

# Matriz de selección de energías alternativas basada en análisis multi-atributo para la conservación de pescado

## Renewable energy selection Matrix based on multi-attribute analysis for fish preservation

Lili Tatiana Vega-Clavijo, Omar Fredy Prías-Caicedo, Fabio Emiro Sierra-Vargas

Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Bogotá, Colombia

Correo electrónico: [ltvegac@unal.edu.co](mailto:ltvegac@unal.edu.co)

Recibido: 2 de marzo de 2016

Aceptado: 15 de abril de 2016

### Resumen

El artículo presenta la aplicación de la metodología Teoría de la utilidad multiatributo validada por un sistema de matrices establecido por los investigadores, para identificar la mejor alternativa de suministro de energía para 10 kw<sub>e</sub> en la generación de hielo para la conservación de pescado, en las zonas costeras y rurales del Chocó biogeográfico de Colombia. Se realizó la comparación, entre los potenciales de diferentes energías renovables y los combustibles diésel, gas natural y propano, con

base en criterios económicos, tecnológicos, ambientales y sociales, siendo validados por expertos y por la comunidad en trabajo de campo. Se concluyó que la mejor alternativa es el diésel seguido de la biomasa.

**Palabras claves:** energías alternativas, análisis multi-atributo, generación de energía eléctrica, evaluación de sistemas complejos, conservación de pescado.

### Abstract

The article presents the application of the methodology of multi attribute utility theory validated by a matrix system established by researchers, to identify the best alternative of energy supply to 10 kwe in the generation of ice for preservation of fish in coastal and rural areas of the Chocó. The comparison between the potentials of different renewable energy sources and diesel, natural gas and propane fuels took place, based on economic, technological,

environmental and social criteria, being validated by experts and the community on field work. It was concluded that the best alternative is diesel followed by biomass.

**Key words:** renewable energy, multi-attribute analysis, electricity generation, complex systems evaluation, fish conservation.

### Introducción

Las regiones selváticas ecuatoriales, como es el caso del Chocó biogeográfico colombiano, ubicado en el costado occidental del país, en general no cuentan con servicios de interconexión eléctrica, por la dificultad de acceso para el tendido de redes y por la distancia entre una y otra comunidad; por ello, las soluciones no interconectadas se consideran una alternativa real para dar solución a esta necesidad. Aunque la región tiene un alto potencial de desarrollo social y económico en los sectores de minería y pesca, fluvial y costera, es en la actualidad la más pobre del país, siendo la falta de acceso a la energía una de las causas principales del bajo desarrollo industrial, la limitación en la generación de fuentes de trabajo para estas comunidades y de la pobreza extrema de sus habitantes.

El proceso de pesca en las comunidades del Chocó, si bien es artesanal, requiere que se mantenga la cadena de frío del pescado hasta el destino de venta, lo cual es un proceso costoso in situ debido a que es necesario contar con energía para la generación del hielo y los servicios de refrigeración, que los pescadores compran a alto costo a comerciantes mayoristas, quienes utilizan plantas generadoras tipo diésel. Dicha tecnología ha prevalecido, como se reporta en la literatura, entre otras, por su bajo costo de instalación y a que existe una consolidada cadena de suministro de combustible con sistema de subsidios nacionales para la compra del mismo [1]. Sin embargo, la energía generada de esta manera pertenece a privados que la venden sin las debidas condiciones de calidad, precio o control ambiental, por lo es necesario evaluar alternativas que contribuyan a su disminución, si es posible, a partir del uso de energías alternativas.

La selección de la tecnología más adecuada para la determinación de la obtención de la energía para este proceso en las condiciones de la región, abarca un conjunto de condiciones, intereses y objetivos, por lo que debe ser abordada desde una perspectiva Multidimensional teniendo en cuenta variables económicas sociales, tecnológicas y ambientales. Si bien los modelos multicriterio desarrollados tienen claras limitaciones por su dificultad para ser estandarizados, permiten dar respuestas argumentadas a las preguntas y problemas que plantean las situaciones complejas como es el caso de estudio.

No existe un método multicriterio aceptado mundialmente para la evaluación y combinación de las variables asociadas a la sostenibilidad; la *International Atomic Energy Agency, IAEA*, presenta una lista de 30 indicadores, sin embargo la amplia variedad en su naturaleza y la difícil valoración de algunos de ellos, hacen difícil su uso. Por su parte, la Agencia de Energía Internacional, desarrolló una lista de 80 indicadores para diferentes países con el fin de ayudar en la toma de decisiones de los gobiernos hacia la modernización en el acceso a la energía, que no cubren aspectos técnicos ni ambientales. [2]

Los métodos multicriterio más usados para la evaluación de sistemas que implican alternativas energéticas, de acuerdo con lo que reporta la literatura son: Procesos Analíticos de Jerarquía (*Analytical Hierarchy Process AHP*), el de organización por orden de preferencia para enriquecimiento de evaluaciones (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation, PROMETHEE*), eliminación y expresión de selección de la realidad (*Elimination and choice expressing reality ELECTRE*) y el de teoría de la utilidad multiatributo (*Multi-Attribute Utility Theory MAUT*) [3-5]. La teoría de la utilidad toma en consideración las preferencias de los expertos en la forma de una función de utilidad la cual se define sobre un conjunto de atributos, donde la utilidad de cada atributo o criterio no tiene que ser lineal. En general los pasos básicos para usar este tipo de metodologías incluyen: 1.- Estructurar el proceso de decisión, la selección de alternativas y la formulación de los criterios. 2.- determinar las ventajas/desventajas de los criterios y determinar sus pesos. 3.- aplicar juicios de valor considerados aceptables y hacer la evaluación. 4.- hacer el cálculo de consolidación de los pesos y tomar la decisión [6, 7]

## Materiales y Métodos

La investigación se desarrolló por etapas, cada una con objetivos específicos que permitieran realizar la evaluación de las diferentes alternativas seleccionadas a partir del método multicriterio de teoría de la utilidad multiatributo. Para establecer las alternativas, se programaron actividades que permitieran obtener información sobre las condiciones económicas, sociales, ambientales y tecnológicas. Para ello, se realizó trabajo de campo en la zona, se hizo una revisión documental sobre las diferentes metodologías de análisis multicriterio y los potenciales de las energías renovables en la región, que determinaron las diferentes opciones a analizar. La figura 1, presenta un esquema de la metodología empleada.

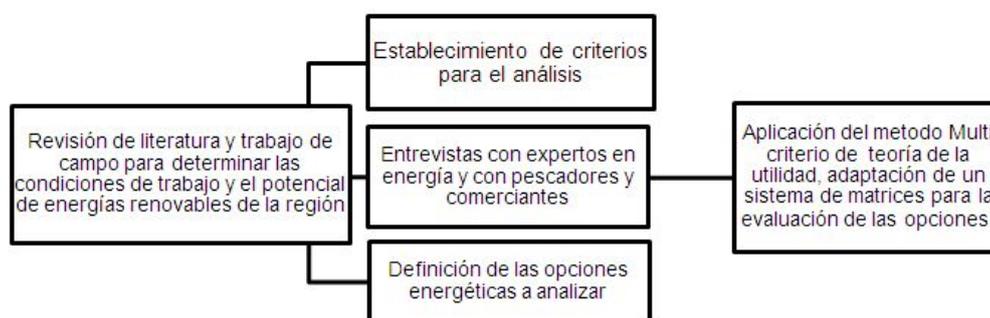


Fig. 1. Esquema de la metodología empleada. Fuente: elaboración propia

### Trabajo de campo y revisión de literatura

Durante el trabajo de campo en la zona se identificaron las características del proceso de pesca y conservación hasta su envío a destino, la figura 2, presenta el proceso de la cadena de frío para mantener el pescado en condiciones hasta su envío a destino. La información recopilada se presenta en la tabla 1, a partir de la cual se establecieron las necesidades energéticas, la demanda de hielo y de refrigeración, su valor y los grupos de interés.



Fig. 2. Cadena de frío del pescado. Fuente: Elaboración propia

**Tabla 1.** Características del proceso identificadas en el trabajo de campo. Fuente: Elaboración propia

Característica	Valor	Unidad
Tipo de pesca	Artesanal por red	
Captura semanal de pescado	9	Ton
Perdurabilidad del pecado	3	Días
Rotación semanal	2	Veces
Relación pescado-hielo	1-1	
Temperatura requerida para la conservación del pescado	0 hasta -5	°C
Personas dedicadas a la pesca	759	
Forma de almacenamiento	Canastas	Unidad
Cantidad de asociaciones	30	Consejos comunitarios – 300 familias
	2	Entidades gubernamentales (SENA, Corporación Autónoma Regional del valle del Cauca)
	1	Empresa Privada (Aprotec)
Tamaño del cuarto frío	2x4x2	m <sup>3</sup>
Demanda de hielo	1138	Kg/día
Valor del hielo	55	USD/Ton

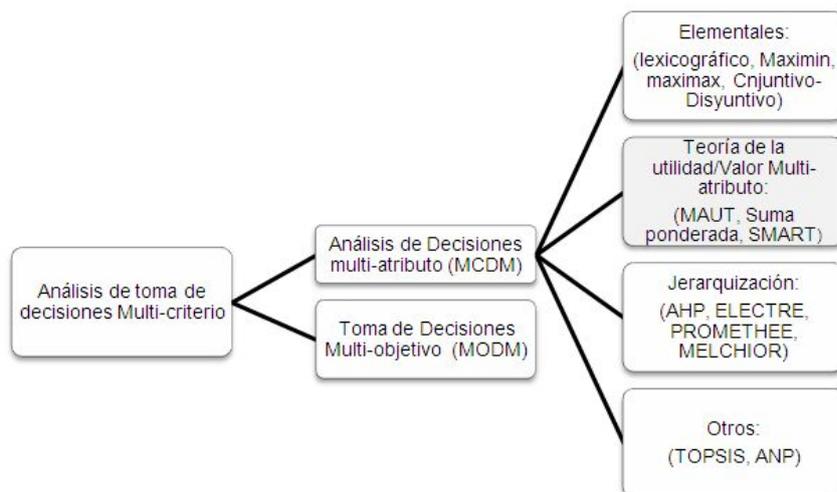
Para la determinación de las diferentes alternativas de energía renovable, se acudió al Atlas Potencial Energético Renovable Nacional; la tabla 2 presenta los resultados para la región del Chocó.

**Tabla 2.** Potencial de Energías renovables del Choco. Fuente: [8]

Tipo de energía renovable	Potencial
Eólica	Velocidades de viento medias entre 1 y 2,5 m/s; el potencial eólico es menor a 100 W/m <sup>2</sup> ; se alcanza como máximo 4 m/s algunos días del año.
Solar	Radiación solar de la zona entre 3 y 3,5 kWh/m <sup>2</sup> -día. Nubosidad entre 6 y 7 octas; la zona permanece nublada durante casi todo el año.
Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH)	El potencial en la zona está entre bajo y muy bajo. Algunos saltos presentan un potencial medio para la implementación de PCH.
Biomasa	Los residuos agrícolas, según el Atlas de Biomasa para Colombia, están alrededor de las 200 mil toneladas/año. Cabe resaltar que el 49,7 % de la producción nacional de coco es aportada por esta región. La actividad forestal ocupa el 47 % del total del área cubierta en bosques.

### Métodos de toma de decisiones multicriterio

Los métodos de Toma de Decisiones Multicriterio, MCDM, *MultiCriteria Decision Making*, consisten en: estructurar el proceso de decisión, selección de alternativas, formular criterios, establecer los compromisos entre criterios, determinar los pesos, aplicar el juicio de valor, evaluar y tomar la decisión. La literatura reporta varias clasificaciones, pero en general estos métodos se pueden dividir en dos categorías: los de Toma de Decisiones Multiobjetivo, MODM, que estudian los problemas discretos y se caracterizan por la existencia de objetivos múltiples y competitivos, [9] y los de Toma de Decisiones Multiatributo, MADM, que se utilizan principalmente para el análisis de problemas continuos y se caracterizan por tener múltiples alternativas, comparables entre sí, evaluadas en contra de un conjunto de criterios, respectivamente [10]. La figura 3 presenta una estructura de los métodos.



**Fig. 3.** Estructura de los métodos de toma de decisiones multicriterio. Fuente: Adaptado de [11]

El método de análisis multicriterio seleccionado fue el de teoría de utilidad multiatributo, ampliamente utilizado para dar solución a problemas de diversa complejidad. El método permite la evaluación de una serie de alternativas con respecto a criterios económicos, sociales, ambientales, tecnológicos y de disponibilidad de las fuentes energéticas. La identificación de los factores y el establecimiento de los criterios se realizaron con la participación de pescadores, expertos en energías alternativas, entidades privadas y entes gubernamentales.

Los criterios económicos han sido en general los de mayor relevancia y los más empleados para la evaluación de proyectos energéticos, entre ellos destacan: el costo de inversión, el costo de operación y mantenimiento, el costo eléctrico, el costo del combustible, el valor actual neto, entre otros. Entre los técnicos están la eficiencia energética, la eficiencia exergética, la seguridad, la confiabilidad, la madurez, entre otros. Los criterios de evaluación ambiental más empleados son las emisiones de NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub>, material particulado, compuestos orgánicos volátiles que no contienen metano, uso de la tierra, ruido, entre otros. Los criterios sociales son: aceptación social, creación de empleo, prestaciones sociales. Los criterios seleccionados deben cumplir con los principios sistémico, de consistencia, de independencia, de mensurabilidad y de comparabilidad [12]

El análisis de los criterios se realiza mediante el uso de atributos de eficacia, los cuales tienen diferentes dimensiones, diferentes pesos y diferentes direcciones de optimización. En general, los problemas se expresan en formato de matrices que implican  $m$  alternativas evaluadas con respecto a  $n$  criterios, donde para los  $n$  criterios se establecerán  $n$  pesos, y para las  $m$  alternativas se establecen  $m \times n$  puntajes (ver ecuación 1).

$$\begin{matrix}
 \text{Alternativas} & \{C_1 \ C_2 \ \dots \ C_n\} \rightarrow \text{Criterios} & & & \text{Puntaje} \\
 & \{w_1 \ w_2 \ \dots \ w_n\} \rightarrow \text{pesos} & & & \text{final} \\
 \begin{Bmatrix} A_1 \\ \vdots \\ A_m \end{Bmatrix} & \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix}_{m \times n} & [w_1 \ w_2 \ \dots \ w_n]_{n \times 1} & = & \begin{bmatrix} S_1 \\ \vdots \\ S_m \end{bmatrix}_{m \times 1}
 \end{matrix} \quad (1)$$

Donde  $A_n$  representa la alternativa evaluada,  $X_{mn}$  representa el puntaje asignado para cada alternativa con respecto a los criterios establecidos ( $C_n$ ) y ( $w_n$ ) los pesos fijados y  $S_m$  representa el puntaje final. [12]

El método de ponderación empleado fue de orden de rango, mediante la combinación de la ponderación subjetiva y objetiva, es decir, los pesos asignados dependieron de la preferencia de los participantes y de los métodos matemáticos basados en el análisis de los datos iniciales, respectivamente. Con el fin de facilitar la aplicación de método, se construyó un sistema de matrices: Matriz de Evaluación de Costos, MEC, Matriz de Indicadores de Tecnologías Energéticas, MITE, Matriz del Puntaje Global de la Alternativa o Tecnología (PG) y la escala de Disponibilidad del Recurso Energético (DRE) con el fin de determinar la Viabilidad de la Fuente Energética (VFE).

La asignación de los puntajes se realizó de tal manera que los valores altos corresponden a las mejores características o con mayor viabilidad, según corresponda (menores costos, menor contaminación, mayor nivel de replicabilidad, entre otras). La evaluación de los criterios se realizó mediante la ponderación subjetiva, ya que los pesos se asignaron de acuerdo a la experiencia del grupo expertos (Ingenieros mecánicos, químicos y electricistas, y especialistas en medio ambiente con experiencia superior a los 20 años en proyectos de aplicación de energías alternativas en comunidades rurales). Los criterios de evaluación seleccionados para cada alternativa junto con los pesos asignados se presentan en la tabla 3.

**Tabla 3.** Criterios seleccionados para el análisis. Fuente: Elaboración propia

Macrocriterio	Criterio	Breve descripción	Peso (%)
Económicos	Inversión Inicial	Total de costo de capital requerido para la instalación de la planta, incluidos el equipamiento y la instalación.	Se realizó la evaluación económica para cada una de las alternativas, teniendo en cuenta los criterios seleccionados
	Insumos	Costo de combustible y accesorios	
	Mantenimiento	Costo de repuestos y mano de obra.	
	Operación	Costos de personal y servicios	
Tecnológicos	Tiempo de instalación	Tiempo requerido para puesta de equipos en sitio y de instalación del equipo incluidas pruebas de puesta a punto	30
	Replicabilidad (facilidad)	Capacidad del sistema de trabajar en una región específica relación vida útil esperada del sistema y las necesidades de recambio de partes.	30
	Proveedores (disponibilidad)	Madurez de la tecnología y existencia de distribuidores en el país.	10
	Capacitación (grado de especialización)	Grado de especialización de la mano de obra necesaria para la instalación, uso y mantenimiento del sistema	20
	Afectación ambiental	Impactos del sistema sobre el ambiente	10
Social	Tipo de organización requerida	Tipo de empresa requerida para la comercialización de la energía, establecida por ley.	20
	Apropiación/ Aprovechamiento de la tecnología	Conocimiento de la tecnología a analizar por parte de la población que la usará y facilidad de acceso a instituciones educativas en la zona.	40
	Riesgo por orden público	Reconocimiento de las condiciones de inseguridad de la región por existencia de grupos armados.	40
Ambiental	Uso del terreno	Cantidad de terreno que no podrá ser usado.	40
	Emisiones	Cantidad de gases efecto invernadero debidos a la operación del sistema.	20
	Manejo de residuos generados	Requisitos para la disposición de, los residuos sólidos generados	20
	Afectación a vertientes de agua	Manejo de residuos líquidos (vertimientos) debidos a la operación del sistema.	20

La matriz de indicadores de evaluación tecnológica arrojó un puntaje global para cada tecnología (PGT), a partir del uso de la ecuación 1. Teniendo en cuenta, que la disponibilidad de los recursos energéticos, es relevante para la aplicación de cualquiera de las tecnologías, se propone la evaluación de cada una de las tecnologías mediante el factor de Disponibilidad del Recurso Energético (DRE). Dicho factor multiplicado por los puntajes obtenidos (PGT) para cada tecnología dio como resultado la Viabilidad de Fuente Energética (VFE), (ecuación 2).

$$PGT \times DRE = VFE \quad (2)$$

Para la determinación de la disponibilidad de recursos energéticos se estableció una escala entre cero (0) y diez (10). Las tecnologías evaluadas fueron: Planta de generación con Diésel, Gas natural o Gas propano; Planta de combustión con biomasa; Gasificación Lecho fijo y Lecho fluidizado; Biodigestión; Solar Fotovoltaica; Eólica Horizontal y Vertical; PCH Pelton y Michellbanki. (ver tabla 4).

**Tabla 4.** Factor de disponibilidad de recursos energéticos (DRE). Fuente: Elaboración propia

Puntaje	Recursos energéticos					
	Diésel	Biomasa		Energía Solar	Energía Eólica (Velocidad del Viento) m/s	Energía Hidráulica
		Combustión/ Gasificación	Biodigestión			
0	No hay posibilidad para llevar el combustible a la zona	No hay posibilidad de adquirir el recurso	No hay disponibilidad de residuos agrícolas húmedos y de ganadería (estiércol y orinas)	Brillo solar $\leq$ 489,82h/año	0 - 1,9	$\gamma$ Qh = 0
2	La posibilidad de llevar el combustible a la zona es mediante transporte aéreo	Acceso al recurso mediante programas a corto plazo	Se cuenta con uno de los recursos	Brillo solar entre 489,82h/año - 1224,55h/año	2-3,9	$\gamma$ Qh < 5 kW y una distancia > 10 Km
5	El suministro de combustible no es permanente	Para disponer del recurso, se necesita un programa de recolección y disposición de los mismos	Disponibilidad de ambos recurso pero baja cantidad	Brillo solar entre 1224,55h/año - 1959,28h/año	4 - 5,9	$\gamma$ Qh < 10 kW y una distancia < 5 Km
8	El suministro es permanente pero con sobrecostos	Buena disponibilidad del recurso, se debe incurrir en costos para la compra del mismo	Se cuenta con la suficiente cantidad de ambos recursos para generar 10kW, pero se encuentran dispersos	Brillo solar entre 1959,28 h/año - 2449,10h/año	6 - 7,9	$\gamma$ Qh $\geq$ 10 kW y una distancia entre 5-10 Km
10	Las fuentes de suministro se encuentran en la zona y el costo es el establecido por el gobierno nacional	Total disponibilidad y bajo costo del recurso	Gran cantidad de residuos agrícolas húmedos y de ganadería (estiércol y orinas)	Brillo solar $\geq$ 2449 horas/año	$\geq$ 8	$\gamma$ Qh $\geq$ 10 kW y una distancia $\leq$ 5Km

La matriz de evaluación de costos (MEC), agrupó los aspectos económicos relacionados con la adquisición, puesta en marcha y de operación en los que se incurre con la escogencia de una determinada tecnología. Las tablas 5a y 5b presentan la matriz para las tecnologías seleccionadas.

**Tabla 5a.** Matriz de evaluación de costos. Fuente: Elaboración propia

Matriz de Evaluación de Costos (MEC) de 10 kW para la zona de Nuquí						
Tecnología	Energías					
	Planta de generación			Planta de combustión con biomasa	Gasificación	
	Diésel	Gas natural	Gas propano		Tiro fijo	Lecho fluidizado
Costo (USD)						
Equipo estimado proyecto	19000	22000	28000	9000	35000	37500
Kilovatio instalado (kW)	2325	2475	2775	2625	3862,5	4187,5
Insumos (directos/indirectos)	327040	163520	140160	60000	60000	50000
	45000	45000	45000	0	0	0
Horas de servicio día/ 20 años	8/ 58400	8/58400	8/58400	8/58400	8/58404	8/58400
Mantenimiento 20 años	90000	90000	90000	70000	75000	80000
Operación 20 años	180000	180000	180000	180000	180000	180000
Disposición de residuos	48000	48000	48000	12000	12000	12000
Costos totales	736540	576020	558660	374500	404250	405750
\$ /Kwh Base 720000 kwh en 20 años	1,02	0,80	0,78	0,52	0,56	0,56

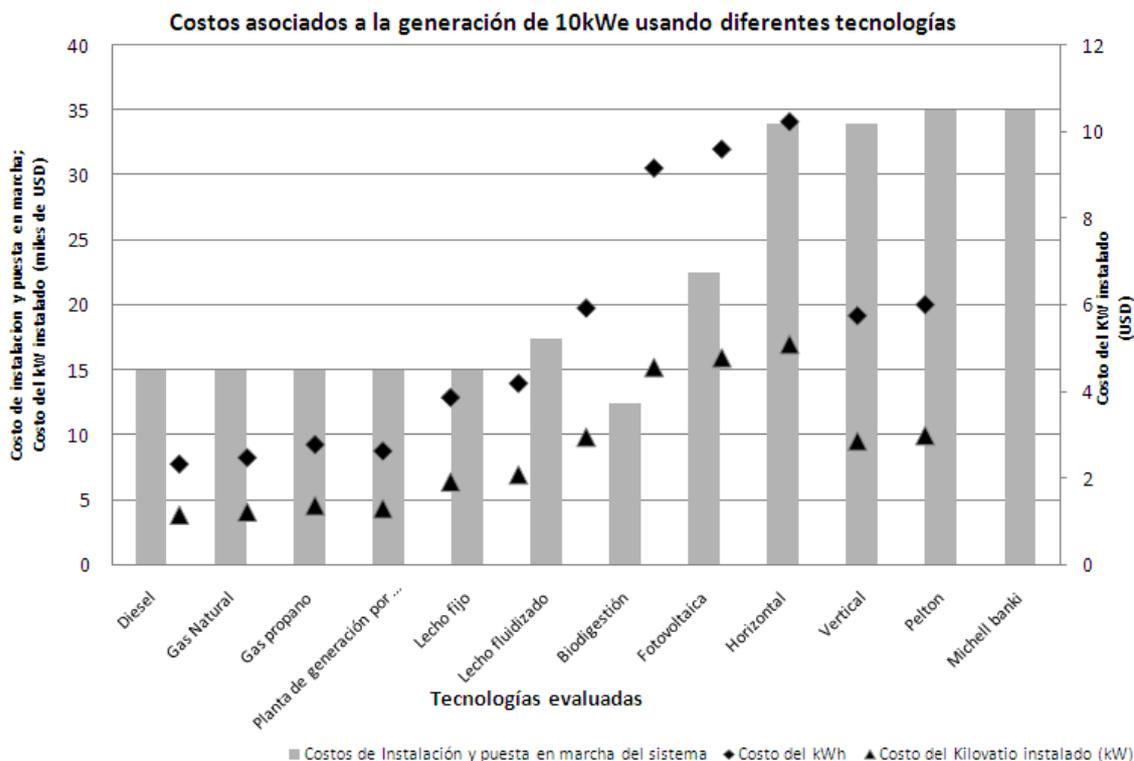
**Tabla 5b.** Matriz de evaluación de costos. Fuente: Elaboración propia

Matriz de Evaluación de Costos (MEC) de 10 kW para la zona de Nuquí						
Tecnología	Energías					
	Biodigestión	Solar	Eólica		PCH	
		Fotovoltaica	Horizontal	Vertical	Pelton	Michellbanki
Equipo estimado proyecto	83000	88000	50000	55000	25500	32600
Kilowatio instalado (kW)	5925	9155	9592,5	10225	5750	6005
Insumos (directos / indirectos)	40000	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0
Horas de servicio día/ 20 años	8/ 58400	10/73000	24/1752000	24/ 1752000	24/ 1752000	24/ 1752000
Mantenimiento 20 años	80000	60000	70000	65000	75000	83000
Operación 20 años	180000	180000	180000	180000	180000	180000
Disposición de residuos	0	0	0	0	0	0
Costos totales	418500	423100	441850	449500	370000	383100
\$ /Kwh Base 720000 kwh/20 años	0,58	0,59	0,61	0,62	0,51	0,53

El trabajo permitió realizar la evaluación comparativa entre la tecnología utilizada en la actualidad, planta de generación alimentada con combustible diésel, y el uso de energías alternativas, con el fin de identificar si era posible generar energía eléctrica a menor costo en la zona para un periodo de 20 años.

### Resultados y Discusión

Todos los criterios fueron evaluados de manera individual para cada sistema comparado. Con base en los resultados obtenidos en las matrices de evaluación de costos de instalación y los precios por kw instalado, de cada alternativa energética estudiada, se realizó la figura 4, que presenta la evaluación económica; en ella se aprecia que la tecnología diésel es altamente competitiva en este nivel.



**Fig. 4.** Resultados de la evaluación económica. Fuente: elaboración propia

Los sistemas de planta de generación, independientemente de los combustibles usados, mantienen los menores costos de producción, seguidos por los sistemas de gasificación de lecho fijo y de lecho fluidizado. Los sistemas hidráulicos, presentan los mayores costos de instalación y puesta en marcha, por lo que no son aconsejables para la región.

La tabla 6 presenta el comparativo de todos los aspectos evaluados por tecnología seleccionada. Se evidencia que la tecnología diésel es la de mayor ponderación en la evaluación social y menor costo, aspectos que apoyan la conclusión que ésta sigue siendo la mejor tecnología en la región, sin embargo, si solo se tienen en cuenta energías renovables, la mejor alternativa es el uso de biomasa usando gasificación y motor de combustión interna.

**Tabla 6.** Resultado de la evaluación combinada. Fuente: Elaboración propia

<b>Resultado</b> <b>Alternativa seleccionada</b>	<b>Evaluación económica</b>	<b>Evaluación social</b>	<b>Evaluación tecnológica</b>	<b>Evaluación ambiental</b>	<b>Puntaje Total (PGT)</b>	<b>Disponibilidad del recurso (DRE) %</b>	<b>Viabilidad de la fuente energética (VFE)</b>
Diésel	11,7	18,4	12,9	3,7	46,7	80	<b>37,4</b>
Gas natural	19,9	12,0	9,2	3,7	44,2	0	0,0
Gas propano	20,8	12,0	10,6	3,7	46,4	50	23,2
Planta de generación por biomasa	39,5	8,0	6,7	2,6	57,6	50	<b>28,8</b>
Lecho fijo	36,4	8,0	7,1	2,5	56,9	50	<b>28,5</b>
Lecho fluidizado	34,7	4,0	4,6	2,5	46,8	50	23,4
Biodigestión	47,0	8,0	11,2	3,3	74,1	20	14,8
Fotovoltaica	53,1	8,4	14,3	3,0	77,7	20	15,5
Turbina eólica horizontal	49,0	16,4	13,8	3,5	87,8	0	0,0
Turbina eólica vertical	50,2	16,4	13,8	3,5	87,9	0	0,0
Pelton	51,0	11,2	8,0	4,6	73,7	20	14,7
Michell Banki	47,8	11,2	8,0	4,6	70,0	20	14,0

De los resultados obtenidos en la evaluación de los Criterios Tecnológicos el mayor puntaje (14) corresponde a la energía solar fotovoltaica, por su versatilidad, replicabilidad, corto periodo de implementación, nivel básico de conocimientos técnicos para su operación y disponibilidad en el mercado Nacional e internacional. La menor puntuación (5) corresponde a la gasificación por lecho fluidizado, por requerir un periodo de implementación alto comparado con las demás tecnologías, y el complejo nivel tecnológico que implica, lo que conlleva a que sea una tecnología aún no madura.

Los resultados obtenidos en la evaluación de Criterios Ambientales muestran que la tecnología con menor afectación son las pequeñas centrales hidroeléctricas [4,5], ya que los impactos son localizados y muy bajos. Por el contrario, el mayor impacto ambiental es generado por las plantas de gasificación, con un puntaje de 2,5 debido a la generación de emisiones, residuos sólidos y líquidos.

En la evaluación de Criterios Sociales, los resultados muestran que la tecnología con menor impacto social negativo es la planta de generación con diésel, ya que esta es la más conocida y operable por las comunidades, por lo tanto la apropiación de la misma es alta. Por otra parte, la tecnología con menor aprovechamiento es la gasificación de lecho fluidizado, debido a la complejidad de esta tecnología, y a los requerimientos adicionales como la recolección de la biomasa y el nivel técnico requerido.

El sistema de matrices desarrollado durante esta investigación permite la modificación de los pesos de acuerdo al interés o al criterio del grupo de expertos, dándole flexibilidad para ser aplicado en otros casos. Al evaluar criterios cualitativa y cuantitativamente, se facilita la inclusión de criterios diversos, como son los sociales, tecnológicos, económicos y ambientales cumpliendo con los principios de consistencia, independencia, mensurabilidad y comparabilidad, disminuyendo la complejidad de este tipo de análisis.

Esta investigación, plantea el uso de métodos multicriterio en contextos locales específicos, lo cual no se ha reportado hasta el momento en la literatura referenciada. Se presentan criterios que no aparecen en los estudios relacionados, entre otras razones por haber tenido en cuenta la población local y por el objetivo del estudio. Entre los criterios novedosos del estudio se encuentran: la disponibilidad y el grado de capacitación del personal, a nivel social el tipo de organización y los aspectos de orden público. A nivel económico y ambiental, se mantienen en general los criterios definidos en otros estudios. Del estudio se observaron las condiciones

puntuales de las poblaciones que requieren la energía, las cuales divergen de acuerdo a la población donde se implementará y legislaciones particulares que hacen que los criterios mencionados deban ser tenidos en cuenta.

## Conclusiones

Todos los criterios económicos directos se identifican fácilmente, no existen suficientes elementos en la literatura que monetaricen los criterios no económicos, por lo que este tipo de metodologías son altamente pertinentes para determinar alternativas con base en criterios múltiples.

La matriz se aplicó a la industria de la pesca en comunidades de zonas no interconectadas, pero puede replicarse en otras comunidades, que transformen otros productos y que no cuenten con suministro de energía eléctrica permanente y de calidad.

La matriz aplicada es una herramienta flexible que incluye los diversos aspectos a tener en cuenta no solamente aspectos económicos, técnicos, ambientales dando un valor de preferencia a los sociales que son los que más diferencian las diversas comunidades, en cualquier país.

## Referencias

1. Fuso Nerini F, Howells M, Brazilian M, et al. Rural electrification options in the Brazilian Amazon. A Multi-criteria analysis. *Energy for Sustainable Development*. 2014;(20):36-48. DOI 10.1016/j.esd.2014.02.005.
2. Mainali B, Shonali P, Rao N, et al. Assessing rural energy sustainability in developing countries. *Energy for Sustainable Development*. 2014;(19):15-28. DOI 10.1016/j.esd.2014.01.008.
3. Loken E. Multi-Criteria Planning of local Systems with Multiple Energy Carriers. Norwegian: University of Science and Technology; 2007. ISBN 978-82-471-1741-5. [Citado 21 de octubre de 2015] Disponible en: [https://www.sintef.no/globalassets/project/seds/espen-loken\\_thesis.pdf](https://www.sintef.no/globalassets/project/seds/espen-loken_thesis.pdf)
4. Daim T, Rimal AT. Multi-Criteria Applications in Renewable Energy Analysis, a Literature Review. In: *Research and Technology Management in the Electricity Industry*; London: Springer; 2013. DOI 10.1007/978-1-4471-5097-8\_2.
5. Loken E, Botterud A, Holen A. Use of the equivalent attribute technique in multi criteria planning of local energy systems. *European Journal of Operational Research*. 2009;197(3):1075-83. DOI 10.1016/j.ejor.2007.12.050.
6. Kang H, Hung M, Pearl W, et al. An Integrated Multi-Criteria Decision Making Model for Evaluating Wind Farm Performance. *Energies*. 2011;4:2002-16. ISSN 1996-1073.
7. Pokehar SD, Ramachandran M. Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning - A review. *Renewable and Sustainable Energy*. 2004;8(3):365-81. DOI 10.1016/j.rser.2003.12.007.
8. SIMPEC. Atlas de radiación solar. Bogotá, Colombia: UPME-IDEAM; 2005. [Citado 15 de octubre de 2015] Disponible en: <http://www.si3ea.gov.co/Home/EnergiaSolar/tabid/74/language/en-US/Default.aspx>
9. Diakaki C, Grigoroudis E, Kabelis N, et al. A multi-objective decision model for the improvement of energy efficiency in buildings. *Energy*. 2010;35(12):5483-96. ISSN 0360-5442. DOI 10.1016/j.energy.2010.05.012.
10. The Comparison Between MAUT and PROMETHEE. In: *Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), IEEE International Conference on*; Macao, China: IEEE; 2010. [Citado 13 de noviembre de 2015] Disponible en: [http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=5675608&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs\\_all.jsp%3Farnumber%3D5675608](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=5675608&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D5675608)
11. Jiménez V. Aplicación de metodología multicriterio para la priorización de los procesos objeto de costeo en entidades del sector de la salud. *Libre Empresa*. 2012;17:99-123.
12. Wang JJ, Jing YY, Zhang CF, et al. Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2009;13:2205-750. ISSN 1364-0321. DOI 10.1016/j.rser.2009.06.021.