



Técnicas Multicriterio Híbridas para la Selección de Proyectos Renovables Eólicos

Hybrid Multicriteria Techniques for the Selection of Wind Renewable Projects

Técnicas híbridas multicritério para a seleção de projetos eólicos renováveis

Ángel Eugenio Infante- Haynes^I

haynes@uho.edu.cu

<https://orcid.org/0000-0002-6462-5339>

Orlando Belete-Fuentes^{II}

orlandobelette@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-2491-8030>

Hernán Luis Castillo García^{IV}

hernancastil@yahoo.es

<https://orcid.org/0000-0002-5706-0130>

Goering Octavio Zambrano Cárdenas^{VI}

goering.zambrano@epoch.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0001-6975-8539>

Fabian Ricardo Ojeda Pardo^{III}

fabian.ojeda@epoch.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0003-3192-5084>

Ernesto Reyes Céspedes^V

ernesto141114@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-8003-3619>

Juan Diego Varela Rodríguez^{VII}

juan.varela@epoch.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-9689-5624>

Correspondencia: haynes@uho.edu.cu

Ciencias técnicas y aplicadas

Artículo de investigación

***Recibido:** 20 de diciembre de 2020 ***Aceptado:** 09 de enero de 2021 * **Publicado:** 01 de febrero de 2021

- I. Máster CSAD/CAN, Profesor Auxiliar, Universidad de Holguín, Via Guardalavaca, Holguin, Cuba.
- II. Doctor en Ciencias Técnicas por la Universidad de Moa, Holguin, Cuba.
- III. Ingeniero en Minas, Máster en Metalurgia, por la Universidad de Moa, Docente de la carrera de Ingeniería de Minas, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Macas, Morona Santiago, Ecuador.
- IV. Máster en Ingeniería Ambiental y Seguridad Industrial, Universidad Nacional de Loja (UNL), La Argelia, Loja, Ecuador.
- V. Ingeniero en Minas, Máster en Topografía Minera, Reparto Caribe, Moa, Cuba.
- VI. Magister en Agroindustrias mención en la Calidad y Seguridad Alimentaria, Docente de las Carreras: Ingeniería en Zootecnia y Ambiental, Escuela Politécnica Superior de Chimborazo, Macas, Morona Santiago, Ecuador.
- VII. Máster en Dirección de Operaciones y Seguridad Industrial, Docente de la Carrera de Ingeniería de Minas, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Macas, Morona Santiago, Ecuador.

Resumen

En el presente trabajo se realizó con el objetivo de disminuir o eliminar la incertidumbre de los juicios de experto y buscar mayor robustez a la solución del problema combinando dos métodos, que están dentro de los más utilizados en la literatura científica para un sinnúmero de soluciones de problemas. Se utilizaron técnicas multicriterios híbridas, método Análisis Jerárquico de Procesos (AHP) apoyado con la herramienta informática Expert Choice y el método o Técnica de Ordenación de Preferencia por Similitud a la Solución Ideal (TOPSIS). Como resultados se obtuvo un procedimiento para seleccionar proyectos renovables eólicos, aplicando técnicas multicriterio híbridas, lo que permitió disminuir o eliminar la incertidumbre de los juicios de experto y buscar mayor robustez a la solución de problemas.

Palabras claves: energía renovable; técnicas multicriterio híbridas; método Análisis Jerárquico de Procesos (AHP); método Topsis.

Abstract

In the present work, it was carried out with the objective of reducing or eliminating the uncertainty of the expert judgments and seeking greater robustness to the solution of the problem by combining two methods, which are among the most used in the scientific literature for countless solutions of problems. Hybrid multi-criteria techniques were used, the Hierarchical Process Analysis (AHP) method supported with the Expert Choice computer tool and the method or Ordering Technique of Preference by Similarity to the Ideal Solution (TOPSIS). As a result, a procedure was obtained to select wind renewable projects, applying hybrid multicriteria techniques, which made it possible to reduce or eliminate the uncertainty of expert judgments and to seek greater robustness in solving problems.

Keywords: renewable energy; hybrid multi-criteria techniques; Hierarchical Process Analysis (AHP) method; Topsis method.

Resumo

No presente trabalho, ele foi realizado com o objetivo de reduzir ou eliminar a incerteza dos julgamentos periciais e buscar maior robustez à solução do problema por meio da combinação de dois métodos, que estão entre os mais utilizados na literatura científica por inúmeras soluções. de

problemas. Foram utilizadas técnicas híbridas multicritério, o método Hierarchical Process Analysis (AHP) apoiado na ferramenta computacional Expert Choice e o método Ordering Technique of Preference by Similarity to the Ideal Solution (TOPSIS). Como resultado, foi obtido um procedimento de seleção de projetos eólicos renováveis, aplicando técnicas híbridas multicritério, o que permitiu reduzir ou eliminar a incerteza dos julgamentos dos especialistas e buscar maior robustez na resolução de problemas.

Palavras-chave: Energia renovável; técnicas híbridas multicritério; Método de Análise Hierárquica de Processos (AHP); Método Topsis

Introducción

Desde tiempo remoto, el tema de la ayuda a la toma de decisión ha inspirado a grandes pensadores, tales como Aristóteles, Platón y Tomas Aquinos, entre otros, a reflexionar acerca de este suceso que forma parte de la vida cotidiana de los humanos ((Figueira, Mousseau, & Roy, 2005)). La primera consideración de los conceptos básicos del Análisis de Decisión Multiatributo como tal, se producen en la década de los sesenta. A partir de este momento, se individualiza dicha metodología, dotándola de su propia terminología y tomando importancia real. Gracias a este hecho, aparecen diversos modelos que hoy son considerados clásicos, como son: la Programación por Metas (1961), el Método Interactivo STEP (1969) o el Método Electre (1968).

Otra nueva vertiente que aborda el problema de toma de decisión multicriterio es la basada en el empleo de programación lineal. Está fue desarrollada por Harold William Kuhn y Albert William Tucker (1925), mediante el concepto de vector máximo, que permitió a la optimización multiatributo convertirse en una disciplina propia (Barba-Romero y Pomerol 1997). La primera reunión científica dedicada explícitamente a la metodología multiatributo, tuvo lugar durante la celebración del VIII Congreso de Programación Matemática, en el La Haya en 1970.

En esta convención resultaron como triunfadoras las propuestas llevadas a cabo por (Roy, 1990) así como los métodos multicriterio interactivos desarrollados por Benayoun, Tergny y Geoffrion (Barba-Romero & Pomerol, 1997). En 1972 en la Universidad de Columbia, (Hannan, 1981) organizaron la “First International Conference on Multiple Criteria Decision Making”, una nueva convención sobre las metodologías de Toma de Decisión Multiatributo donde se presentó la investigación sobre (MULTICRITERIO, DE, & KUHNIANA, 2006); hasta consagrados científicos como (MULTICRITERIO et al., 2006). Gracias a este congreso, los estudios sobre la

problemática de métodos multiatributo se constituyeron como ciencia expresamente, hecho que queda expuesto mediante la publicación de las actas del congreso en 1973, por (Zeleny, 1973a, 1973b).

Es durante esta serie de conferencias cuando se acuerda la formación del “Special Interest Group on Multiple Criteria Decision Making”. (Barba-Romero Casillas & Pomerol, 1997) (Barba-Romero & Pomerol, 1997).

(Llewellyn, Boon, & Lewthwaite, 2018) afirman que los métodos de ayuda a la toma de decisión no buscan la solución óptima de un problema, pues en la realidad es común que no exista una alternativa ideal. Por ello trataremos de buscar, según los dos grandes grupos de metodologías, la solución que mejor respuesta proporcione al problema planteado.

La Toma de decisión multiatributo (MADM), enfocada a problemas en los cuales el número de alternativas se encuentra fijado, con lo cual el decisor únicamente debe seleccionar, clasificar u ordenar las diferentes alternativas. En esta categoría podemos encontrar los métodos con solución a priori y los métodos interactivos.

La Toma de decisión multiobjeto (MODM), es una variante de los procesos de toma de decisión de las alternativas, en la cual no están definidas al inicio del proceso, con lo que el decisor busca obtener o diseñar la “mejor” alternativa dentro de las limitaciones con los recursos disponibles. Estaremos ante un problema multiobjetivo en el caso de que se presenten infinitas soluciones alternativas, es decir tendremos un problema continuo de naturaleza infinita, que será resuelto por medio de métodos de optimización para encontrar un conjunto de soluciones eficientes, no dominadas u óptimas.

Según (Velazquez, Claudio, & Ravindran, 2010), para poder aplicar metodologías multiatributo debemos contar con un problema formado por al menos dos criterios de decisión o atributos, pudiendo estos estar enfrentados, y al menos dos alternativas que puedan ser valoradas por los atributos impuestos.

- **Alternativas:** posibles soluciones al problema de decisión, entre las cuales el decisor puede elegir.
- **Atributos o Criterios:** características, rasgos, cualidades, o parámetros que describen cada una de las alternativas. El número de atributos que describe las alternativas será elegido por el decisor o grupo de decisión. Estos pueden ser valorados de dos formas:

cuantitativamente, si tenemos evaluaciones numéricas y cualitativamente, sino existe unidad de medida, siendo la medida subjetiva.

- **Pesos:** parámetros que permiten reflejar las preferencias del decisor entre atributos.
- **Objetivo o Meta:** delimita el deseo que se quiere satisfacer, indicando las direcciones de mejora según las preferencias del conjunto decisor. La alternativa resultante del proceso cumplirá los atributos establecidos.

Es por eso que el objetivo de esta investigación consiste en disminuir o eliminar la incertidumbre de los juicios de experto y buscar mayor robustez a la solución del problema combinando dos métodos, que están dentro de los más utilizados en la literatura científica para un sinnúmero de soluciones de problemas.

Materiales y métodos

Definición de los criterios

En este paso señalaremos las pautas o los juicios que resultarán clave para alcanzar la solución al problema planteado en el paso anterior. Dentro de este abanico de criterios planteados para llegar hasta la meta es necesario conocer cuales han de ser tenidos en cuenta y cuales podrán ser omitidos, por resultar irrelevantes a la hora de tomar la decisión final (Robbins et al., 1994).

El conjunto de criterios que nos permita realizar el análisis del problema para plantearle una solución al decisor deber tener las siguientes propiedades:

- **Compleitud:** cuando un problema o planteamiento se encuentra completamente representado o descrito en todos los aspectos y posibilidades gracias a los atributos que el decisor ha seccionado.
- **Operatividad:** el decisor debe ser capaz de entender las implicaciones de las alternativas y que estos criterios resulten útiles para ayudar al decisor a encontrar la mejor alternativa.
- **Descomponibilidad:** los criterios deben atender a un apartado diferente del problema global de forma independiente.
- **No redundancia:** los criterios no deben representar las mismas características, con el fin de no ocasionar problemas de duplicidad en el método.

- **Minimalidad:** de este modo podemos limitar al mínimo el número de criterios a emplear para lograr la descripción de un problema. Debemos excluir aquellos criterios que no aporten ninguna información al sistema.

Selección de acciones viables

En el momento en el cual las alternativas han sido establecidas, presentadas y evaluadas por el decisor que ha de tomar la decisión en según los criterios establecidos y jerarquizados, pasamos a elegir una única alternativa como solución al problema.

Esta alternativa supondrá el alcance de la meta del problema planteado, y representará la mejor de las propuestas planteadas según los criterios y el método multiatributo seleccionado para el procedimiento establecido.

Según Métodos híbridos de toma de decisiones con múltiples criterios: una revisión de las aplicaciones para cuestiones de sostenibilidad (Zavadskas, Govindan, Antucheviciene, & Turskis, 2016).

Seleccionar un método apropiado es un desafío continuo en cada situación que requiere una decisión. Los diferentes métodos MCDM a veces producen diferentes clasificaciones de alternativas. Ningún método puede considerarse mejor ni para un general ni para un problema particular (Saaty & Ergu, 2015). En consecuencia, se recomienda utilizar más de un método MCDM e integrar los resultados para la toma de decisiones finales.

- El orden de clasificación y la decisión final pueden variar significativamente según la importancia de cada criterio en el problema analizado. Hay estudios disponibles sin ponderación cuando se asigna la misma importancia a todos los criterios considerados (Ibáñez-Forés et al., 2014). El enfoque híbrido sugiere resolver dos tareas simultáneamente, como determinar los pesos y valores de los criterios e integrar ellos al valor de la función de utilidad de atributos múltiples. Además, integrando criterios ponderaciones, determinadas mediante el uso de diferentes métodos de ponderación objetiva y subjetiva, ayuda a reflejar más cuidadosamente las preferencias de las partes interesadas.
- Los modelos de toma de decisiones deben estar lo más cerca posible de los problemas de la vida real. La confusión en el proceso de toma de decisiones a menudo proviene de un

contexto de gestión de incertidumbre, cuando las ambigüedades y las dificultades hacen que se tome una decisión inadecuada.

En la actualidad existen multitud de métodos desarrollados entorno a la toma de decisión multatributo, por ello resulta necesario realizar una clasificación de los mismos. En este caso hemos optado por basarnos en la información que tiene disponible el decisor, pues como hemos comentado ahora juega un papel clave. Esta ordenación fue desarrollada por (Chen & Hwong, 1992), y en ella podemos distinguir entre información ordinal, cardinal o estandarizada, según se muestra a continuación (tabla 1) nos resultará una forma cómoda de implantar los métodos estudiados.

Tabla 1: Métodos multicriterio

Métodos Multiatributo			
Sin información	Información sobre el entorno	Información en atributo	
Dominancia	Pesimista----Maximin Optimista ----Maximax	Nivel estándar	Método Conjuntivo, Método Disyuntivo.
	Ordinal		Método lexicográfico, Eliminación por aspectos (EBA) QUALIFLEX.
	Cardinal		Suma ponderada, Producto ponderado, Asignación lineal. ELECTRE, PROMETHEE, Topsis, Jerarquía Analítica (AHP).

En este trabajo, se emplearán los métodos multicriterio con información de los atributos de tipo cardinal, en específico los métodos Jerarquía Analítica (AHP) y el método TOPSIS.

El método TOPSIS, fue creado por (Yoon & Hwang, 1981), que traducido del inglés significa Técnicas para Ordenar las Preferencias por Similitud a la Solución Ideal y luego el Análisis Jerárquicos de Procesos (AHP), estos dos últimos son los que se utilizaron en este trabajo, y dentro de las técnicas híbridas se encuentra en primer lugar las técnicas Difusa-Topsis por lo que se demuestra que este último es un método muy robusto, confiables, aunque muy complejo en su implementación.

La base del método TOPSIS por tanto radica en la elección de la alternativa más próxima a la solución ideal positiva y más lejana a la solución ideal negativa. Esto es si hablamos en términos

de distancia, la alternativa elegida será la que menor distancia tenga con la solución ideal positiva y mayor distancia con la solución ideal negativa. Entendemos como solución ideal aquella que represente una colección de puntuaciones o valores en todos los criterios considerados en la decisión, aun siendo este valor inalcanzable.

Fue desarrollado por Hwang y Yoon en 1981 y mejorada por los propios autores en 1987 y 1992, también trabajaron Zeleny, (García-Cascales & Lamata, 2010) y entre otros.

Este método se desarrolló como una alternativa al método Elimination and Choice Translating Reality (ELECTRE S.D. (Pohekar & Ramachandran, 2004) y se ha extendido rápidamente como una alternativa para la solución de problemas de gestión en diversas áreas como la logística de la cadena de suministro, marketing, medio ambiente, ingeniería química, redes inteligentes, energías renovables, entre otros ((Strantzali & Aravossis, 2016); (Sianaki, Masoum, & Potdar, 2018); (Naqvi et al., 2019)). Entre las características que le brindan preferencia al método TOPSIS respecto a otros enfoques similares se encuentran ((Yoon & Hwang, 1981)

Su idoneidad para mantener un gran número de atributos y alternativas, la cantidad de parámetros de entrada subjetivos es mínima y limitada, posee consistencia comparativa en las alternativas de clasificación.

En el estado del arte antes referenciado, la mayoría de los autores que tratan la energía renovable coinciden con un grupo de atributos que serán evaluado por el autor, principalmente aquellos que pertenecen al triángulo de la sostenibilidad y están agrupados en las dimensiones económicas, ambiental y social, otros se encuentran enmarcado en las dimensiones que conforman el ciclo de vida de la energía eólica, que integran además las dimensiones técnicas, estratégicas y riesgo.

Para nuestro modelo, como habíamos dichos utilizaremos los pesos calculado por el AHP y luego serán añadidos al modelo TOPSIS, que se plantea a continuación:

Sean las alternativas $A_i, i=1,2,\dots,m$, los criterios $C_j, j=1,2,\dots,n$, los pesos de los criterios W_j y una matriz de decisión con $X_{ij}=U_j(A_{ij}), \forall ij$. Donde U es la función utilidad del decisor, operando sobre la base de que todo los criterios sean a maximizar/minimizar según se esten considerando ganancias o costos, respectivamente.

Se denomina punto ideal positivo en R al punto A^+ , siendo la mejor opción posible, y A^- , la solución ideal negativa en R , siendo la peor opción posible. Un decisor racional siempre elegiría

A^+ , y si este valor no se correspondiera con alguna de las alternativas, elegiría la que estuviera más cercana a ella, por tanto, la matriz de decisión quedaría de la siguiente forma, tabla 2:

Tabla 2: Matriz de decisión

	w1	w2	wn
	C1	C2	Cn
A1	X11	X12	X1n
A2	X21	X22	X2n
...
Am	Xm1	Xm2	...	Xmn

Dentro de las características principales de este método están:

- La necesidad que una alternativa se ubique a la menor distancia, respecto al punto ideal, representando de esta forma lo mejor (ideal positiva, o simplemente ideal)
- Y al mismo tiempo a la mayor distancia del punto anti-ideal, que representa lo peor (Ideal negativa o anti-ideal).

Teniendo en cuenta que la alternativa Ideal, no necesariamente observada, se determina a partir de un conjunto de valores, del conjunto de alternativas, siendo todo lo contrario para la anti-ideal, que entonces, estaría dentro de los peores valores del conjunto de alternativas.

Normalización

Antes de comenzar con la aplicación de los métodos de toma de decisión que se han implementado en este trabajo, en algunos casos, debemos realizar la normalización de los datos introducidos por el decisor.

Para problemas cuyo objetivo es la toma de decisión, es necesario disponer de una herramienta que permita transformar los valores de los diferentes criterios en unidades homogéneas con el objetivo de convertirlos en valores comparables y operables aritméticamente entre sí.

La normalización de nuestra matriz presentará las siguientes ventajas:

- Permite la selección de la alternativa más adecuada, pues dado que los criterios se expresan en diferentes magnitudes se ve complicada esta elección si no se incurre en este proceso.
- Al emplear una escala fija y acotada podremos definir niveles de referencia que faciliten la toma de decisión, así la comparación de alternativas es inmediata.

El proceso de normalización puede realizarse según tres modalidades:

- Sin cambio de magnitud, como por ejemplo el caso de mediciones de temperaturas realizadas en diversas escalas termométricas y posteriormente representadas en una común.
- Existen diversas técnicas estadísticas para realizar la normalización de datos.

Según % del máximo

Con este procedimiento obtendremos una normalización lineal pura. Para la aplicación del mismo, debemos realizar la división de cada valoración de las alternativas para un atributo entre el valor de la alternativa mejor puntuada para ese criterio. Si lo expresamos matemáticamente tendremos para cada valor normalizado lo siguiente:

$$n_{ij} = x_{ij} / (\text{Max } x_{ij}) \quad (1)$$

Los valores homogeneizados para este tipo se encontrarán dentro del intervalo [0,1] conservando la proporcionalidad, y observaremos cierta tendencia a la concentración de valores.

Según % del total

Al igual que para el método anterior, este caso se corresponde con una linealización pura, la forma de normalizar los datos, se realiza mediante la división de cada valoración para las alternativas de estudio, entre la suma de todas las valoraciones de un criterio, es decir:

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum x_{ij}} \quad (2)$$

Los datos conservarán la proporcionalidad dentro del intervalo [0,1], y aumenta la tendencia a la concentración de valores respecto al caso anterior.

Según % del rango

A diferencia que el primer y segundo método, en este se producirá la normalización mediante una linealización con ordenada en el origen. Ahora debemos realizar fracción entre la diferencia de la valoración de cada alternativa para un criterio menos el valor mínimo alcanzado por las valoraciones en ese criterio, entre la máxima diferencia entre todas las estimaciones dadas.

Matemáticamente se muestra:

$$n_{ij} = \frac{x_{ij} - \text{Min } x_{ij}}{\text{Max } x_{ij} - \text{Min } x_{ij}} \quad (3)$$

La normalización en este caso no conserva la proporcionalidad, pues los datos se adaptan a la concentración media de los valores. Los datos se siguen manteniendo en el intervalo [0,1].

Según Vector Unitario

El último de los posibles tipos de normalización desarrollados en el presente Trabajo Fin de Grado, realiza la homogeneización mediante una linealización pura. Este se aplica dividiendo cada dato de la matriz entre el módulo generado por todas las valoraciones dadas para un criterio. El módulo de dicho vector se calcula mediante la raíz de la suma de los cuadrados de cada término. Si lo expresamos matemáticamente tenemos:

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum x_{ij}^2}} \quad (4)$$

Como los anteriores, los valores obtenidos se encuentran en un rango [0,1] y conservan la proporcionalidad, aunque también muestran alta tendencia a la concentración de valores.

En este trabajo utilizamos esta última técnica: Vector unitario.

Método AHP: Introducción y características

El siguiente método formulado para la resolución de problemas multiatributo se enmarca dentro de los métodos eigen pesos, o métodos de asignación de pesos basados en el cálculo del autovector dominante de una matriz de comparaciones binarias de los criterios, en este caso. Aunque el nacimiento de esta tipología de métodos multiatributo se asocia al método DARE, el cual no es motivo de estudio de este proyecto, en la actualidad el principal representante de los métodos eigen pesos es el AHP o Proceso Analítico Jerárquico.

La propuesta del método AHP parece de la mano del profesor Thomas L. Saaty, entorno a inicios de los años ochenta. Saaty propone este método como una teoría general sobre juicios y valoraciones, basado en escalas de razón y redes, en las cuales cobra gran peso la jerarquización de en las relaciones de objetos y propósitos. Por lo que con este método su autor busca obtener a partir de un problema multidimensional, o multicriterio, un problema que cuente con una escala unidimensional, o escala de prioridades, que represente unas salidas globales al mismo.

Este método, facilita la toma de decisiones en problemas en los cuales se involucran múltiples criterios, Su simplicidad y su poder han sido evidenciados en los cientos de aplicaciones en las

cuales se han obtenidos importantes resultados y en la actualidad, es la base de muchos paquetes de software diseñados para los procesos de tomas de decisiones complejas. Además, ha sido adoptado por numerosas compañías para el soporte de los procesos de toma de decisiones complejas e importantes, es un método matemático creado para evaluar alternativas cuando se tienen en consideración varios criterios y está basado en el principio que la experiencia y el conocimiento de los actores son tan importantes como los datos utilizados en el proceso.

Entre sus principales ventajas se pueden comentar: (Gómez & Cabrera, 2008) Se puede analizar el efecto de los cambios en un nivel superior sobre el nivel inferior, da información sobre el sistema y permite una vista panorámica de los actores, sus objetivos y propósitos, permite flexibilidad para encarar cambios en los elementos de manera que no afecten la estructura total

El AHP utiliza comparaciones entre pares de elementos, construyendo matrices a partir de estas comparaciones, y usando elementos del álgebra matricial para establecer prioridades entre los elementos de un nivel, con respecto a un elemento del nivel inmediatamente superior, esto podrá verse con mayor claridad en el desarrollo del este artículo.

Procedimiento propuesto por Yoon, K., & Hwang, C. L. (1981) para el método TOPSIS y adaptados por los autores:

- Definición de la matriz de decisión: En este punto, se debe definir el conjunto de alternativas, conjunto de criterios y sus pesos, valor de cada atributo en cada alternativa, en nuestros casos empleamos los pesos calculados por el método AHP, resultados de las encuestas de los expertos
- Normalización de la matriz de decisión: Para esto se aplicó la normalización a través del vector unitario.
- Calcular la matriz normalizada ponderada: En este paso se calcula la matriz normalizada ponderada, multiplicando en columnas por el peso de cada atributo, como se muestra en el modelo matemático.
- Determinación de la alternativa ideal positiva (SIP) y la alternativa anti-ideal o ideal negativa (SIN), seleccionando de entre los valores dado para cada atributo, en cada alternativa, el mejor valor para cada alternativa ideal y el peor para la alternativa anti-ideal, y el peor valor para la alternativa anti-ideal

- Cálculo de la medida de distancia o distancia euclidiana, para la alternativa ideal y la alternativa anti-ideal o Ideal negativa: medida que se resume con un vector.
- Calculo de la proximidad relativa, mejor desempeño o puntuación: Donde ya se pueda estimar la ratio.
- Ordenación de las preferencias o ranking: Se debe ordenar de mayor a menor, las ratios antes determinados.

Resultados:

Los resultados obtenidos se fundamentan en lo siguiente:

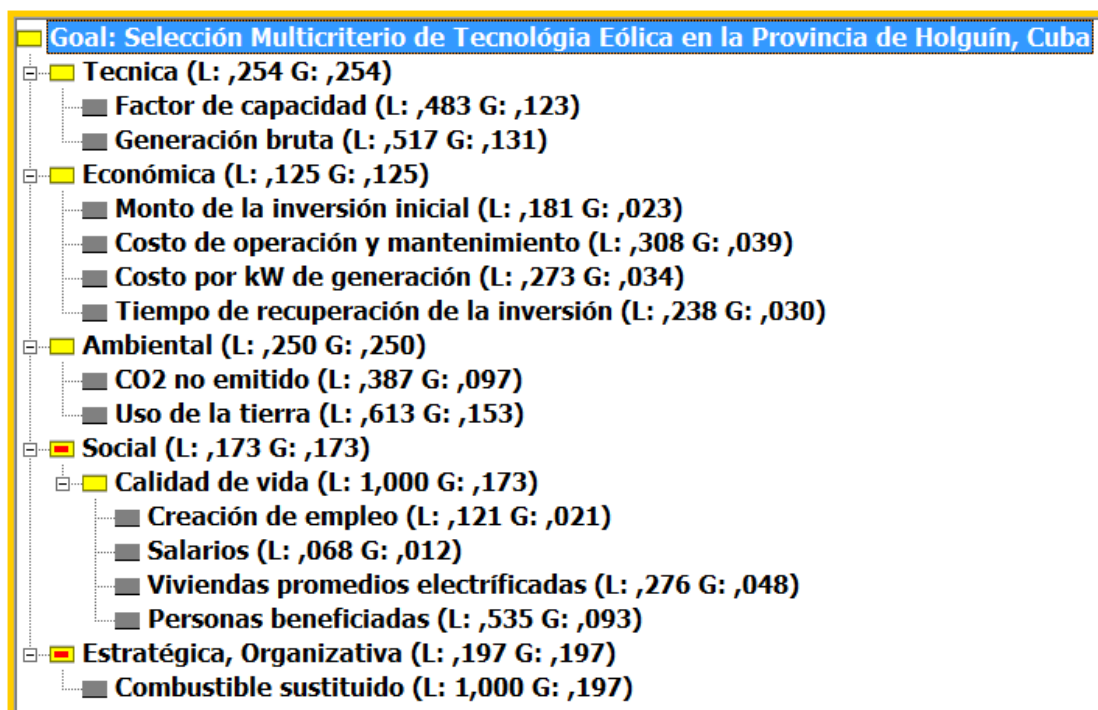
La matriz de decisión, para nuestro caso cuenta con las siguientes alternativas y atributos o criterios: dos alternativas conformadas por los Parques Eólicos Gibara 1 y Gibara 2, con las diferentes dimensiones que agrupan los 13 criterios que están referenciados en la tabla 3, de ellos a minimizar los costos de inversión, de operación y mantenimiento, costo nivelados o de producción, el periodo de recuperación de la inversión y el uso de la tierra, de otro lado los atributos a maximizar serían factor de capacidad, generación bruta, CO₂, no emitido, calidad de vida, vivienda electrificada, personas beneficiadas con el proyecto, y finalmente la cantidad de combustible que se sustituye con esta planta renovable. Los pesos aquí relacionados fueron el resultado de modelos aportados por los autores en artículos anteriores, para llegar a ellos se utilizó el método Análisis Jerárquicos de Procesos (AHP) que se muestra en la fig. 3.

Tabla 3: Pesos calculados por los autores, mediante el método AHP.

Dimensiones/Indicadores		Pesos de los Criterios	Alternativas a evaluar		Función Costo/Beneficio
Dimensiones	Indicadores		Gibara 1	Gibara 2	
Técnicas	Factor Capacidad, %	0,123	28,5	25,8	Max
	Generación neta MWh/años	0,131	8994,2	7907,2	Max
Económicas	Costo inversión MMT	0,023	9500,5	11762,3	Min
	Costo de operación y mantenimiento (\$)	0,039	2978.8	1630,55	Min
	Costo nivelado energía cuc/cup kW	0,034	0,269	0,344	Min
	Periodo Rep. Inv, años CUC/CUP	0,030	8	10	Min
Ambiental	No emisión CO ₂ Ton/años/MW	0,097	69791,3	49051,1	Max

	Uso de la tierra (Extensión en km ² /kW)	0,153	0,637	0,562	Min	
Sociales	Calidad de vida	Creación empleo (u)	0,121	6	5	Max
		Salarios (\$)	0,012	5000	4500	Max
	Viviendas promedias electrificadas(u)		0,048	1499	1176	Max
	Personas beneficiadas núcleos (3)/MW		0,093	4499	3529	Max
Estratégico Organizativo	Combustible Sust. ton/años	0,197	22302	20438	Max	

Figura 3: Método Análisis Jerárquicos de Procesos (AHP) utilizado por los autores.



Teniendo toda la información aportada por la fig. 3, se procedió a aplicar el método TOPSI, obteniendo los siguientes resultados:

En la tabla 4 se aprecia cuáles serían las preferencias a optimizar, teniendo en cuenta criterios de costo beneficios, por ejemplo el factor de capacidad es beneficioso que sea lo mayor posible, dado que él depende la eficiencia de la planta, así mismo pasa con la generación, más generación más personas beneficiadas por las viviendas que serían electrificadas, también incidiría en menos

emisiones de CO₂ al ambiente lo cual también es beneficioso, como lo es el aumento del salario de los trabajadores y todo esto redundaría en mayor cantidad de combustibles que el país tendrías que importar, con el consiguiente ahorro de divisa de la cual no se dispone en grandes cantidades. Por otro lado, también podemos ver los criterios tipo costos, los cuales serían preciso minimizar, tal es el caso de los costos de inversión, operación y mantenimiento y los costos de kW de generación, en busca de la eficiencia de la planta, con la obtención de las utilidades por la venta de energía (tabla 4).

Tabla 4: Criterios tipo costos y beneficio.

Valoración	Factor Capacidad	Generación Bruta	Monto Inversión	Costo O&M	Costo Kw	T.rec. Inv	Co ₂ N.em	Uso Tierra	Empleo	Salario	Viviendas Electrificadas.	Personas Beneficiadas.	Combust. Sustituido
	Max	Max	Min	Min	Min	Min	Max	Min	Max	Max	Max	Max	Max
Parque Gibara 1	28,5	8994,3	9500528	2978,9	0,269	8	69791	0,637	6	5000	1499,6	4498,8	2230
Parque Gibara 2	25,8	7907,2	11762296	1630,5	0,344	10	49051	0,562	5	5000	1176,5	3529,5	2043

En la tabla 5 se pueden apreciar los pesos obtenidos por el método Jerárquico de Análisis de Procesos y obtenido el softwares expert choice, que nos servirán para el proceso de ponderación de cada criterio, el cual se realiza luego de la normalización de la matriz, por el método del vector propio antes descrito, el resultado de estos pasos termina con la determinación de la alternativa ideal positiva (SIP) y la alternativa anti-ideal o ideal negativa (SIN, teniendo siempre en cuenta si es un criterio a maximizar o minimizar, pues si es un criterio tipo costo ese tomaría el menor valor como ideal, pero si es beneficio entonces se tomaría el mayor valor como alternativa ideal, para la anti ideal es todo lo contrario.

Tabla 5: Pesos ponderados obtenidos por el método Jerárquico de Análisis de Procesos y el software expert choice.

Topsis	Factor Cap.	Generación Bruta	Monto Inv	Costo O&M	Costo kW	T.Rec. Inv	CO ₂ N.Em	Uso Tierra	Empleo	Salario	Viviendas Elect.	Personas B.	Combust. Sust
Pesos	0,123	0,131	0,023	0,039	0,034	0,03	0,097	0,153	0,021	0,012	0,048	0,093	0,197
Pesos ponderados	0,1228	0,1308	0,0229	0,0389	0,0339	0,0299	0,0969	0,1528	0,0209	0,0119	0,0479	0,0929	0,1968
Vi +	0,0910	0,0982	0,0178	0,0341	0,0267	0,0234	0,0792	0,1146	0,0161	0,0084	0,0377	0,0730	0,1451
Vi -	0,0824	0,0864	0,0144	0,0187	0,0209	0,0187	0,0557	0,1011	0,0134	0,0084	0,0295	0,0573	0,1329

Luego en la tabla 6 se muestra la distancia euclidiana o la distancia al punto ideal y anti-ideal para cada alternativa, aquí se puede apreciar como la alternativa 1 tiene menor posición con respecto al punto ideal y la 2 está más distantes, todo esto conlleva a que el cálculo de la proximidad relativa de la alternativa 1 sea mayor que la alternativa 2.

Tabla 6: Distancia euclidiana para cada alternativa

$d_i +$	$d_i -$	P_i
0,0205	0,0361	0,6378
0,0361	0,0205	0,3621

Por último, en la tabla 7 se elabora el orden de elección, donde la alternativa 1 llegó más cerca al punto ideal y más lejos al punto anti ideal, por lo que llega a ser la mejor alternativa a escoger.

Tabla 7: Orden de elección

Orden de elección	Elección
P. Gibara 1	0,6378
P. Gibara 2	0,3621

Conclusiones

La investigación realizada permitió elaborar un procedimiento para seleccionar proyectos renovables eólicos aplicando técnicas multicriterio híbridas, para disminuir o eliminar la incertidumbre de los juicios de experto y buscar mayor robustez a la solución de problemas. Se elaboró una orden de elección, que permitió obtener la mejor alternativa a escoger, donde la alternativa 1 llegó más cerca al punto ideal y más lejos al punto anti ideal.

Referencias

1. Barba-Romero Casillas, S., & Pomerol, J. (1997). Decisiones multicriterio. Fundamentos teóricos y utilización práctica. Colección de economía. Madrid. Universidad de Alcalá.
2. Barba-Romero, S., & Pomerol, J.-C. (1997). Decisiones multicriterio: fundamentos teóricos y utilización práctica: Universidad de Alcalá, Servicio de Publicaciones.

3. Behzadian, M., Otaghsara, S. K., Yazdani, M., & Ignatius, J. (2012). A state-of the-art survey of TOPSIS applications. *Expert Systems with Applications*, 39(17), 13051-13069.
4. Chen, S., & Hwong, C. (1992). Fuzzy multiple attribute decision-making: methods and applications. книга.
5. Figueira, J., Mousseau, V., & Roy, B. (2005). ELECTRE methods Multiple criteria decision analysis: State of the art surveys (pp. 133-153): Springer.
6. García-Cascales, M. S., & Lamata, M. T. (2010). Nueva aproximación al método tópsis difuso con etiquetas lingüísticas. Paper presented at the ESTYLF, XV Congreso Español sobre Tecnologías y Lógica Fuzzy.
7. Gómez, J. C. O., & Cabrera, J. P. O. (2008). El proceso de análisis jerárquico (AHP) y la toma de decisiones multicriterio. Ejemplo de aplicación. *Scientia et technica*, 2(39).
8. Hannan, E. L. (1981). Linear programming with multiple fuzzy goals. *Fuzzy sets and systems*, 6(3), 235-248.
9. Llewellyn, L., Boon, H., & Lewthwaite, B. (2018). Effective behaviour management strategies for australian aboriginal and torres strait islander students: a literature review. *Australian Journal of Teacher Education*, 43.
10. Multicriterio, T. D. L. D., DE, U. E., & Kuhniana, R. C. (2006). Artículos de investigación operativa. Editores Asociados: Estadística: Miguel Angel Gómez Villegas ma_gv@ mat. ucm. es Universidad Complutense de Madrid, 22(4), 9.
11. Naqvi, S. R., Tariq, R., Hameed, Z., Ali, I., Naqvi, M., Chen, W.-H., . . . Taqvi, S. A. (2019). Pyrolysis of high ash sewage sludge: Kinetics and thermodynamic analysis using Coats-Redfern method. *Renewable energy*, 131, 854-860.
12. Pohekar, S. D., & Ramachandran, M. (2004). Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning—A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 8(4), 365-381.
13. Robbins, T. W., James, M., Owen, A. M., Sahakian, B. J., McInnes, L., & Rabbitt, P. (1994). Cambridge Neuropsychological Test Automated Battery (CANTAB): a factor analytic study of a large sample of normal elderly volunteers. *Dementia and geriatric cognitive disorders*, 5(5), 266-281.
14. Roy, B. (1990). The outranking approach and the foundations of ELECTRE methods Readings in multiple criteria decision aid (pp. 155-183): Springer.

15. Sianaki, O. A., Masoum, M. A., & Potdar, V. (2018). A decision support algorithm for assessing the engagement of a demand response program in the industrial sector of the smart grid. *Computers & Industrial Engineering*, 115, 123-137.
16. Strantzali, E., & Aravossis, K. (2016). Decision making in renewable energy investments: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 55, 885-898.
17. Velazquez, M. A., Claudio, D., & Ravindran, A. R. (2010). Experiments in multiple criteria selection problems with multiple decision makers. *International journal of operational research*, 7(4), 413-428.
18. Yoon, K., & Hwang, C. L. (1981). TOPSIS (technique for order preference by similarity to ideal solution)—a multiple attribute decision making, w: *Multiple attribute decision making—methods and applications, a state-of-the-art survey*. Berlin: Springer Verlag.
19. Zavadskas, E. K., Govindan, K., Antucheviciene, J., & Turskis, Z. (2016). Hybrid multiple criteria decision-making methods: A review of applications for sustainability issues. *Economic research-Ekonomska istraživanja*, 29(1), 857-887.
20. Zeleny, M. (1973a). *Compromise Programming, Multiple Criteria Decision Making*, Edited by JL Cochrane and M. Zeleny: University of South Carolina Press, Columbia, South Carolina.
21. Zeleny, M. (1973b). *A Priori and a Posteriori Goals in Macroeconomic Policy Making in Multiple Criteria Decision Making* (Cochrane JL, Zeleny, M. editors): University of South Carolina Press, Columbia.

2020 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons

Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0)

(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).