

**SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DE INVERSIÓN EN GENERACIÓN DE
ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN
MULTIOBJETIVO Y MULTICRITERIO**

MARIANTONIETA MOLINA MANTILLA



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE ESTUDIOS INDUSTRIALES Y EMPRESARIALES
MAESTRÍA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL
BUCARAMANGA
2016**

**SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DE INVERSIÓN EN GENERACIÓN DE
ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN
MULTIOBJETIVO Y MULTICRITERIO**

MARIANTONIETA MOLINA MANTILLA

**Trabajo de investigación para optar al título de Magister en Ingeniería
Industrial**

Director:

NESTOR RAÚL ORTIZ PIMIENTO

MSc. en ingeniería industrial

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE ESTUDIOS INDUSTRIALES Y EMPRESARIALES
MAESTRÍA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL
BUCARAMANGA**

2016

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de investigación a mi familia, que es el motor de mi vida, mis padres y hermanos, especialmente mis sobrinas Sol y Avril.

Lo dedico a mi país, Colombia. Con la esperanza que sea un aporte significativo para el desarrollo y crecimiento económico del mismo, favoreciendo a las comunidades más necesitadas y aisladas, en el suministro de un servicio vital como es la energía eléctrica, y que contribuya a la reducción de los efectos del cambio climático incentivando la generación por medio de energías renovables

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios, por las bendiciones recibidas en mi vida y por las oportunidades brindadas para continuar cumpliendo mis sueños y tener una vida plena.

Por permitirme adquirir destrezas en el campo de la investigación, hacer mi aporte a la ciencia y a la comunidad. Conocer diferentes países y culturas por medio de este trabajo de investigación. Y contar con personas maravillosas que me han brindado su apoyo y buena energía durante este proceso.

A mi familia, amigos, compañeros de trabajo y compañeros de investigación, este trabajo es resultado de un esfuerzo conjunto. Gracias por su apoyo y comprensión.

Al ingeniero Ariel Uribe y mis compañeros del grupo de Optimización y Diversificación energética del Instituto Colombiano de Petróleo, porque el trabajo realizado en el Instituto gestó la idea de este proyecto. Les agradezco estar en mi vida, porque son personas excepcionales, con excelentes valores.

A la compañía Decision Ware, y el ingeniero Raúl Rodríguez, por incentivar esta investigación.

A la Universidad Industrial de Santander, Consejo Académico, División Financiera, Vicerrectoría de Investigación y Extensión, especialmente a la Escuela de Estudios Industriales y Empresariales y al grupo de investigación en Optimización y Organización de Sistemas productivos, administrativos y logísticos – *OPALO*, porque la formación profesional recibida, despertó en mí el interés por la

investigación de operaciones y la optimización. Y deseo continuar desarrollando proyectos en este campo.

A los profesores y compañeros del Grupo de Investigación OPALO, y de la maestría en Ingeniería Industrial, especialmente mi amiga y profesora Eliana Peña, quienes me brindaron su conocimiento, experiencia, comprensión y motivación en este proceso.

Al profesor Néstor Ortiz, por brindarme sus conocimientos, orientar y facilitar mi trabajo de investigación. A los profesores Henry Lamos, Gerardo Latorre y Viatcheslav Kafarov, quienes con su formación, experiencia y contactos, aportaron significativamente a la revisión, y ejecución del proyecto.

A los Ingenieros Electricistas Christian Arteaga y Henry Medina, quienes con su formación, empeño y dedicación contribuyeron significativamente a realización del Caso Aplicado del proyecto y validación del modelo matemático, y a la Ingeniera Ana María Rosso, quien con su experiencia y conocimiento aportó a la realización del proyecto.

Al Instituto de Nacional de Electricidad y Energías Limpias de México, por brindarme la oportunidad de realizar mi pasantía de investigación en tan destacado claustro, especialmente al PhD. José Luis Ceciliano, quien con sus investigaciones y experiencia orientó la metodología de la presente investigación, la formulación del modelo matemático y programación del mismo en GAMS.

Al IFORS, por brindarme el espacio y la oportunidad de presentar mi ponencia. Y al IPSE y la UPME del Ministerio de Minas y Energías de Colombia, especialmente a los profesionales que se interesaron por mi trabajo de investigación, revisaron las presentaciones y los documentos, hicieron sus aportes y recomendaciones al proyecto, contribuyeron con la explicación del sistema y el suministro de datos de

entrada y fuentes de información para la realización del Caso Aplicado y en la definición de criterios cualitativos, ponderación de importancia de los mismos, e implementación del método multicriterio para el Caso Aplicado. Ingenieros, Germán Hernández, Jairo Valencia, Germán Neira, Rafael Albarracín, Javier Rodríguez y al PhD Camilo Táutica por la evaluación y calificación del presente trabajo de investigación.

A todos, Gracias por su valioso tiempo, apoyo, motivación, paciencia, comprensión y por alentarme a conseguir grandes objetivos y a ser cada día mejor.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	16
1. REVISIÓN DE LA LITERATURA	18
2. PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	41
3. METODOLOGÍA	49
3.1 FASE 1: OPTIMIZACIÓN MULTI OBJETIVO	51
3.1.1 Formulación Matemática	51
3.1.2 Resultados Optimización Multiobjetivo	70
3.2 FASE 2: MÉTODO DE OPTIMIZACIÓN MULTICRITERIO	77
3.2.1 Resultados Optimización Multicriterio	84
4. CONCLUSIONES	88
5. RECOMENDACIONES E INVESTIGACIONES FUTURAS	92
BIBLIOGRAFÍA	93

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Metodología propuesta.	50
Figura 2. Curva de Pareto Objetivos Económico y Ambiental.	70
Figura 3. Resultados Costos y Emisiones totales por alternativas.	72
Figura 4. Nueva capacidad instalada total clasificada por tipo de fuentes.	87

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Parejas de Pesos Ponderados	62
Tabla 2. Resultados modelo multiobjetivo. Consolidados a 10 años.	71
Tabla 3. Resultados en nueva capacidad instalada total por alternativas por año	73
Tabla 4. Resultados en generación total por alternativas en 10 años.	74
Tabla 5. Resultados en nueva capacidad instalada total por alternativas en 10 años.	75
Tabla 6. Definición de Criterios y Subcriterios cualitativos	80
Tabla 7. Parejas Fuente - Tecnología	83
Tabla 8. Escala de valoración Saaty, método AHP.	83
Tabla 9. Jerarquización de método AHP.	85
Tabla 10. Cantidad generada (promedio mensual, 10 años) [kW] por nodos	85
Tabla 11. Nueva capacidad instalada total en (10 años) [kW] por nodos	86

LISTA DE ANEXOS¹

	Pág.
ANEXO A. CASO APLICADO	106
ANEXO B. MODELO MATEMÁTICO – DETALLADO	106
ANEXO C. MÉTODO MULTICRITERIO	106

¹ Ver documentos adjuntos en el CD-ROOM

RESUMEN

TÍTULO: SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DE INVERSIÓN EN GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN MULTIOBJETIVO Y MULTICRITERIO.*

AUTOR: Mariantonieta Estefanía Molina Mantilla**

PALABRAS CLAVE: Optimización, Multiobjetivo, Multicriterio, Toma de Decisiones, Planeación Energética, Energía Renovable, Caso Aplicado.

DESCRIPCIÓN

Esta investigación propone una metodología basada en un modelo de programación lineal para resolver el problema multiobjetivo de planeación de la expansión en generación de energía, en dos fases: Un método multiobjetivo, que determina la nueva capacidad a instalar y la cantidad de energía a generar, considerando criterios cuantitativos (Económico y Ambiental- Generación de emisiones) seguido de un método multicriterio usado para seleccionar la mejor alternativa, considerando criterios cualitativos (sociales y de sostenibilidad). Donde, se logra satisfacer la demanda de energía eléctrica en diferentes nodos considerando la generación con fuentes renovables y convencionales. Enfocándose en un caso aplicado para zonas no interconectadas en Colombia.

Para el desarrollo de este proyecto de investigación fue necesario hacer un análisis del sistema de generación de energía en nuestro país y seleccionar los nodos, fuentes y tecnologías factibles en este estudio para crear el modelo matemático de planeación energética. El modelo matemático es lineal y estratégico, orientado a largo plazo (10 años) con periodos de tiempo mensuales, tiene dos funciones objetivo (Minimizar los costos y la generación de emisiones) y sus restricciones. El modelo es programado en el software de modelos matemáticos y optimización GAMS, donde a las funciones objetivo se le asignan diferentes pesos y estas son normalizadas. Esta etapa es resuelta con el método de optimización de Sumas Ponderadas (Zadeh, 1963) y se obtiene una Frontera de Pareto, con diez alternativas de solución del modelo.

Luego, para escoger una única solución, se aplica el método multicriterio teniendo en cuenta ocho criterios cualitativos: Técnicos, Sociales, Medioambientales y Físicos, utilizado el Proceso de Análisis Jerárquico AHP (Saaty, 1980), comparando entre los diferentes criterios y cada una de las diez alternativas y con la participación de expertos en toma de decisiones, se obtiene un Ranking de Alternativas

* Proyecto de grado para optar al título de Magister en Ingeniería Industrial.

** Facultad de ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales, Ingeniería Industrial. Director: MSc. Néstor Ortiz Pimiento.

ABSTRACT

TITLE: SELECTION OF INVESTMENT ALTERNATIVES IN POWER GENERATION EXPANSION USING MULTIOBJECTIVE AND MULTICRITERIA OPTIMIZATION METHODS. *

AUTHOR: Mariantonieta Estefanía Molina Mantilla **

KEY WORDS: Optimization, Multiobjective, Multicriteria, Decision Making, Power Energy Planning, Renewable Energy, Applied Case.

DESCRIPTION

This research proposes a framework based on a linear programming model to solve the multiobjective generation expansion planning problem in two phases. A Multiobjective method is used to decide the new capacity to install. Then, a multicriteria method is used to select the best alternative. Quantitative (economical, environmental) and qualitative (social, sustainability) criteria are considered. The projected demand is satisfied considering renewable and conventional sources, especially in places where there is not interconnection to the electrical system, focusing in a Colombian case.

For the development of the project it was necessary to do an analysis to the energy system in Colombia and then to make a mathematical model to do energy planning. Mathematical model is strategic (for long time, ten years in monthly periods) and linear with two objective functions (Minimizing economical costs and environment-emissions) and constraints. This model is programming in General Algebraic Model System (GAMS) and different weights are assigned to the objective functions and there are normalized, this stage is solved by Weighted-sum method (Zadeh, 1963) and a Pareto Front is obtained with ten alternatives of solution.

Then to choose only one solution a multicriteria method is applied taking into account eight qualitative criteria: Technical, Social, Environment and Physical and using Analytical Hierarchy Process AHP (Saaty, 1980) with comparison between criteria and alternatives and with the participation of decision makers the Alternatives Ranking is obtained.

* Research Project to Master Degree.

** Physicomechanical Engineering's Faculty. Industrial and business School, Industrial Engineering. Director: MSc. Nestor Ortiz Pimiento.

INTRODUCCIÓN

La energía eléctrica es un servicio vital para el desarrollo y evolución de un país. Constituye el principal insumo de las actividades industriales que soportan su economía y es indispensable para garantizar la calidad de vida de sus habitantes. Actualmente, en Colombia existe gran interés por aumentar la cobertura, suministro 24 horas, y su aseguramiento a largo plazo de manera sostenible, contemplando las proyecciones en el crecimiento de la población y la industria en los próximos años y la escasez prevista en la disponibilidad de recursos energéticos.

Por lo tanto, dada la apremiante necesidad que tienen los gobiernos de planear el abastecimiento de estos requerimientos energéticos, es necesario que la planeación energética de un país contemple inversiones en sistemas de generación no convencionales.

Sin embargo, la evaluación y selección de las alternativas de inversión apropiadas es una decisión compleja, considerando que, además de satisfacer la demanda proyectada las plantas de generación de energía eléctrica deben ser económica, ambiental y socialmente sostenibles, teniendo en cuenta la relevancia que estos aspectos han tomado en los últimos años.

El presente proyecto de investigación está orientado a contribuir en la solución del problema de decisión para planeación energética: Planeación Multiobjetivo de la expansión en capacidad de generación de Energía Eléctrica (MGEP², por sus siglas en inglés, Multiobjective Generation Expansion Planning), mediante la

² MEZA, J. L. C., YILDIRIM, M. B., & MASUD, A. S. M. A Model for the Multiperiod Multiobjective Power Generation Expansion Problem. *IEEE Transactions on Power Systems*, 22(2), 871-878. doi:10.1109/TPWRS.2007.895178. 2007

selección de alternativas de inversión en generación de energía, determinando la capacidad a instalar y cantidad de energía a generar, para satisfacer la demanda de energía prevista a largo plazo. Además, tendrá en cuenta el interés actual por invertir en fuentes de generación de energía no convencionales, que compitan con alternativas de generación convencional. A partir de una metodología con un modelo matemático multiobjetivo y un método multicriterio que involucra criterios económicos, técnicos, ambientales y sociales.

Para validar el modelo y los métodos de solución propuestos se resuelve el problema de planeación energética en algunos nodos de las zonas no interconectadas de Colombia (ZNI): Acandí, Ciudad Mutis, Leticia y San Andrés.

El modelo tiene un componente diferenciador respecto a investigaciones anteriores en el país, debido a la implementación del método de solución “combinado multiobjetivo y multicriterio”, para aproximarse a mejores soluciones. Resuelve el problema para diferentes nodos simultáneamente, y tiene en cuenta diversos criterios cualitativos (económico y ambiental) y cuantitativos (técnicos, ambiental, social y vías de acceso), lo cual proporciona decisiones más sostenibles. Presenta las soluciones en períodos de tiempo mensuales, en un horizonte de planeación de 10 años, considerando los cambios en disponibilidad de fuentes en estos períodos de tiempo y un presupuesto limitado para inversión y generación. Además, cuenta con la participación de expertos en la toma de decisiones.

Esta investigación constituye un aporte significativo para entidades gubernamentales y empresas generadoras de energía, que pretendan implementar proyectos de generación, especialmente en áreas sin acceso al SIN y donde se pretende aprovechar su potencial en energía renovables.

1. REVISIÓN DE LA LITERATURA

El estudio de los problemas de planeación de abastecimiento energético a largo plazo es un tema de interés para los gobiernos y las industrias en todo el mundo y ha tomado relevancia en los últimos años, debido al incremento significativo de la demanda de energía, en medio de un panorama de escasez de combustibles fósiles y una marcada tendencia al control de emisiones de gases efecto invernadero y los efectos del cambio climático. Los tomadores de decisiones en planeación energética deben enfrentar estos grandes retos y avanzar hacia una nueva matriz energética orientada al desarrollo de energía sostenible.

Las energías renovables, tales como energía eólica, solar, y bioenergía entre otras, constituyen una estrategia para lograr este propósito y requieren una participación importante en la planeación energética de los países.

Al respecto, diversos autores señalan que: “determinar si establecer o no sistemas de energía renovable y qué fuentes o combinación de fuentes es la mejor opción es una decisión compleja”³ que da lugar al problema planeación en expansión de la capacidad de generación. Tekiner, H., et al (2010)⁴ señalan que: “el problema de planificación de expansión de la generación de energía eléctrica, Generation Expansion Planning, por sus siglas en inglés, GEP, que en adelante se denominará GEP, consiste en la selección de opciones tecnológicas de última generación que se añaden a un sistema existente, teniendo en cuenta, cuándo y dónde deben construirse para satisfacer la creciente demanda de energía en un

³ BAÑOS, R., MANZANO-AGUGLIARO, F., MONTOYA, F. G., Gil, C., ALCAYDE, a., & GÓMEZ, J. Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(4), 1753-1766. doi:10.1016/j.rser.2010.12.008 2011

⁴TEKINER, H., COIT, D. W., & FELDER, F. a. Multi-period multi-objective electricity generation expansion planning problem with Monte-Carlo simulation. *Electric Power Systems Research*, 80(12), 1394-1405. Elsevier B.V. doi:10.1016/j.epsr.2010.05.007 2010

horizonte de tiempo de planificación”. Este problema también es conocido por sus siglas en inglés como PGEP (Power Generation Expansion Planning), en adelante se denominará PGEP y consiste en la evaluación de diferentes alternativas de proyectos de generación de energía para seleccionar la mejor y es definido por Meza, J. L. C et al., (2007⁵ y 2009⁶), como “el problema que determina qué, dónde y cuándo construir nuevas unidades de generación, para satisfacer la demanda de energía prevista” determinando la capacidad de generación que se debe instalar y la cantidad de energía a generar en cada período de tiempo, dentro de un horizonte de planeación a largo plazo.

Este problema busca encontrar el plan de expansión de mínimo costo. Sin embargo, hay otros objetivos que pueden ser considerados en el problema tales como: impacto ambiental, fiabilidad, combustible importado y seguridad, entre otros. El problema se ha resuelto utilizando optimización, pero se considera complejo y difícil de resolver, principalmente cuando involucra múltiples objetivos en conflicto, tales como: minimización de los costos del sistema, maximización de confiabilidad y minimización de los impactos ambientales; y cuando tienen en cuenta la incertidumbre asociada a los datos de entrada.

De acuerdo con Jebaraj S. (2006) los planteamientos de los modelos en cuanto a criterios, fuentes y tecnologías a evaluar y métodos de solución de los problemas de decisión mencionados, son variados y su desarrollo ha evolucionado en los últimos años. “Existen aplicaciones en diferentes tipos de modelos tales como modelos de energía renovable, reducción de emisiones, planeación energética, abastecimiento de la demanda energética, y modelos de pronóstico control empleando métodos de optimización”⁷.

⁵ MEZA, J. L. C., YILDIRIM, M. B., & MASUD, A. S. M. Op. Cit.

⁶Ibíd.

⁷JEBARAJ S, INIYAN S. A review of energy models. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2006; 10(4):281–311.

La formulación para seleccionar la mejor alternativa y resolver el problema GEP inicialmente era mono-objetivo, predominaba el criterio económico relacionado con la minimización de diferentes tipos de costos: costos de inversión, de operación (generación y transmisión) y mantenimiento. Uno de los primeros autores, Bloom, J. A. (1982)⁸ abordó el problema a largo plazo y lo resolvió con planteamiento mono-objetivo (minimizar los costos: valor presente de los costos de inversión y operación del sistema), considerando evaluación multi-período y diferentes tipos de plantas de generación. Utilizó el método de Descomposición de Benders Generalizada (Geoffrion, AM., 1972) y dividió el problema en un problema master y un subproblema bajo el supuesto de linealidad.

Sin embargo, en los últimos años y según Bhattacharyya (2012)⁹, dada “la necesidad de incorporar aspectos ambientales y sociales en la planificación energética, el interés de los países y las industrias por incursionar en generación de energías no convencionales y debido a que este tipo de energía era menos competitiva que la energía convencional en cuanto a inversión, madurez tecnológica y capacidad de generación” surgió la necesidad de incorporar más de un objetivo, pasando del económico, a los técnicos y luego a los ambientales (los cuáles se hicieron más notables a finales de los 80's con el incremento de la conciencia ambiental, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático y el tratado de Kyoto en 1992), garantizando un suministro energético confiable que minimice el impacto ambiental. Actualmente, los problemas involucran adicionalmente el criterio social Doukas, H. C. et al (2007)¹⁰

⁸ BLOOM, J. A. Solving an Electricity Generating Capacity Expansion Planning Problem by Generalized Benders' Decomposition. *Operations Research*, 31(1), 84-100. 1982

⁹ BHATTACHARYYA, S. C. Review of alternative methodologies for analysing off-grid electricity supply. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 677-694. Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.rser.2011.08.033. 2012

¹⁰ DOUKAS, H. C., ANDREAS, B. M., & PSARRAS, J. E. Multi-criteria decision aid for the formulation of sustainable technological energy priorities using linguistic variables. *European Journal of Operational Research*, 182(2), 844-855. doi:10.1016/j.ejor.2006.08.037 2007

e indicadores de sostenibilidad Afgan, N. (2008) ¹¹ . Esta tendencia ha incrementado notablemente el uso de enfoques multicriterio en la solución del problema de decisión.

“Los métodos de decisión multicriterio por sus siglas en inglés, MCDM, Multi-criteria Decision Making, en adelante MCDM, han sido ampliamente utilizados para tratar criterios múltiples y en conflicto y obtener mejores soluciones” Pohekar (2004)¹², además, involucran la percepción de un grupo de expertos en el proceso de decisión. Estos métodos se dividen dos: los métodos de toma de decisiones multiobjetivo (por sus siglas en inglés y en adelante MODM (Multi-objective Decision Making)), cuantitativos, y los métodos de toma de decisiones con múltiples atributos (por sus siglas en inglés y en adelante MADM (Multi-attribute Decision Making)), cualitativos. Theodorou (2010)¹³.

En los MADM se evalúa un número de alternativas de acuerdo a una serie de parámetros predeterminados, como el valor de las funciones objetivo (que en este método se denominan criterios). Las alternativas se comparan unas con otras con el fin de obtener la mejor solución, teniendo en cuenta la preferencia de los decisores o expertos.

Existen numerosas investigaciones plantean resolver el problema GEP únicamente con técnicas multicriterio MADM, (también conocidas en la literatura como MCDM).

¹¹ AFGAN, N. H., & CARVALHO, M. G. Sustainability assessment of a hybrid energy system. *Energy Policy*, 36(8), 2903-2910. doi:10.1016/j.enpol.2008.03.040 2008

¹² POHEKAR, S. D., & RAMACHANDRAN, M. (). Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 8(4), 365–381. doi:10.1016/j.rser.2003.12.007. 2004

¹³ THEODOROU, S., FLORIDES, G., & TASSOU, S. The use of multiple criteria decision making methodologies for the promotion of RES through funding schemes in Cyprus, A review. *Energy Policy*, 38(12), 7783–7792. doi:10.1016/j.enpol.2010.08.038. Theodorou investiga el uso de MCDM métodos y su implementación en la isla de Chipre. 2010

Tales como, (Georgopoulou, 1997)¹⁴ en selección de la capacidad de generación y distribución óptima para la generación de electricidad en regiones con grandes incrementos de demanda empleando el método ELECTREE y problemas de expansión de grandes sistemas de energía eléctrica en Rusia (Voropai, 2002)¹⁵, quién resolvió el problema utilizando el método MAUT.

Según Theodorou (2010)¹⁶: Muchos métodos de toma de decisiones con múltiples criterios MCDM se han desarrollado a través de los años y se utilizan para una amplia gama de aplicaciones. Estos métodos varían desde los muy simples hasta muy complejos. Algunos métodos tales como el método de las sumas ponderadas (WSM, por sus siglas en inglés Weighted Sum Method), Zadeh (1963) y el método del producto ponderado (WPM, por sus siglas en inglés Weighted Product Method) son métodos muy comunes. Otros métodos han sido desarrollados como una alternativa, tales como la técnica simple de calificación para atributos múltiples (SMART, por sus siglas en inglés Simple Multi-attribute Ranking Technique), Olson (1996), Mészáros y Rapcsák (1996) como una versión más simple de la teoría de la utilidad de atributos múltiples (MAUT, por sus siglas en inglés Multi-Attribute Utility Theory), Keeney y Raiffa (1976) y la técnica para orden de preferencia por similitud para la solución ideal (TOPSIS, por sus siglas en inglés Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution), Hwang and Yoon (1981), como un alternativa al método de eliminación y selección traduciendo la realidad (ELECTREE Elimination and Choice Translating Reality), Roy B.,(1985), entre otros. Recientes trabajos de investigación han implementado los métodos Fuzzy AHP (FAHP) y GIS (por sus siglas en inglés, Geographic Information

¹⁴ GEORGOPOULOU, E., LALAS, D., & PAPAGIANNAKIS, L. A multicriteria decision aid approach for energy planning problems: The case of renewable energy option. *European Journal of Operational Research*, 103(1), 38-54. doi:10.1016/S0377-2217(96)00263-9 1997

¹⁵ VOROPAI, N. I., & IVANOVA, E. Y. Multi-criteria decision analysis techniques in electric power system expansion planning. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 24(1), 71-78. doi:10.1016/S0142-0615(01)00005-9 2002

¹⁶THEODOROU, S., FLORIDES, G., & TASSOU, S. Op. Cit.

System) Marques, J.E., et al (2015)¹⁷ y Eroglu, Hasan and Aydin Musa (2015)¹⁸ y SMAA (por sus siglas en inglés, Stochastic Multicriteria Acceptability Analysis) Wang, Haichao., et al (2015)¹⁹ para resolver problemas de decisión multicriterio.

Sin embargo, los métodos de MCDM más utilizados en problemas de la planificación energética, en especial de la energía renovable son: el AHP Analytic Hierarchy Process, propuesto por Saaty (1980)²⁰, seguido por PROMETHEE, ELECTREE y MAUT.

Pohekar (2004), Theodorou (2010) y Bhattacharyya, S. C. (2012)²¹ y Wang (2009)²² indican que el AHP es el método integral más popular. Y según (Karni et al., 1992)²³, con el fin de validar el resultado se puede usar más de un método MCDM para resolver el problema de decisión.

A diferencia del MADM, en el MODM las alternativas no están predefinidas, sino que se construyen con los resultados de las variables de decisión, ya que el problema se plantea como un modelo matemático, con funciones objetivo, variables de decisión y restricciones, y es resuelto con un método multi-objetivo el

¹⁷ MARQUES, J. E., Teixeira, J., Chamine, H. I., Carvalho, M. R., Rocha, F., Fonseca, P. E., & Pe, A. A comprehensive analysis of groundwater resources using GIS and multicriteria tools (Caldas da Cavaca , Central Portugal): environmental issues, 2015 2699–2715. <http://doi.org/10.1007/s12665-014-3602-1>

¹⁸ EROGLU, Hasan and Aydin Musa Optimization of electrical power transmission lines'routing using AHP , fuzzy AHP , and GIS, 2015 1418–1430. <http://doi.org/10.3906/elk-1211-59>

¹⁹ WANG, Haichao., Jiao Wenling., Lahdelma Risto., Zhu Chuanzhi & Zou Pinghua Stochastic Multicriteria Acceptability Analysis for Evaluation of Combined Heat and Power Units, 2015 59–78. http://doi.org/10.3390/en8010059_

²⁰ SAATY TL. The analytic hierarchy process. New York, NY, USA: McGraw-Hill. 1980

²¹ BHATTACHARYYA, S. C. Op. Cit.

²² WANG, J.-J., JING, Y.-Y., ZHANG, C.-F., & ZHAO, J.-H. Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2009 2263-2278. doi:10.1016/j.rser.2009.06.021

²³ KARNI, R., FEIGIN, P., BREINER, A. Multicriterion issues in energy policy making. *European Journal of Operational Research* 56, 1992 30–40.

cual genera el conjunto de soluciones no dominadas, conocidas como: soluciones del frente de Pareto, Pareto V. (1896)²⁴.

Cabe anotar, que los métodos de solución MCDM basados en la preferencia de los interesados, no son los únicos explorados para la solución de este problema de decisión. Algunos autores han resuelto este complejo problema mediante la aplicación de optimización multiobjetivo MODM como programación dinámica (DP, por sus siglas en inglés) programación lineal entera (ILP, por sus siglas en inglés), programación con restricciones, las técnicas de programación lineal entera mixta (MILP, por sus siglas en inglés), y los algoritmos evolutivos y genéticos que se aplican también a la planificación de servicios públicos de electricidad y problemas de gestión de energética²⁵.

Los métodos de optimización multi-objetivo apropiados otorgan a los tomadores de decisiones una colección de diferentes soluciones, donde se pueden evaluar las consecuencias de las diferentes alternativas propuestas y su impacto en el resto del sistema. Esto permitirá tomar decisiones que pueden reducir los riesgos de inversión. Pero generalmente, estos métodos (MODM) preceden la implementación de un método MCDM.

A partir del enfoque de solución en dos fases, se han desarrollado investigaciones como la de Yang, H.T and Cheng S.L. (1989)²⁶, quienes combinan de manera secuencial los métodos MODM y MADM, resolviendo el problema GEP en Taiwán con métodos multiobjetivo, seguido de multicriterio utilizando un algoritmo que combina programación dinámica y el método de simulación de la producción, donde con la rutina de programación dinámica se determina el conjunto de

²⁴ VILFREDO PARETO., 1896

²⁵WRIGHT JA, LOOSEMORE HA, FERMANI R. Optimization of building thermal design and control by multi-criterion genetic algorithm. Energy and Buildings 2002;34:959–72.

²⁶YANG, H.T .and CHEN, S. L. Incorporating a multicriteria decision procedure into the combined dynamic programming. IEEE Transactions on Power Systems, 1989 4(1).

soluciones no dominadas. Y, en la siguiente fase se plantea el procedimiento multicriterio MCDM, con la técnica para el orden de preferencia por similitud con la solución ideal, TOPSIS, por sus siglas en inglés, para jerarquizar las soluciones. Esta investigación, constituye un punto de partida en la solución del problema multiobjetivo con la combinación de métodos cuantitativos y métodos multicriterio, los cuales a partir de las soluciones no dominadas, determinan el orden jerárquico de implementación de las alternativas, seleccionando las mejores, de acuerdo a los criterios considerados, como se plantea en el presente trabajo de investigación.

Young – Chang Kim and Byong-Hun Ahn (1993)²⁷ también resolvieron el problema de PGEP en Korea con planteamiento multiobjetivo, seguido del método multicriterio, a partir de programación dinámica por orden de preferencia, utilizando la herramienta WASP por sus siglas en inglés Wien Automatic System Planning Package²⁸, obteniendo una lista de casos que combinan las mejores decisiones de capacidad a adicionar y luego los tomadores de decisiones seleccionan la mejor alternativa de acuerdo a su preferencia.

Posteriormente, Joao Climaco., et al (1995)²⁹ resolvieron el problema con el método de programación lineal multiobjetivo MOLP, por sus siglas en inglés, obteniendo las soluciones compromiso del conjunto de soluciones factibles no dominadas del frente de Pareto. Y en una siguiente fase, a partir de estas soluciones, aplica el método gráfico, denominado TRIMAP diseñado para problemas de tres objetivos, donde los tomadores de decisiones deben seleccionar las mejores alternativas, considerando su ubicación en el gráfico de

²⁷ KIM, Y.-CHANG. Multicriteria Generation-Expansion Planning with Global Environmental Considerations. *Engineering*, 40(2), 1993 154-161.

²⁸ OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY, Wien Automatic System Planning Package (WASP): An Electric Expansion Utility Optimal Generation Expansion Planning Computer Code, Rep. ORNL-4925 1974.

²⁹ CLÍMACO JOAO et al., A multiple objective linear programming model for power generation expansion. *International Journal Of Energy*, 19(March 1994), 1995 419-432.

acuerdo a la puntuación y ponderación que cada una obtuvo en los tres objetivos (minimizar el valor presente neto del costo y el impacto ambiental y maximizar la confiabilidad del sistema).

Por otro lado, Linares Llamas, P. (1999)³⁰ plantea una solución para problema de planificación integrada de recursos para satisfacer la demanda en un horizonte de planeación a largo plazo en España. A diferencia de las investigaciones anteriores, incluye una fase adicional en la metodología de solución: tratamiento de incertidumbre. La solución se desarrolla en tres fases: optimización multiobjetivo con programación compromiso para determinar el conjunto de soluciones eficientes, optimización multicriterio: AHP y manejo de incertidumbre: por medio de escenarios y resolución de un juego contra la naturaleza involucrando análisis de riesgos.

De manera adicional, C. Henggeler Antunes., et al (2004)³¹, plantean el método de solución del problema multiobjetivo PGEP, con un modelo de programación lineal entera mixta (MOMILP, por sus siglas en inglés), donde se obtiene el conjunto de soluciones no dominadas (con la optimización individual de cada objetivo) de las cuales se obtiene la solución compromiso, y los tomadores de decisiones con ayuda de la herramienta computacional escogen la solución ideal considerando la distancia Tchebycheff con el punto de referencia.

Meza, J. L. C., et al. (2007) plantean el enfoque híbrido para resolver el problema de decisión de planeación de la expansión de generación de energía multiobjetivo Multiobjective Generation Expansion Planning, (por sus siglas en inglés y en

³⁰ LINARES LLAMAS, P. Integración de criterios medioambientales en procesos de decisión: una aproximación multicriterio a la planificación integrada de recursos eléctricos. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes España. 1999

³¹ ANTUNES, C. H., MARTINS, A. G., & BRITO, I. S. A multiple objective mixed integer linear programming model for power generation expansion planning. *Energy*, 29(4), 2004 613-627. doi:10.1016/j.energy.2003.10.012

adelante, MGEP), en dos fases: Fase 1: Programación Lineal Multiobjetivo y Fase 2: En donde se prioriza la implementación de las alternativas de inversión con cada una de las tecnologías para un período de tiempo, con el método AHP. Concluye qué: sería interesante incluir más objetivos en problema como un mejor impacto social para maximizar la confiabilidad del sistema. Además, existen otras aplicaciones y métodos de solución del problema, pero las mayores limitantes para la solución MGEP son tiempo y costo. Por otro lado, señala que la disponibilidad y experiencia de los tomadores de decisiones son un aspecto clave en este tipo de aplicaciones. Cabe resaltar, que esta investigación es tomada como referencia para el presente proyecto.

Recientemente, Galvez, G. H. et al., (2014)³² emplea el método de programación compromiso y el modelo de optimización híbrido para energías renovables utilizando el software Hybrid Optimization Model for Electric Renewables – HOMER, desarrollado por NREL National Renewable Energies Laboratory³³ para generar conjuntos de alternativas a través de búsqueda enumerativa y se evalúa la influencia de las variaciones en la ponderación para cada criterio.

George Mavrotas (2009)³⁴ señala que los métodos de solución para los problemas de programación matemática multiobjetivo se clasifican en a priori (antes de resolver el modelo), interactivos (durante la solución del modelo) y a posteriori (después de resolver el modelo), de acuerdo a la etapa de decisión en la cual los tomadores de decisiones indican sus preferencias³⁵. Los métodos interactivo y a posteriori transmiten mucha más información a los tomadores de decisiones para

³² GALVEZ, G. H., PORTELA, J. R. D., RODRÍGUEZ, A. N., et al., Selection of hybrid systems with hydrogen storage based on multiple criteria : application to autonomous systems and connected to the electrical grid, (July 2013), 2014 702–713. <http://doi.org/10.1002/er>.

³³ Guía de Inicio HOMER Versión 2.0 National Renewable Energy Laboratory. Department of Energy Laboratoric.Golden, Colorado. 2003

³⁴ MAVROTAS, G. Effective implementation of the e-constraint method in Multiobjective Mathematical Programming problems. *Applied Mathematics and Computation*, 213-455-465.. 2009

³⁵ HWANG C.L, A.MASUD Multiple Objective Decision Making. Methods and Applications: A State of the Art Survey. *Lecture Notes in Economicsand Mathematical Systems, vol 164, Springer – Verlag*. Berlín. 1979

tomar la decisión acertada, especialmente los métodos a posteriori o de generación., Estos métodos exigen un esfuerzo computacional mayor. Sin embargo, una gran ventaja es que el tomador de decisiones puede observar el conjunto de soluciones de Pareto y proceso de solución se divide en dos fases independientes: En la primera fase se genera el conjunto de soluciones eficientes de Pareto, en donde se tienen todas las posibles alternativas, allí se involucra al tomador de decisiones y en la siguiente fase este refuerza su confianza para tomar la decisión final. Los métodos de generación más usados son “*weighting method*” y “*e-constraint method*” (método de las restricciones). Estos métodos son usados para problemas lineales y de tamaño mediano. Sin embargo, el método de las restricciones también genera eficientes soluciones en problemas no lineales, no convexos y de programación matemática multiobjetivo mixta entera, con variables continuas y discretas.

Por su parte, Ehrgott (2006)³⁶ señala que el método de las restricciones es el método más popular para encontrar todas las soluciones eficientes, y que el método de las restricciones elásticas (compuesto por el método de las restricciones y el de las sumas ponderadas) es superior al método de las restricciones, ya que genera soluciones eficientes aceptables y requiere menor esfuerzo computacional. Kazemi, A. et al., (2014)³⁷ aplican a los problemas de planeación de expansión en generación y transmisión optimización multiobjetivo usando la teoría de la decisión de la brecha “gap” de información y el método ϵ - de restricción aumentada.

³⁶ EHRGOTT, M. A discussion of scalarization techniques for multiple objective integer programming. *Annals of Operations Research*, 147(1), 2006 343-360. doi:10.1007/s10479-006-0074-z.

³⁷ KAZEMI, A., DEGHAN, S., & AMJADY, N. Multi-objective robust transmission expansion planning using information-gap decision theory and augmented ϵ -constraint method. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 8(5), 828–840. 2014 <http://doi.org/10.1049/iet-gtd.2013.0427>

Por otro lado, M.O.W. Grond (2012)³⁸ señala, que el uso de procedimientos heurísticos permite obtener soluciones factibles para los problemas multiobjetivo de sistemas de energía a gran escala. Algunos notables Algoritmos de Optimización Evolutiva Multiobjetivo (MOEAs, por sus siglas en inglés) de primera generación son: el Algoritmo Genético de Clasificación no dominado (NSGA)³⁹ y el Algoritmo Genético Pareto-Niched (NPGA)⁴⁰. Entre los Algoritmos MOEAs de segunda generación que se enfocan en la noción de elitismo (cómo retener y actualizar el conjunto de las mejores soluciones no dominadas), dos reconocidos son: Algoritmo Evolutivo de Strength Pareto 2 (SPEA 2)⁴¹ y el Algoritmo Genético de Clasificación no dominado II (NSGA-II)⁴² empleado por Kong D.S (2015)⁴³. Los métodos heurísticos permiten el modelado preciso del problema de optimización y buscar buenas soluciones a problemas muy complejos, en un tiempo de cálculo razonable.

Meza, J. L. C., et al. (2009) también resuelve el problema MGEP en dos fases, pero lo hace para un período de tiempo únicamente. Obtiene el conjunto de soluciones no dominadas del frente de Pareto con programación entera mixta (MMGEP, por sus siglas en inglés Mixed-Integer non linear GEP) y después evalúa estas soluciones simultáneamente con algoritmos de programación evolutiva multiobjetivo - (Multiobjetive Evolutionary Algorithm) MOEA, por sus siglas en inglés. Con el cuál se determina un nuevo conjunto de soluciones no

³⁸GROND, M. O. W., MEMBER, S., LUONG, N. H., MORREN, J., & SLOOTWEG, J. G. (n.d.). Multi-Objective Optimization Techniques and Applications in Electric Power Systems.

³⁹N. SRINIVAS, AND K. DEB, "Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms. *Evolutionary Computation*, vol. 2(3), pp. 221—248, 1994.

⁴⁰A. ABRAHAM, L. JAIN, AND R. GOLDBERG (EDS), *Evolutionary Multiobjective Optimization – Theoretical Advances and Application*, Springer-Verlag, London, 2005.

⁴¹E. Zitzler, M. Laumanns, and L. Thiele, "SPEA 2: Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm," Technical Report 103, computer Engineering and networks Laboratory (TIK), Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Switzerland, May 2001.

⁴²K. DEB, A. PRATAP, S. AGARWAL, AND T. MEYARIVAN, "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II," *IEEE Transaction on Evolutionary Computation*, vol. 6(2), pp. 182 - 97, April 2002.

⁴³KONG, D.-S., JANG, Y.-S., & HUH, J.-H. Method and Case Study of Multiobjective Optimization-Based Energy System Design to Minimize the Primary Energy Use and Initial Investment Cost. *Energies*, 8(6), 6114–6134. 2015 <http://doi.org/10.3390/en8066114>

dominadas, y luego se priorizan las alternativas a implementar con el método Análisis Jerárquico de Procesos, AHP.

Panpan, J. et al., (2013)⁴⁴ presenta un nuevo enfoque para sistemas híbridos de generación renovable distribuida basado en el grado de satisfacción difusa “fuzzy” combinado con un algoritmo genético para lograr la optimización del sistema.

Ameli, A. et al., (2015)⁴⁵ resuelve el problema con optimización multiobjetivo con enjambre de partículas (MOPSO por sus siglas en inglés, multiobjective particle swarm optimization) y técnicas de optimización difusa “fuzzy”, la decisión incluye localización.

Por otro lado, Hatice Tekiner., et al (2010)⁴⁶ resolvieron el problema multiperíodo y multiobjetivo GEP con simulación Montecarlo, para tratar la incertidumbre y determina la capacidad y el período de tiempo donde debe ubicarse la nueva unidad de generación. El problema es formulado con programación lineal mixta entera MILP, donde se obtiene el frente de Pareto y las soluciones óptimas son encontradas a partir de escenarios de simulación con combinación de las funciones objetivo y programación estocástica.

⁴⁴ PANPAN, J., JUN, Z., & CHUANCHUAN, C. Multi-objective optimization for renewable energy distributed generation based on fuzzy satisfaction. *2013 5th International Conference on Power Electronics Systems and Applications (PESA)*, (2), 1–4. 2013 <http://doi.org/10.1109/PESA.2013.6828223>.

⁴⁵ AMELI, A., MEMBER, S., FARROKHIFARD, M., & MEMBER, S. Profit-Based DG Planning Considering Environmental and Operational Issues : A Multiobjective Approach, 2015 1–12.

⁴⁶TEKINER, H., COIT, D. W., & FELDER, F. a. Multi-period multi-objective electricity generation expansion planning problem with Monte-Carlo simulation. *Electric Power Systems Research*, 80(12), 1394-1405. Elsevier B.V. 2010 doi:10.1016/j.epsr.2010.05.007.

Charwand, M. et al., (2014)⁴⁷ proponen una investigación basada en formulación con programación entera mixta (MIP, por sus siglas en inglés), utilizando la Descomposición de Benders para dividir el problema y obtener la solución óptima.

El método intersección de límite normal (NBI, por sus siglas en inglés Normal Bourdary Intersection) se implementó para generar soluciones óptimas de Pareto. Finalmente, la mejor solución compromiso se logra a partir de toma de decisiones difusa “fuzzy” y se emplea el mecanismo de rueda de la ruleta y la simulación de Monte Carlo para la generación de escenarios al azar, en donde el problema de optimización estocástica se convierte en sus respectivos equivalentes deterministas. Por su parte, Heidari, A. et al., (2015)⁴⁸ presentan un estudio similar para resolver el problema de planificación de la expansión de generación y transmisión coordinada, con un enfoque probabilístico multi-objetivo, pero a diferencia del anterior, los resultados de la etapa multiobjetivo son comparados con los métodos algoritmo genético de clasificación no dominada con bases de datos virtuales II (VDSNSGA II, por sus siglas en inglés) y el método algoritmo genético de clasificación no dominada II (NSGA II, por sus siglas en inglés).

Adicionalmente, es importante señalar, que no hay un consenso sobre qué criterios utilizar en el proceso de decisión. Los criterios y subcriterios (o atributos) son exclusivos para contexto del problema en el cuál se lleva a cabo el proceso de decisión, su elección depende de las características del sistema de generación, las alternativas a evaluar y la información disponible. Los intereses considerados en la formulación de los modelos, la situación que enmarca la toma de decisiones y la percepción de los tomadores de decisiones, también determinan la selección de los criterios.

⁴⁷ CHARWAND, M., AHMADI, A., HEIDARI, A. R., MEMBER, S., & NEZHAD, A. E. Benders Decomposition and Normal Boundary Intersection Method for Multiobjective Decision Making Framework for an Electricity Retailer in Energy Markets, 1–10. 2014

⁴⁸ HEIDARI, A., MAVALIZADEH, H., & AHMADI, A. Probabilistic multi-objective generation and transmission expansion planning problem using normal boundary intersection. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 9(6), 560–570. 2015 <http://doi.org/10.1049/iet-gtd.2014.0278>.

Wang (2009)⁴⁹ indica que “Los costos locales de inversión se encuentran en primer lugar en todos los criterios de evaluación, seguido de cerca por la emisión de CO2”. Además señala que “los multiatributos considerados en la toma de decisiones en energía sostenible han ganado una creciente popularidad. Y, la eficiencia, el costo de la inversión, la emisión de CO2 y la creación de empleo son los criterios más comunes.”

El presente proyecto de investigación propone resolver el problema GEP con múltiples objetivos, es decir, el problema MGEP (Multiobjective Generation Expansion Planning) Meza, J. L. C et al., (2007), el cual contempla los objetivos económico y el ambiental, entre otros, para determinar las fuentes y tecnologías de generación, cuánto generar, cuánta capacidad instalar y en qué período de tiempo, para diferentes nodos, en un horizonte de planeación a largo plazo, empleando un método multiobjetivo seguido de multicriterio, como aporte significativo a la planeación energética de un país, con la implementación de un caso de estudio enfocado en la solución del problema para nodos en Colombia que forman parte de las Zonas no Interconectadas, ZNI.

En Colombia, se han desarrollado investigaciones similares a la propuesta, encaminadas a seleccionar las mejores alternativas de generación de energía, con el objeto de resolver el problema de energización, particularmente en ZNI y el Ministerio de Minas y Energía, ha venido trabajando en la solución de este problema. En 1999, la Unidad de Planeación Minero Energética, UPME contrató el diseño de un plan estructural, institucional y financiero para el suministro de energía eléctrica a las ZNI, con la participación de las comunidades y el sector privado con caracterización de la demanda de energía, clasificación de los centros poblados, su situación natural, económica y social, así como una estimación de los costos del suministro de energía, un sistema de información geo-referenciado de las ZNI y una propuesta regulatoria de suministro de electricidad (Hagler Bailly y

⁴⁹ WANG, J.-J., JING, Y.-Y., ZHANG, C.-F., & Zhao, J.-H. Op. Cit.

Aene Consultancy, 2001)⁵⁰. Por su parte, el Instituto de Planeación y Promoción de Soluciones Energéticas, IPSE ha diseñado una metodología para la formulación, evaluación y priorización de proyectos de energización para las ZNI (IPSE, 2001)⁵¹.

Por su parte, Tobón D., et al (2010)⁵² señalan que en Colombia, la energización de las ZNI en el pasado se abordó desde la factibilidad técnica y la viabilidad económica de los proyectos. Sin embargo, este esquema tradicional es modificado por investigaciones como las de Cadena, A et al., 2005⁵³, Henao, F et al., 2005⁵⁴, Pérez, E 2005⁵⁵, que contemplan múltiples objetivos, tales como: naturales, sociales, humanos, biofísicos y financieros que constituyen una propuesta integral para la selección de tecnologías y la asignación de recursos a proyectos de energización.

Es así como Cadena, A et al. (2005) proponen seleccionar una tecnología que maximice la formación de los capitales natural, económico y social de una localidad, teniendo en cuenta la disponibilidad de recursos, las alternativas energéticas y la capacidad de pago de la población. Henao, F. (2005) aborda el

⁵⁰ HAGLER, BAILLY Y AENE CONSULTORÍA *Documentos ANC-375-10, 13, 16, 17, 20, 21, 22, 23, 24, 27, 28 y 29*, en: *Establecimiento de un plan estructural, institucional y financiero, que permita el abastecimiento energético de las zonas no interconectadas, con participación de las comunidades y el sector privado*. Santafé de Bogotá. 2001

⁵¹ INSTITUTO DE PLANEACIÓN Y PROMOCIÓN DE SOLUCIONES ENERGÉTICAS PARA LAS ZONAS NO INTERCONECTADAS *Manual metodológico para la formulación, evaluación y priorización de proyectos de soluciones energéticas para las ZNI*. Santafé de Bogotá. 2001

⁵² TOBÓN OROZCO, David et al. *Optimización de herramientas multiobjetivo para la toma de decisiones de inversión en sistemas aislados sostenibles de energía*. Universidad de Antioquia, ISA, Colciencias. 2010.

⁵³ CADENA, Angela et al. "Programa para soportar la toma de decisiones de soluciones energéticas a ZNI con un enfoque de optimización en la maximización del beneficio para resolver el problema del suministro de electricidad con mínimo costo", en: VI Seminario Internacional sobre Análisis y Mercados Energéticos, Medellín, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín-Universidad de Los Andes. 2005

⁵⁴ HENAO, Felipe et al. *Modelo de toma de decisiones multiobjetivos en energización de ZNI, como herramienta para el alcance de MVS*. Tesis de Maestría. Escuela de Sistemas. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. 2005

⁵⁵ PÉREZ, Edison "Energización rural en ecosistemas estratégicos de Colombia", Medellín, I Simposio Internacional Energía y frontera tecnológica en el sector rural. Centro de Convenciones Quirama. 2005

problema de la selección de la mejor alternativa para energizar una comunidad en San José Cravo Norte (Arauca). Presenta un algoritmo para la asignación de pesos a los objetivos del problema de selección de tecnologías y un modelo de toma de decisiones multicriterio con programación compromiso, Zeleny, M. (1973)⁵⁶ para las distancias de los puntos del pentágono de capitales. Los capitales son definidos considerando el esquema de sostenibilidad conocido como Medios de Vida Sostenibles (DFID, 2005)⁵⁷. El cual busca el análisis del problema mediante la optimización simultánea de cinco indicadores representativos, los llamados “capitales de la comunidad” (natural, social, humano, físico y financiero), donde en cada eje del pentágono se localizan las alternativas de acuerdo a su ponderación para cada uno de los criterios, y los tomadores de decisiones seleccionan cuáles implementar de acuerdo a su preferencia. La herramienta computacional SURE (Sustainable Rural Energy Decision Support System, es un producto de dicha investigación, en el marco del proyecto de investigación Resurl —Renovable energy for sustainable rural livelihood—(Resurl, 2005⁵⁸; Colciencias, 2005⁵⁹).

Otras investigaciones también han utilizado la metodología del pentágono de capitales de medios de vida sostenibles MVS, para resolver el problema de energización, tales como Gonzales et al (2005)⁶⁰ quienes proponen un modelo

⁵⁶ ZELENY, M. Compromise Programming. En: J.L. Cockrane y M. Zeleny (editores). *Multiple Criteria Decision Making*. University of South Carolina Press, Columbia. 1973

⁵⁷ DEPARTMENT FOR INTERNATIONAL DEVELOPMENT —DFID—Guías sobre medios de vida sostenibles MVS. Disponible en: http://www.livelihoods.org/info/info_guidancesheets.html, acceso: septiembre de 2008. En este proyecto participaron la Universidad Central Las Villas, Cuba; el ITDG "Intermediate Technology Development Group", del Perú; la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, y el Imperial College London, Reino Unido, como coordinador del proyecto. 2005

⁵⁸ RENEWABLE ENERGY FOR SUSTAINABLE LIVELIHOODS RESURL *Seminario taller sobre la energización rural en zonas rurales aisladas y medios de vida sostenibles*. Medellín. 2005

⁵⁹ CENTRO COLOMBIANO PARA EL DESARROLLO DE LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA, COLCIENCIAS *Informe técnico de avance: Proyecto de investigación “plataforma para el soporte a la evaluación de políticas y a la toma de decisiones en energización de zonas no interconectadas en Colombia”*. Medellín, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. 2005

⁶⁰ GONZALES Guillermo CADENA Angela.. et al, Desarrollo de un programa para la ayuda en la toma decisiones para la implementación de soluciones energéticas en las zonas no interconectadas. 2005

para la selección del proyecto que busca maximizar el beneficio de la localidad de Calamar, Guaviare. Se basa en tres capitales del pentágono: económico, social y natural. Incluye el mínimo costo y se determinan diferentes indicadores asociados con estos capitales. El resultado más alto dará la mejor solución propuesta (que le agregue mayor valor económico y su operación y mantenimiento sean financiables por la comunidad). Hoyos (2007)⁶¹ en la evaluación de políticas para la electrificación de una ZNI en el suroccidente de Colombia, utiliza dinámica de sistemas y medios de vida sostenibles. Cherni et al (2007)⁶², presentan una herramienta analítica denominada SURE (The Sustainable Rural Energy Decision Support System-DSS), con el objetivo de maximizar los cinco capitales que representan una localidad (físico, financiero, natural, social y humano), cuyas dinámicas dependen principalmente de la provisión de energía eléctrica y de otros proyectos productivos y sociales complementarios, para el análisis de decisión de alternativas de generación de energía rural y suministro de energía renovable, usando el enfoque MCDM. Trabajos similares han sido desarrollados en Colombia por Naranjo et al., (2005)⁶³ y Franco et al., (2008).⁶⁴

En adición, Chaves Lised., (2013)⁶⁵ desarrolló una metodología de optimización multiobjetivo para energización de zonas rurales, en la localidad de Bocas de Canal (Nariño) en el marco del programa de energización rural sostenible, PERS,

⁶¹ HOYOS, SANTIAGO *Simulación para la evaluación de políticas en la energización de una ZNI del suroccidente colombiano utilizando DS y MVS*. Tesis de maestría en ingeniería de sistemas, Medellín, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. 2007

⁶²CHERNI JA, DYNER I, HENAO F, Jaramillo P, Smith R, Font RO. Energy supply for sustainable rural livelihoods: a multi-criteria decision support system. *Energy Policy* 2007;35(3):1493–504.

⁶³NARANJO, L & BOTERO, S .Informe Marco Legal. En Proyecto COLCIENCIAS. Plataforma para el soporte a la evaluación de políticas y a la toma de decisiones en energización de zonas no interconectadas en Colombia. En Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Mayo 2005.

⁶⁴FRANCO, Carlos; DYNER, Isaac e HOYOS, Santiago Contribución de la energía al desarrollo de comunidades aisladas no interconectadas: Un caso de aplicación de la dinámica de sistemas y los medios de vida sostenibles en el Suroccidente Colombiano. *Dyna -Revista. Facultad. Nacional de Minas* [online], vol.75, n.154, 2008 pp. 199-214. ISSN 0012-7353.

⁶⁵CHAVES, LISED., Metodología con optimización multiobjetivo para energización de zonas rurales, realizar un software que permita la aplicación a una zona no interconectada del departamento de Nariño. Universidad de los Andes. Unidad de Planeación Minero Energética. 2013

de la UPME. Se establece la rentabilidad de las opciones energéticas, en términos de VPN y la evaluación de alternativas se basa en decisiones multiobjetivo que evalúan criterios (con base en el concepto de MVS) físicos, naturales, económicos y sociales, utilizando programación compromiso y el proceso de análisis jerárquico AHP (Analytic Hierarchy Process) Saaty, (1980)⁶⁶. Inicialmente, se utiliza el software HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewables – NREL) para la evaluación económica y técnica de las alternativas energéticas encontradas, luego se aplica el método AHP y se asignan los pesos de los subcriterios (criterios cualitativos, no tenidos en cuenta en el HOMER). Con los resultados obtenidos a partir del método AHP se aplica el método de Programación Compromiso en el pentágono de capitales.

Estos criterios fueron tomados como referencia para plantear los criterios cualitativos considerados en esta investigación.

Si bien, los estudios anteriores aplicados al contexto colombiano resuelven el problema de energización, y constituyen una buena solución para determinar con que alternativas satisfacer la demanda de energía a largo plazo. No determinan la cantidad de energía a generar en cada período de tiempo. Tobón D., et al (2010)⁶⁷ señala que estos trabajos realizan análisis estáticos y determinísticos, y dejan a un lado herramientas de simulación que permitan conocer el impacto futuro de las decisiones actuales sobre el desarrollo sostenible de las ZNI tales como: Álvarez, 2005⁶⁸; Aristizábal, 2006⁶⁹; Franco et al., 2006⁷⁰.

⁶⁶ SAATY, THOMAS L. Op. Cit..

⁶⁷ TOBÓN OROZCO, David et al Op. Cit.

⁶⁸ ÁLVAREZ, Claudia Contribución de la energía a los medios de vida rurales sostenibles – un enfoque de dinámica de sistemas. Tesis de maestría en ingeniería de sistemas, Medellín, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. 2005

⁶⁹ ARISTIZÁBAL, Jaime Simulación de políticas y estrategias en pro del uso eficiente de los recursos estatales para la energización rural colombiana. Tesis de maestría en ingeniería de sistemas, Medellín, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. 2006

⁷⁰ FRANCO, Carlos, et al Assessing the impact of energization in the Colombian Southwest: a case of application using SD. 24 Congreso internacional de la sociedad de dinámica de sistemas, Holanda. 2006

Tobón D., et al (2010) abordan el problema multiobjetivo por etapas, la característica básica de esta propuesta consiste en que todas las variables se reducen a una dimensión de costos, es decir, cualquier variable o criterio se cuantifica monetariamente. Se comparan las alternativas en términos del VPN y se estudia la rentabilidad de establecer proyectos sombilla de reducción de emisiones de CO₂⁷¹. El modelo establece qué alternativas en cuanto a tecnología y tamaño son más eficientes en términos de mínimo costo y sostenibilidad y compara las opciones de generación propia con interconexión al Sistema Interconectado Nacional (SIN). Para este análisis se utiliza una aplicación construida en el software R, los criterios para la selección de la alternativa son: evaluación del capital social y humano, por medio de las restricciones sociales e institucionales (RSI). Emplea algoritmos de ubicación geográfica, y análisis estadístico PCA para asignar los pesos a los objetivos en el método multicriterio.

Existen otros ejemplos de aplicación de un método Multiobjetivo MODM para Planeación Energética en Colombia, tales como: Chahín C, (2009)⁷² quién realizó una investigación aplicada al Sistema Eléctrico Colombiano, señala que “La Unidad de Planeación Minero Energética de Colombia (UPME) en sus análisis de planeación a largo plazo, utiliza, conjuntamente con otras entidades, el modelo LEAP (Long-Range Energy Alternatives Planning System, (Stockholm Environment Institute, 2008)) y la familia de modelos MARKAL (MARK et Allocation)⁷³. LEAP es un modelo de simulación para planeación de la demanda, en tanto que MARKAL es un modelo integrado de programación lineal multiperíodo, desarrollado para apoyar la toma de decisiones en los procesos de

⁷¹ ORGANIZACIÓN LATINOAMERICANA DE ENERGÍA (OLADE), en su programa de energía sostenible desarrolla un proyecto conjuntamente con la Universidad de Calgary y el gobierno de Canadá para electrificación rural en Colombia (2006) “diseño y operación de los sistemas energéticos para zonas asiladas, la puesta en marcha de esquemas de sostenibilidad, capital semilla para replicar proyectos piloto”.

⁷² CHAHÍN ÁLVAREZ, Carmenza. Proyecto: *INFORME FINAL* Planificación Energética - Estudio de Caso, Colombia. 2009, Págs. 8, 88-91.

⁷³ ALFSTAD, T “Applications of energy Models in the South. Energy Research Centre. LEAP & MARKAL,” in *Recommend. V1*. Ed 2. 2004.

planificación de largo plazo de sistemas energéticos. Es un modelo manejado desde la demanda, el cual evalúa la contribución óptima de las tecnologías en función de diferentes objetivos alternos o ponderados: minimización de costos descontados, minimización de importaciones de combustibles fósiles, minimización de emisiones contaminantes, maximización de la participación de fuentes renovables, con sujeción a ciertas restricciones”.

Por otro lado, el Instituto de Energía de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín ha desarrollado herramientas de planeación y metodologías para la energización rural, para ello considera múltiples objetivos y algoritmos genéticos (Smith y Mesa, 1996⁷⁴; Smith y Pulgarín, 2002⁷⁵). Mientras que, Bastidas, M. (2010)⁷⁶ desarrolló un modelo optimización termoeconómica, tecnológica y ambiental con algoritmos genéticos multiobjetivo, con los objetivos: minimización de gases efecto invernadero, minimización de costos energético-económicos y maximización de la eficiencia energética) aplicando algoritmos evolutivos (para la configuración de los pesos de los objetivos) y algoritmos genéticos multiobjetivo para resolver el problema de optimización energética y obtener la frontera de Pareto. Realizó tratamiento de la incertidumbre empleando simulación Montecarlo. Además, integra la simulación con optimización y utiliza el método TOPSIS para la evaluación de alternativas. Quijano H, Ricardo (2012)⁷⁷ desarrolló una plataforma de planificación energética denominada MODERGIS, basada en los criterios de sostenibilidad, preservación del medio ambiente, social y seguridad en el suministro energético y se aplicó a un caso piloto en Colombia. MODERGIS reúne

⁷⁴ SMITH, R Y J. MESA A rural electrification expansion model. *International Transactions in Operational Research*. Vol. 3, 1996 pp. 319-325.

⁷⁵ SMITH, R. Y A. PULGARÍN *Optimización multiobjetivo con algoritmos genéticos: desarrollo de un modelo para energización rural*. Chile, XI Congreso Latino-iberoamericano de investigación de operaciones. 2002

⁷⁶ BASTIDAS BARRANCO, Marlon José. Análisis multiobjetivo para la optimización en sistemas de generación de energía Tesis Doctoral. Programa de Ingenierías. Área: Sistemas Energéticos. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Medellín. 2010

⁷⁷ QUIJANO HURTADO, RICARDO Diseño e implementación de una plataforma integrada de modelación para la planificación energética sostenible -Modergis – “estudio de caso Colombia” Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. 2012

herramientas en planificación energética tales como: los sistemas de información geográfica, un modelo de proyección de oferta y demanda de energía LEAP y el algoritmo basado en análisis multicriterio de decisión que integra los resultados de las dos herramientas anteriores; para seleccionar la combinación en una canasta de alternativas energéticas renovables. Resuelve el problema con el método de optimización por niveles de metas o aspiraciones VIKOR (Serafim Opricovic & Tzeng, 2007)⁷⁸, con el cual se identifican los mejores y peores valores de cada criterio y las distancias con la mejor decisión.

Estas investigaciones han sentado un importante precedente para la investigación en planificación energética en Colombia, especialmente para la energización de zonas no interconectadas.

Finalmente, se concluye que emplear métodos MCDA agregados es decir, incorporar dos o más métodos MCDA con estilos diferentes en la solución del problema, otorgan mayor validez en la solución., Wang (2009). Bhattacharyya (2012) recomienda una herramienta híbrida que combine dos o más opciones para resolver el problema de decisión y de esta manera tomar ventaja de las fortalezas y debilidades de las diferentes opciones y la verificación en los resultados de los enfoques.

La optimización multicriterio MCDA para selección de alternativas de inversión en generación de energía, contribuye a resolver de manera apropiada el problema de decisión en planeación de la expansión de capacidad en generación de energía. Sin embargo, la incorporación de métodos multiobjetivo MODM, permite resolver este problema considerando las características energéticas del sistema y la generación multiperíodo en un horizonte de planeación a largo plazo. Por lo tanto, la implementación de métodos multiobjetivo y multicriterio conjuntamente garantiza una solución integral que involucra las soluciones obtenidas a partir de un

⁷⁸ SERAFIM OPRICOVIC & TZENG, 2007

tratamiento objetivo y analítico, con el tratamiento subjetivo, alcanzando la decisión apropiada, que no está condicionada únicamente por la experiencia y percepción individual del grupo de expertos, lo que conduce a una solución más robusta y acertada.

Sin embargo, la implementación del método de solución “combinado (multiobjetivo y multicriterio)”, para aproximarse a mejores soluciones, debe profundizarse en Colombia, ya que pocas aplicaciones integran el método de optimización multiobjetivo, seguido de métodos de optimización multicriterio para resolver el problema de planeación energética MGEP multiperíodo a largo plazo.

Y pocas, además incorporan criterios sociales y/o de sostenibilidad en la toma de decisiones, para la evaluación de alternativas de energía convencional y renovables y resuelven el problema en diferentes nodos conjuntamente, como lo propone la presente investigación. Además, a diferencia de investigaciones preliminares, la propuesta evalúa en el método multicriterio, criterios diferentes a los considerados en el método multiobjetivo.

2. PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

El sistema de abastecimiento energético en Colombia tiene gran interés por resolver el problema de satisfacer la demanda a largo plazo, en medio de un panorama de escasez de combustibles fósiles convencionales y ampliar la cobertura para el territorio nacional (considerando que actualmente existen poblaciones sin acceso a la red del sistema interconectado nacional y sin suministro energético las 24 horas). Escenario que tiende a agravarse, si no se evalúan e implementan nuevas alternativas de generación. Este proyecto de investigación presenta una propuesta para resolver el problema mencionado, también denominado problema de planificación de expansión de generación de energía (GEP por sus siglas en inglés).

Alizadeh, B., & Jadid, S. (2011)⁷⁹, manifiesta que “el problema de planificación de los sistemas de energía es muy importante debido a la creciente necesidad de electricidad y como la planificación requiere grandes inversiones financieras, es esencial tener en cuenta qué alternativas emplear y sus justificaciones económicas”.

En la toma de decisiones actual para resolver este problema, predomina el criterio económico y la decisión se toma con el objeto de satisfacer la demanda total proyectada a largo plazo (es decir para un único período de tiempo), además la información detallada de las alternativas respecto a otros criterios de evaluación (por ejemplo, ambiental y social) es escasa y estos no se consideran. La información disponible no presenta datos respecto a intereses de la comunidad y las consecuencias ambientales y sociales del proyecto de generación.

⁷⁹ALIZADEH, B., & JADID, S. Reliability constrained coordination of generation and transmission expansion planning in power systems using mixed integer programming. IET Generation, Transmission & Distribution, 5(9), 948. 2011 doi:10.1049/iet-gtd.2011.0122

Adicionalmente, tener en cuenta las consideraciones mencionadas hace de este un problema de alta complejidad.

Cabe anotar que, es importante considerar nuevas fuentes de generación, puesto que “el uso de energías renovables constituye una alternativa para suplir las energías fósiles”, Congreso de la República de Colombia (2013)⁸⁰. “Las energías renovables además de ser una herramienta para mejorar la seguridad energética, contribuyen a mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero y proporcionan beneficios sociales directa e indirectamente: la reducción de los impactos en la salud y el medio ambiente, mejorando oportunidades educativas, creación de empleos, la reducción de la pobreza, y aumenta la igualdad de género y, por lo tanto, la reducción de los obstáculos al desarrollo sostenible”. REN21 Secretariat (2014)⁸¹, Müller S., Brown A., Ölz S. (2011)⁸².

Así mismo, teniendo en cuenta que, “La generación de energía es la fuente de mayor producción de gases efecto invernadero GEI en el mundo”. Rodríguez Y.R., (2010)⁸³. “La Convención Marco (de la ONU 1997) establece elementos muy importantes de “política global” para enfrentar los gases efecto invernadero y el Cambio Climático. En particular, señala que los países en desarrollo, necesitarán aumentar su consumo de energía, tomando en cuenta las posibilidades de lograr una mayor eficiencia energética y controlar las emisiones de gases de efecto invernadero, mediante la aplicación de nuevas tecnologías en condiciones que

⁸⁰ CONGRESO DE LA REPÚBLICA DE COLOMBIA Ley 1665 con la cual se aprueba el Estatuto de la Agencia Internacional de Energías Renovables IRENA. 2013 Pág.4.

⁸¹ REN21 Secretariat (2014). Renewables Global Status Report. Key Findings 2014. Paris: REN21 Secretariat. www.ren21.net. París, Francia. 2014 Pág. 5.

⁸² MÜLLER SIMON, BROWN ADAN, ÖLZ SAMANTHA Policy considerations for deploying renewables. Information Paper. International Energy Agency. OECD/IEA. www.iea.org. París, Francia. 2011 Pág. 13.

⁸³ RODRÍGUEZ YEE RICARDO. Formulación de un plan de desarrollo para las fuentes no convencionales de energía en Colombia (PDFNCE) Colombia. Volumen 2 – Diagnóstico de las FNCE en Colombia. Consorcio energético CORPOEMA. Presentado a la UPME. 2010 Pág. 3-22.

hagan que esa aplicación sea económica y socialmente beneficiosa” citado por Rodríguez Y.R., (2010)⁸⁴.

Por su parte, los gobiernos están tomando medidas para disminuir la cantidad de gases efecto invernadero; es así como entre los objetivos del milenio de las Naciones Unidas está: “Frenar el Cambio Climático inducido por el hombre y garantizar energía limpia para todos y dentro de este, frenar las emisiones de gas de invernadero de los entornos energéticos, industriales y agrícolas, y promover energía sostenible para todos”. Consejo de liderazgo de la red de soluciones para el desarrollo sostenible de la ONU (2013)⁸⁵ y generación de electricidad casi libre de CO2 para el año 2050 con el uso de energía renovable (esencialmente eólica, solar e hidro-energía) Consejo de liderazgo de la red de soluciones para el desarrollo sostenible de la ONU (2013)⁸⁶.

Por lo tanto, es primordial que en el sistema de abastecimiento energético nacional se tomen decisiones orientadas a garantizar la cobertura, calidad y sostenibilidad de la energía en todo el país a largo plazo.

Los proyectos que formen parte de la planeación energética, deben contemplar nuevos sistemas de generación y fuentes de energía que propicien el aseguramiento energético, planeado de manera sostenible, dada la relevancia que este problema ha tomado en los últimos años, considerando la necesidad de incluir energías renovables y criterios de evaluación que involucren el impacto ambiental, social y desarrollo sostenible, además de los criterios económicos y técnicos usualmente considerados; a partir del interés que ha suscitado en los

⁸⁴ *Ibíd.* Pág. 2-16.

⁸⁵ CONSEJO DE LIDERAZGO DE LA RED DE SOLUCIONES PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE Una Agenda de Acción para el Desarrollo Sostenible. Informe para el secretario general de las Naciones Unidas. Sustainable Development Solutions Network. A global initiative for the United Nations. www.unsdsn.org. 2013 Pág ix.

⁸⁶ CONSEJO DE LIDERAZGO DE LA RED DE SOLUCIONES PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE Op. Cit Pág. 22

últimos años, la conservación de los recursos naturales, preservación del medio ambiente y satisfacer las principales necesidades de las comunidades aledañas al sistema de generación.

Por esto, es crucial contar con un sistema de toma de decisiones de planeación energética que contemple la evaluación de alternativas de energías renovables además de las convencionales y la *inclusión de otros criterios* (además de los criterios económicos comúnmente utilizados), de manera simultánea para la selección de las alternativas de inversión apropiadas.

Según Battacharyya (2012), “la necesidad de incorporar aspectos ambientales y sociales en la planificación energética ha incrementado el uso de enfoques multicriterio”. El interés por incursionar en generación de energías no convencionales promovió la utilización de estos métodos de toma de decisiones, debido a que este tipo de energía era menos competitiva que la energía convencional en cuanto a inversión, madurez tecnológica y capacidad de generación. Por lo tanto, los beneficios ambientales, sociales y sostenibilidad a largo plazo hacen pertinente su implementación, y el análisis multicriterio permite identificar las ventajas de esta energía respecto a las otras. De esta manera, se recomienda que las fuentes y tecnologías de generación de energía sean seleccionadas teniendo en cuenta estos criterios.

Por tanto, es pertinente que en Colombia la planeación energética a largo plazo incluya métodos de optimización multiobjetivo y multicriterio para selección de alternativas de inversión en generación de energía, ya que de acuerdo con la revisión de literatura, sólo el enfoque de optimización multicriterio permite considerar las dimensiones sociales, institucionales y de sostenibilidad, es decir, los criterios *cualitativos* (considerados en el presente proyecto) y “ofrece una alternativa eficaz para la conciliación de puntos de vista conflictivos” (Bhattacharyya, S. C. (2012)).

Aunque sólo el enfoque MCDM (Polatidis y Haralambopolous (2008)⁸⁷, y Pohekar (2004)⁸⁸) parece considerar las dimensiones sociales e institucionales, este es insuficiente para analizar la viabilidad en la implementación de las alternativas y determinar la cantidad de energía generada por las diferentes tecnologías en cada período de tiempo. Los autores coinciden, en sugerir la combinación de criterios y métodos de solución, en un método de solución híbrido que involucre el método analítico-objetivo y el método multicriterio o subjetivo.

De esta manera, se obtiene una solución integrada que complementa las fortalezas y debilidades de los dos enfoques. La decisión será más apropiada, porque con sólo el método subjetivo, estaría condicionada únicamente a la percepción de los tomadores de decisiones. Al respecto, los autores recomiendan un enfoque participativo en el que se tenga en cuenta un grupo de interesados y expertos durante el proceso de decisión. Y además “incrementar los criterios orientados al enfoque social y de sostenibilidad” Meza et al., (2007).

Con el enfoque híbrido y la participación del grupo de interesados se comprenden mejor los resultados de los modelos. El análisis se realiza en un escenario realista y se facilita la negociación, cuantificación y comunicación de las prioridades en la toma de decisiones.

Además, la programación matemática multiobjetivo permite analizar y tener en cuenta la evaluación de todos los criterios y las diversas posibilidades de generación energética en diferentes localidades de manera simultánea. Si no se utilizara la programación matemática, los criterios y alternativas se analizarían de

⁸⁷POLATIDIS H, Haralambopolous DA. Renewable energy sources planning and design: a multi-criteria approach. In: van den Bergh J, Bruinsma FR, editors. Managing the transition to renewable energy: theory and practice from local regional and macro perspectives. Cheltenham, U.K.: Edward Elgar; 2008 [chapter 11].

⁸⁸POHEKAR, S. D., & RAMACHANDRAN, M. Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning—A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 8(4), 365–381. doi:10.1016/j.rser.2003.12.007. 2004

manera aislada o de forma independiente, el problema sería muy complejo y la toma de decisiones requeriría un tiempo significativamente superior.

En Colombia, no se ha conocido la implementación de un modelo matemático y métodos de solución que evalúen las alternativas de inversión en generación de energía considerando múltiples criterios (cuantitativos y cualitativos), que seleccione la mejor alternativa considerando las fuentes y tecnologías viables en cada punto de demanda y permita definir, a partir de una demanda proyectada a largo plazo, la cantidad de capacidad a instalar y energía a generar en múltiples períodos (dentro de un horizonte de planeación), y que resuelva el problema para diferentes nodos simultáneamente, como lo propone el presente proyecto de investigación. El cual pretende hacer un aporte significativo en solución del problema “Planeación Multiobjetivo de expansión en la capacidad de generación de Energía Eléctrica a largo plazo” (Multiobjective Generation Expansion Planning MGEP), Meza, J. L. C., et al. (2007)⁸⁹, dando respuesta a la pregunta de investigación:

¿Cómo plantear y resolver un modelo de optimización multiobjetivo para el problema de planeación energética a largo plazo, que incluya recursos renovables, e involucre múltiples criterios y métodos de solución cuantitativos y cualitativos conjuntamente?

Alizadeh, B., & Jadid, S. (2011)⁹⁰ plantea que el problema de expansión de capacidad de generación de energía eléctrica (Generation Expansion Planning – GEP) está definido por cuatro preguntas cruciales:

- ¿Dónde construir?

⁸⁹MEZA, J. L. C., YILDIRIM, M. B., & MASUD, A. S. M. A Model for the Multiperiod Multiobjective Power Generation Expansion Problem. *IEEE Transactions on Power Systems*, 22(2), 871-878. doi:10.1109/TPWRS.2007.895178. 2007

⁹⁰ALIZADEH, B., & Jadid, S. (). Reliability constrained coordination of generation and transmission expansion planning in power systems using mixed integer programming. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 5(9), 948. 2011 doi:10.1049/iet-gtd.2011.0122

- ¿Cuándo construir?
- ¿Qué capacidad construir?
- ¿Qué tecnología utilizar?

La presente investigación, se enfocará en resolver preguntas como:

- ¿Qué alternativas implementar, identificando tecnologías y fuentes de generación, para satisfacer la demanda de energía a largo plazo?
- ¿Qué capacidad de generación instalar?
- ¿Cuándo instalar nueva capacidad en un horizonte de planeación?
- ¿Cuánto generar en cada período de tiempo?

Y realiza un aporte significativo a la toma de decisiones de planeación energética a largo plazo, proponiendo una metodología y modelo matemático de optimización para resolver el problema de decisión MGEP, a partir de alternativas que involucren fuentes de energía con combustibles fósiles convencionales y/o energías renovables. Incorporando a diferencia de investigaciones realizadas en nuestro país, una mayor cantidad de criterios (tanto cuantitativos como cualitativos) y su análisis conjunto. De manera que, la decisión tomada tenga mayor soporte y sea sustentada desde varias dimensiones.

Esta propuesta, se justifica en aras de orientar la planeación energética hacia soluciones que garanticen un crecimiento económico, ambiental y socialmente sostenible, a partir de los sistemas de abastecimiento y generación de energía vigentes y la incorporación de nuevas alternativas que incrementen la base de generación actual para satisfacer el acelerado y significativo crecimiento en la demanda energética. Dado que es primordial para el sistema de abastecimiento energético nacional garantizar cobertura y calidad de energía en todo el país a largo plazo.

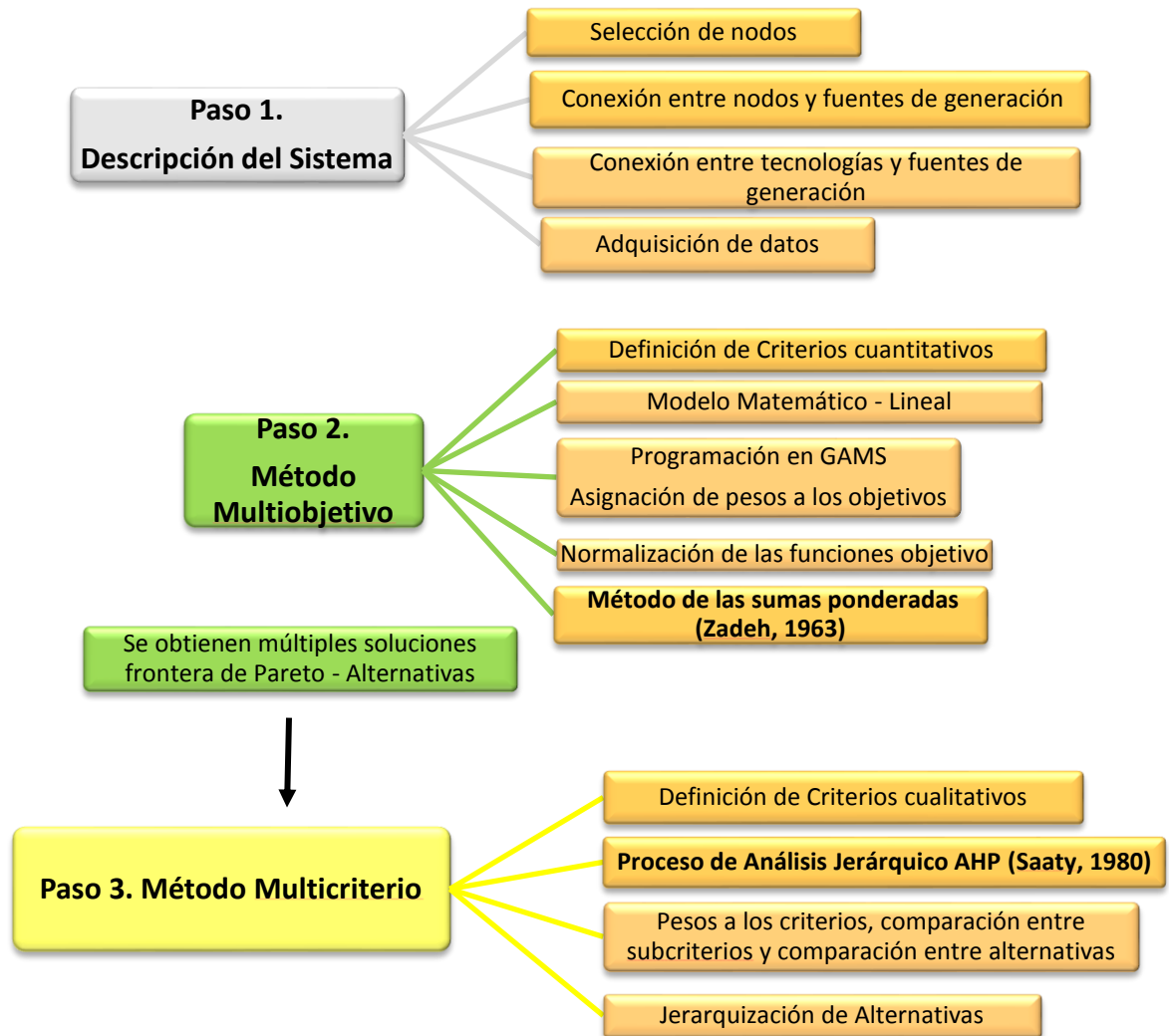
Además, la solución de este problema toma relevancia teniendo en cuenta que la inversión, en nuevas alternativas de generación de energía, en adaptación, montaje e implementación del proyecto de generación, es significativa y tiene grandes implicaciones ambientales y sociales para las comunidades cercanas. Por lo tanto, la decisión debe ser acertada para evitar pérdidas económicas, y no incurrir en gastos innecesarios y costos adicionales a largo plazo, como consecuencia de una toma de decisiones equivocada que pondría en riesgo el cumplimiento de los objetivos del proyecto.

La presente investigación plantea la implementación del modelo matemático y la metodología propuesta, para resolver el problema de energización en Zonas No Interconectadas, ZNI en Colombia, las cuales están conformadas en su mayoría por localidades rurales y aisladas.

3. METODOLOGÍA

El presente proyecto de investigación consiste en una construcción teórica de la formulación del problema de decisión multiobjetivo MGEP, (Expansión de capacidad de generación de energía eléctrica). Planteamiento y solución del problema con programación matemática. El cuál será resuelto en dos grandes fases (Optimización Multiobjetivo y Optimización Multicriterio). El método multiobjetivo seguido del método multicriterio, para seleccionar la mejor alternativa de inversión en generación de energía, como se presenta en el siguiente esquema:

Figura 1. Metodología propuesta.



La solución de este problema se aplica a un caso de estudio en el contexto Colombiano para validar la solución propuesta y concluir respecto al resultado.

3.1 FASE 1: OPTIMIZACIÓN MULTI OBJETIVO

El objetivo de esta etapa es presentar un modelado del sistema de planeación energética: Formular y resolver el modelo matemático multiobjetivo para resolver el problema MGEP de evaluación de alternativas de inversión en generación de energía eléctrica.

El modelo matemático, es un modelo de optimización multiobjetivo, lineal, determinístico, multiperíodo y con variables binarias. Formulado tomando como referencia el trabajo de investigación realizado por MEZA, J. L. C., et al (2007)⁹¹ en México. Está adaptado al caso de ZNI en Colombia. Sin embargo, se plantean algunos parámetros de manera general, para que el modelo pueda ser aplicado en otros sistemas de abastecimiento energético.

3.1.1 Formulación Matemática

NOTACIÓN

En este apartado se presenta la nomenclatura con que se identifican los índices, variables y parámetros del modelo matemático.

1. Índices

- i* Nodos de demanda de energía eléctrica
- j* Tipo de tecnología de generación
- k* Fuentes de Generación de energía
- t* Período de tiempo

⁹¹ MEZA, J. L. C., YILDIRIM, M. B., & MASUD, A. S. M. Op. Cit.

El modelo planteado, se ha aplicado a los siguientes nodos de las ZNI en Colombia:

Los nodos se identifican con el índice i : n1, n2, n3, n4.

No.	Nodo
n1	Acandí
n2	Ciudad Mutis
n3	Leticia
n4	San Andrés

Cabe anotar que, este modelo es aplicable a nodos donde sean viables diversas tecnologías y fuentes, por lo menos más de dos, para que sea útil la implementación de la metodología propuesta y se seleccione la combinación adecuada de fuentes de generación.

Las fuentes de energía utilizadas en el modelo son:

- Combustibles Fósiles o Convencionales: Diésel, Combustóleo.
- Fuentes de Generación no convencionales o alternativas: Biomasa, Radiación Solar, Viento, Caudal de agua, Luz solar.

Las fuentes de generación se identifican con el índice k : 1, 2, 3, 4, 5, 6.

En la siguiente tabla se presentan las unidades de medida de las fuentes de generación:

No.	Fuente de energía	Unidad de medida
1	Diésel	[gal/s]
2	Biomasa (Residuos de cultivos)	[Kg/s]
3	Radiación Solar	[kwh/m ²]/día
4	Viento	[m/s]
5	Combustóleo	[gal/s]
6	Caudal de agua	[m ³ /s]

Las tecnologías de generación consideradas en el caso aplicado se presentan en la siguiente tabla:

No.	Tecnología
1	Generadores Diésel MACI
2	Gasificadores
3	Paneles Solares
4	Aerogeneradores
5	PCH

Y se identifican con el índice j : 1, 2, 3, 4, 5.

El modelo presenta los resultados de planeación energética para un horizonte de 10 años, divididos en períodos de tiempo mensuales. Y se identifican con el índice t . De 1 a 120. Se plantean períodos de tiempo mensuales para predecir con mayor exactitud la energía a generar, considerando que la disponibilidad de fuentes renovables de generación, como energía solar, viento y caudal de agua, varía de acuerdo a los cambios climáticos ocurridos en diversos periodos de tiempo durante un año.

La información del Caso Aplicado se presenta de manera detallada en el Anexo No. 1.

2. Variables de decisión

El modelo presenta los resultados de las siguientes variables de decisión para cada mes, (en un horizonte de planeación de 10 años).

$X_{i,j,k,t}$ [kW] Cantidad de energía a instalar correspondiente a un equipo de generación que se va a instalar en el nodo i , para generar con la tecnología j , con la fuente de generación k , en el período de tiempo t .

$Y_{i,j,k,t}$ [kW] Cantidad de energía a generar en el nodo i , con la tecnología j , con la fuente de generación k , en cada período de tiempo t .

$\hat{s}_{i,k,t}$ [Unidades de combustible] Cantidad de combustible o fuente de generación tipo k , adquirido en el mercado interno, si está disponible para el nodo i en el período de tiempo t .

$\hat{i}_{i,k,t}$ [Unidades de combustible] Cantidad de combustible o fuente de generación tipo k importado, si está disponible para el nodo i en el período de tiempo t .

La energía se presenta en kW y se define como la generación requerida para satisfacer el pico máximo de demanda en el nodo durante un mes.

El modelo calcula las siguientes variables:

$H_{i,j,k,t}$ [kW] Cantidad de capacidad instalada acumulada en el nodo i , con la tecnología j , con la fuente de generación k , en cada período de tiempo t .

$U_{i,j,k,t}$ Variable binaria que está alineada a la instalación o no de nueva capacidad en el nodo i , con la tecnología j , con la fuente de generación k , en el período de tiempo t .

$v_{i,j,k,t}$ [Unidades de combustible] Cantidad de fuente de energía sobrante o faltante en el nodo i , con la tecnología j , con la fuente de generación k , en cada período de tiempo t .

Variable de holgura.

$vcost_i$ [USD] Cantidad de dinero sobrante o faltante en el nodo i , cada año, para cumplir con la generación requerida, teniendo en cuenta la restricción de un presupuesto para generación anual. Variable de holgura.

$N_{esp\ i,j,k,t}$ Cantidad de unidades de generación instaladas en el nodo i , de la tecnología j , en la fuente k , en el período de tiempo t .

$v_{i,j,k,t}$ [unidades de combustible] Es una variable de holgura que indica la cantidad de combustible adicional al disponible en el mercado $S_{i,k,t}$ que se requiere para generar energía. Como se encuentra ubicada a la izquierda de la restricción, si el valor es positivo indica la cantidad faltante y si es negativo indica una cantidad sobrante.

3. Parámetros

$I_{i,j,k,t}$ [USD/kW] Costo unitario por la inversión en nueva capacidad a instalar en el nodo i , con la tecnología j , con la fuente de generación k , en el período de tiempo t .

$C_{i,j,k,t}$ [USD/kW] Costo unitario por generar una unidad de energía en el nodo i , con la tecnología j , con la fuente de generación k , en el período de tiempo t .

$CN_{i,k,t}$ [USD/unidad de combustible] Costo unitario por unidad de combustible k , comprado o adquirido en el nodo para el nodo i , en el período de tiempo t . (No utilizado en el caso aplicado).

$CS_{i,k,t}$ [USD/unidad de combustible] Costo unitario por unidad de combustible k , comprado en el mercado interno para el nodo i , en el período de tiempo t .

$CM_{i,j,k,t}$ [USD/kW] Costo unitario de mantenimiento por kW instalado acumulado en el nodo i , de la tecnología j , en la fuente k , en el período de tiempo t .

$CI_{i,k,t}$ [USD/unidad de combustible] Costo unitario por unidad de combustible k , importado para el nodo i , en el período de tiempo t . (No utilizado en Colombia)

$E_{i,j,k}$ [Kg de CO₂/kW] Cantidad de emisiones por unidad de energía generada por la fuente de generación de energía tipo k en la tecnología j , el nodo i .

$D_{i,t}$ [kW] Demanda de energía en cada nodo i , en el período de tiempo t .

Q [%] Factor de pérdidas estimadas en generación.

$F_{i,j,k}$ [%] Factor de generación del equipo de la tecnología j con la fuente de generación de energía tipo k .

$l_{i,j,k}$ [kW] Nivel máximo de capacidad de generación admisible en el nodo i , con la tecnología j , con la fuente de generación k .

$L_{i,j,k}$ [kW] Nivel máximo de capacidad de generación admisible en todo el horizonte de planeación en el nodo i , con la tecnología j , con la fuente de generación k .

$lmin_{i,j,k}$ [kW] Nivel mínimo de capacidad nueva a instalar en el nodo i , con la tecnología j , con la fuente de generación k .

$W_{i,j,k}$ [Unidad de combustible/kW] Factor de combustible o recurso energético requerido para generar una unidad de energía [kW] en el nodo i , con la tecnología j , con la fuente de generación k .

$R_{i,k,t}$ [Unidad de combustible] Cantidad de combustible tipo k disponible en el nodo i , en el período de tiempo t .

$S_{i,k,t}$ [Unidad de combustible] Cantidad de combustible tipo k disponible en el nodo i , en el período de tiempo t , proveniente del mercado interno.

$Im_{i,k,t}$ [Unidad de combustible] Cantidad de combustible tipo k disponible en el nodo i , en el período de tiempo t , proveniente del mercado externo (importado). (Aplica sólo en el caso de importar combustible).

$n_{espj,k}$ [kW] Capacidad específica de cada equipo de generación de la tecnología j con la fuente de generación de energía tipo k .

$M_{i,t}$ [USD] Cantidad de dinero disponible para invertir en expansión de la capacidad actual (por año) en el período de tiempo t , en el nodo i .

$Gmax_{i,t}$ [USD] Cantidad de dinero disponible para generación de energía (por año) en el período de tiempo t , en el nodo i .

$P_{i,t}$ [USD] Cantidad de dinero disponible tanto para invertir en expansión de la capacidad actual como para generar (por año) en el período de tiempo t , en el nodo i .

Re Factor de reserva en la demanda del nodo i en el período de tiempo t .

$H_{i,j,k,0}$ [kW] Capacidad instalada inicial en el período de tiempo $t=0$ nodo i , con la tecnología j , con la fuente de generación k .

4. SUPUESTOS DEL MODELO

A continuación se enuncian los supuestos considerados para la formulación del modelo matemático, de acuerdo al funcionamiento del sistema de generación en Zonas no Interconectadas en Colombia (no interconectables en corto plazo) y la disponibilidad de información del sistema.

Supuestos Técnicos

- El modelo resuelve el problema MGEP para satisfacer la demanda de energía eléctrica proyectada a largo plazo en zonas no interconectadas ZNI.
- Los nodos se encuentran aislados geográficamente y cada nodo autogenera. La energía eléctrica se genera en el mismo lugar en donde existe la demanda, es decir, la generación es in situ. No se contempla que entre ellos se presente intercambio de energía (transmisión) y de combustible.
- El modelo plantea el problema de suministro energético a largo plazo para n cantidad de nodos simultáneamente.
- En los nodos puede existir o no una capacidad de generación instalada inicial y a esta se adicionan las nuevas capacidades de las tecnologías de generación que se instalen en el nodo.

El usuario del modelo debe cambiar los datos de entrada de los límites en la capacidad máxima y mínima a instalar y total en el horizonte de planeación,

porque estos datos deben estimarse de acuerdo con la demanda a satisfacer en cada período de tiempo.

- El modelo tiene en cuenta la cantidad de generadores eólicos y de PCH instalados. Porque la cantidad de fuente disponible (velocidad del viento y caudal de agua), genera energía de acuerdo a la cantidad de equipos instalados, así la velocidad del viento o el caudal de agua permanezca constante.
- El modelo calcula de manera intrínseca el combustible que se debe comprar en el mercado local y el importado.

Supuestos Económicos

- Tiene en cuenta restricciones presupuestales anuales en presupuesto para inversión, generación y presupuesto total.
- El costo de los combustibles disponibles in situ (en el nodo) están incluidos en los costos de generación.
- El modelo considera costos de compra de combustible cuando estos son comprados en el mercado nacional (o internacional si es el caso), es decir en una ubicación geográfica diferente al nodo (estos costos incluyen el valor del transporte).

*Nota: Los datos de entrada al modelo (parámetros) deben ser calculados y validados por expertos.

5. FUNCIONES OBJETIVO:

MINIMIZAR COSTOS

Costos de Inversión, Costos de Generación y Costo de mantenimiento:

$$\text{Min } F_1 = \sum_{t \in T} (1 + r)^{-t} [\sum_{i \in N} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} I_{i,j,k,t} * X_{i,j,k,t} + \sum_{i \in N} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} C_{i,j,k,t} * Y_{i,j,k,t}]$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} CM_{i,j,k,t} * H_{i,j,k,t} + \sum_{i \in N} \sum_{k \in K} CS_{i,k,t} * \hat{s}_{i,k,t} + \sum_{i \in N} \sum_{k \in K} CI_{i,k,t} * \hat{i}_{i,k,t}] \quad (1)$$

El objetivo económico se calcula en Valor Presente, a una tasa de descuento de 8%

* r =Tasa de descuento WACC suministrada en el IPSE: del 12%-DFT promedio anual= 0.08

MINIMIZAR LAS EMISIONES DE GHG: GASES EFECTO INVERNADERO

Se tienen en cuenta las emisiones directas de CO₂ generadas por cada fuente y tecnología en cada nodo.

$$Min F_2 = \sum_{t \in T} [\sum_{i \in N} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} E_{i,j,k} * Y_{i,j,k,t}] \quad (2)$$

Para resolver este problema de optimización multiobjetivo se utiliza uno de los métodos más empleados de acuerdo con la literatura, el método de las sumas ponderadas Zadeh (1963). El cual indica que la optimización de la suma ponderada de las funciones objetivo genera un punto eficiente o no dominado. Donde, para cada combinación de factores ponderantes, se obtiene una nueva alternativa no dominada, así:

$$Min. \left\{ w_1 \frac{F.O_1(x)}{F.O_1^N} + w_2 \frac{F.O_2(x)}{F.O_2^N} + \dots + w_p \frac{F.O_p(x)}{F.O_p^N} \right\}$$

Sujeto a:

$$x \in X_N$$

F.O = representa la diferencia entre F.O_{max} y F.O_{min} para cada objetivo (matriz de pagos)

w = Factor ponderante para cada objetivo (Peso)

Se definen factores ponderantes o pesos de importancia (w) para cada función objetivo, en este caso W1 y W2 los cuales multiplican cada función. Estas funciones se normalizan para que puedan sumarse, teniendo en cuenta la siguiente fórmula:

$$Max. \left\{ w1 \frac{(F.O1)}{(/s/idealF.O1 - s/antiidealF.O1/)} + w2 \frac{(F.O2)}{(/s/idealF.O2 - s/antiidealF.O2/)} \right\}$$

Las soluciones ideales de cada objetivo se obtienen luego de optimizarlos de manera individual (sin tener en cuenta los pesos) y las soluciones anti-ideales se obtienen calculando el valor de un objetivo si se reemplaza la solución ideal del otro en la sumatoria.

La cantidad de parejas de pesos se definen de acuerdo al número de alternativas que se quieran generar. Para el caso aplicado en esta investigación, se definieron 10 alternativas de generación, es decir, se asignan 10 parejas de pesos. Estos pesos fueron escogidos aleatoriamente, como se presenta en la siguiente tabla, considerando que el peso asignado al criterio ambiental fuese superior a 40% en todos los casos:

Tabla 1. Parejas de Pesos Ponderados

ALTERNATIVAS	W1	W2
A1	0,15	0,85
A2	0,2	0,8
A3	0,25	0,75
A4	0,3	0,7
A5	0,35	0,65
A6	0,4	0,6
A7	0,45	0,55
A8	0,5	0,5
A9	0,55	0,45
A10	0,6	0,4

El modelo está sujeto a las siguientes restricciones:

- **Balance de energía de los nodos:** Satisfacer la demanda proyectada en cada nodo i y período de tiempo t del sistema. Incluye un factor de pérdida por generación y pequeña distribución Q .

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} Y_{i,j,k,t} = D_{i,t} * (1 + Q) \quad (3) \quad i \in N, t \in T$$

- **Límite superior para la cantidad de generación total en el nodo en el período $t = 1$:**

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} Y_{i,j,k,1} \leq \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} [(H_{i,j,k,0} * F_{i,j,k}) + (X_{i,j,k,1} * F_{i,j,k})]$$

$$(4) \quad i \in N, t \in T$$

Esta ecuación presenta una variación: Límite superior para la cantidad de generación total en el nodo en todos los períodos de tiempo $t = T$. (Ver Anexo No. 2 Ecuación 4.1).

- **Capacidad máxima de generación:**

Límite superior para la cantidad de energía generada en el nodo i , con la tecnología j , con la fuente de generación k , en cada período de tiempo $t=1$.

$$Y_{i,j,k,1} \leq (H_{i,j,k,0} * F_{i,j,k}) + (X_{i,j,k,1} * F_{i,j,k}) \quad (5) \quad i \in N, j \in J, k \in K, t \in T$$

Esta ecuación presenta una variación: Capacidad máxima de generación total en el nodo en todos los períodos de tiempo $t = T$. (Ver Anexo No. 2 Ecuación 5.1).

La energía generada en el nodo i , con la tecnología j , con la fuente de generación k , en cada período de tiempo t , no debe superar la capacidad instalada acumulada en el nodo i , para la tecnología j , con la fuente de generación k , en el período de tiempo anterior $t - 1$. Se considera el factor de generación del equipo de tecnología j , con la fuente de generación k , en el nodo i (Pereira, 2011).

- **Límite superior para la cantidad de capacidad instalada acumulada en el nodo en cada período de tiempo:**

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} H_{i,j,k,t} \leq D_{i,t} * (1 + Q) + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} (H_{i,j,k,0}) \quad (6) \quad i \in N,$$

$t \in T$

- **Límite superior para la cantidad total de capacidad nueva instalada en el nodo en todos los períodos de tiempo del horizonte de planeación:**

$$\sum_{t \in T} [\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} (X_{i,j,k,t})] \leq D_{i,120} \quad (7) \quad i \in N$$

- **Capacidad de generación instalada (disponible) acumulada en t=1:**

$$H_{i,j,k,1} = H_{i,j,k,0} + X_{i,j,k,1} \quad (8) \quad i \in N, j \in J, k \in K, t \in T$$

- **Capacidad de generación instalada (disponible) acumulada:**

$$H_{i,j,k,t} = H_{i,j,k,t-1} + X_{i,j,k,t} \quad (9) \quad i \in N, j \in J, k \in K, t \in T$$

$$H_{i,j,k,t} = H_{i,j,k,0} + H_{i,j,k,t-1} + X_{i,j,k,t}$$

La capacidad instalada acumulada en el nodo i , con la tecnología j , con la fuente de generación k , en cada período de tiempo t es igual a la capacidad instalada del período anterior, más la nueva capacidad instalada en el nodo i , con la tecnología j , con la fuente de generación k , en el período de tiempo t .

Donde $H_{i,j,k,t-1}$ es la capacidad instalada acumulada del periodo anterior,

$H_{i,j,k,0}$ es la capacidad instalada inicial o existente y

$H_{i,j,k,T}$ es la capacidad instalada acumulada en el período final T del horizonte de planeación.

- **Nivel máximo admisible de capacidad total a instalar en todo el horizonte de planeación:**

$$H_{i,j,k,T} \leq L_{i,j,k} \quad (10) \quad i \in N, j \in J, k \in K$$

El nivel L establece un límite a la cantidad de energía total instalada en cada nodo i , con la tecnología j y la fuente de generación k , en el horizonte de planeación. Teniendo en cuenta que existen recursos limitados en las fuentes

de energía, especialmente en las energías renovables (viento, energía solar, entre otros) y un área disponible para generación de energía.

La capacidad de generación acumulada en el nodo i , en el último período de tiempo T debe ser inferior a este nivel máximo.

- **Reserva en la generación - Reserva en la capacidad instalada:**

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} H_{i,j,k,t} \geq D_{i,t} * Re \quad (11) \quad i \in N, t \in T$$

La capacidad de energía acumulada instalada en el nodo i , con la tecnología j , con la fuente de generación k , en cada período de tiempo t , debe ser mayor o igual que la demanda por un factor de reserva, previendo un posible incremento en la demanda planeada.

El porcentaje de reserva en la capacidad instalada, es un dato de entrada al modelo, de acuerdo al tomador de decisiones.

- **Nivel mínimo admisible de capacidad a instalar:**

Las siguientes ecuaciones emplean la variable binaria $U_{i,j,k,t}$, en caso de que se deba instalar nueva capacidad la variable toma el valor de 1, o en caso contrario el valor de 0.

Estas restricciones se emplean para limitar la cantidad mínima de capacidad a instalar, considerando la capacidad nominal mínima de la tecnología. La capacidad de energía a instalar en el nodo i , con la tecnología j , con la fuente de generación k , en cada período de tiempo t , $X_{i,j,k,t}$, debe ser mayor o igual a la capacidad mínima a instalar por unidad de generación $lmin_{i,j,k}$.

$$X_{i,j,k,t} \geq \text{lmin}_{i,j,k} * U_{i,j,k,t} \quad (12) \quad i \in N, j \in J, \\ k \in K, t \in T$$

- **Nivel máximo admisible de capacidad a instalar:**

$$X_{i,j,k,t} \leq l_{i,j,k} \quad (13) \quad i \in N, j \in J, k \in K$$

El nivel l establece un límite a la cantidad de energía $X_{i,j,k,t}$ a instalar en cada nodo i , con la tecnología j y la fuente de generación k , en el horizonte de planeación. Considerando que los costos de inversión y operación en el modelo están relacionados con este rango de capacidad.

- **Cantidad de recurso energético requerido para generación:**

Esta restricción permite limitar la cantidad de energía generada de acuerdo a la cantidad de fuente disponible.

$$\sum_{j \in J} [W_{i,j,k} * Y_{i,j,k,t} + v_{i,j,k,t}] = R_{i,k,t} + \hat{s}_{i,k,t} + \hat{i}_{i,k,t} \quad (14) \quad i \in N, k \in K, t \in T$$

Donde,

$v_{i,j,k,t}$ Es una variable de holgura que indica la cantidad de combustible adicional al disponible en el mercado $S_{i,k,t}$.

Para el caso aplicado esta ecuación presenta variaciones, de acuerdo al tipo de fuente de generación (Ver Anexo No. 2, Ecuaciones 14.1, 14.2 y 14.3) y no se contempla importación de combustibles.

- **Cantidad máxima de combustible disponible en el mercado interno o local:**

$$\hat{S}_{i,k,t} = S_{i,k,t} - v_{i,j,k,t} \quad (15) \quad i \in N, k \in K, t \in T$$

Donde $S_{i,k,t}$ es la cantidad máxima de combustible disponible en el mercado local y $v_{i,j,k,t}$ es la variable de holgura.

- **Cantidad máxima de combustible disponible en el mercado interno o local:**

$$v_{i,j,k,t} = S_{i,k,t} - \hat{S}_{i,k,t} \quad (16) \quad i \in N, k \in K, t \in T$$

- **Cantidad máxima de combustible disponible para importar:**

La cantidad de combustible tipo k para importar en el nodo i debe ser inferior a la cantidad $Im_{i,k,t}$ de unidades de combustible tipo k disponible en el mercado externo (a importar) en el nodo i en el período de tiempo t .

$$\hat{I}_{i,k,t} \leq Im_{i,k,t} \quad (17) \quad i \in N, k \in K, t \in T$$

Sin embargo, en el caso aplicado no se consideran importaciones.

- **Nueva Inversión, Inversión máxima: Inversión máxima en nueva capacidad a instalar:**

$$\sum_{t \in T} [\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} I_{i,j,k,t} * X_{i,j,k,t}] \leq M_{i,t} \quad (18) \quad i \in N, t \in T$$

Existe un presupuesto máximo para inversión M_t en nuevas unidades o expansión en la capacidad de generación de todas las tecnologías tipo j , y las fuentes tipo k para cada uno de todos los nodos i , en cada período de tiempo t .

Para efectos del caso aplicado el presupuesto asignado es anual y las ecuaciones presentan una variación (Ver Anexo No. 2, Ecuación 18.1). Sin embargo, la ecuación puede utilizarse en cualquier período de tiempo, de acuerdo a como se presente la asignación presupuestal.

- **Máximo costo de generación:**

Los costos de generación y de mantenimiento están limitados por el dinero de compañía generadora disponible para generación en cada nodo $Gmax_{i,t}$. Incluye costos de generación, mantenimiento y adquisición de la fuente de generación o compra (con costos de transporte), como se presenta en la siguiente restricción:

$$\sum_{t \in T} [\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} (C_{i,j,k,t} * Y_{i,j,k,t} + CS_{i,k,t} * \hat{s}_{i,k,t} + CM_{i,j,k,t} * H_{i,j,k,t} + CI_{i,k,t} * \hat{i}_{i,k,t})] \leq Gmax_{i,t} \quad (19) \quad i \in N, t \in T$$

Sin embargo, para el caso aplicado el dinero disponible para generación en ZNI es restringido, por esto se incluye en la restricción una variable de holgura $vcost_i$. El presupuesto asignado es anual y las ecuaciones presentan una variación (Ver Anexo No. 2, Ecuación 19.1).

- **Restricción presupuestal en costos totales:**

$$\sum_{t \in T} [\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} (I_{i,j,k,t} * X_{i,j,k,t} + C_{i,j,k,t} * Y_{i,j,k,t} + CS_{i,k,t} * \hat{S}_{i,k,t} + CM_{i,j,k,t} * H_{i,j,k,t})] + vcost_i = P_{i,t} \quad (20) \quad i \in N, t \in T$$

Existe un presupuesto máximo total, para inversión en nuevas unidades o expansión en la capacidad de generación y para generación de todas las tecnologías tipo j , y las fuentes tipo k para cada uno de los nodos i del sistema en cada período de tiempo t .

El presupuesto asignado es anual y las ecuaciones presentan una variación (Ver Anexo No. 2.Ecuación 20.1).

- **No negatividad en las variables de decisión:**

$$X_{i,j,k,t}, Y_{i,j,k,t}, H_{i,j,k,t} \geq 0 \quad (21)$$

$$\hat{S}_{i,k,t}, \hat{I}_{i,k,t} \geq 0$$

$v_{i,j,k,t}, vcost_i$ Es una variable libre, puede tomar valores positivos o negativos.

- **Valores iniciales o capacidad instalada existente:**

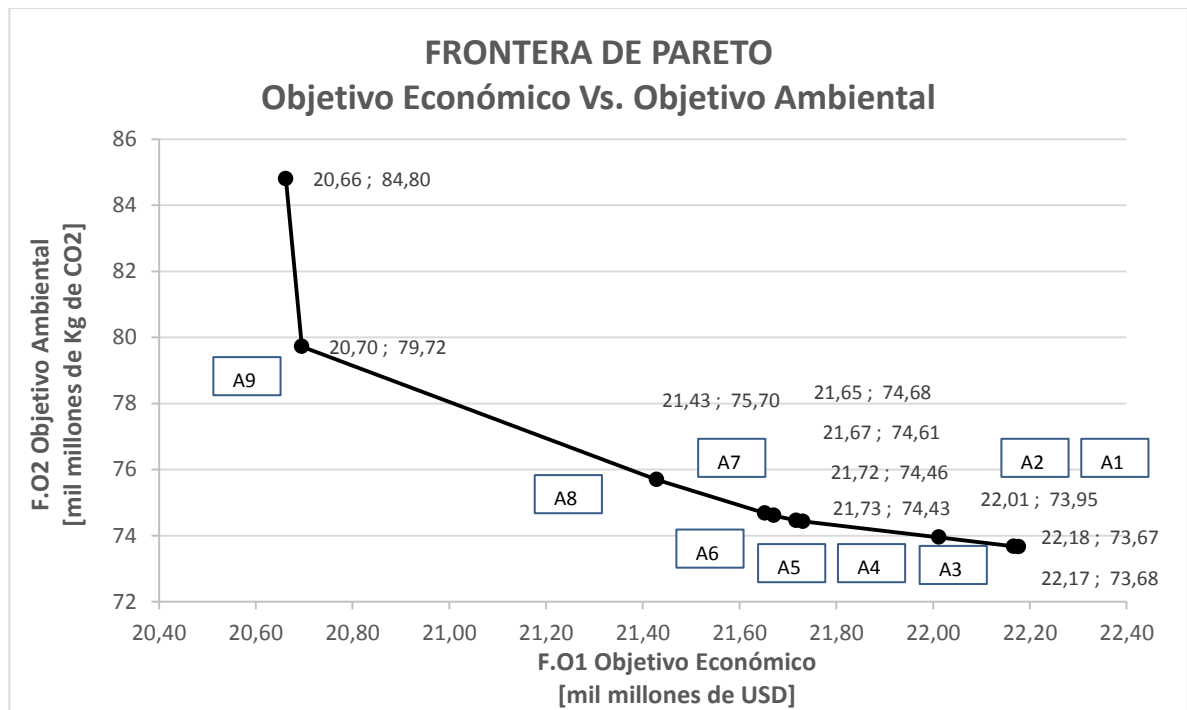
$H_{i,j,k,0}$ es la capacidad inicial instalada cuando $t=0$ es el período inicial

El modelo matemático se programa en GAMS, General Algebraic Modelling System, y se resuelve con programación matemática mixta entera MIP (teniendo en cuenta que el modelo presenta variables binarias). Se utiliza el solver CPLEX de ILOG para resolver el problema propuesto con el método de las sumas ponderadas.

3.1.2 Resultados Optimización Multiobjetivo Como resultado de aplicar la optimización multiobjetivo al problema MGEP se obtiene la solución de las variables de decisión en un grupo de alternativas (10 alternativas, dado que se asignaron 10 pesos ponderados). Estas constituyen el conjunto de soluciones no dominadas del frente de Pareto, con los resultados de las variables de decisión para cada período de tiempo (mes) en el horizonte de planeación y que satisfacen las restricciones del problema. De esta manera, se pueden evaluar las consecuencias de las diferentes alternativas propuestas y su impacto en el resto del sistema, lo cual permite tomar decisiones que pueden reducir los riesgos de inversión.

En la siguiente gráfica se presenta la curva de Pareto obtenida al optimizar los objetivos F.O.1 (Objetivo Económico) y F.O2 (Objetivo Ambiental). Cada punto constituye una alternativa de decisión.

Figura 2. Curva de Pareto Objetivos Económico y Ambiental.



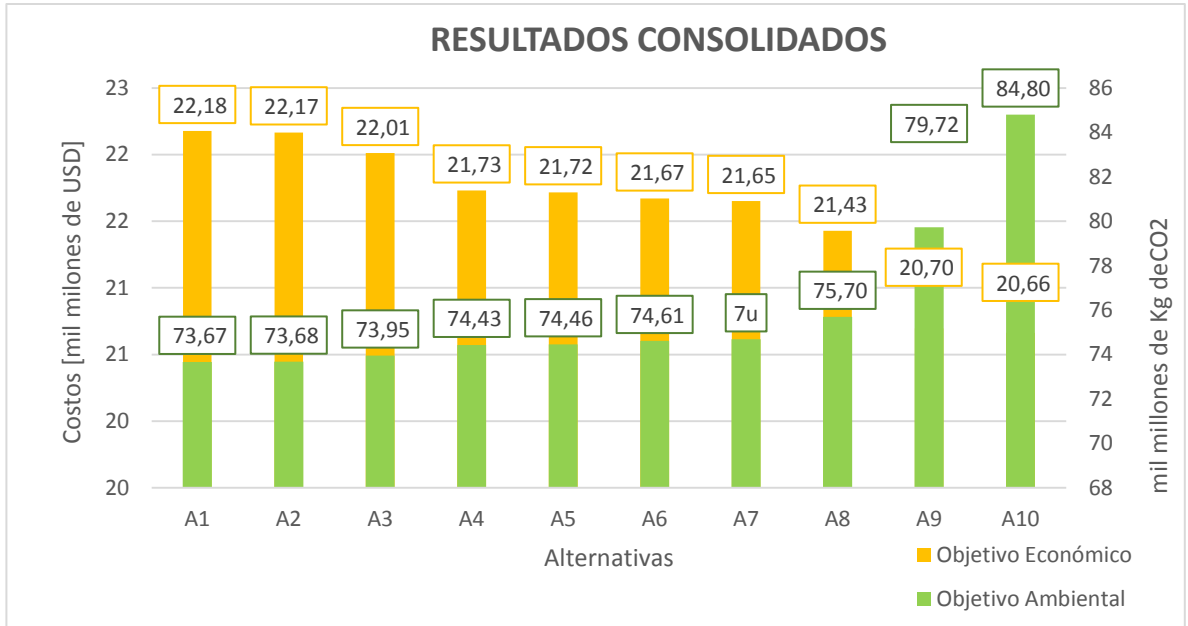
Los resultados corresponden a la optimización de los dos objetivos, en las 10 alternativas. Sin embargo, estos resultados no se encuentran normalizados y no han sido multiplicados por los pesos y se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 2. Resultados modelo multiobjetivo. Consolidados a 10 años.

RESULTADOS OPTIMIZACIÓN MULTI OBJETIVO – FRENTE DE PARETO				
ALTERNATIVAS	W1	W2	ECONÓMICO	AMBIENTAL
			mil millones de	
			USD	KG DE CO2
A1	0,15	0,85	22,18	73,67
A2	0,2	0,8	22,17	73,68
A3	0,25	0,75	22,01	73,95
A4	0,3	0,7	21,73	74,43
A5	0,35	0,65	21,72	74,46
A6	0,4	0,6	21,67	74,61
A7	0,45	0,55	21,65	74,68
A8	0,5	0,5	21,43	75,70
A9	0,55	0,45	20,70	79,72
A10	0,6	0,4	20,66	84,80

En la siguiente gráfica se presentan los resultados de los objetivos, por alternativa:

Figura 3. Resultados Costos y Emisiones totales por alternativas.



En la siguiente tabla se presenta la variable de decisión nueva capacidad instalada propuesta para cada alternativa, total en el horizonte de planeación (10 años). Consolidado para todos los nodos y fuentes de generación.

Tabla 3. Resultados en nueva capacidad instalada total por alternativas por año

NUEVA CAPACIDAD INSTALADA [kW] POR ALTERNATIVA, POR AÑO, EN EL HORIZONTE DE PLANEACIÓN (10 años)													
ALT	W1	W2	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10	Total
A1	0,15	0,85	11.978,40	11.614,57	151,80	155,25	138,47	120,00	152,08	0	675,00	1.418,23	26.403,80
A2	0,2	0,8	11.834,65	11.605,49	151,80	155,25	120,00	120,00	0	161,16	675,00	1.436,70	26.260,05
A3	0,25	0,75	11.834,65	11.595,27	151,80	155,25	120,00	120,00	0	120,00	675,00	1.436,70	26.208,67
A4	0,3	0,7	11.834,65	11.470,73	271,80	151,11	120,00	120,00	0	120,00	675,00	1.440,84	26.204,13
A5	0,35	0,65	11.834,65	10.983,55	641,25	151,11	240,00	120,00	0	0	795,00	1.440,84	26.206,40
A6	0,4	0,6	11.834,65	10.983,55	151,80	297,19	517,55	120,00	0	0	675,00	1.519,15	26.098,89
A7	0,45	0,55	10.784,80	10.835,20	1.350,00	155,25	653,04	120,00	240,00	0	0	1.350,00	25.488,29
A8	0,5	0,5	11.834,65	10.835,20	300,15	155,25	142,65	491,72	120,00	0	675,00	0	24.554,62
A9	0,55	0,45	11.688,60	10.835,20	0	0	0	0	491,72	120,00	1.419,10	859,05	25.413,67
A10	0,6	0,4	9.063,60	10.835,20	0	0	0	0	249,45	360,00	2.025,00	2.025,00	24.558,25

En la siguiente tabla se presentan los resultados de la cantidad generada promedio mensual, consolidado por fuentes de generación para cada una de las alternativas, por año, en un horizonte de planeación de 10 años.

Tabla 4. Resultados en generación total por alternativas en 10 años.

GENERACIÓN TOTAL en 10 años POR FUENTE DE GENERACIÓN								
[kW promedio mensual]								
ALTERNATIVAS	W1	W2	DIESEL	BIOMASA	SOLAR	VIENTO	COMBUSTÓLEO	CAUDAL
A1	0,15	0,85	37.520,41	899,93	151,10	2.625	1.980,92	7.846,83
A2	0,2	0,8	37.536,55	884,33	149,88	2.625	1.980,69	7.847,72
A3	0,25	0,75	37.678,45	884,33	203,04	2.625	1.980,69	7.652,67
A4	0,3	0,7	37.614,31	1.186,30	201,21	2.625	1.980,70	7.416,66
A5	0,35	0,65	37.608,50	1.206,42	186,90	2.625	1.980,70	7.416,66
A6	0,4	0,6	37.403,15	1.480,31	119,34	2.625	1.979,72	7.416,66
A7	0,45	0,55	37.413,48	1.470,45	190,44	2.625	2.011,58	7.413,24
A8	0,5	0,5	37.413,48	1.934,86	103,84	2.625	2.045,83	6.895,74
A9	0,55	0,45	37.426,10	3.501,78	33,76	2.625	2.434,23	5.003,32
A10	0,6	0,4	38.014,11	35,38	29,08	2.625	7.153,75	3.166,86

Y en la siguiente tabla se presenta el resultado de la variable de decisión nueva capacidad instalada total, en el horizonte de planeación, clasificada por fuente de generación:

Tabla 5. Resultados en nueva capacidad instalada total por alternativas en 10 años.

NUEVA CAPACIDAD TOTAL INSTALADA en 10 años POR FUENTE DE GENERACIÓN								
[kW]								
ALTERNATIVAS	W1	W2	DIESEL	BIOMASA	SOLAR	VIENTO	COMBUSTÓLEO	CAUDAL
A1	0,15	0,85		2.690,63	1.496,96	14.000		8.216,20
A2	0,2	0,8		2.565,35	1.478,50	14.000		8.216,20
A3	0,25	0,75		2.565,35	1.787,12	14.000		7.856,20
A4	0,3	0,7		3.000,69	1.778,45	14.000		7.425,00
A5	0,35	0,65		3.000,69	1.780,72	14.000		7.425,00
A6	0,4	0,6		3.439,00	1.234,89	14.000		7.425,00
A7	0,45	0,55		3.570,00	1.168,29	14.000		6.750,00
A8	0,5	0,5		2.594,85	1.209,77	14.000		6.750,00
A9	0,55	0,45		4.701,62	611,72	14.000		6.100,33
A10	0,6	0,4		4.251,40	609,45	14.000		5.697,40

Este modelo asume que existe un presupuesto disponible y recursos limitados para generación. Considerando que, las empresas de generación de energía tienen recursos limitados para la generación a largo plazo y que su balance financiero anual no arroja grandes utilidades y que con los sistemas de generación actuales en las ZNI, se incurre en altos costos debido al costo de compra de combustible (diésel) principalmente por los costos de transporte, a pesar que este es subsidiado por el estado. Por esto, es tan relevante y necesario generar en estos nodos con energías renovables y tener sistemas híbridos, que contribuyan a disminuir los costos.

Sin embargo, las energías renovables no puede ser el único sistema de generación en el nodo, ya que dada la incertidumbre en las disponibilidad de esta fuente, siempre debe existir el respaldo de las convencionales.

En el caso aplicado hay una salvedad con este tema porque en todos los nodos existe disponibilidad de potencia por la capacidad inicial instalada.

Los resultados generados por el método multiobjetivo, constituyen un conjunto de 10 alternativas, de las cuáles se selecciona “la mejor” según los criterios cualitativos y la metodología multicriterio. Estos resultados de generación y nueva capacidad instalada, clasificadas por fuentes (Tablas 4 y 5) son los datos de entrada a los cuáles se les aplica el método multicriterio, donde los resultados de las alternativas son valorados respecto a cada uno de los criterios y subcriterios cualitativos, como se explica en la siguiente Fase.

3.2 FASE 2: MÉTODO DE OPTIMIZACIÓN MULTICRITERIO

Un portafolio de energía estratégicamente diversificado incluye diferentes fuentes de generación. Según MÜLLER S., (2011)⁹². Contar con diferentes fuentes aumenta la seguridad energética sólo si su disponibilidad no está directamente vinculada. Idealmente, las fuentes serán complementarias, de modo que una cubriría los riesgos de la otra. Por esto, es relevante incorporar las energías renovables al portafolio de generación, especialmente en lugares apartados en donde exista disponibilidad de diferentes fuentes de generación.

Además, las FNCE (Fuentes No Convencionales de Energía) tienen un alto potencial de contribución al empleo, generación de actividades productivas y sostenibilidad medioambiental. RODRÍGUEZ Y.R., (2010)⁹³.

Adicionalmente, Tobón D., et al (2010)⁹⁴ señala que “para decidir cuál es la mejor alternativa energética en una región o localidad, es necesario considerar criterios como la disponibilidad de recursos naturales, los costos de implementación, y se debe incorporar a la población, tanto en su aceptación, como en su gestión. También se considera que estas alternativas energéticas sean eficientes en las áreas tecnológica (maximización del abastecimiento), económica (reducción de costos; Koroneos *et al.*, 2005)⁹⁵, social (minimización de impactos negativos en la población; Beccali *et al.*, 1998)⁹⁶ y ambiental (mitigación de daños ambientales).

Finalmente, se concluye que la alternativa energética óptima debe conllevar a un beneficio social, económico y ambiental. Aunque aún faltan etapas por recorrer

⁹² MÜLLER SIMON, BROWN ADAN, ÖLZ SAMANTHA Op. Cit.

⁹³ RODRÍGUEZ YEE RICARDO. Op. Cit.. Pág 2-27.

⁹⁴ TOBÓN OROZCO, DAVID et al. Op. Cit.

⁹⁵ KORONEOS, C., N. et al., Optimization of energy production system in the Dodecanese Islands. *Renewable Energy*. Vol. 30, No. 2, 2005pp. 195-210.

⁹⁶ BECCALI, M., et al Decision making in energy planning: the ELECTRE multi-criteria analysis approach compared to a fuzzy-sets methodology. *Energy Conversion and Management*. Vol. 39, No. 16-18, 1998 pp. 1869-1881.

para que estas tecnologías compitan con las convencionales, debido a sus altos costos y su limitada eficiencia; también es cierto que la ausencia de energía puede resultar mucho más onerosa para la población que los mayores costos de las tecnologías de menor escala. Incluso, en algunas regiones estas pueden resultar competitivas a causa de los costos de transporte del combustible fósil o de la extensión de redes para bajas densidades de población (Cadena *et al.*, 2005)⁹⁷, como es el caso de las ZNI en nuestro país.

Por lo tanto, estos aspectos son considerados en la evaluación de las alternativas, además de los aspectos (criterios) cuantitativos considerados en la fase Multiobjetivo, y hacen un aporte significativo a esta investigación, para complementar la toma de decisiones implementando el método multicriterio, y hallar la mejor alternativa de inversión como solución del problema de decisión.

Para esto, se emplea el método multicriterio AHP (Analytical Hierarchy Process, por sus siglas en inglés), proceso analítico jerárquico diseñado por Thomas Saaty (1980)⁹⁸. Es el método más utilizado por los autores en los problemas de planeación energética⁹⁹, de análisis cualitativo que jerarquiza las alternativas de inversión que resuelven el problema de decisión planteado y permite seleccionar una única solución al problema.

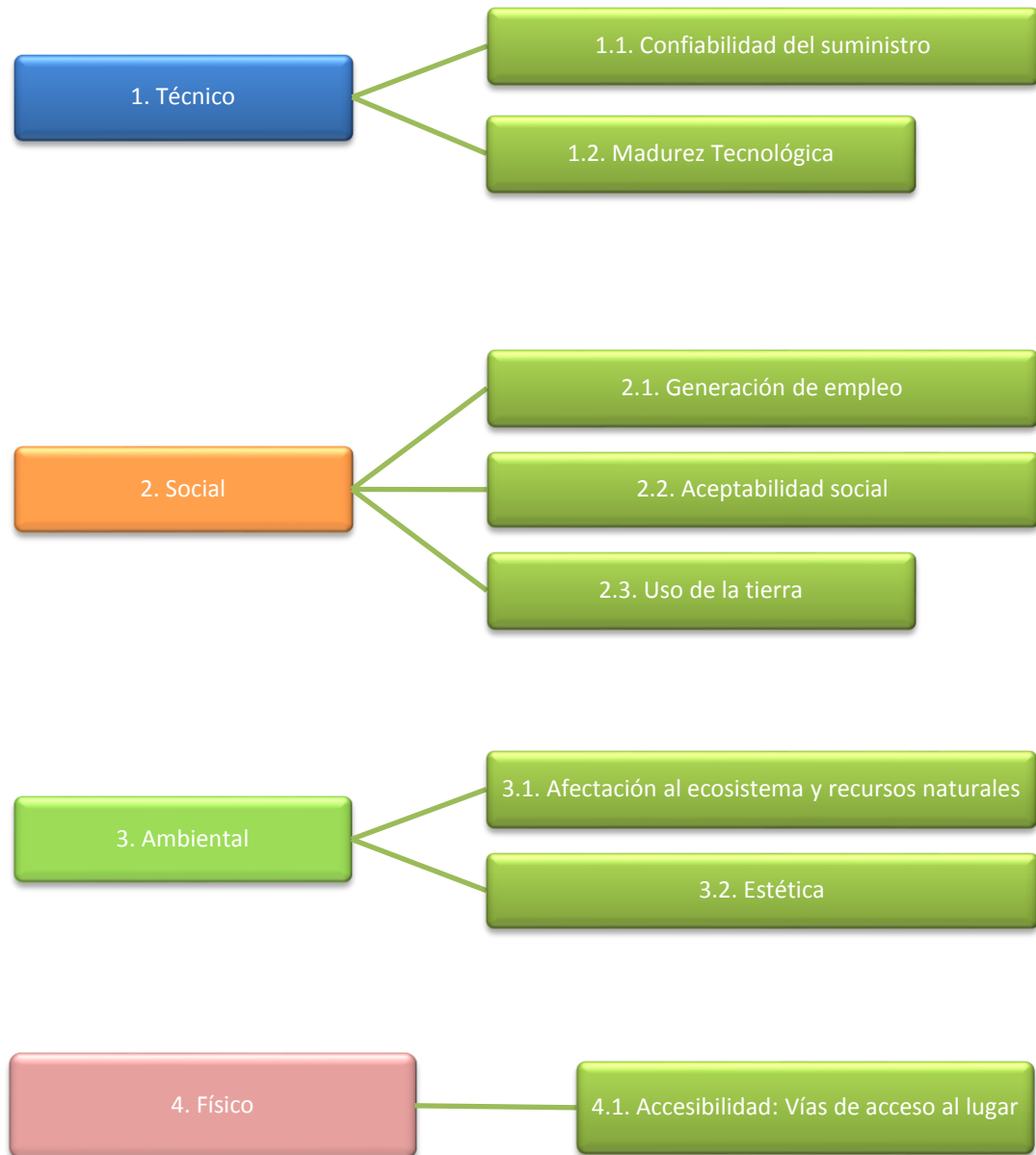
Este método requiere la intervención de expertos en el sistema de abastecimiento energético. Y se evalúan las alternativas, de acuerdo a su importancia según los siguientes criterios y subcriterios, definidos a partir de la revisión de literatura y análisis de las Zonas No Interconectadas en Colombia (ZNI), como se presenta en la siguiente figura:

⁹⁷ CADENA Angela., Op. Cit.

⁹⁸ ANDERSON, D.R et al. Métodos cuantitativos para negocios. International Thomson. Ed 11. 2004. Pág. 746-757.

⁹⁹ BHATTACHARYYA, S.C. Op cit.

Figura 4. Criterios y subcriterios cualitativos



En la siguiente tabla se presenta la definición de los subcriterios y su afectación con los resultados del método multiobjetivo para la asignación inicial de puntajes de las alternativas respecto a cada subcriterio en el **Paso 3**:

Tabla 6. Definición de Criterios y Subcriterios cualitativos

Criterios	Subcriterios	Definición	Evaluar con respecto a
1. Técnico	1.1. Confiabilidad del suministro	Según Wang J.J (2009) es la capacidad de generar energía de manera continua en un período de tiempo determinado.	Cantidad generada
	1.2. Madurez Tecnológica	Según Beccali (2003) es la experticia en el mantenimiento y operación de los equipos o unidades de generación. La madurez tecnológica, está basada en el estado del arte de investigación e implementación de la tecnología aplicada.	Cantidad generada
2. Social	2.1. Generación de empleo	Según Beccali (2003) ¹⁰⁰ la generación de empleo se valora con el índice de impacto del empleo, expresado como el número de personas ocupadas por MJ de energía generada en 1 año. Según Chatzimouratidis (2008) ¹⁰¹ también se debe tener en cuenta la cantidad de personas contratadas en la construcción y operación de la planta, durante su vida útil y su desmantelamiento.	Capacidad instalada
	2.2. Aceptabilidad social	Según Chatzimouratidis (2008) la aceptación social es la evaluación de los tipos de planta de energía con respecto a su grado de aceptación por parte de la comunidad local.	Capacidad instalada
	2.3. Uso de la tierra	Según Beccali (2003), un índice medio de requerimiento de tierras se evalúa y se expresa como m ² /kW de potencia instalada. De acuerdo con Chatzimouratidis (2008), la calidad de vida de la	Capacidad instalada

¹⁰⁰ BECCALI, M., CELLURA, M., & MISTRETTA, M. Decision-making in energy planning. Application of the Electre method at regional level for the diffusion of renewable energy technology. *Renewable Energy*, 28(13), 2003 2063–2087. [http://doi.org/10.1016/S0960-1481\(03\)00102-2](http://doi.org/10.1016/S0960-1481(03)00102-2)

¹⁰¹ CHATZIMOURATIDIS, A. I., & PILAVACHI, P. A. Multicriteria evaluation of power plants impact on the living standard using the analytic hierarchy process. *Energy Policy*, 36(3), 2008 1074–1089. <http://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.11.028>.

Criterios	Subcriterios	Definición	Evaluar con respecto a
		comunidad se ve afectada directamente por los terrenos ocupados que podría haber sido utilizado para la creación de parques y centros de recreación o actividades agrícolas.	
3. Ambiental Es importante incluir otros aspectos de impacto ambiental adicionales al criterio considerado en la Fase Multiobjetivo (cantidad de emisiones generadas por cada tecnología).	3.1. Afectación al ecosistema y recursos naturales	Afectación a la fauna y flora, una posible consecuencia de grandes obras civiles, además del resultado de una contaminación visual y auditiva que afecte la migración de las especies animales. Según Chatzimouratidis (2008) Perturbación óptica causada por los edificios y el ruido de los equipos de la planta de energía.	Capacidad instalada
	3.2. Estética	Hace referencia estrictamente al impacto visual generado por la implementación de proyectos eléctricos en áreas específicas. Con un mayor impacto para plantas de grandes capacidades, que difícilmente pueden ser integradas con el paisaje de su entorno. Cavallaro F (2005) Refleja la molestia visual creada por el desarrollo de un proyecto en un área específica.	Capacidad instalada
4. Físico	4.1. Vías de acceso	Este criterio permite evaluar el estado de las vías de acceso a la localidad, el tipo de transporte viable, así como de la distancia en referencia a sus centros de abastecimiento. Además, comprende la construcción de vías para las etapas de entrada y montaje de equipos y plantas y operación, por ende, depende de cada nodo y tecnología a implementar. Para tecnologías que utilicen combustibles fósiles, las vías cumplen con la función de permitir el acceso del combustible, en este caso la alta demanda de	Cantidad generada

Criterios	Subcriterios	Definición	Evaluar con respecto a
		flujo vehicular pesado implica la construcción de vías de mejores especificaciones.	

La descripción detalla de los criterios se presenta en el Anexo 3. Método Multicriterio.

Los datos requeridos para aplicar el método multicriterio son los resultados totales en generación y nueva capacidad instalada por 10 años, para todos los nodos, clasificados de acuerdo a la fuente de generación, por cada alternativa.

Paso 1: Asignación de Ponderación a los criterios y subcriterios

Las ponderaciones se asignan con la intervención de expertos, quienes evalúan los criterios y subcriterios cualitativos de acuerdo a su importancia en la selección de las alternativas (Ver Anexo No. 3).

Paso 2: Valoración de alternativas respecto a subcriterios.

Los expertos realizan la valoración de las alternativas de decisión en cada subcriterio, de acuerdo a su percepción. Para esto asignan previamente una puntuación a los subcriterios de acuerdo a su grado de afectación en cada una de las parejas fuente-tecnologías (Tabla No.7). La puntuación asignada a las parejas se presenta en el Anexo No.3)

Tabla 7. Parejas Fuente - Tecnología

FUENTE – TECNOLOGÍA
Diésel – Generadores
Fuel Oil No. 6 o Combustóleo– Generadores
Biomasa – Gasificación
Radiación Solar - Paneles fotovoltaicos
Viento – Aerogeneradores
Agua – PCHs

Luego se multiplica el puntaje asignado a la pareja por el valor de cantidad generada o instalada, según corresponda (ver Tabla 6) por cada fuente de generación y en total para cada alternativa.

Con esta valoración las alternativas obtienen un puntaje total por cada subcriterio respecto a la cantidad generada y/o capacidad instalada, y esto permite que las alternativas sean comparadas entre sí, de acuerdo los subcriterios, con la valoración de importancia según la Escala Saaty, presentada en la siguiente tabla:

Tabla 8. Escala de valoración Saaty, método AHP.

Escala Saaty	
Planteamiento verbal de la preferencia	Calificación Numérica
Extremadamente preferible	9
Entre muy fuertemente y extremadamente preferible	8
Muy fuertemente preferible	7
Entre fuertemente y muy fuertemente preferible	6
Fuertemente preferible	5
Entre moderadamente y fuertemente preferible	4

Escala Saaty	
Planteamiento verbal de la preferencia	Calificación Numérica
Moderadamente preferible	3
Entre igualmente y moderadamente preferible	2
Igualmente preferible	1

Fuente: Adaptación de Saaty (1980).

Paso 3: Comparación de importancia de las alternativas, respecto a cada subcriterio.

Al final, cada alternativa obtiene una puntuación respecto a cada subcriterio y esto multiplicado por la ponderación asignada inicialmente, genera un puntaje total por alternativa, de esta manera las alternativas se jerarquizan de mayor a menor puntaje. El procedimiento y los resultados se presentan de manera detallada en el Anexo No. 3.

3.2.1 Resultados Optimización Multicriterio Los resultados presentados corresponden a la validación de la metodología, del modelo multiobjetivo y del método multicriterio en un problema de planeación energética en Colombia, aplicado a energización en Zonas No Interconectadas ZNI.

Después de implementar el método de AHP de optimización multicriterio se selecciona la **Alternativa No.3**, ya que esta obtuvo el mayor valor de priorización, como se indica en la siguiente tabla, en donde se ordenan las alternativas jerárquicamente de mayor a menor:

Tabla 9. Jerarquización de método AHP.

JERARQUIZACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS CON EL MÉTODO AHP				
Orden	W1	W2	Alternativa	Matriz de prioridades
1°	0,25	0,75	A3	0,234175014
2°	0,15	0,85	A1	0,158115305
3°	0,2	0,8	A2	0,151335188
4°	0,6	0,4	A10	0,148625146
5°	0,35	0,65	A5	0,088353168
6°	0,3	0,7	A4	0,082648257
7°	0,4	0,6	A6	0,045781625
8°	0,45	0,55	A7	0,039521534
9°	0,55	0,45	A9	0,028980005
10°	0,5	0,5	A8	0,020108304

Los resultados de las variables de decisión obtenidas en la **alternativa No. 3**, se presentan en las siguientes tablas:

Estas son las cantidades que la metodología propuesta recomienda se deben instalar y generar en cada uno de los nodos durante un horizonte de planeación de 10 años.

Tabla 10. Cantidad generada (promedio mensual, 10 años) [kW] por nodos

FUENTE	n1 (Acandí)	n2 (Ciudad Mutis)	n3 (Leticia)	n4 (San Andrés)	TOTAL
DIESEL	762,49	34,42	-	36.881,54	37.678,45
BIOMASA	-	-	884,33	-	884,33
SOLAR	54,00	-	67,66	81,38	203,04
VIENTO	-	-	-	2.624,93	2.624,93
COMBUSTÓLEO	-	-	1.980,69	-	1.980,69
CAUDAL	239,39	1.337,89	6.075,39	-	7.652,67
TOTAL	1.055,88	1.372,31	9.008,07	39.587,86	51.024,12

Tabla 11. Nueva capacidad instalada total en (10 años) [kW] por nodos

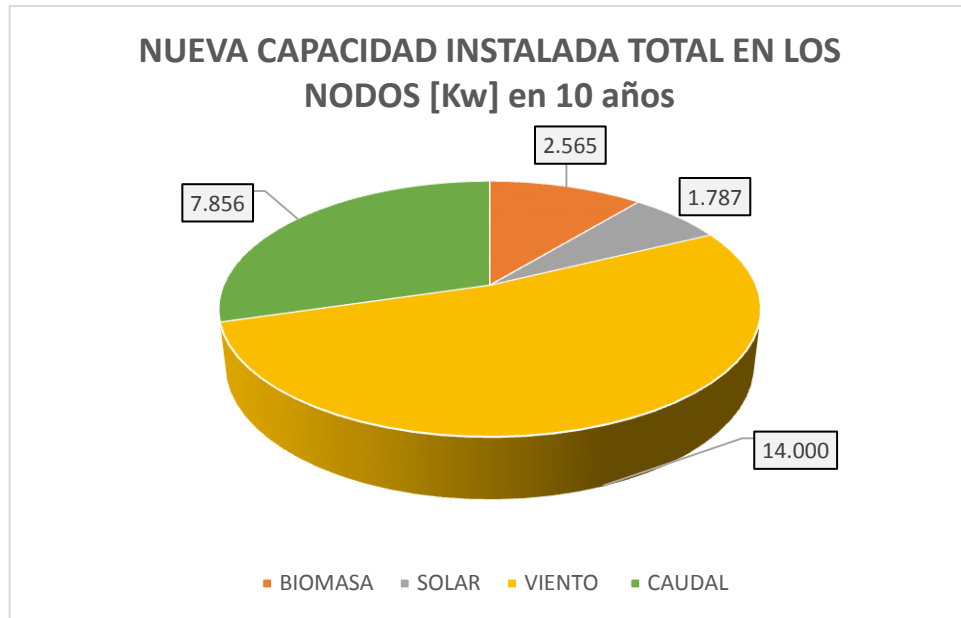
FUENTE	n1 (Acandí)	n2 (Ciudad Mutis)	n3 (Leticia)	n4 (San Andrés)	TOTAL
DIESEL	-	-	-	-	-
BIOMASA	-	-	2.565,35	-	2.565,35
SOLAR	360,00	-	695,40	731,72	1.787,12
VIENTO	-	-	-	14.000,00	14.000,00
COMBUSTÓLEO	-	-	-	-	-
CAUDAL	431,20	675,00	6.750,00	-	7.856,20
TOTAL	1.151,20	675,00	10.010,75	14.731,72	26.208,67

En las soluciones presentadas por el modelo, predomina la generación con energías renovables, viento y caudal predominan en los nodos. Sin embargo en San Andrés y Acandí el mayor porcentaje de generación se realiza con diésel. En el caso aplicado no se contempla importación de combustibles, dado que actualmente esta actividad no se lleva a cabo.

Teniendo en cuenta la importancia del objetivo ambiental, se observa una inclinación hacia la disminución de combustibles fósiles, los cuales presentan alto costo de adquisición y mayor nivel de contaminación. Sin embargo, se debe mantener la capacidad instalada inicial en los nodos, como respaldo.

En la siguiente gráfica se presenta la cantidad de nueva capacidad instalada [kW], total en 10 años por fuente de energía y se observa que predomina la instalación de aerogeneradores para energía eólica, en segundo lugar la nueva capacidad de PCH, seguida de capacidad con biomasa y energía solar fotovoltaica.

Figura 5. Nueva capacidad instalada total clasificada por tipo de fuentes.



Los resultados del modelo se presentan en Excel en períodos de tiempo mensuales, para cada una de las alternativas. Sin embargo, el modelo se ajusta presentar resultados en períodos de tiempo anuales o en 10 años, para todos los nodos. La energía generada por las diferentes fuentes en un nodo se suma para satisfacer la demanda del nodo.

Como se observa en el diagrama pastel los resultados de la metodología propuesta teniendo en cuenta la optimización de los objetivos cuantitativos y cualitativos y considerando costos de mantenimiento por capacidad total instalada, el modelo matemático ha decidido la inclusión de nuevas fuentes de generación en la matriz energética de los nodos (fuentes renovables). A pesar que, los nodos tienen capacidad instalada con Generadores diésel y PCH, y ésta capacidad es suficiente para satisfacer la demanda proyectada.

4. CONCLUSIONES

- Esta investigación propone una metodología y un modelo matemático para resolver el problema de planeación energética, en un horizonte de planeación de 10 años, con períodos de tiempo mensuales. Con el método de solución multiobjetivo se llega a una solución exacta en un tiempo de cómputo razonable, por lo tanto no se requieren algoritmos de aproximación como heurísticas o metaheurísticas para resolver el problema planteado.
- Se emplean dos métodos consecutivos: multiobjetivo, seguido del método multicriterio donde se obtiene el conjunto de soluciones no dominadas del frente de Pareto y con el método AHP se obtiene “la mejor solución” entre el grupo de soluciones representativas de Pareto. El modelo optimiza las variables de decisión minimizando costos y generación de emisiones de CO₂. La asignación de pesos en las funciones objetivo tiene prelación por el componente ambiental, dada la importancia que este aspecto ha tomado en los últimos años.
- El modelo hace un aporte adicional a investigaciones anteriores y propone una metodología innovadora en nuestro país, porque involucra diversos criterios y realiza planeación energética simultáneamente. Considera 6 criterios (económico, ambiental (emisiones), técnico, social, ambiental, vías de acceso y 7 subcriterios, lo cual otorga mayor sostenibilidad a la decisión tomada.
- La implementación de investigación de operaciones para resolver el problema MGEP, permite hacer más eficiente la toma de decisiones, se pueden obtener múltiples respuestas simultáneamente, lo cual disminuye los costos en el proceso de planeación energética de un conjunto de nodos con autogeneración

y analizar las diferentes opciones de generación energética con un presupuesto limitado. El modelo puede ser aplicado para n nodos, n fuentes, n tecnologías y n períodos de tiempo, (simultáneamente) siempre y cuando la licencia de GAMS y las características del equipo de cómputo lo permitan. Incluso los nodos pueden tener cualquier ubicación geográfica

- El modelo puede ser empleado para resolver el problema de planeación energética de n nodos, n fuentes, n tecnologías y n períodos de tiempo, (simultáneamente) siempre y cuando la licencia de GAMS y las características del equipo de cómputo lo permitan. Por esto, es posible implementar el modelo para uno o varios nodos, sin importar su ubicación geográfica, los nodos pueden estar localizados en diversos países.
- Esta investigación constituye un aporte significativo para la toma de decisiones de inversión en proyectos de generación de energía en las ZNI, tanto para las entidades gubernamentales, como para las empresas generadoras de energía en los nodos. Las cuáles a partir de un presupuesto para proyectos de generación buscan satisfacer la demanda energética de estas localidades, donde no es viable el acceso al SIN por condiciones geográficas o de infraestructura y se busca aprovechar el potencial energético de cada nodo con la inclusión de energías renovables.
- Este modelo se diferencia de investigaciones previas en las siguientes consideraciones:
- Inclusión de variables de holgura, en cantidad de combustible convencional y presupuesto disponible, con el fin de dar a conocer nuevos requerimientos del sistema de abastecimiento energético y planear su consecución.

- Factor de carga en la generación de acuerdo a la tecnología y fuente. Porcentaje de pérdidas en generación y reserva en capacidad instalada acumulada, previendo un posible aumento en la demanda proyectada.
- En cuanto a energía producida por aerogeneradores y turbinas en PCH, la cantidad de insumo disponible debe multiplicarse por el número de equipos (de acuerdo a la capacidad instalada) para determinar cuánto se podría generar.
- El modelo considera que existe una capacidad inicial instalada y por esto incorpora un costo de mantenimiento para penalizar la capacidad ociosa (en caso que se presente). Además, supone un presupuesto limitado para inversión y generación en cada nodo.
- El caso aplicado es un ejercicio teórico, que prueba el funcionamiento del modelo, donde la calidad de los datos es fundamental en la confiabilidad de los resultados. En el caso aplicado, se requirió una búsqueda minuciosa de los datos de entrada y cálculos para ajustar estos datos a los requerimientos del modelo. Los parámetros varían de acuerdo al nodo, tecnología, fuente y período de tiempo. Sin embargo, éstos son datos aproximados y no corresponden a información actual del nodo. Por otro lado, algunos parámetros como costos de inversión y costos de generación varían por rangos de acuerdo a la capacidad instalada o cantidad generada, y dado que estas variables son resultados del modelo, es difícil predecir con exactitud este dato de entrada. Por lo tanto, se recomienda establecer una metodología que permita asignar estos parámetros de manera acertada.
- Los expertos en planeación energética, tienen una participación significativa en el desarrollo de la metodología propuesta, principalmente en la fase multicriterio, porque ellos conocen el sistema energético: la disponibilidad de

fuentes y tecnologías, el comportamiento del suministro energético y la factibilidad de las decisiones en cada nodo.

- El modelo multiobjetivo se desarrolla en un tiempo de cómputo razonable. El cual incluye una corrida en GAMS por cada pareja de pesos y la presentación de resultados en Excel para cada alternativa. El tiempo de respuesta del modelo varía de acuerdo al peso asignado en las alternativas, va de 2 a 12 minutos por corrida. Además se requiere aproximadamente una jornada para la ejecución del método multicriterio y el análisis de resultados con la participación de los expertos.

5. RECOMENDACIONES E INVESTIGACIONES FUTURAS

- Se recomienda precisar los parámetros para definir la asignación de los pesos en cada una de las alternativas y que estos no sean asignados de forma aleatoria.
- Se recomienda plantear una metodología que permita proyectar con mayor exactitud la disponibilidad de las fuentes de generación a largo plazo y su incertidumbre. Considerando que las fuentes de energía, especialmente renovables, varían con el tiempo y cada año, de acuerdo a los cambios climáticos, difíciles de predecir con exactitud.
- Se recomienda plantear los resultados del modelo en varios escenarios y considerar incertidumbre en los principales parámetros de entrada.
- Programar la formulación del método AHP en GAMS, contigua al modelo multiobjetivo, para obtener la solución final en el mismo proceso. Además, incorporar la decisión de localizar las plantas de generación e integrar los nodos con una sola planta que satisfaga la demanda de comunidades cercanas. Utilizar el software ARGIS para decidir la localización de las plantas y proponer la opción de conexión al SIN siempre y cuando existan líneas de transmisión cerca o viables a corto plazo en el nodo
- Se recomienda adicionar a la formulación análisis de factibilidad económica de las alternativas de generación con indicadores financieros como VPN, Payback y TIR para identificar la viabilidad de los proyectos y su punto de equilibrio. Para esto se deben considerar los ingresos a partir de la venta del servicio de energía eléctrica a la población, entre otros aspectos.

BIBLIOGRAFÍA

A. ABRAHAM, L. JAIN, AND R. GOLDBERG (EDS), Evolutionary Multiobjective Optimization – Theoretical Advances and Application, Springer-Verlag, London, 2005.

AFGAN, N. H., & CARVALHO, M. G. Sustainability assessment of a hybrid energy system. *Energy Policy*, 36(8), 2903-2910. 2008 doi:10.1016/j.enpol.2008.03.040

ALFSTAD, T "Applications of energy Models in the South. *Energy Research Centre. LEAP & MARKAL,*" in *Recommend. V1. Ed 2.* 2004.

ALIZADEH, B., & Jadid, S. Reliability constrained coordination of generation and transmission expansion planning in power systems using mixed integer programming. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 5(9), 948. 2011 doi:10.1049/iet-gtd.2011.0122

ALIZADEH, B., & JADID, S. Reliability constrained coordination of generation and transmission expansion planning in power systems using mixed integer programming. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 5(9), 948. 2011 doi:10.1049/iet-gtd.2011.0122

ÁLVAREZ, Claudia Contribución de la energía a los medios de vida rurales sostenibles – un enfoque de dinámica de sistemas. Tesis de maestría en ingeniería de sistemas, Medellín, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. 2005

AMELI, A., MEMBER, S., FARROKHIFARD, M., & MEMBER, S. Profit-Based DG Planning Considering Environmental and Operational Issues: A Multiobjective Approach, 2015 1–12.

ANDERSON, D.R et al. Métodos cuantitativos para negocios. International Thomson. Ed 11. 2004. Pág. 746-757.

ANTUNES, C. H., MARTINS, A. G., & BRITO, I. S. A multiple objective mixed integer linear programming model for power generation expansion planning. *Energy*, 29(4), 2004 613-627. doi:10.1016/j.energy.2003.10.012

ARISTIZÁBAL, Jaime Simulación de políticas y estrategias en pro del uso eficiente de los recursos estatales para la energización rural colombiana. Tesis de maestría en ingeniería de sistemas, Medellín, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. 2006

BAÑOS, R., MANZANO-AGUGLIARO, F., MONTOYA, F. G., Gil, C., ALCAYDE, a., & GÓMEZ, J. Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(4), 1753-1766. 2011 doi:10.1016/j.rser.2010.12.008

BASTIDAS BARRANCO, Marlon José. Análisis multiobjetivo para la optimización en sistemas de generación de energía Tesis Doctoral. Programa de Ingenierías. Área: Sistemas Energéticos. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Medellín. 2010

BECCALI, M., CELLURA, M., & MISTRETTA, M. Decision-making in energy planning. Application of the Electre method at regional level for the diffusion of renewable energy technology. *Renewable Energy*, 28(13), 2003 2063–2087. [http://doi.org/10.1016/S0960-1481\(03\)00102-2](http://doi.org/10.1016/S0960-1481(03)00102-2)

BECCALI, M., et al Decision making in energy planning: the ELECTRE multi-criteria analysis approach compared to a fuzzy-sets methodology. Energy Conversion and Management. Vol. 39, No. 16-18, 1998 pp. 1869-1881.

BHATTACHARYYA, S. C. Review of alternative methodologies for analysing off-grid electricity supply. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(1), 677-694. Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.rser.2011.08.033. 2012

BLOOM, J. A. Solving an Electricity Generating Capacity Expansion Planning Problem by Generalized Benders ' Decomposition. Operations Research, 31(1), 84-100. 1982

CADENA, Angela et al. "Programa para soportar la toma de decisiones de soluciones energéticas a ZNI con un enfoque de optimización en la maximización del beneficio para resolver el problema del suministro de electricidad con mínimo costo", en: VI Seminario Internacional sobre Análisis y Mercados Energéticos, Medellín, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín-Universidad de Los Andes. 2005

CENTRO COLOMBIANO PARA EL DESARROLLO DE LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA, COLCIENCIAS Informe técnico de avance: Proyecto de investigación "plataforma para el soporte a la evaluación de políticas y a la toma de decisiones en energización de zonas no interconectadas en Colombia". Medellín, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. 2005

CHAHÍN ÁLVAREZ, Carmenza. Proyecto: INFORME FINAL Planificación Energética - Estudio de Caso, Colombia. 2009, Págs. 8, 88-91.

CHARWAND, M., AHMADI, A., HEIDARI, A. R., MEMBER, S., & NEZHAD, A. E. Benders Decomposition and Normal Boundary Intersection Method for

Multiobjective Decision Making Framework for an Electricity Retailer in Energy Markets, 1–10. 2014

CHATZIMOURATIDIS, A. I., & PILAVACHI, P. A. Multicriteria evaluation of power plants impact on the living standard using the analytic hierarchy process. *Energy Policy*, 36(3), 2008 1074–1089. <http://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.11.028>.

CHAVES, LISED., Metodología con optimización multiobjetivo para energización de zonas rurales, realizar un software que permita la aplicación a una zona no interconectada del departamento de Nariño. Universidad de los Andes. Unidad de Planeación Minero Energética. 2013

CHERNI JA, DYNER I, HENAO F, Jaramillo P, Smith R, Font RO. Energy supply for sustainable rural livelihoods: a multi-criteria decision support system. *Energy Policy* 2007;35(3):1493–504.

CLÍMACO JOAO et al., A multiple objective linear programming model for power generation expansion. *International Journal Of Energy*, 19(March 1994), 1995 419-432.

CONGRESO DE LA REPÚBLICA DE COLOMBIA Ley 1665 con la cual se aprueba el Estatuto de la Agencia Internacional de Energías Renovables IRENA. 2013 Pág.4.

CONSEJO DE LIDERAZGO DE LA RED DE SOLUCIONES PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE Una Agenda de Acción para el Desarrollo Sostenible. Informe para el secretario general de las Naciones Unidas. Sustainable Development Solutions Network. A global initiative for the United Nations. www.unsdsn.org. 2013 Pág ix.

DEPARTMENT FOR INTERNATIONAL DEVELOPMENT —DFID—Guías sobre medios de vida sostenibles MVS. Disponible en: http://www.livelihoods.org/info/info_guidancesheets.html, acceso: septiembre de 2008. En este proyecto participaron la Universidad Central Las Villas, Cuba; el ITDG "Intermediate Technology Development Group", del Perú; la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, y el Imperial College London, Reino Unido, como coordinador del proyecto. 2005

DOUKAS, H. C., ANDREAS, B. M., & PSARRAS, J. E. Multi-criteria decision aid for the formulation of sustainable technological energy priorities using linguistic variables. *European Journal of Operational Research*, 182(2), 844-855. doi:10.1016/j.ejor.2006.08.037 2007

E. Zitzler, M. Laumanns, and L. Thiele, "SPEA 2: Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm," Technical Report 103, computer Engineering and networks Laboratory (TIK), Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Switzerland, May 2001.

EHRGOTT, M. A discussion of scalarization techniques for multiple objective integer programming. *Annals of Operations Research*, 147(1), 2006 343-360. doi:10.1007/s10479-006-0074-z.

EROGLU, Hasan and Aydin Musa Optimization of electrical power transmission lines' routing using AHP , fuzzy AHP , and GIS, 2015 1418–1430. <http://doi.org/10.3906/elk-1211-59>

FRANCO, Carlos, et al Assessing the impact of energization in the Colombian Southwest: a case of application using SD. 24 Congreso internacional de la sociedad de dinámica de sistemas, Holanda. 2006

FRANCO, Carlos; DYNER, Isaac e HOYOS, Santiago Contribución de la energía al desarrollo de comunidades aisladas no interconectadas: Un caso de aplicación de la dinámica de sistemas y los medios de vida sostenibles en el Suroccidente Colombiano. Dyna -Revista. Facultad. Nacional de. Minas [online], vol.75, n.154, 2008 pp. 199-214. ISSN 0012-7353.

GALVEZ, G. H., PORTELA, J. R. D., RODRÍGUEZ, A. N., et al., Selection of hybrid systems with hydrogen storage based on multiple criteria: application to autonomous systems and connected to the electrical grid, (July 2013), 2014 702–713. <http://doi.org/10.1002/er>.

GEORGOPOULOU, E., LALAS, D., & PAPAGIANNAKIS, L. A multicriteria decision aid approach for energy planning problems: The case of renewable energy option. European Journal of Operational Research, 103(1), 38-54. doi:10.1016/S0377-2217(96)00263-9 1997

GONZALES Guillermo CADENA Angela.. et al, Desarrollo de un programa para la ayuda en la toma decisiones para la implementación de soluciones energéticas en las zonas no interconectadas. 2005

GROND, M. O. W., MEMBER, S., LUONG, N. H., MORREN, J., & SLOOTWEG, J. G. (n.d.). Multi-Objective Optimization Techniques and Applications in Electric Power Systems.

Guía de Inicio HOMER Versión 2.0 National Renewable Energy Laboratory. Department of Energy Laboratoric.Golden, Colorado. 2003

HAGLER, BAILLY Y AENE CONSULTORÍA Documentos ANC-375-10, 13, 16, 17, 20, 21, 22, 23, 24, 27, 28 y 29, en: Establecimiento de un plan estructural, institucional y financiero, que permita el abastecimiento energético de las zonas no

interconectadas, con participación de las comunidades y el sector privado. Santafé de Bogotá. 2001

HEIDARI, A., MAVALIZADEH, H., & AHMADI, A. Probabilistic multi-objective generation and transmission expansion planning problem using normal boundary intersection. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 9(6), 560–570. 2015 <http://doi.org/10.1049/iet-gtd.2014.0278>.

HENAO, Felipe et al. Modelo de toma de decisiones multiobjetivos en energización de ZNI, como herramienta para el alcance de MVS. Tesis de Maestría. Escuela de Sistemas. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. 2005

HOYOS, SANTIAGO Simulación para la evaluación de políticas en la energización de una ZNI del suroccidente colombiano utilizando DS y MVS. Tesis de maestría en ingeniería de sistemas, Medellín, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. 2007

HWANG C.L, A.MASUD Multiple Objective Decision Making. Methods and Applications: A State of the Art Survey. *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, vol 164, Springer – Verlag. Berlín. 1979

INSTITUTO DE PLANEACIÓN Y PROMOCIÓN DE SOLUCIONES ENERGÉTICAS PARA LAS ZONAS NO INTERCONECTADAS Manual metodológico para la formulación, evaluación y priorización de proyectos de soluciones energéticas para las ZNI. Santafé de Bogotá. 2001

JEBARAJ S, INIYAN S. A review of energy models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2006; 10(4):281–311.

K. DEB, A. PRATAP, S. AGARWAL, AND T. MEYARIVAN, "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II," IEEE Transaction on Evolutionary Computation, vol. 6(2), pp. 182 - 97, April 2002.

KARNI, R., FEIGIN, P., BREINER, A. Multicriterion issues in energy policy making. European Journal of Operational Research 56, 1992 30–40.

KAZEMI, A., DEHGHAN, S., & AMJADY, N. Multi-objective robust transmission expansion planning using information-gap decision theory and augmented ϵ -constraint method. IET Generation, Transmission & Distribution, 8(5), 828–840. 2014 <http://doi.org/10.1049/iet-gtd.2013.0427>

KIM, Y.-CHANG. Multicriteria Generation-Expansion Planning with Global Environmental Considerations. Engineering, 40(2), 1993 154-161.

KONG, D.-S., JANG, Y.-S., & HUH, J.-H. Method and Case Study of Multiobjective Optimization-Based Energy System Design to Minimize the Primary Energy Use and Initial Investment Cost. Energies, 8(6), 6114–6134. 2015 <http://doi.org/10.3390/en8066114>

KORONEOS, C., N. et al., Optimization of energy production system in the Dodecanese Islands. Renewable Energy. Vol. 30, No. 2, 2005pp. 195-210.

LINARES LLAMAS, P. Integración de criterios medioambientales en procesos de decisión: una aproximación multicriterio a la planificación integrada de recursos eléctricos. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes España. 1999

MARQUES, J. E., Teixeira, J., Chamine, H. I., Carvalho, M. R., Rocha, F., Fonseca, P. E., & Pe, A. A comprehensive analysis of groundwater resources

using GIS and multicriteria tools (Caldas da Cavaca , Central Portugal): environmental issues, 2015 2699–2715. <http://doi.org/10.1007/s12665-014-3602-1>

MAVROTAS, G. Effective implementation of the e-constraint method in Multiobjective Mathematical Programming problems. *Applied Mathematics and Computation*, 213-455-465.. 2009

MEZA, J. L. C., YILDIRIM, M. B., & MASUD, A. S. M. A Model for the Multiperiod Multiobjective Power Generation Expansion Problem. *IEEE Transactions on Power Systems*, 22(2), 871-878. doi:10.1109/TPWRS.2007.895178. 2007

MÜLLER SIMON, BROWN ADAN, ÖLZ SAMANTHA Policy considerations for deploying renewables. Information Paper. International Energy Agency. OECD/IEA. www.iea.org. París, Francia. 2011 Pág. 13.

N. SRINIVAS, AND K. DEB, “Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms. *Evolutionary Computation*, vol. 2(3), pp. 221—248, 1994.

NARANJO, L & BOTERO, S .Informe Marco Legal. En Proyecto COLCIENCIAS. Plataforma para el soporte a la evaluación de políticas y a la toma de decisiones en energización de zonas no interconectadas en Colombia. En Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Mayo 2005.

OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY, Wien Automatic System Planning Package (WASP): An Electric Expansion Utility Optimal Generation Expansion Planning Computer Code, Rep. ORNL-4925 1974.

ORGANIZACIÓN LATINOAMERICANA DE ENERGÍA (OLADE), en su programa de energía sostenible desarrolla un proyecto conjuntamente con la Universidad de

Calgary y el gobierno de Canadá para electrificación rural en Colombia (2006) “diseño y operación de los sistemas energéticos para zonas asiladas, la puesta en marcha de esquemas de sostenibilidad, capital semilla para replicar proyectos piloto”.

PANPAN, J., JUN, Z., & CHUANCHUAN, C. Multi-objective optimization for renewable energy distributed generation based on fuzzy satisfaction. 2013 5th International Conference on Power Electronics Systems and Applications (PESA), (2), 1–4. 2013 <http://doi.org/10.1109/PESA.2013.6828223>.

PÉREZ, Edison “Energización rural en ecosistemas estratégicos de Colombia”, Medellín, I Simposio Internacional Energía y frontera tecnológica en el sector rural. Centro de Convenciones Quirama. 2005

POHEKAR, S. D., & RAMACHANDRAN, M. (). Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 8(4), 365–381. doi:10.1016/j.rser.2003.12.007. 2004

POHEKAR, S. D., & RAMACHANDRAN, M. Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 8(4), 365–381. doi:10.1016/j.rser.2003.12.007. 2004

POLATIDIS H, Haralambopolous DA. Renewable energy sources planning and design: a multi-criteria approach. In: van den Bergh J, Bruinsma FR, editors. *Managing the transition to renewable energy: theory and practice from local regional and macro perspectives*. Cheltenham, U.K.: Edward Elgar; 2008 [chapter 11].

QUIJANO HURTADO, RICARDO Diseño e implementación de una plataforma integrada de modelación para la planificación energética sostenible -Modergis –

“estudio de caso Colombia” Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.
2012

REN21 Secretariat (2014). Renewables Global Status Report. Key Findings
2014.Paris: REN21 Secretariat. www.ren21.net. París, Francia. 2014 Pág. 5.

RENEWABLE ENERGY FOR SUSTAINABLE LIVELIHOODS RESURL Seminario
taller sobre la energización rural en zonas rurales aisladas y medios de vida
sostenibles. Medellín. 2005

RODRÍGUEZ YEE RICARDO. Formulación de un plan de desarrollo para las
fuentes no convencionales de energía en Colombia (PDFNCE) Colombia.
Volumen 2 – Diagnóstico de las FNCE en Colombia. Consorcio energético
CORPOEMA. Presentado a la UPME. 2010 Pág. 3-22.

SAATY TL. The analytic hierarchy process. New York, NY, USA: McGraw-Hill.
1980

SERAFIM OPRICOVIC & TZENG, 2007

SMITH, R Y J. MESA A rural electrification expansion model. International
Transactions in Operational Research. Vol. 3, 1996 pp. 319-325.

SMITH, R. Y A. PULGARÍN Optimización multiobjetivo con algoritmos genéticos:
desarrollo de un modelo para energización rural. Chile, XI Congreso Latino-
iberoamericano de investigación de operaciones. 2002

TEKINER, H., COIT, D. W., & FELDER, F. a. Multi-period multi-objective electricity
generation expansion planning problem with Monte-Carlo simulation. Electric

Power Systems Research, 80(12), 1394-1405. Elsevier B.V. doi:10.1016/j.epsr.2010.05.007 2010

TEKINER, H., COIT, D. W., & FELDER, F. a. Multi-period multi-objective electricity generation expansion planning problem with Monte-Carlo simulation. Electric Power Systems Research, 80(12), 1394-1405. Elsevier B.V. 2010 doi:10.1016/j.epsr.2010.05.007.

THEODOROU, S., FLORIDES, G., & TASSOU, S. The use of multiple criteria decision making methodologies for the promotion of RES through funding schemes in Cyprus, A review. Energy Policy, 38(12), 7783–7792. doi:10.1016/j.enpol.2010.08.038. Theodorou investiga el uso de MCDM métodos y su implementación en la isla de Chipre. 2010

TOBÓN OROZCO, David et al. Optimización de herramientas multiobjetivo para la toma de decisiones de inversión en sistemas aislados sostenibles de energía. Universidad de Antioquia, ISA, Colciencias. 2010.

VILFREDO PARETO., 1896

VOROPAI, N. I., & IVANOVA, E. Y. Multi-criteria decision analysis techniques in electric power system expansion planning. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 24(1), 71-78. doi:10.1016/S0142-0615(01)00005-9 2002

WANG, Haichao., Jiao Wenling., Lahdelma Risto., Zhu Chuanzhi & Zou Pinghua Stochastic Multicriteria Acceptability Analysis for Evaluation of Combined Heat and Power Units, 2015 59–78. <http://doi.org/10.3390/en8010059>.

WANG, J.-J., JING, Y.-Y., ZHANG, C.-F., & ZHAO, J.-H. Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. Renewable and

Sustainable Energy Reviews, 13(9), 2009 2263-2278.
doi:10.1016/j.rser.2009.06.021

WRIGHT JA, LOOSEMORE HA, FERMANI R. Optimization of building thermal design and control by multi-criterion genetic algorithm. Energy and Buildings 2002;34:959–72.

YANG, H.T .and CHEN, S. L. Incorporating a multicriteria decision procedure into the combined dynamic programming. IEEE Transactions on Power Systems, 1989 4(1).

ZELNY, M. Compromise Programming. En: J.L. Cockrane y M. Zeleny (editores). Multiple Criteria Decision Making. University of South Carolina Press, Columbia. 1973

ANEXOS

ANEXO A. CASO APLICADO

(Ver documentos adjuntos)

ANEXO B. MODELO MATEMÁTICO – DETALLADO

(Ver documentos adjuntos)

ANEXO C. MÉTODO MULTICRITERIO

(Ver documentos adjuntos)