Optimización multiobjetivo para la solución de problemas complejos en la Ingeniería de Sistema.

Multi-objective optimization for the solution of complex problems in System Engineering.

Ms. C. Ángel Infante Haynes[1] Dr. C. Orlando Belette Fuentes[2]

[1] Universidad de Holguín, Cuba, ehaynes@uho.edu.cu

[2] Universidad de Holguín, Cuba, orlandobf@uho.edu.cu

RESUMEN

En este trabajo se incursionó en el conocimiento de los problemas complejos dentro de la Ingeniería de Sistemas, terminología que a pesar de no ser nueva en el ámbito científico, ha sido poco difundida en Cuba, por lo que se plantea como objetivo utilizar los métodos para encontrar los pesos de los criterios de forma objetiva, a través del método *Criteria Importance Through Intercriteria Correlation* (CRITIC), que no es más que encontrar los pesos de cada criterio, a través de la correlación entre ellos, así como también el método *Multi Objective Optimization on basis of* Ratio *Analysis (MOORA),* en su dos direcciones, primero como método compensatorio debido a que utilizas los criterios deseables e indeseables, tenidos en cuenta por el centro decisor, para obtener un ranking de mejores alternativas, luego se introducen una nueva variante, la función de agregación, un punto de referencia (ideal) para calcular la distancia Tchebycheff a este punto. Se toma como caso de estudio, la selección de mejor proyecto de desarrollo de energía eólica a desarrollar en el Oriente de Cuba, encontrándose por ambas vías el mismo resultado. (Poner resultados y conclusiones).

Palabras clave: Optimización multiobjetivo, Ingeniería de Sistema, método Critic, método MOORA

ABSTRACT

In this work, the knowledge of complex problems within Systems Engineering was explored, terminology that despite not being new in the scientific field, has been little disseminated in Cuba, so the objective is to use the methods to find the weights of the criteria objectively, through the Criteria Importance Through Intercriteria Correlation (CRITIC) method, which is nothing more than finding the weights of each criterion, through the correlation between them, as well as the Multi Objective method Optimization on basis of Ratio Analysis (MOORA), in its two directions, first as a compensatory method because you use the desirable and undesirable criteria, taken into account by the decision-making center, to obtain a ranking of better alternatives, then a new one is introduced variant, the aggregation function, an (ideal) reference point to calculate the Tchebycheff distance to this point. The selection of the best wind energy development project to be developed in the East of Cuba is taken as a case study, finding the same result in both ways. (Put results and conclusions).

Keywords: Multi-objective optimization, System Engineering, Critic method, MOORA method

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, dada la necesidad de lograr el mejor funcionamiento de los diferentes objetos que afectan la vida del hombre, ha evolucionado la teoría y práctica de los sistemas de toma de decisiones, vinculados a la ingeniería lo que ha impulsado el desarrollo de sistemas automatizados, que son estudiados por la ciencia denominada ingeniería de sistemas.

Sin lugar a dudas el estudio de los sistemas complejos a partir del aprovechamiento de la complejizacion del fenómeno es investigación de frontera (Adler, Angelopoulos et al. 1991), mientras que en el mundo real (política, economía, ingeniería, psicología, etc.) se reconoce que el todo es más que la suma de las partes y, en consecuencia, se habla de holismo, en el mundo de la Ingeniería de sistemas complejos se sabe que las partes cambian, se adaptan, evolucionan a través de múltiples espacios de posibilidades. De manera metafórica, mientras que la ciencia normal piensa que el rompecabezas logra resolverse a través de la adecuada articulación de las diferentes partes, la Ingeniería de sistemas complejos ha evidenciado que las partes del rompecabezas y el rompecabezas como un todo cambian permanentemente a medida que se va armando, y se adaptan conforme interactúan con otras piezas, con su armador, de manera amplia con el entorno; entonces ¿es posible a partir de conocimiento del estado inicial del problema en un momento determinado encontrar una solución?, ¿Que tan confiables son los pronósticos que surgen del conocimiento de las condiciones iniciales de determinadas variables que influyen en el fenómenos objeto de estudio? (Bohorquez-Chacón 2016). Los problemas complejos requieren soluciones complejas; es decir, soluciones adaptativas, inteligentes, que logren evolucionar en la misma medida en que evoluciona el problema. El reto es verdaderamente apasionante no solo por las implicaciones de los resultados, sino también por el campo de exploración que ofrece para nuevas interpretaciones y consecuentemente soluciones, de los problemas actuales que surgen de la complejidad y complejizacion de los fenómenos de la sociedad (Bohorquez Arevalo 2016).

(Simon 1972) Definió un sistema complejo (SC) como “una gran cantidad de partes que tienen muchas interacciones”. (Ashby and Goldstein 2011) formuló la Ley de la Variedad Requerida, afirmando que “Cuanto mayor sea la variedad de perturbaciones a las que tiene que hacer frente el sistema, mayor será la variedad de acciones compensatorias que debería poder realizar y mayor será el conocimiento o la inteligencia que el sistema necesitará para saber qué acción realizar en qué circunstancias

La Ingeniería de Sistemas (IG) estudia las decisiones informáticas que ayudan a los sistemas de materiales u objetos virtuales y constituye la ciencia de tomar decisiones exitosas. Muchos autores realizan investigaciones y aplicaciones en este y otros campos relacionados (Rebovich 2011) Entonces, son enfoques interdisciplinarios destinados a asegurar el comportamiento de los sistemas existentes y las características de diseñar nuevos sistemas creados por el hombre. Se centra en definir las necesidades del cliente y la funcionalidad requerida al principio del ciclo de desarrollo, documentar los requisitos y luego proceder con la síntesis del diseño y la validación del sistema mientras se considera el problema completo: operaciones, costo y cronograma, rendimiento, capacitación y soporte, prueba, fabricación, y eliminación “la aplicación formalizada del modelado para respaldar los requisitos del sistema, el diseño, el análisis, las actividades de verificación y validación que comienzan en la fase de diseño conceptual y continúan a lo largo del desarrollo y la fase posterior del ciclo de vida

Según (Candia-Véjar and González 2011) existen tres fuentes de dificultad, en primer lugar su complejidad computacional por no conocerse el algoritmo de tiempo polinomial para resolver el problema (y no se espera que tal algoritmo existan), por lo tanto, el diseño de algoritmos aproximados o heurísticos que puedan entregar buenas soluciones en tiempos razonables es crucial cuando el problema a resolver es complicado. En segundo lugar aparece por el lado de la incertidumbre en sus diferentes componentes, debido a que los sistema en el mundo real son siempre afectados por la incertidumbre y ella está presente en la mayoría o todos sus elementos, como alternativa es la llamada Optimización Difusa en donde la incertidumbre se modela usando los conceptos de conjuntos difusos y una alternativa más reciente es la Optimización

Robusta donde el objetivo es normalmente optimizar una función objetivo del peor caso. Cualquiera sea la modelación matemática usada, el modelo resultante conteniendo incertidumbre es más complejo que el modelo clásico correspondiente. Y finalmente los problemas de optimización que naturalmente consideran dos o más funciones objetivos a optimizar, es por eso que los modelos matemáticos de Optimización Multicriterio y Optimización Multiobjetivo se han desarrollado para intentar resolver estos desafiantes problemas.

METODOLOGÍA

Para la solución del problema, se aplica un importante grupo de técnicas, algoritmos y programas disponibles, en particular, el modelo de Programación Lineal y el algoritmo simplex y algoritmos de punto interior, el modelo de Programación Lineal Entera y los algoritmos Branch and Bound y Branch and Cut; estos modelos y algoritmos han resuelto, por más de 50 años, importantes problemas de optimización del mundo real. (Candia-Véjar and González 2011). Importante en este recorrido es también conocer que el método SIMUS, utiliza la programación lineal, con técnica del Simplex, dentro de una herramienta informática donde al combinarse con métodos de sobreclasificación constituyen verdaderos aportes a la toma de decisión multicriterio (MCDM).

En el proceso de ayuda a la toma de decisiones tradicionalmente se han empleado métodos clásicos, tales como programación lineal, problema de transporte, redes, los cuales tienen como carencia la no existencia de una modelación matemática que permita convertir un problema de la vida real en un modelo, donde estén involucrada las preferencia del centro decisor que serán los encargados al final del proceso de tomar la decisión, por esta razón en muchas ocasiones estos métodos carecen de seguidores para la generalización de los mismo, independientemente que puedan aplicarse en los diferentes campos de la ciencia y la tecnología, así como en las fronteras interdisciplinarias. Todo esto ha llevado a la formulación de nuevos métodos, donde se involucran además de los decisores que al final del proceso ayudan a los expertos a llegar a la modelación multicriterio (Montesino Ronquillo 2012).

En la teoría de la decisión multicriterio juega un papel fundamental el concepto de optimalidad paretiana, concepto que introdujo en 1896 el economista italiano Vilfredo Pareto, este concepto en la teoría de la decisión multicriterio se define como:

Un conjunto de soluciones es eficiente o Pareto óptimas cuando está formado por soluciones factibles, esto es, que cumplen las restricciones, tales que no existe otra solución factible que proporciona una mejora en un atributo, sin producir un empeoramiento en al menos otro de los atributos**.** Para resolver el problema, se propone el uso del método MOORA, ya que como menciona (Brauers, Zavadskas et al. 2008), este es un método que parece ser una herramienta apropiada para determinar el orden en el que debe ser seleccionadas diferentes alternativas, según un conjunto de opciones disponibles, considerando criterios ideales en conflicto. El método MOORA (Multi Objective Optimization on basis of Ratio Analysis) es creado por (Brauers and Zavadskas 2006, Prado and Ortiz 2015) y permite tomar en cuenta diversos aspectos que por sí solos no pudieran compararse, debido a la diferencia en sus unidades respectivas de medición. El método suprime dichas unidades y facilita el trato de los diferentes factores, para obtener la que es la mejor.

Según (Shao, Han et al. 2020),(Liu and Du 2020) el método se considera un método compensatorio debido a que utilizas los criterios deseables e indeseables, tenidos en cuenta por el centro decisor, para obtener un ranking de mejores alternativas.
El método en cuestión tiene dos componentes, primero el radio del sistema, más tarde Brauer y Zavdskas (2006), introducen una nueva variante para este método, usando para la realización la función de agregación, un punto de referencia (ideal) y luego calcular la distancia Tchebycheff a este punto, la ventaja de usar un punto de referencia y agregar con esta distancia es eliminar la compensación. Una vez normalizada y ponderada a matriz de decisión, se construye el punto o alternativa de referencia R(rj), este punto se construye con la mejor evaluación para cada criterio, luego de calcular la distancia, se ordenan las alternativas de acuerdo a la menor distancia.
Los pasos a seguir para la aplicación del método en cuestión son los siguientes:

1. Primer paso basado en la selección del problema, teniendo en cuenta las alternativas y criterios de la matríz de decisión x_{ij}.

$$X_{ij} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}$$

2. Calcular el vector normalizado de la matriz de decisión $\overline{x_{ij}}$

$$\bar{x}_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^{m} x_{ij}^2}}$$

$\bar{x}_{ij}$: representan las alternativas j respecto al objetivo i j = 1,2 … … , m
m: representan el numero de alternativas i = = 1,2 … … , n objetivos

3. Definir el vector peso de cada criterio obtenido por algún método subjetivo u objetivo, en nuestro caso serán encontrado a través del método CRITIC.

$$W = |w1, w2, w3, \ldots \ldots . wn,|$$

4. Calcular la matriz normalizada ponderada, para estos se deben multiplicar el peso de cada criterio por cada elemento de la matriz normalizada.
5. Realizar la evaluación de cada alternativa a través de la función de agregación (S_{xij}).

$$S(xij) = \sum_{i=1}^{h} \overline{\overline{xij}} - \sum_{i=h+1}^{h} \overline{\overline{xij}}$$

Donde i = 1,2,3, … … . , h corresponde a los criterios catalgados como máximos;
i = h + 1, h + 2, … . . n corresponde a los criterios catalogados como mínimos.

6. Determinar el raking de alternativa, donde la mejor alternativa será la que mayor valor de S_{xij} posea.
7. Introduciendo el radio en un punto teórico de referencia (ideal) y luego calcular la distancia Tchebycheff a este punto (Karlin and Ziegler 1996)

$$Min_j = \{Max|x_i - \overline{\overline{x_{ij}}}|\}$$

donde i = 1,2, … n son los objetivos, j = 1,2, . . . , m son las altenativas $\overline{x_{ij}}$ son los objetivos normalizados i de las alternativas j

8. Determinar el raking de alternativa, donde la mejor alternativa será la de menor distancia S_{xij}, según se plantea en el siguiente modelo.

$$min_i \{max_j|r_j - \overline{x_{ij}}|\}$$

Este método antes de ser aplicado es necesario tener los pesos de cada criterio, por lo que para esto proponemos además ser encontrado a través del método Criteria Importance Through Intercriteria Correlation (CRITIC), , desarrollado por (Diakoulaki, Mavrotas et al. 1995), siendo este una derivación del método Diakoulaki.

El método CRITIC, tiene una ventaja sobre los métodos subjetivos que debe destacarse, y es que es un método objetivo, por lo que disminuye en cierto grado la incertidumbre que puedan ser introducidas por los expertos, al poder inclinarse más sobre un criterio sobre otro, a la hora de la ponderación, toda la información es obtenida de la matriz de decisión, eliminando de esta forma las preferencias del decisor.

Pasos a seguir para la aplicación de este método de ponderación:

Se parte de una matriz de decisión, como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Matriz de decisión, donde están presente alternativas y criterios

ALTERNATIVA	Criterio A	Criterio B	Criterio C
1	X_{1A}	X_{1B}	X_{1C}
2	X_{2A}	X_{2B}	X_{2C}
3	X_{3A}	X_{3B}	X_{3C}
4	X_{4A}	X_{4B}	X_{4C}
5	X_{5A}	X_{5B}	X_{5C}
6	X_{PA}	X_{PB}	X_{PC}

1. Primer paso. Normalización de cada atributo, a través del siguiente modelo matemático. Para la normalización de la matriz de decisión por el rango, se debe tener en cuenta si el atributo es relacionado a los costos, o los beneficios, este método se basa en al cálculo de la distancia euclidiana. Para atributo a maximizar:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - x_j min}{x_j max - x_j min}$$

Para atributo a minimizar:

$$r_{ij} = \frac{x_j max - x_{ij}}{x_j max - x_j min}$$

2. Segundo paso encontrar la matriz de correlación.

$$\rho_{jk=} \frac{\sum_{i=1}^{m}(r_{ij}-\overline{r_j})*(r_{ik}-\overline{r_k})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m}(r_{ij}-\overline{r_j})^2 * \sum_{i=1}^{m}(r_{ij}-\overline{r_j})^2}} \qquad j, \quad = \quad ,2, \ldots \ldots, n$$

k 1

3. Tercer paso encontrar la desviación estándar de la matriz.

$$Cj = \sigma j * \sum(1-\rho_{jk}) \quad j=1,2\ldots,n$$

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{m}(r_{ij} - \overline{r_j})^2}{m-1}}$$

4. Cuarto paso encontrar los pesos o ponderación de cada atributo.

$$W_j = \frac{C_j}{\sum_{k=1}^{n} Cj}$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caso de estudio:

En este caso de estudio se pretende la selección de sistemas de fuentes renovables de energía (FRE), para la generalización de este proyecto en la zona del norte oriental de, se implementa un modelo que permitió generar poblaciones de solución para la satisfacción de las necesidades de energía de la zona antes declarada, los Parques Eólicos de Gibara 1 y Gibara 2, se encuentra ya en explotación, no comportándose así los parques Rio Seco y Herradura 1, los cuales se encuentra en fase de inversiones, para el estudio se tomó la información de los estudios de factibilidad, como se puede apreciar en la tabla 1, los criterios que serán, nuestro objetivos fueron declaro en el resumen del trabajo, estos serán nuestra función objetivos, y en la diferentes interacciones, también serán convertidos en restricciones del problema, por lo que la inecuación creada será de mínimo, tratando que los criterios antes mencionado, sean óptimo o eficientes.

Primer paso: Construcción de la matriz de decisión (tabla 2), donde el Proyecto uno es Gibara 1, Proyecto dos Gibara 2, Proyecto tres Rio Seco 1 y el Proyecto cuatro Herradura 1, donde se puede apreciar que son ocho objetivos a maximizar y 5 a minimizar.

1. Tabla 2. Atributos agrupados en las diferentes dimensiones de estudio.

<table>
<tr><th>Dimensiones</th><th colspan="2">Indicadores</th><th>Gibara 1</th><th>Gibara 2</th><th>Rio Seco 1</th><th>Herradura 1</th></tr>
<tr><td rowspan="2">Técnicas</td><td colspan="2">Factor capacidad, %</td><td>28.5</td><td>25.8</td><td>30,2</td><td>30,2</td></tr>
<tr><td colspan="2">Generación neta MWh/años</td><td>8994.28</td><td>7907.22</td><td>134 500</td><td>135095</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Económicas</td><td colspan="2">Costo de inversión, MMT</td><td>9500.5</td><td>11762.3</td><td>222397</td><td>122835</td></tr>
<tr><td colspan="2">Costo de operación y mantenimiento $</td><td>2978.8</td><td>1630.55</td><td>3387,8</td><td>2978,8</td></tr>
<tr><td colspan="2">Costo nivelado de energía CUC/CUP kW</td><td>0.269</td><td>0.344</td><td>0,11</td><td>0,10</td></tr>
<tr><td colspan="2">Período Rep. Inv. Años CUC/CUP</td><td>8</td><td>10</td><td>19</td><td>17</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Ambiental</td><td colspan="2">No emisión CO2 t/año/MW</td><td>69791.3</td><td>49051.1</td><td>114200</td><td>116000</td></tr>
<tr><td colspan="2">Uso de la tierra (extensión en km2/kW)</td><td>0.637</td><td>0.562</td><td>6,375</td><td>12,06</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Sociales</td><td rowspan="2">Calidad de vida</td><td>Creación empleo (u)</td><td>11</td><td>11</td><td>19</td><td>19</td></tr>
<tr><td>Salarios ($)</td><td>5000</td><td>4500</td><td>5000</td><td>5000</td></tr>
<tr><td colspan="2">Viviendas promedio electrificadas (u)</td><td>1499</td><td>1176</td><td>79778</td><td>79778</td></tr>
</table>

	Personas beneficiadas núcleos (3)/MW	4499	3529	44676	44676
Estratégico organizativo	Combustible sus. t/año 279.3	22302	20438	33500	37730

Como resultado se obtiene la matriz de decisión con las acciones a realizar:

Tabla 3. Matriz de decisión

Objetivos/Proyectos	$\mathbf{P_1}$	$\mathbf{P_2}$	$\mathbf{P_3}$	$\mathbf{P_4}$	**Acción**
Costo de inversión	9500,5	11762,3	222397	122835	Min
Costo de operación y mantenimiento	2978,8	1630,55	3387,8	2978,8	Min
Costo nivelado de energía	0,269	0,344	0,11	0,10	Min
Período Rep. Inv. Años	8	10	19	17	Min
Factor capacidad	28,5	25,8	30,2	30,2	Max
Generación neta	8994,28	7907,22	134 500	135095	Max
No emisión CO2	69791,3	49051,1	114200	116000	Max
Uso de la tierra	0,637	0,562	6,375	12,06	Min
Calidad de vida: Creación empleo	11	11	19	19	Max
Calidad de vida: Salarios	5000	4500	5000	5000	Max
Viviendas promedio electrificadas (u)	1499	1176	79778	79778	Max
Personas beneficiadas núcleos (3)	4499	3529	44676	44676	Max
Combustible sustituido.	22302	20438	33500	37730	Max

1. Primer paso basado en la selección del problema, teniendo en cuenta las alternativas y criterios de la matríz de decisión x_{ij}.

Tabla 4. Selección de problemas

	C1	**C2**	**C3**	**C4**	**C5**	**C6**	**C7**	**C8**	**C9**	**C10**	**C11**	**C12**	**C13**
A1	9500.5	2978.8	0.269	8	28.5	8994.28	69791.3	0.637	11	5000	1499	4499	22302
A2	11762.3	1630.55	0.344	10	25.8	7907.22	49051.1	0.562	11	4500	1176	3529	20438
A3	222397	3387.8	0.11	19	30.2	134500	114200	6	19	5000	79778	44676	33500

A4	122835	2978.8	0.1	17	30.2	135095	116000	12.06	19	5000	79778	44676	37730
Acción	Min	Min	Min	Min	Max	Max	Max	Min	Max	Max	Max	Max	Max

2. Calcular el vector normalizado de la matriz de decisión $\overline{x_{ij}}$.

Tabla 5. Cálculo del vector normalizado de la matriz de decisión

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13
A1	0.634	0.121	0.429	0.393	0.614	0.009	0.310	0.007	0.000	1.000	0.004	0.024	0.108
A2	0.627	0.519	0.000	0.321	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
A3	0	0.000	1.337	0.000	1.000	0.995	0.973	0.506	1.000	1.000	1.000	1.000	0.755
A4	0.297	0.121	1.394	0.071	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

3. Definir el vector peso de cada criterio obtenido por algún método subjetivo u objetivo, en nuestro caso serán encontrado a través del método CRITIC.
   - Aplicando el método CRITIC.
   - Primer paso es la normalización de cada atributo.

Tabla 6. Vector peso de cada criterio obtenido por algún método subjetivo u objetivo

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13
A1	0.634	0.121	0.429	0.393	0.614	0.009	0.310	0.007	0.000	1.000	0.004	0.024	0.108
A2	0.627	0.519	0.000	0.321	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
A3	0	0.000	1.337	0.000	1.000	0.995	0.973	0.506	1.000	1.000	1.000	1.000	0.755
A4	0.297	0.121	1.394	0.071	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

- Segundo paso encontrar la matriz de correlación.

Tabla 7. Matriz de correlación

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13
C1	1.000	0.687	-0.871	0.958	-0.773	-0.916	-0.876	-0.663	-0.917	-0.522	-0.917	-0.917	-0.811
C2	0.687	1.000	-0.814	0.569	-0.941	-0.665	-0.817	-0.511	-0.661	-0.968	-0.664	-0.673	-0.665
C3	-0.871	-0.814	1.000	-0.899	0.954	0.968	1.000	0.892	0.967	0.766	0.967	0.971	0.972
C4	0.958	0.569	-0.899	1.000	-0.746	-0.975	-0.901	-0.819	-0.976	-0.438	-0.976	-0.973	-0.906

C5	-0.773	-0.941	0.954	-0.746	1.000	0.851	0.955	0.771	0.848	0.923	0.849	0.856	0.874
C6	-0.916	-0.665	0.968	-0.975	0.851	1.000	0.968	0.908	1.000	0.582	1.000	1.000	0.976
C7	-0.876	-0.817	1.000	-0.901	0.955	0.968	1.000	0.887	0.967	0.766	0.968	0.971	0.970
C8	-0.663	-0.511	0.892	-0.819	0.771	0.908	0.887	1.000	0.906	0.528	0.906	0.906	0.970
C9	-0.917	-0.661	0.967	-0.976	0.848	1.000	0.967	0.906	1.000	0.577	1.000	1.000	0.975
C10	-0.522	-0.968	0.766	-0.438	0.923	0.582	0.766	0.528	0.577	1.000	0.580	0.591	0.636
C11	-0.917	-0.664	0.967	-0.976	0.849	1.000	0.968	0.906	1.000	0.580	1.000	1.000	0.975
C12	-0.917	-0.673	0.971	-0.973	0.856	1.000	0.971	0.906	1.000	0.591	1.000	1.000	0.976
C13	-0.811	-0.665	0.972	-0.906	0.874	0.976	0.970	0.970	0.975	0.636	0.975	0.976	1.000

- Tercer paso encontrar la desviación estándar de la matriz.

Tabla 8. Desviación estándar de la matriz

C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13
0.304	0.226	0.688	0.190	0.472	0.574	0.497	0.478	0.577	0.500	0.576	0.571	0.488

- Cuarto paso encontrar los pesos o ponderación de cada atributo.

Tabla 9. Pesos o ponderación de cada atributo

0.1168	0.0852	0.0875	0.0753	0.0645	0.0750	0.0633	0.0626	0.0757	0.0828	0.0755	0.0745	0.0614	
C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	
													1.0000

4. Calcular la matriz normalizada ponderada, para estos se deben multiplicar los pesos de cada criterio por cada elemento de la matriz normalizada (distancia euclidiana).

Tabla 10. Matriz normalizada ponderada

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13
A1	0.004	0.045	0.051	0.021	0.032	0.004	0.024	0.003	0.027	0.042	0.001	0.005	0.023

A2	0.005	0.025	0.065	0.026	0.029	0.003	0.017	0.003	0.027	0.038	0.001	0.004	0.021
A3	0.102	0.051	0.021	0.050	0.034	0.053	0.039	0.029	0.046	0.042	0.053	0.052	0.035
A4	0.056	0.045	0.019	0.045	0.034	0.053	0.040	0.055	0.046	0.042	0.053	0.052	0.039

5. Realizar la evaluación de cada alternativa a través de la función de agregación (S_{xij}).
   Tabla 11. evaluación de cada alternativa a través de la función de agregación

Alternativas	Suma Max	Suma Min	Diferencia
A1	0.161	0.121	0.040
A2	0.143	0.122	0.021
A3	0.385	0.224	0.161
A4	0.416	0.165	0.251

6. Determinar el raking de alternativa, donde la mejor alternativa será la que mayor valor de S_{xij} posea.

Tabla 12. Determinación del raking de alternativa

Proyectos	Rank
Gibara 1	3
Gibara 2	4
Rio Seco 1	2
Herradura 1	1

Por lo que se puede apreciar la mejor alternativa resultante fue la número 4, Proyecto Eólico Herradura 1

7. Introduciendo el radio en un punto teórico de referencia (ideal) y luego calcular la distancia Tchebycheff a este punto (He, Studden et al. 1996, Karlin and Ziegler 1996).

Tabla 13. Introducción del radio en un punto teórico de referencia

Alt.	**C1**	**C2**	**C3**	**C4**	**C5**	**C6**	**C7**	**C8**	**C9**	**C10**	**C11**	**C12**	**C13**
A1	0.004	0.045	0.051	0.021	0.032	0.004	0.024	0.003	0.027	0.042	0.001	0.005	0.023
A2	0.005	0.025	0.065	0.026	0.029	0.003	0.017	0.003	0.027	0.038	0.001	0.004	0.021
A3	0.102	0.051	0.021	0.050	0.034	0.053	0.039	0.029	0.046	0.042	0.053	0.052	0.035
A4	0.056	0.045	0.019	0.045	0.034	0.053	0.040	0.055	0.046	0.042	0.053	0.052	0.039

r_j	0.004	0.025	0.019	0.021	0.034	0.053	0.040	0.055	0.046	0.042	0.053	0.052	0.039

A continuación, se calcula la diferencia entre el punto ideal para cada criterio de costo o beneficio y la matriz normalizadas ponderada, tabla 14.

Tabla 14. Diferencia entre los puntos ideales y la matriz normalizada ponderada

C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13
0.000	-0.020	-0.032	0.000	0.002	0.050	0.016	0.052	0.019	0.000	0.052	0.047	0.016
-0.001	0.000	-0.046	-0.005	0.005	0.050	0.023	0.053	0.019	0.004	0.053	0.048	0.018
-0.098	-0.027	-0.002	-0.029	0.000	0.000	0.001	0.026	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004
-0.052	-0.020	0.000	-0.024	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

8. Determinar el raking de alternativa, donde la mejor alternativa será la que menor valor de S_{xij}, según.

$$Min_j = \{Max|x_i - \overline{x_{ij}}|\}$$

Finalmente se encuentran los valores máximos para cada alternativa, de donde elegiremos el valor mínimo, por ser este la distancia mínima al ideal, también será la mejor alternativa a elegir, por el centro decisor.

CONCLUSIONES

Del análisis realizado se pudo demostrar que con la aplicación de un método para la ponderación objetiva, se eliminó o atenuó el subjetivismo de centros decisores, al inclinarse más a un determinado criterio que a otros, así como el grado de incertidumbre asociado a este proceso, el método CRITIC derivado del Diakolaki, resultó ser una poderosa herramienta para la ponderación de criterios, es uno de los procedimientos más objetivos que aparece en la literatura científica como muy buena aceptación en el ámbito académico y científico.

Se pudo demostrar que el método MOORA, es uno de los más utilizado en la literatura con más de doscientas publicaciones en los últimos cinco años en bases de datos de alto ranking como Ciencia directa, es un método de optimización multiobjetivo, así como puede ser utilizado por dos vías: de forma directa o a través de la distancia de Tchebyceff, esta última con muy buena prestaciones y confiabilidad.

REFERENCIAS BLIOGRÁFICAS

Adler, R., et al. (1991). "Determination of the relative branching ratios for pp→ π+ π− and pp→ K+ K−." Physics Letters B **267**(1): 154-158.

Ashby, W. R. and J. Goldstein (2011). "Variety, constraint, and the law of requisite variety." Emergence: Complexity and Organization **13**(1/2): 190.

Barba-Romero, S. and J.-C. Pomerol (1997). Decisiones multicriterio: Fundamentos teóricos y utilización práctica, Universidad de Alcalá, Servicio de Publicaciones.

Bhangale, P., et al. (2004). "Attribute based specification, comparison and selection of a robot." Mechanism and Machine Theory **39**(12): 1345-1366.
Bohorquez-Chacón, L. F. (2016). "La universidad, los problemas sociales de la ciencia y la tecnología frente al reto del desarrollo sustentable." Aibi revista de investigación, administración e ingeniería: 1-1.
Bohorquez Arevalo, L. E. (2016). Complexity and Complex Systems Engineering, UNIV DISTRITAL FRANCISCO JOSE DE CALDAS, CENTRO INVEST & DESARROLLO CIENT ….
Brauers, W. K. and E. K. Zavadskas (2006). "The MOORA method and its application to privatization in a transition economy." Control and cybernetics **35**: 445-469.
Brauers, W. et al. (2008). "Multi‐objective decision‐making for road design." Transport **23**(3): 183-193.
Candia-Véjar, A. and M. González (2011). "Sistemas de ingeniería: Problemas, modelos y algoritmos de solución para la ayuda en la toma de decisiones." Ingeniare. Revista chilena de ingeniería **19**(3): 310-311.
Diakoulaki, D., et al. (1995). "Determining objective weights in multiple criteria problems: The critic method." Computers & Operations Research **22**(7): 763-770.
He, Z., et al. (1996). "Optimal designs for rational models." Annals of Statistics **24**(5): 2128-2147.
Karlin, S. and Z. Ziegler (1996). Some inequalities of total positivity in pure and applied mathematics. Total Positivity and Its Applications, Springer**:** 247-261.
Liu, Y. and J.-l. Du (2020). "A multi criteria decision support framework for renewable energy storage technology selection." Journal of Cleaner Production **277**: 122183.
Montesino Ronquillo, Y. (2012). Manual de métodos multicriterio para la toma de decisiones, Universidad Central" Marta Abreu" de Las Villas.
Prado, M. N. and J. F. Ortiz (2015). "Aplicación del metodo Moora en la elección de una universidad mexicana." Cultura Científica y Tecnológica(45).
Rebovich, G. (2011). "Systems thinking for the enterprise." Rebovich & White, ed.
Shao, M., et al. (2020). "A review of multi-criteria decision making applications for renewable energy site selection." Renewable energy.
Simon, H. A. (1972). "Theories of bounded rationality." Decision and organization **1**(1): 161-176.