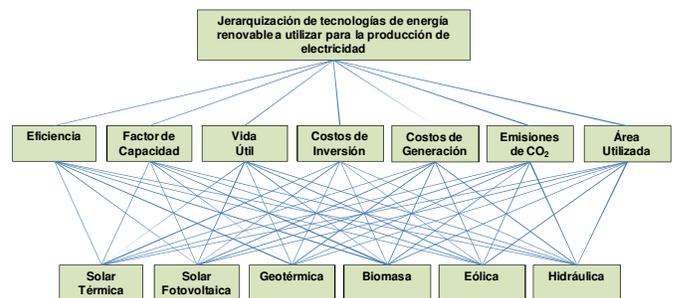


Fig. 1. Jerarquización de los criterios.

Al aplicar la técnica de los autovectores se obtienen los pesos de importancia relativa de los criterios, la cual se muestra en la tabla 4, mientras que en la tabla 5 se presentan los valores de desempeño normalizados de las alternativas consideradas.

En dichas tablas se cumple la siguiente nomenclatura:
 EF: Eficiencia, FC: Factor de Carga, VU: Vida Útil, CI: Costos de Inversión, CG: Costos de Generación, EM: Emisiones CO₂, AU: Área Utilizada.

a₄: Tecnología Biomasa
 a₅: Tecnología Eólica
 a₆: Tecnología Hidráulica

Crterios	Pesos
EF	0,1395
FC	0,3137
VU	0,1935
CI	0,0742
CG	0,0742
EM	0,0483
AU	0,1566

Tabla 4. Pesos de los criterios.

TECNOLOGÍA	EF	FC	VU	CI	CG	EM	AU
Solar Térmica	0,077	0,083	0,139	0,105	0,110	0,089	0,195
Solar Fotovoltaica	0,052	0,083	0,139	0,082	0,025	0,089	0,130
Geotérmica	0,186	0,250	0,167	0,147	0,233	0,148	0,521
Biomasa	0,129	0,250	0,139	0,147	0,133	0,008	0,013
Eólica	0,144	0,083	0,139	0,335	0,266	0,444	0,020
Hidráulica	0,412	0,250	0,278	0,184	0,233	0,222	0,120

Tabla 5. Valores normalizados de desempeño de las alternativas.

Con los valores presentes en las tablas 4 y 5 se obtienen los valores globales de las alternativas, a partir de los cuales serán jerarquizadas. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 6.

Geotérmica	0,2535
Hidráulica	0,2502
Biomasa	0,1465
Eólica	0,1423
Solar Térmica	0,1146
Solar Fotovoltaica	0,0928

Tabla 6. Jerarquización de las alternativas AHP.

Aplicación de PROMETHEE

Se consideró el criterio tipo “usual” para efectos de determinar la función de preferencia. Entonces, se calculan lo que los autores en [11] 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:

a₁: Tecnología Solar Térmica
 a₂: Tecnología Solar Fotovoltaica
 a₃: Tecnología Geotérmica

Alternativas	a1	a2	a3	a4	a5	a6
a1		0,070	0,000	0,029	0,022	0,022
a2	0,052		0,000	0,029	0,022	0,022
a3	0,143	0,143		0,098	0,115	0,033
a4	0,086	0,086	0,011		0,045	0,000
a5	0,048	0,048	0,028	0,070		0,028
a6	0,120	0,120	0,076	0,098	0,115	

Tabla 7. Índices de Preferencia π_i (a_i,a_j).

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.

Flujo	a1	a2	a3	a4	a5	a6
φ _i ⁺	0,144	0,126	0,531	0,227	0,223	0,529
φ _i ⁻	0,449	0,468	0,114	0,325	0,319	0,106

Tabla 8. Flujos de las alternativas.

De la tabla 8 se puede observar que las alternativas a₃ (geotérmica) y a₆ (hidráulica) no son comparables puesto que a pesar que a₃ tiene flujo positivo máximo, el flujo negativo mínimo corresponde a la alternativa a₆. Estas dos alternativas compartirían el primer lugar de la jerarquización puesto que de manera individual, cada una sobre-clasifica al resto de las alternativas. Seguidamente, se puede observar que las alternativas a₄ y a₅ son incomparables, por lo que compartirían la segunda posición de la jerarquización, pero ellas de manera independiente sobre-clasifican a las alternativas a₁ y a₂. La penúltima posición corresponde a a₁ y la última posición corresponde a a₂.

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, de la cual se puede observar un orden total de las alternativas, quedando en primer lugar la tecnología hidráulica, seguida de la geotérmica, la eólica y la Biomasa. En los últimos lugares quedan la solar térmica y la solar fotovoltaica.

Flujo	a1	a2	a3	a4	a5	a6
φ _i	-0,3046	-0,3420	0,4171	-0,0977	-0,0964	0,4236

Tabla 9. Flujos Netos.

Aplicación de TOPSIS

Se parte de la matriz de decisión, la cual es idéntica a la matriz de la tabla 2. Esta se transforma utilizando normalización vectorial, para obtener la matriz de decisión normalizada. Seguidamente, se obtiene la matriz de decisión normalizada ponderada, utilizando los pesos de importancia relativa de los criterios, ya presentados en la tabla 4. Esta matriz se presenta en la tabla 10.

Tecnología	Solar Térmica	Solar Fotovoltaica	Geotérmica	Biomasa	Eólica	Hidráulica
Eficiencia (%)	0,077	0,052	0,186	0,129	0,144	0,412
Factor de Capacidad (%)	0,083	0,083	0,250	0,250	0,083	0,250
Vida Útil (Años)	0,139	0,139	0,167	0,139	0,139	0,278
Costos de Instalación (US\$/kW)	0,105	0,082	0,147	0,147	0,335	0,184
Costos de Generación (c\$/kWh)	0,110	0,025	0,233	0,133	0,266	0,233
Emisiones CO2 (kg/kWh)	0,089	0,089	0,148	0,008	0,444	0,222
Área Utilizada (km2/kW)	0,195	0,130	0,521	0,013	0,020	0,120

Tabla 10. Matriz de decisión normalizada ponderada.

Con los datos presentes en esta matriz se obtienen los indicadores necesarios para la jerarquización de las alternativas. Dichos indicadores se presentan en la tabla 11, los cuales nos permiten jerarquizar a las alternativas consideradas, observándose que la tecnología hidráulica queda en el primer lugar, seguida por la tecnología geotérmica.

Alternativas	D_j^*	D_j^-	C_j^*
Solar Térmica	0,1630	0,1395	0,4612
Solar Fotovoltaica	0,1806	0,1238	0,4067
Geotérmica	0,0822	0,1921	0,7003
Biomasa	0,1687	0,1315	0,4380
Eólica	0,1719	0,1001	0,3679
Hidráulica	0,0145	0,2171	0,9375

Tabla 11. Indicadores TOPSIS.

Comparación de resultados

En la tabla 12 se presentan los resultados obtenidos luego de aplicar cada una de las técnicas consideradas.

Alternativa	AHP	PROMETHEE	TOPSIS
Geotérmica	1	2	2
Hidráulica	2	1	1
Biomasa	3	4	4
Eólica	4	3	6

Solar Térmica	5	5	3
Solar Fotovoltaica	6	6	5

Tabla 12. Comparación de Resultados.

De la tabla 12 se puede observar que los resultados obtenidos considerando las técnicas AHP y PROMETHEE son similares, puesto que como se observó en la tabla 8, las tecnologías Geotérmica e Hidráulica compartirían los dos primeros lugares de la jerarquización, así como las tecnologías Biomasa y Eólica compartirían los lugares 3 y 4 de la jerarquización. Al comparar con la técnica TOPSIS, se puede notar que arroja resultados similares en cuanto a que las tecnologías hidráulica y geotérmica ocupan los dos primeros lugares de la jerarquización.

V. CONCLUSIONES

Con cada una de las técnicas de toma de decisiones multicriterio utilizadas en el presente estudio, se pudo obtener una jerarquía de las tecnologías de energías renovables.

Luego de realizar el estudio comparativo se puede observar que las tres jerarquías obtenidas, luego de aplicar tres técnicas de toma de decisiones multicriterio, son diferentes entre sí.

La jerarquía obtenida con la técnica AHP es similar a la jerarquía obtenida con la técnica PROMETHEE, en el sentido que los dos primeros lugares los ocupan las tecnologías hidráulica y geotérmica, los siguientes dos lugares los ocupan las tecnologías eólica y biomasa, y los dos últimos lugares los ocupan las tecnologías solares.

Los resultados obtenidos con las tres técnicas indican que las tecnologías hidráulica y geotérmica ocupan los dos primeros lugares de la jerarquización.

La técnica PROMETHEE arroja como resultado que las tecnologías Geotérmica e Hidráulica son incomparables entre sí, así como son incomparables entre si las tecnologías Eólica y la Biomasa.

VI. REFERENCIAS

- [1]. Spiegel E., McArthur N., “La nueva era del cambio energético. Opciones para impulsar el futuro del planeta”. Editorial McGraw Hill, 2010.
- [2]. Demirtas O., “Evaluating the Best Renewable Energy Technology for Sustainable Energy Planning”. *International Journal of Energy Economics and Policy*. Vol. 3, Special Issue, 2013, pp.23-33.
- [3]. 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).
- [4]. Wimpler 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.
- [5]. Department for communities and local government. Multi-criteria analysis: a manual. Communities and Local Government Publications (2009) [Online]. Disponible: www.communities.gov.uk.
- [6]. Harris, R. "Introduction to Decision Making". Virtual Salt. [Online]. Junio 2012. Disponible: <http://www.virtualsalt.com/crebook5.htm>.
- [7]. Ishizaka A., Nemery P., "Multi-Criteria Decision Analysis. Methods and Software". Wiley and Sons. First Edition. 2013.
- [8]. Velasquez M., Hester P., "An Analysis of Multi-Criteria Decision Making Methods". *International Journal of Operations Research*, Vol. 10, No. 2, 56-66 (2013).
- [9]. Saaty T.L., "Decision making with the analytic hierarchy process", *Int. J. Services Sciences*, Vol. 1, No. 1, 2008.
- [10]. 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.
- [11]. 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.
- [12]. 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.
- [13]. 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.
- [14]. 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.
- [15]. Ferry R., Monoain E., "A field guide to renewable energy technologies. Land art generator initiative". 1st Edition. February 2012. Disponible en: www.landartgenerator.org.
- [16]. U.S. Department of Energy: 2012 "Renewable Energy Data Book". 2013.
- [17]. Agfan N., Carvalho M., "Multi-criteria assessment of new and renewable energy power plants". *Elsevier Energy*, 27, 2002. 739-775.
- [18]. Ghaderi S.F., Tanha R., Karimi A., "Capacity planning for fossil fuel and renewable energy resources power plants". University of Tehran. 2008.
- [19]. 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.
- [20]. 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.