

Metodologías de decisión multicriterio para planeación energética en zonas rurales del Ecuador

Sigüencia Sigüenza Oscar M.^{1,2}, Pires Neves Luis M.^{1,3}, Sempertegui Álvarez Rodrigo E.²

¹ Instituto Politécnico de Leiria, Escuela superior de tecnología y gestión, Rúa Dom Álvaro Abranches Noronha, 2411 901, Leiria, Portugal.

² Universidad de Cuenca, Facultad de Ingeniería, Av. 12 de abril, 010202, Cuenca, Ecuador.

³ INESC Coimbra, Rua Sílvio Lima, Coimbra, Portugal.

Autores para correspondencia: 2152200@my.ipleiria.pt, rodrigo.sempertegui@ucuenca.edu.ec

Fecha de recepción: 25 de agosto de 2017 - Fecha de aceptación: 29 de septiembre de 2017

ABSTRACT

This article reviews the multi criteria decision methods in rural energy planning, a tool that helps to reduce subjectivity in decision making by creating a series of selection filters and enables to choose between complex and conflicting alternatives. The choice of the multicriteria methodology must be adapted to all constraints established in the modeling of the problem. The result will always depend on the combination that best satisfies the final decision maker and will be a result hardly given as valid from the perspective of the decision maker.

Keywords: Energy planning, multi-criteria decision, electre TRI.

RESUMEN

En este artículo se hará una revisión de los métodos de decisión multicriterio en planificación energética. Estos son una herramienta para reducir la subjetividad en la toma de decisiones mediante la creación de una serie de filtros de selección y ayuda a la elección entre alternativas del tipo complejas o con conflictos entre sí. La elección de la metodología multicriterio deberá adaptarse a todas las restricciones establecidas en la modelización del problema. El resultado final siempre dependerá de la combinación que mejor satisfaga al decisor final y será un resultado apenas dado como válido en la perspectiva del decisor.

Palabras clave: Planificación energética, decisión multicriterio, electre TRI.

1. INTRODUCCIÓN

La cobertura del servicio de energía eléctrica en zonas rurales en Ecuador sigue siendo menor en comparación con el área urbana, 89.03% vs 94.77% (Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, 2014), esto, debido principalmente a mayores restricciones que se tiene que enfrentar al momento del análisis de factibilidad de los proyectos, entre las cuales están: la baja demanda, difícil acceso, aspectos ambientales y, principalmente, debido a los altos costos que implican una extensión de red eléctrica (Rojas-Zepa & Yusta, 2014). La planificación energética en áreas rurales define problemas complejos cuando se trata de la implementación de fuentes con energías alternativas, ya que un incorrecto análisis puede conllevar a situaciones como un mal dimensionamiento de los equipos, afectación del medio ambiente, problemas asociados a temas sociales o a un sobrecosto del proyecto (Domenech Léga, 2013). Las características, tendencias o rangos de aplicación son elementos relevantes para la recopilación de información precisa para la selección de métodos de decisión.

Al intervenir varios criterios con diferentes magnitudes y objetivos, en algunos casos estos tienden a ser maximizados como, por ejemplo, la aceptación social de la energía, y en otros casos minimizados como en el caso de los costos de inversión en un sistema energético. Los métodos de decisión multicriterio (MCDM) permiten el análisis simultaneo de más de una función objetivo, lo cual permite realizar el análisis de un conjunto de alternativas definidas en función del potencial de los recursos energéticos locales, con la utilización de uno, varios, o una combinación de estas fuentes de energías. De acuerdo con recopilaciones de estudios realizados (Domenech Léga, 2013; Peralta Jaramillo, 2011; Benitez Leyva, 2015; Ochoa Ramon, 2009), alternativas energéticas del tipo solar y eólica son una clara opción para suministro de energía eléctrica a zonas rurales. Este tipo de alternativas vienen ligadas directamente a la distribución de las viviendas. En el caso de comunidades con gran dispersión de viviendas, los sistemas individuales domiciliarios resultan más baratos y si las viviendas están muy concentradas, las microrredes suelen ser las opciones más aceptables (Domenech Léga, 2013). El principio es que se deben crear alternativas que mejor alcancen los valores especificados para la situación de decisión. Lo ideal sería crear la mejor alternativa posible, utilizando la menor cantidad de tiempo, esfuerzo y recursos, pero de manera realista (Keeney, 1996).

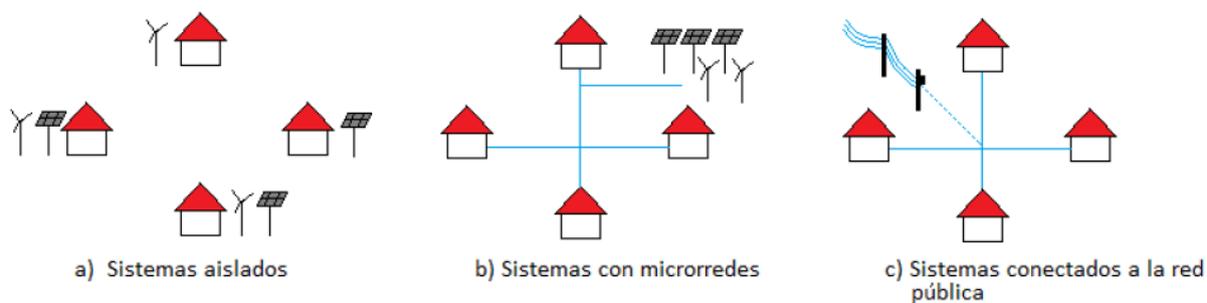


Figura 1. Configuraciones para sistemas de electrificación rural, adaptado de Ochoa Ramón (2009).

Los criterios de evaluación son los factores que pueden permitir elegir entre propuestas de una u otra alternativa. Estos podrán ser cualitativos o cuantitativos, y, deberán ser definidos tomando en consideración todos los aspectos relevantes para hacer fiable la aceptación de una u otra alternativa. Además de criterios técnicos y económicos, los cuales han sido los que más se han considerado hasta finales de los años 90 (Rojas-Zerpa & Yusta, 2014), se plantearán 2 aspectos adicionales, sociales y ambientales, relevantes para la formación de la matriz de evaluación.

En el análisis de las fuentes de energía, el Ecuador tiene un alto potencial solar, con una radiación media horizontal entre 3 - 4 kWh/m²/día (Peralta Jaramillo, 2011; Roy, 1985). Otro de los recursos es el eólico, principalmente en la región sierra, donde se pueden considerar muchos proyectos factibles para generación de energía eléctrica a pequeña y gran escala (Roy, 1985; Brans & Vincke, 1985; Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos, 2015).

2. MÉTODOS DE DECISIÓN MULTICRITERIO (MCDM) Y APLICACIÓN A PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

En su dimensión más básica, un proceso de toma de decisión puede concebirse como la elección por parte de un centro decisor (un individuo o un grupo de individuos) de «lo mejor» entre «lo posible». Los problemas analíticos surgen a la hora de definir «lo mejor» y «lo posible» en un determinado contexto decisional. El valor de las variables de decisión que satisfacen las restricciones constituye lo que se denomina el conjunto factible o alcanzable, que estructura y formaliza lo que se entiende por lo posible. Este conjunto puede ser continuo (esto es, existen infinitas soluciones factibles) o discreto (esto es, existe un número finito de soluciones factibles) (Romero, 1996). Según este autor existen 3 tipos de decisiones multicriterio, que se pueden utilizar según el tipo de problema a estudiar (ver Fig. 2).

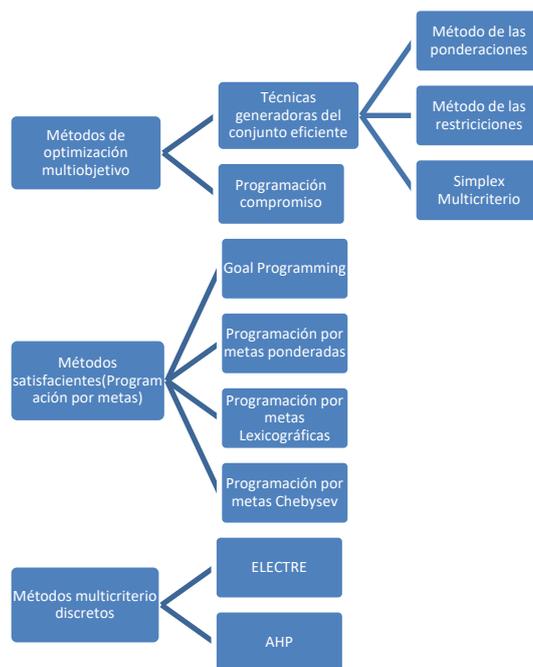


Figura 2. Clasificación de los métodos de decisión multicriterio (MCDM) (Romero, 1996).

2.1. Métodos de optimización multiobjetivo

La programación multiobjetivo, también llamada optimización vectorial, constituye un enfoque multicriterio de gran potencialidad cuando el contexto decisional está definido por una serie de objetivos a optimizar y que deben de satisfacer un determinado conjunto de restricciones. Como la optimización simultánea de todos los objetivos es usualmente imposible pues suele existir un cierto grado de conflicto, en la vida real, entre los objetivos que pretende optimizar un centro decisor. El enfoque multiobjetivo en vez de intentar determinar un no existente óptimo, pretende establecer el conjunto de soluciones eficientes o Pareto óptimas. Debe indicarse que la programación multiobjetivo utiliza información estrictamente técnica, sin incorporar en el análisis las preferencias del decisor. Una de las principales desventajas de este método es que la utilidad se reduce considerablemente en problemas decisionales de un tamaño elevado (Romero, 1996).

2.2 Métodos satisficentes (Programación por metas)

La programación por metas se apoya en una lógica no optimizante sino en lo que Simon (1955) ha acuñado como lógica satisficente. En contexto decisional está definido por información incompleta, recursos limitados, multiplicidad de objetivos, conflictos de intereses, etc. Lo que intenta este método es que una serie de metas relevantes se aproximen lo más posible a unos niveles de aspiración fijados de antemano. Para formular un modelo de programación por metas, igual que sucede con los demás enfoques multicriterio, se comienza por fijar los atributos que se consideran relevantes para el problema a analizar. Una vez establecidos los atributos, se asigna a cada uno de ellos un nivel de aspiración (Romero, 1996).

2.3. Métodos multicriterio discretos

Dentro de lo que sería específicamente decisión multicriterio existen dos escuelas bien diferenciadas: la americana y la europea. El padre fundador de la escuela europea es Bernard Roy, que desarrolló la serie de métodos ELECTRE (Roy, 1985) y llevó a muchos científicos, principalmente en regiones de habla francesa, a diseñar métodos similares como PROMETHEE (Brans & Vincke, 1985). En estos métodos, desde el punto de vista de la planificación energética, existen situaciones en las que los expertos deben elegir, dentro de un número finito de alternativas y evaluadas bajos ciertos criterios en conflicto, un grupo más estrecho de ellas (una relación de mejor rango). El método ELECTRE (*Elimination Et Choix Traduisant la Réalité*) se ha aplicado en muchas áreas y una de las aplicaciones

más usadas es en la selección de una alternativa energética con criterios en conflictos (Benitez Leyva, 2015).

La escuela americana está inspirada por los trabajos de Keeney (1996) sobre funciones multiatributo y teoría de la utilidad multiatributo. Un método popular, dentro de este marco, es el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) de Saaty (1980). Tomando ELECTRE y AHP para representar (como suele ser usual) las respectivas escuelas, se pueden distinguir fácilmente las diferencias y las analogías (Benitez Leyva, 2015). Los métodos ELECTRE se utilizan para clasificar a las poblaciones en categorías delimitadas por algunas alternativas de referencia o perfiles de referencia. Comienza con una comparación por pares de las alternativas bajo cada uno de los criterios por separado. Se introducen las valoraciones de cada una de las acciones bajo cada uno de los respectivos criterios, así como ciertos niveles de holgura para la diferenciación entre dos valoraciones de dos acciones distintas bajo cada criterio. El decisor puede declarar qué es indiferente entre las alternativas en consideración, qué tiene una preferencia débil o estricta por una de las dos, o qué es incapaz de expresar ninguna preferencia. La indiferencia entre dos acciones, o bien su preferencia débil o estricta, se resume diciendo que la primera acción es tan buena como la segunda o, equivalentemente, que la primera acción sobre-clasifica a la segunda. Así, bajo cada criterio hay un sistema completo o incompleto de relaciones binarias entre las alternativas, las denominadas relaciones de sobre-clasificación (Roy & Bouyssou, 1993).

El método PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations) nace de la mano de Jean-Pierre Brans (1982). A partir de entonces, empiezan a aparecer numerosas aplicaciones con un especial interés en los problemas de ubicación: plantas hidroeléctricas, instalaciones comerciales en un ambiente competitivo, depósitos de deshechos, evaluación financiera, etc. Uno de los objetivos esenciales del método es el de ser fácilmente comprensible para el decisor, siendo en realidad uno de los más intuitivos de la decisión multi discreta. En las distintas versiones del método se hace un amplio uso del concepto de pseudo-criterio y se procede a asociar a cada criterio original un criterio generalizado, que responde a uno de los seis tipos reconocidos, en general, en la literatura sobre el tema. Aunque el método PROMETHEE está también sujeto a subjetividades, especialmente en lo que se refiere a la definición de los parámetros de los pseudo-criterios, es preciso puntualizar, sin embargo, que éstos umbrales no intervienen en el mismo momento de cada método, ya que en el ELECTRE I actúan directamente sobre la relación de superación, por lo que no es sorprendente que la influyeran directamente, mientras que en el PROMETHEE los umbrales intervienen en la fase preparatoria de definición de los criterios. El método PROMETHEE posee una definición axiomática que permite caracterizarlo como un método de agregación que satisface condiciones de neutralidad (el pre-orden agregado no se ve influido por el número de alternativas), monotonía (el pre-orden social se comporta en el buen sentido cuando el número de sujetos que 5 prefieren una alternativa a otra aumenta), y otras condiciones algo más complejas (Bouyssou, 1990).

El método AHP (Analytic Hierarchy Process) también comienza con una evaluación por pares de las alternativas bajo cada uno de los criterios por separado. En el experimento básico, donde las alternativas *A* y *B* se presentan bajo el criterio *C*, se requiere al decisor que exprese su indiferencia entre las dos, o su preferencia, débil, fuerte o muy fuerte, por una de ellas. Su juicio verbal (la gradación de selección) es a continuación convertida en un valor numérico sobre una denominada escala fundamental. Mediante una matriz, el AHP calcula las puntuaciones parciales bajo cada criterio, también denominadas “impact scores”, aproximando los valores subjetivos de las alternativas bajo cada criterio. Merece la pena notar que las puntuaciones parciales no son únicas. Se define un cociente para cada par de alternativas, con lo cual las puntuaciones parciales tienen un grado multiplicativo de libertad. Pueden obviamente ser normalizadas. Comparaciones por pares y cálculos similares conducen a pesos normalizados para los respectivos criterios. Finalmente, hay un paso de agregación que genera puntuaciones multi-criterio globales y la media aritmética. Por medio de estas cantidades, denominadas puntuaciones finales, tenemos un orden global (o estructura global de preferencia) definida sobre el conjunto de alternativas. En la terminología de la escuela americana: las puntuaciones parciales y globales de las funciones parciales y la función global específicamente. En general, cada una de las alternativas es Pareto-óptima, porque las alternativas dominadas por otras pueden ser inmediatamente eliminadas de consideraciones posteriores (Benitez Leyva, 2015).

Según este autor algunas de las aplicaciones de los MCDM para trazar una política energética adecuada son:

- Inversión para la expansión del suministro
- Evaluación de fuentes de energía renovables
- Administración y planificación energética desde aspectos medioambientales

Por lo anteriormente anotado, nos centraremos justamente en la evaluación de las fuentes de energías renovables y la planificación energética, tomando en cuenta 4 criterios: económicos, técnicos, sociales y ambientales. En un estudio presentado por Rojas Zerpa & Yusta (2014) se recopila información de 120 trabajos sobre el análisis de las metodologías, tecnologías y aplicaciones para planeación de suministro eléctrico en zonas remotas rurales (ver Fig. 3). Se puede apreciar que el uso de MCDM en el tercer periodo es mayor en comparación con los periodos anteriores, debido principalmente a que el análisis ya no se centra en una única función objetivo.

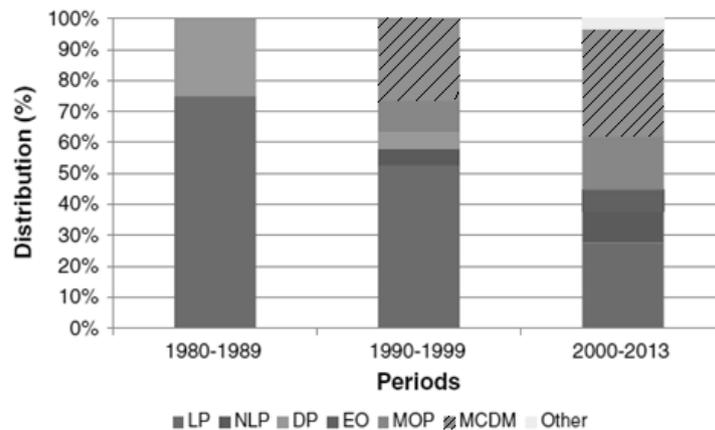


Figura 3. Porcentaje de distribución de metodologías utilizadas en planeación de suministro descentralizado de energía (Rojas-Zerpa & Yusta, 2015).

3. PROCESO DE PLANIFICACIÓN PARA ELECTRIFICACIÓN A ZONAS RURALES UTILIZANDO MÉTODOS DE DECISIÓN MULTICRITERIO (MCDM)

El proceso de planificación empieza con el análisis socioeconómico del lugar objeto de estudio, en donde se deberá determinar cuáles son las características y las necesidades por ser cubiertas y los aspectos relevantes que pueden contribuir a un mejor análisis en la planificación energética en la definición de las alternativas. Posteriormente se deberá definir cuáles son las alternativas tecnológicas que se pueden implementar en función de los recursos energéticos locales, determinando las condiciones mínimas necesarias y en función de los criterios definidos. Finalmente, determinada la matriz de evaluación, se procederá a definir un método que pueda realizar el análisis de todas estas variables para seleccionar la mejor alternativa.

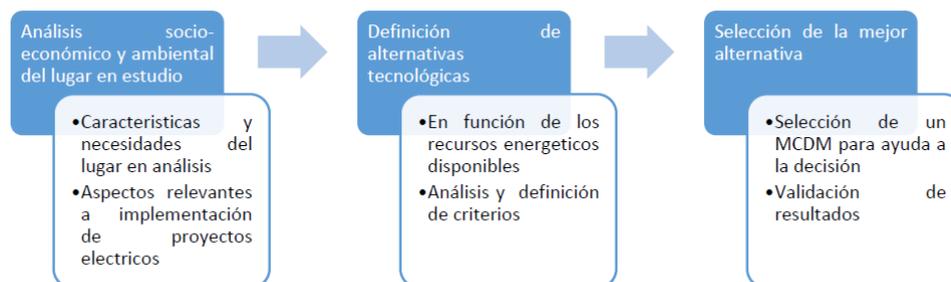


Figura 4. Esquema general en la planificación para electrificación en zonas rurales con ayuda de MCDM, adaptado de Ochoa Ramón (2009).

En los MCDM, otro de los pasos requeridos para el análisis de las decisiones multicriterio es el tema de la identificación de los criterios. En la Tabla 1 se presenta un resumen de los criterios y las modalidades de los tipos de sistemas utilizados en estudios similares para planificación energética en zonas rurales.

Tabla 1. Detalle de criterios utilizados para modelización y tipo de modalidad adoptada en sistemas de planificación energética.

BIBLIOGRAFIA	DETALLE DE CRITERIOS UTILIZADOS				MODALIDAD		
	CRITERIOS TECNICOS	CRITERIOS ECONOMICOS	CRITERIOS SOCIALES	CRITERIOS AMBIENTALES	DDG	CDG	PGE
Domenech Léga 2013	*Cantidad de suministro, *Continuidad del recurso, *Flexibilidad, *Repuestos locales, *Fabricación local, *Seguridad	*Costos de infraestructura	*Facilidad de gestión, *Equidad, *Beneficios domiciliarios, *Servicios comunitarios, *Usos productivos, *Impacto sobre los recursos locales		X	X	
Rojas Zerpa 2012	*Coeficiente de eficiencia, *Energía no servida, *Disponibilidad de suministro de energía primaria, *Confiabilidad de la tecnología	*Costo presente neto, *Costos variables de operación y mantenimiento	*Creación de trabajo, *Aceptación social de la energía, *Índice de desarrollo humano	*Emisiones de CO2, Nox, SO2, *Uso del suelo	X	X	X
Benitez Leyva 2015		*Costos de Inversión(año 2016); *Costos de operación y mantenimiento	*Aceptación social de la energía	*Emisiones de CO2; *Emisiones de Nox; *Emisiones de Sox	X	X	
Peralta Jaramillo 2011	*Continuidad del suministro, *Estimación de la demanda, *Análisis de los recursos energéticos	*Valor presente neto	*Servicios comunitarios, *Uso de suelo		X	X	
Ochoa Ramon 2009	*Suministro, *flexibilidad, *Repuestos y mantenimiento, *Fabricación local, Energía Exediaría, *Riesgos del sistema...	*Inversión inicial /beneficio, *Costos de Oper y Mant.), *Esfuerzo de pago...	*Facilidad de gestión, *Equidad, *Riesgo de conflictos, *Usos productivos, *Acceso a servicios básicos, *Beneficios domiciliarios, *Impacto sobre los recursos solares...	*Ruido, *Emisiones en la atmósfera, *Producción de residuos, *Impacto visual	X	X	
DDG	Generación dispersa descentralizada						
CDG	Generación concentrada descentralizada						
PGE	Sistemas conectados a la red						

3.1. Definición de criterios

Los criterios de selección pueden variar dependiendo de la zona objeto de estudio. No es lo mismo el análisis de planificación energética para una zona urbana que una zona rural; para la sierra, costa u oriente, cada lugar tiene sus características definidas. Del resumen detallado en la Tabla 1, se puede

Tabla 2. Criterios y subcriterios por considerar en planificación energética rural en Ecuador.

Criterios	Subcriterios	Unidad
Técnicos	Disponibilidad de suministro de energía primaria.	%
	Capacidad de cobertura de demanda de energía.	%
Económicos	Costos de inversión.	\$
	Costos de variables de operación y mantenimiento.	\$
Sociales	Aceptación social de la energía.	%
Ambientales	Emisión de CO2.	TnCO2/año
	Ocupación del suelo.	%
	Ruido	Escala (0-3)
	Impacto visual.	Escala (0-3)

verificar que, de estudios efectuados en distintos lugares, la mayoría de los criterios son comunes, por lo que podríamos considerar algunos de esos criterios para el caso del Ecuador y presentarlos en la Tabla 2, con sus respectivas unidades de medida y los subcriterios correspondientes.

En el pasado, los criterios de selección que más ponderación han recibido al momento de la instalación de un determinado proyecto son los criterios económicos y técnicos, sin embargo, debido principalmente al cambio climático que hoy en día afecta al planeta y a la mejora de las condiciones de vida para la población, el análisis de los criterios sociales y ambientales son considerados de gran importancia, previos a la instalación de cualquier proyecto, de ahí la necesidad de incluir en la planificación energética este tipo de criterios. Criterios como la disponibilidad de suministro de energía primaria, cobertura de la demanda del sistema y la aceptación social de la energía, deberán ser maximizados, mientras que los demás criterios deben ser minimizados.

3.2. Selección de alternativas

Para la selección de alternativas se deberán tomar en cuenta todos los criterios de selección, se analizará cada uno de ellos bajo sus valores cualitativos o cuantitativos. Con la matriz de evaluación se procederá a la elección de MCDM que se adapte al problema.

Tabla 3. Matriz de evaluación para planificación energética a zonas rurales en Ecuador.

		Disponibilidad de suministro Cobertura de demanda Costos de inversión Costos de operación y mant. Aceptación social de la energía Emisiones de CO2 Ocupación de suelo Ruido Impacto visual								
		Técnicos		Economicos		Sociales		Ambientales		
CODIGO	ALTERNATIVAS	C1	C2	C3	C4	C6	C7	C8	C9	C9
DDG1	SPV y baterías en cada vivienda	a11	a12	a13	...	...	...	...	...	...
DDG2	HIBRID SPV-WT y baterías en cada vivienda	a21	a22	...	...	...	...	...	...	...
CDG1	SPV MICRO-GRID y baterías	a31	...	...	...	...	...	...	...	...
CDG2	SPV, WT MICRO-GRID y baterías	...	...	...	...	...	...	...	...	...
CG	Extensión de la red pública	...	...	...	...	...	...	...	...	...
DDG	Generación descentralizada dispersa									
CDG	Generación descentralizada compacta									
CG	Generación Centralizada									

3.3. El problema de la clasificación para problemas de decisión multicriterio

Roy (1985) define cuatro tipos de problemas en la ayuda de decisión multicriterio:

- *Problemática de la descripción:* el propósito del análisis es describir la situación de decisión en un lenguaje formal, en términos de acciones, criterios y evaluaciones;
- *Problemática de la elección:* el propósito del análisis es seleccionar una acción (o un número limitado de acciones);
- *Problemática de categorización:* el propósito del análisis es clasificar las acciones por orden de preferencia;
- *Problemática de clasificación:* el propósito del análisis es clasificar las acciones en categorías definidas a priori.

Una de las situaciones que más dificultad lleva, a la hora de tomar una decisión, es aquella en la que las variables de decisión generan conflictos entre si y están sujetas a incertidumbre (Vitoriano, 2007); el uso de métodos multicriterio sobre clasificación puede ayudar a la resolución de este tipo de problemas.

3.4. El método ELECTRE TRI

La familia de métodos ELECTRE ha sido creada en los años 60 por Roy (1985) y sus colaboradores, y consiste en varios métodos desarrollados para la problemática de elección y clasificación, y un método para tratar la problemática ordinal de clasificación: el ELECTRE TRI (Roy & Bouyssou, 1993; Yu, 1992).

Introduzcamos alguna notación:

- m número de acciones;
- n número de criterios;
- t número de categorías;
- $A = \{a_1, \dots, a_m\}$ conjunto de acciones;
- $G = \{g_1(\cdot), \dots, g_n(\cdot)\}$ Conjunto de criterios (funciones valoradas reales en A);
- $C = \{C_1, \dots, C_t\}$ conjunto de categorías ordenadas (C_1 es el peor, C_t es el mejor);
- $B = \{b_0, \dots, b_t\}$ conjunto de perfiles (acciones de referencia) que separan categorías consecutivas.

Cada categoría C_i está limitada por dos acciones de referencia (perfiles): b_i es su límite superior y b_{i-1} su límite inferior (ver Fig. 5).

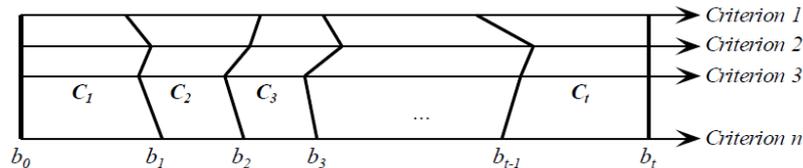


Figura 5. Estructuración método ELECTRE TRI (Yu, 1992).

La asignación de acciones a categorías se basa en el concepto de relación de superación en $A \times B$. Una acción $a_i \in A$ sobrepasa un perfil $b_h \in B$ (denotado $a_i S b_h$) si se puede considerar al menos tan buena como esta última (es decir, a_i no es peor que b_h), dadas las evaluaciones (actuaciones) de a_i y b_h en los n criterios. Si a_i no es peor que b_h en cada criterio, entonces es obvio que $a_i S b_h$. Sin embargo, si hay algunos criterios donde a_i es peor que b_h , entonces a_i puede superar b_h o no, dependiendo de la importancia relativa de esos criterios y de las diferencias en las evaluaciones (se pueden ignorar pequeñas diferencias, mientras que las grandes diferencias pueden oponerse a una Veto a la superación).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Selección de las alternativas

En el Ecuador el uso de energías renovables aún no se potencia su aprovechamiento, si consideramos la Figura 6, podemos apreciar que las fuentes que más energía proveen es la energía térmica y la energía hídrica, las cuales representan un alto porcentaje (94.7%) respecto de los otros tipos de energía, la energía solar y eólica apenas representan un 0.39% del total de energía producida (Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos, 2015).

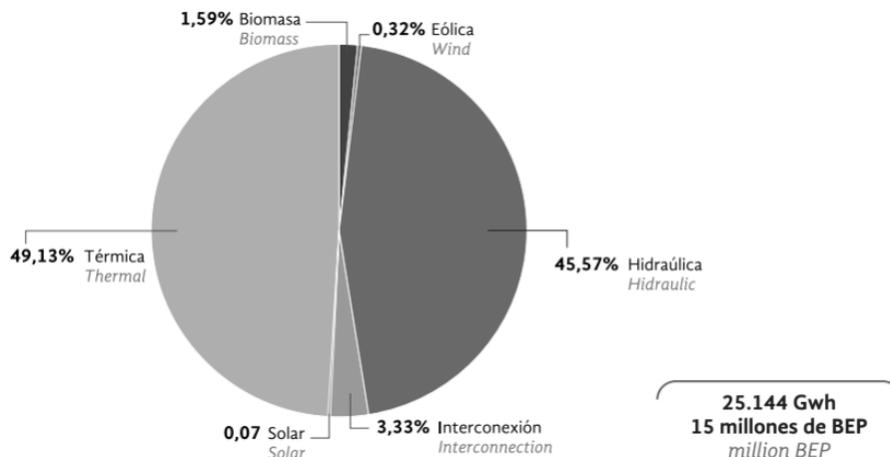


Figura 6. Estructura de generación de electricidad en Ecuador.

Para considerar alternativas con energías solar y eólica los valores mínimos aceptables son: insolación media anual mayor a 3 kWh/m²/día, o una velocidad promedio mínima de viento mayor a 5m/s (Domenech Léga, 2013; Peralta Jaramillo, 2011; Benitez Leyva, 2015; Ochoa Ramon, 2009). En los casos que no se considere el recurso eólico, la matriz de evaluación daría lugar a la presentada en la Tabla 4.

Tabla 4. Alternativas propuestas en caso de no considerar fiable el recurso eólico.

CODIGO	ALTERNATIVAS	CRITERIOS								
		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
DDG1	SPV y baterías en cada vivienda									
CDG1	SPV MICRO-GRID y baterías									
CDG2	SPV MICRO-GRID, extension de red y baterías									
CG	Extension de la red publica									
DDG	Generacion descentralizada dispersa									
CDG	Generacion descentralizada compacta									
CG	Generacion Centralizada									

4.2. Selección de criterios

Para la determinación de los criterios de selección debemos tomar como referencia estudios similares realizados en planificación energética rural y analizar cuáles son los que pueden ser considerados para la modelización del problema, estos dependerán del lugar de estudio.

4.3. Selección del método de decisión multicriterio

Con el análisis de los métodos existentes se consideró cuál de ellos se adapta a la problemática planteada, con el método escogido se puede tener resultados en donde las alternativas estarán ordenadas de acuerdo a categorías pre-definidas desde la “peor” hasta la “mejor”, teniendo en cuenta que en muchos casos la “mejor” alternativa no siempre será la que menor costo de inversión tenga, todo dependerá de los criterios de evaluación que están vinculados directamente con las preferencias del decisor.

5. CONCLUSIONES

Para la modelización y planteamiento del conjunto de las alternativas, en función de los criterios de selección y en base a la descripción de los métodos de sobre clasificación, el Método ELECTRE con su versión ELECTRE TRI sería un candidato idóneo para modelar el problema de decisión para la planificación de electrificación de zonas rurales. Los recursos energéticos locales son determinantes al momento de seleccionar las alternativas. Aun cuando otros MCDM pueden ser aplicados, se requeriría del análisis de otras variables como, por ejemplo, dar pesos relativos a los criterios de selección como en el caso AHP, donde las preferencias del decisor pueden afectar a la selección de la alternativa. El método multicriterio ELECTRE TRI tiene como objetivo clasificar un conjunto de alternativas de acuerdo con clases ordenadas y delimitadas por acciones de referencia.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido desarrollado gracias al apoyo brindado por la SENESCYT, la Universidad de Cuenca y el Insituto Politécnico de Leiria.

REFERENCIAS

- Benitez Leyva, L. V. (2015). *Procedimiento multicriterio-multiobjetivo e planificación energética a comunidades rurales aisladas*. Tesis doctoral, p. Departamento Ingeniería y Gestión Forestal y Ambiental, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España. Disponible en http://oa.upm.es/38624/1/LAZARO_VENTURA_BENITEZ_LEYVA.pdf
- Bouyssou, D. (1990). *Méthodes d'aide multicritère à la décision - Fondements et mise en œuvre*. Thèse de doctorat en Sciences de Gestion. Paris, France: Dauphine Université Paris.
- Brans, J.-P., Vincke, P. (1985). A preference ranking organization method: The PROMETHEE Method for Multiple Criteria Decision-Making. *Management Science*, 31(6), 647-656. <https://doi.org/10.1287/mnsc.31.6.647>
- Domenech Léga, B. (2013). *Metodología para el diseño de sistemas de electrificación autónomos para comunidades rurales*. Tesis doctoral, 238 p. Departamento de Organización de Empresas, Universitat Politècnica de Catalunya, Catalunya, España. Disponible en <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/95045/TBDL1de1.pdf>
- Keeney, R. L. (1996). Value-focused thinking: Identifying decision opportunities and creating alternatives. *European Journal of Operational Research*, 92(3), 537-549. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(96\)00004-5](https://doi.org/10.1016/0377-2217(96)00004-5)
- Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos. (2015). *Balance Energético Nacional 2015, Parte 1*, 54 p. Disponible en https://issuu.com/sectoresestrategicos/docs/resumen_balance_energetico_2015
- Ministerio de Electricidad y Energía Renovable. (2014). *Electrificación rural con energías renovables*. Disponible en <http://www.energia.gob.ec/electrificacion-rural-con-energias-renovables/>
- Ochoa Ramon, J. L. (2009). *Criterios de evaluación y análisis de alternativas para el diseño de proyectos de electrificación rural con energía eólica y solar en países en desarrollo*. Màster Interuniversitari UB-UPC d'Enginyeria en Energia, 52 p. Universitat Politècnica de Catalunya, Catalunya, España. Disponible en <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/11564/Memoria.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Peralta Jaramillo, J. (2011). *Estudio de viabilidad de un sistema energético*. Tesis de maestría. Facultad de Física, Universidad de Santiago de Compostela. Santiago de Compostela, España.
- Rojas-Zerpa, J. C., Yusta, J. M. (2014). Methodologies, technologies and applications for electric supply planning in rural remote areas. *Energy for Sustainable Development*, 20, 66-76. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2014.03.003>
- Rojas-Zerpa, J. C., Yusta, J. M. (2015). Application of multicriteria decision methods for electric supply planning in rural and remote areas. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 557-571. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.139>
- Romero, C. (1996). *Análisis de las decisiones multicriterio*. Publicación de Ingeniería de Sistemas, 115 p. Madrid, España: Isdefe. Disponible en http://www.academia.utp.ac.pa/sites/default/files/docente/51/decisiones_multicriterio.pdf
- Roy, B. (1985). *Méthodologie multicritère d'aide à la décision*. Paris, France: Éditeur, Economica, 423 p.
- Roy, B., Bouyssou, D. (1993). *Aide multicritère à la décision : méthodes et cas*. Paris, France: Dauphine Université Paris, 695 p. Disponible en <https://basepub.dauphine.fr/handle/123456789/4522>
- Simon, H. A. (1955). A behavioral model of rational choice. *The Quarterly Journal of Economics*, 69(1), 99-118.
- Vitoriano, B. (2007). *Teoría de la decisión: decisión con incertidumbre, decisión multicriterio y teoría de juegos*. Madrid, España: Universidad Complutense. 106 p. Disponible en http://www.mat.ucm.es/~bvitoria/Archivos/a_dt_UCM.pdf