

**APLICACIÓN DEL MÉTODO DELPHI CON ENFOQUE DIFUSO PARA
SELECCIONAR ALTERNATIVAS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA - ESTUDIO
DE CASO DE SEIS MUNICIPIOS NO INTERCONECTADOS DE COLOMBIA**

**MARÍA CAMILA MONSALVE CAMARGO
MARÍA ALEJANDRA NOBZA VILLARREAL**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE ESTUDIOS INDUSTRIALES Y EMPRESARIALES
BUCARAMANGA**

2016

**APLICACIÓN DEL MÉTODO DELPHI CON ENFOQUE DIFUSO PARA
SELECCIONAR ALTERNATIVAS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA - ESTUDIO
DE CASO DE SEIS MUNICIPIOS NO INTERCONECTADOS DE COLOMBIA**

**MARÍA CAMILA MONSALVE CAMARGO
MARÍA ALEJANDRA NOBZA VILLARREAL**

**Proyecto de grado presentado como requisito para optar el título de
Ingeniero Industrial**

Director:

**JAIME ALBERTO CAMACHO PICO
Ingeniero Industrial, Ph.D**

Codirectores:

**ANA MARÍA ROSSO CERÓN
Ingeniera Química**

**HENRY LAMOS DÍAZ
Físico Matemática, Ph.D**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE ESTUDIOS INDUSTRIALES Y EMPRESARIALES
BUCARAMANGA**

2016

DEDICATORIA

A Dios por hacer este sueño posible.
A nuestros padres y hermanos por su amor, confianza y apoyo.
Y a todos aquellos que nos ayudaron en este proceso.

María Alejandra y María Camila

AGRADECIMIENTOS

A los profesores Jaime Alberto Camacho y Henry Lamos por compartir sus conocimientos y guiarnos en la realización de este proyecto.

A Ana María Rosso por su paciencia, esmero y sus deseos por investigar.

A los Funcionarios de la IPSE y UPME, Profesores de la UIS y Empresarios del sector energético por su aporte y colaboración en la realización de este proyecto.

A la Escuela de Estudios Industriales Empresariales por contribuir a nuestra formación profesional

CONTENIDO

| | Pág. |
|--|-------------|
| INTRODUCCIÓN | 17 |
| 1. GENERALIDADES DEL PROYECTO | 19 |
| 2. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO | 21 |
| 3. OBJETIVOS..... | 23 |
| 3.1. OBJETIVO GENERAL | 23 |
| 3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 23 |
| 4. MARCO TEÓRICO | 24 |
| 4.1 ZONAS NO INTERCONECTADAS (ZNI)..... | 24 |
| 4.1.1 Casos de estudio. | 26 |
| 4.2 SUSTENTABILIDAD | 27 |
| 4.2.1. Sustentabilidad Ambiental..... | 28 |
| 4.2.2. Sustentabilidad Social..... | 28 |
| 4.2.3. Sustentabilidad Económica..... | 29 |
| 4.2.4. Sustentabilidad Tecnológica. | 29 |
| 4.3 TECNOLOGÍAS Y FUENTES DE ENERGÍA A CONSIDERAR EN EL ESTUDIO | 30 |
| 4.3.1. Energía Solar. | 31 |
| 4.3.2. Energía Eólica..... | 33 |
| 4.3.3. Biomasa. | 35 |
| 4.3.4. Energía Hidráulica. | 37 |
| 4.3.5. Tecnología grupos electrógenos..... | 39 |
| 4.4 METODOLOGÍA DELPHI CON ENFOQUE DIFUSO | 40 |
| 4.4.1 Método Delphi..... | 40 |
| 4.4.2 Lógica Difusa. | 45 |

| | |
|---|-----|
| 4.4.3 Enfoque difuso del método Delphi. | 47 |
| 5. DISEÑO METODOLÓGICO..... | 49 |
| 5.1. REVISIÓN DE LA LITERATURA PARA LA SELECCIÓN DE LOS INDICADORES DE LOS CRITERIOS AMBIENTAL, ECONÓMICO TECNOLÓGICO Y SOCIAL | 51 |
| 5.1.1 Revisión de la literatura de artículos y tesis del sector energético..... | 51 |
| 5.1.2 Selección de los indicadores de los criterios tecnológico, social, económico y ambiental | 61 |
| 5.2 APLICACIÓN DEL MÉTODO DELPHI PARA EL LEVANTAMIENTO DE LA INFORMACIÓN | 79 |
| 5.2.1 Selección de expertos..... | 80 |
| 5.2.2 Elaboración de los cuestionarios | 82 |
| 5.2.3 Lanzamiento de la segunda vuelta | 84 |
| 5.3 METODOLOGÍA LÓGICA DIFUSA PARA LA EVALUACIÓN DE LOS CRITERIOS Y SELECCIÓN DE LAS ALTERNATIVAS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA EN LAS ZNI | 87 |
| 5.3.1 Evaluación de los criterios ambientales, económicos, tecnológicos y sociales | 88 |
| 5.3.2 Asignar un valor escalado a las alternativas según el consenso generalizado de los expertos..... | 97 |
| 5.3.3 Sistema de inferencia difusa | 105 |
| 5.3.4 Resultados: Presentación, análisis, discusión y principales conclusiones.. | 112 |
| 6. CONCLUSIONES | 118 |
| 7. RECOMENDACIONES..... | 120 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 121 |
| ANEXOS..... | 121 |

LISTA DE FIGURAS

| | Pág. |
|--|-------------|
| Figura 1. Mapa de zonas interconectadas y zonas no interconectadas..... | 25 |
| Figura 2. Esquema transversal de un sistema hidroeléctrico a filo de agua | 38 |
| Figura 3. Esquema global del proceso Delphi | 45 |
| Figura 4. Funciones de Pertenencia Lógica Fuzzy | 46 |
| Figura 5. Esquema general del diseño metodológico | 50 |
| Figura 6. Proceso de selección de sub criterios..... | 51 |
| Figura 7. Jerarquía de los criterios de Violeta Parodi | 59 |
| Figura 8. Histograma Indicadores ambientales..... | 62 |
| Figura 9. Histograma Indicadores económicos | 62 |
| Figura 10. Histograma Indicadores Tecnológicos. | 63 |
| Figura 11. Histograma Indicadores Sociales. | 63 |
| Figura 12. Preselección de los sub criterios | 65 |
| Figura 13. Mapa jerárquico | 83 |
| Figura 14. Análisis de desviación estándar para la alternativa solar | 86 |
| Figura 15. Pasos para el desarrollo de la metodología | 88 |
| Figura 16. Matriz de Opinión para la Alternativa Solar en la Zona 1 | 89 |
| Figura 17. Matriz de juicios normalizada..... | 89 |
| Figura 18. Criterios de los expertos para la Alternativa Solar en la Zona Insular...96 | |
| Figura 19. Criterio ambiental de los expertos para cada alternativa de la Zona Insular | 96 |
| Figura 20. Intersección entre dos opiniones | 98 |
| Figura 21. Matriz de acuerdo | 98 |
| Figura 22. Ventana mostrando resultados de la corrida del Software para el criterio ambiental en la Zona 1. | 103 |

| | |
|--|-----|
| Figura 23. Sistema de Inferencia Difuso. | 105 |
| Figura 24. Fusificación de las variables de entrada | 106 |
| Figura 25. Respuesta a la variable de salida. | 108 |
| Figura 26. Reglas del Sistema de Inferencia | 109 |
| Figura 27. Variable de Salida Vs C.Tecnológico y C. Ambiental para un C. Social =0,69 y un C. Económico = 0,51 | 110 |
| Figura 28. Variable de Salida Vs C.Social y C. Ambiental para un C. Tecnológico =0,59 y un C. Económico = 0,51 | 110 |
| Figura 29. Variable de Salida Vs C.Económico y C. Ambiental para un C. Tecnológico =0,59 y un C. Social = 0,69 | 111 |
| Figura 30. Variable de Salida Vs C.Social y C. Tecnológico para un C. Ambiental =0,83 y un C. Económico = 0,51 | 111 |
| Figura 31. Variable de Salida Vs C.Económico y C. Tecnológico para un C. Ambiental =0,83 y un C. Social = 0,69..... | 111 |
| Figura 32. Variable de Salida Vs C.Económico y C. Social para un C. Ambiental =0,83 y un C. Tecnológico = 0,59 | 112 |
| Figura 33. Evaluación de las alternativas de generación de energía..... | 112 |
| Figura 34. Jerarquización de las alternativas de generación de energía | 115 |

LISTA DE TABLAS

| | Pág. |
|--|-------------|
| Tabla 1. Criterios de evaluación J. Wang | 53 |
| Tabla 2. Criterios de evaluación Cavallaro y Ciraolo. | 54 |
| Tabla 3. Criterios preseleccionados según revisión bibliografía | 66 |
| Tabla 4. Composición de los Grupos: Sector público, privado y académico..... | 81 |
| Tabla 5. Matriz de comparación por parejas de los cuatro sub criterios por el evaluador 1 | 90 |
| Tabla 6. Matriz de comparación por parejas de los cuatro sub criterios por el evaluador 2 | 91 |
| Tabla 7. Matriz de comparación por parejas de los cuatro sub criterios por el evaluador 3 | 91 |
| Tabla 8. Matriz de comparación por parejas de los cuatro sub criterios por el evaluador 4 | 91 |
| Tabla 9. Matriz de comparación por parejas de los cuatro sub criterios por el evaluador 5 | 92 |
| Tabla 10. Matriz de comparación por parejas de los cuatro sub criterios por el evaluador 6 | 92 |
| Tabla 11. Matriz de comparación por parejas de los cuatro sub criterios por el evaluador 7 | 92 |
| Tabla 12. Matriz de comparación por parejas de los cuatro sub criterios por el evaluador 8 | 93 |
| Tabla 13. Matriz de comparación por parejas de los cuatro sub criterios por el evaluador 9 | 93 |
| Tabla 14. Matriz integrada de puntuación para el criterio ambiental..... | 94 |
| Tabla 15. Vector de peso de la ISM para el criterio ambiental..... | 94 |

| | |
|---|-----|
| Tabla 16. Factor de peso de los sub criterios | 95 |
| Tabla 17. Zona 1 Insular (San Andrés)..... | 104 |
| Tabla 18. Zona 2 Sur: Putumayo (Valle del Guamuez)..... | 104 |
| Tabla 19. Zona 3 Oriente: Meta (La Macarena y Puerto Concordia) | 104 |
| Tabla 20. Zona 4 Occidente: Chocó (Medio Atrato y Alto Baudó)..... | 104 |
| Tabla 21. Categorías lingüísticas para la defusificación de las alternativas..... | 107 |
| Tabla 22. Elegibilidad de las alternativas en las zonas de estudio | 113 |

LISTA DE ANEXOS

- ANEXO A. Marco teórico
- ANEXO B. Selección de indicadores
- ANEXO C. Encuestas
- ANEXO D. Análisis de encuestas Ronda 1
- ANEXO E. Factores de peso AHP
- ANEXO F. Criterios por zona
- ANEXO G. Reglas sistema inferencia
- ANEXO H. Artículo

NOTA: LOS ANEXOS CORRESPONDIENTES A ESTA INVESTIGACIÓN PUEDEN SER CONSULTADOS EN LA BIBLIOTECA DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER: SALA BASE DE DATOS.

RESUMEN

TITULO: APLICACIÓN DEL MÉTODO DELPHI CON ENFOQUE DIFUSO PARA SELECCIONAR ALTERNATIVAS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA - ESTUDIO DE CASO DE SEIS MUNICIPIOS NO INTERCONECTADOS DE COLOMBIA.*

AUTORES: MARÍA CAMILA MONSALVE CAMARGO**
MARÍA ALEJANDRA NOBZA VILLARREAL

PALABRAS CLAVES: Método Delphi, Lógica Difusa, Energías Renovables, Zonas No Interconectadas (Zni), Generación De Energía Eléctrica, Criterios Sociales, Criterios Económicos, Criterios Ambientales, Criterios Tecnológicos.

DESCRIPCIÓN:

En la actualidad el 52% del territorio nacional corresponde a zonas no interconectadas (ZNI) a la red de energía eléctrica, en las cuales se asienta el 79% de la población de carácter rural del país que no cuentan con este servicio. La implementación de nuevas energías alternativas renovables para la generación de energía eléctrica se presenta como una solución a este problema.

Este trabajo de grado tiene como objetivo utilizar la metodología Delphi con enfoque difuso para realizar un estudio de cinco alternativas de generación de energía eléctrica (grupos electrógenos, fotovoltaica, eólica, pequeñas centrales hidroeléctricas y gasificación de biomasa) para las ZNI seleccionadas bajo criterios ambientales, tecnológicos, sociales y económicos. El documento se estructura en cuatro capítulos: en primer lugar, se consideró necesario realizar una revisión de la literatura con el fin de abordar las bases teóricas y así determinar los sub criterios más relevantes para evaluación de las alternativas de energía eléctrica; en la segunda parte se seleccionaron los sub criterios definitivos bajo el contexto de estudio, asignándole su respectiva escala de medición; posteriormente, bajo el método Delphi, se realizó una consulta a expertos del sector energético para la valoración de las tecnologías en las zonas de estudio a través de dos rondas de cuestionarios. Por último, haciendo uso de la lógica difusa se evaluó cada una de las tecnologías mediante una aplicación en Matlab que integró las opiniones de los expertos. Como resultado de este estudio se determinó que en La Isla de San Andrés la alternativa eólica resultó ser la opción más elegible, seguida de la alternativa solar y diésel. Para los municipios La Macarena, Puerto Concordia, Valle Guamuez, Medio Atrato, Alto Baudó en primer lugar se ubicó la alternativa Pequeñas Centrales Hidroeléctricas, en segundo lugar, la alternativa de gasificación de biomasa, seguido de solar y diésel.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales. Director: PhD. Jaime Alberto Camacho Pico. Codirectores: Ing. Ana María Rosso Cerón, PhD. Henry Lamos Díaz

ABSTRACT

TITLE: APPLICATION OF DELPHI METHOD WITH FUZZY APPROACH FOR SELECT ALTERNATIVE ELECTRICITY GENERATION - CASE STUDY OF SIX NON-INTERCONNECTED AREAS IN COLOMBIA*

AUTHORS: MARÍA CAMILA MONSALVE CAMARGO**
MARÍA ALEJANDRA NOBZA VILLARREAL

KEYWORDS: Delphi Method, Fuzzy Logic, Renewable Technologies, Non-Interconnected Areas (ZNI), Electric Power Generation, Social Criteria, Economics Criteria, Environmental Criteria, Technologic Criteria.

DESCRIPTION:

Currently 52% of the national territory is not interconnected areas (ZNI), in which 79% of the rural population of the country do not have electrical energy service. Implementations of new renewable alternative energy for power generation are presented as a solution to this problem.

This research aimed to use the Delphi methodology with a fuzzy approach for a study of five alternatives for electricity generation (photovoltaic, wind, small hydropower, biomass gasification and diesel) for ZNI selected under environmental, technological, social and economic criteria. The paper is organized as follows: First, it was considered necessary to review the literature in order to get the theoretical bases and determine the most relevant sub criteria for evaluating alternative electricity. In the second part the sub criteria were selected under the context of study and a measurement scale was assigned. Then the Delphi method was applied with experts from the energy sector for assessing technologies in the study areas through two rounds of questionnaires. Finally, making use of fuzzy logic that facilitates the management of qualitative information considered the different technologies were assessed was assessed through an application in Matlab that integrated the judgment of experts in order to choose the best sustainable alternative. In this study, small hydropower is shown as the first alternative in the municipalities of La Macarena, Puerto Concordia, Valle del Guamuez, Medio Atrato and Alto Baudó, while wind alternative stood in San Andrés followed by solar and diesel technology.

* Work degree

** Faculty of Mechanical Engineering and Physical. School of Industrial and Business Studies. Director: PhD. Jaime Alberto Camacho Peak. Co-Directors: Ana Maria Rosso Ceron Ing, PhD. Henry Lamos Díaz

INTRODUCCIÓN

La energía eléctrica es un servicio indispensable para potenciar el bienestar social y económico, generar riqueza industrial y comercial, aumentar la protección social y elevar el nivel de vida de los países; en consideración a ello, ha surgido una racionalidad ambiental denominada “Desarrollo Sostenible”, que tiene como propósito fundamental satisfacer las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras. La utilización de energías renovables nace como alternativa para dar solución a diferentes problemas que se presentan tanto en los países industrializados como en los que están en proceso de industrialización; uno de ellos es el suministro de energía eléctrica a todas sus regiones, en especial las que se encuentran apartadas de los principales sistemas de generación debido a su geografía, llamadas Zonas No Interconectadas (ZNI). En Colombia las ZNI comprenden gran parte del territorio nacional, están ubicadas en lugares de difícil acceso, a largas distancias de los centros urbanos, carecen de infraestructura física y no cuentan con vías propias de acceso, siendo zonas de gran importancia ecológica, que se caracterizan por su riqueza de recursos naturales y gran biodiversidad; en tal circunstancia, las energías renovables representan una alternativa que ofrece un servicio constante y confiable, cuyos costos de generación son asequibles a la población, y adicionalmente contribuyen a la disminución de gases de efecto invernadero.¹

El presente proyecto busca dar solución a estos problemas de energización de las zonas no interconectadas de Colombia, estudiando diferentes alternativas de generación de energía eléctrica bajo criterios ambientales, tecnológicos, sociales y económicos; los cuales se evalúan de acuerdo a sub criterios que se seleccionan mediante una revisión bibliográfica, y apoyados en el uso de la metodología Delphi

¹ ESTEVE GÓMEZ, Natalia. Energización de las zonas no interconectadas a partir de las energías renovables solar y eólica. Tesis de Magíster en Gestión Ambiental. Bogotá D.C.: Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Estudios Ambientales y Rurales, 2011.

que permite consultar a expertos del sector gubernamental de la UPME (Unidad de Planeación Minero Energética) y el IPSE (Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las ZNI), profesores investigadores en asuntos energéticos y empresarios pertenecientes al sector de la energía en Colombia, sus opiniones basadas en conocimientos con el fin de seleccionar las mejores alternativas en cada región. Por último, se evalúa en conjunto las opiniones emitidas a través de un método de decisión multicriterio utilizando la lógica difusa para facilitar el análisis, puesto que se puede adoptar un lenguaje cualitativo a valores cuantitativos y la asignación de reglas lógicas que permiten describir la viabilidad de cada alternativa de generación de energía.

En síntesis, esta investigación consiste en realizar un análisis de cinco tecnologías en seis municipios no interconectados del país, utilizando el método Delphi con enfoque difuso para determinar la mejor alternativa para cada zona de estudio.

1. GENERALIDADES DEL PROYECTO

La energía evidentemente es el pilar del desarrollo de los procesos productivos, del progreso social de los países y elemento fundamental del avance tecnológico a nivel mundial. En Colombia el Sistema interconectado Nacional cubre aproximadamente el 48 % del territorio nacional alimentando cerca del 98,2 % de los usuarios, el resto de los usuarios se encuentran en zonas remotas del territorio llamadas Zonas No Interconectadas (ZNI).

Las razones por las cuales estas zonas están aisladas de la red eléctrica son básicamente que estos entornos rurales se caracterizan por su difícil acceso lo cual encarece la opción de extender una red de distribución eléctrica tradicional y su posterior mantenimiento. También se debe tener en cuenta que el consumo en estas zonas es reducido y disperso, lo cual hace que el mercado de energía rural sea poco rentable económicamente para una empresa eléctrica nacional o privada. Esto significa que estas personas no disponen de iluminación eléctrica, telecomunicaciones o potencia mecánica, dependiendo completamente de combustibles tradicionales aumentando las emisiones de CO₂ y el calentamiento global. La anterior situación requiere diversificar las tecnologías destinadas a la electrificación de las ZNI y reorientar la concepción y las estrategias que guían los planes de energización rural, con el fin de que los proyectos sean sostenibles.

Las diferentes iniciativas para la implementación de energías renovables en ZNI de Colombia se encuentran en una etapa inicial que consiste en la formulación de proyectos para planes de desarrollo. La aprobación de la Ley 1715 del 13 de mayo del 2014 referente a la regulación de la integración de las energías renovables en el sistema eléctrico nacional, hace referencia a los mecanismos e incentivos para el impulso de las FNCE (Fuentes No Convencionales de Energía) lo que favorecerá su desarrollo en el país. Esto, sumado a los múltiples beneficios que

aportan estas fuentes, tales como la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, el aprovechamiento de los recursos renovables, la generación de empleo, el desarrollo científico y tecnológico, y la paulatina reducción de la dependencia de fuentes fósiles.

Detectada esta problemática se hace necesario identificar opciones para suplir la demanda energética de la población, y en consecuencia, determinar las alternativas más viables teniendo en cuenta aspectos ambientales, tecnológicos, sociales y económicos para cada zona.

2. JUSTIFICACIÓN

La energía es un factor indispensable para el desarrollo socioeconómico en los territorios, y en tal sentido, las energías renovables contribuyen al desarrollo sostenible, siendo la solución a largo plazo a los problemas de suministro de energía mundial, mediante la transición energética de los combustibles fósiles hacia estas otras fuentes de energía alternativas.

En Colombia el 52% del territorio nacional corresponde a zonas no interconectadas (ZNI)², es decir, aquellas que no reciben el servicio público de energía eléctrica a través del Sistema Interconectado Nacional debido a su difícil acceso y las enormes inversiones necesarias para llevar las redes de distribución eléctricas. En la mayoría de los casos estos lugares se caracterizan por su riqueza natural, étnica y cultural, muchas de ellas son áreas protegidas debido a la presencia de resguardos indígenas y terrenos colectivos, donde se encuentra la mayor parte de la biodiversidad del país. Por lo tanto, es necesaria la búsqueda de nuevos métodos para obtener energía más limpia, renovable y de fácil acceso.

El propósito de este proyecto es el de seleccionar las alternativas de generación de energía para cada una de las ZNI escogidas (Alto Baudó, Medio Atrato, La Macarena, Puerto Concordia, Valle del Guamuez y San Andrés Isla), a partir del análisis de variables tecnológicas, sociales, ambientales y económicas, que determinen la viabilidad de las mismas para el abastecimiento energético de viviendas rurales aisladas de la red a partir de tecnologías fotovoltaica, eólica, gasificación de biomasa, pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) y grupos electrógenos.

² INSTITUTO DE PLANIFICACIÓN Y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas no Interconectadas. [Sitio Web] [Consultado el 30 julio 2015]. Disponible en: <http://www.ipse.gov.co/atencion-ciudadano/preguntas-frecuentes-y-respuestas/2-Institucional/3-Qu%C3%A9%20son%20las%20ZNI>.

Este estudio será desarrollado utilizando el método Delphi Difuso, donde expertos del sector gubernamental de la UPME (Unidad de Planeación Minero Energética) y el IPSE (Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las ZNI), profesores investigadores en asuntos energéticos y empresarios pertenecientes al sector de la energía en Colombia, basados en sus conocimientos y experiencia en este campo, aportarán sus criterios en la selección de las mejores alternativas de generación eléctrica para cada región. Debido a la incertidumbre y subjetividad en las respuestas, es necesario el uso de un enfoque difuso el cual permita que las diferentes opiniones converjan para así obtener la priorización de las alternativas a escoger a través del uso de un software especializado en variables difusas. Con esta investigación se busca dar una solución a la problemática de las ZNI con el análisis de las alternativas más factibles para cada una de ellas.

Esta investigación tiene la particularidad, a diferencia de diversos estudios hasta ahora realizados, de involucrar cinco diferentes alternativas de generación de energía eléctrica, con criterios y sub criterios, que permitan determinar para cada municipio seleccionado la alternativa más apropiada, dependiendo de su factibilidad tecnológica, social, ambiental y económica.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar cualitativamente, variables tecnológicas, sociales, ambientales y económicas, asociadas a cinco sistemas de generación de energía eléctrica (grupos electrógenos, fotovoltaica, eólica, pequeñas centrales hidroeléctricas, gasificación de biomasa), utilizando una metodología Delphi-Difusa aplicada a expertos involucrados en proyectos de energías renovables, en seis municipios localizados en los departamentos de Chocó, Meta, Putumayo y San Andrés.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Realizar una revisión de la literatura para definir el marco conceptual e identificar las variables y criterios a tener cuenta en las diferentes alternativas de generación de energía.
2. Elaborar los cuestionarios que serán aplicados a los expertos una vez definido el marco conceptual.
3. Aplicar en dos etapas los cuestionarios a los expertos de la UPME (Unidad de Planeación Minero Energética) y el IPSE (Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zona No Interconectadas) utilizando la metodología Delphi difusa.
4. Procesar y analizar las respuestas obtenidas en las dos etapas por medio de una aplicación en Matlab, con el fin de proporcionar las recomendaciones correspondientes para cada uno de los seis municipios.
5. Elaborar un artículo de carácter publicable que evidencie los resultados obtenidos en la investigación realizada.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 ZONAS NO INTERCONECTADAS (ZNI)

Colombia se divide energéticamente en dos tipos de zonas: las Zonas Interconectadas (ZI) las cuales tienen acceso al servicio de energía eléctrica a través del Sistema Interconectado Nacional (SIN) y las Zonas No Interconectadas (ZNI) que son aquellas áreas geográficas en donde no se presta el servicio público de electricidad a través del Sistema Interconectado Nacional.

Las ZNI corresponden al 52% del territorio nacional, donde se asienta el 79% de la población de carácter rural del país. Las ZNI están conformadas por 17 departamentos, 5 capitales departamentales, 39 cabeceras municipales, 112 municipios, 1441 localidades, más de 176.000 usuarios atendidos y 94 entes prestadores organizados en 14 grupos territoriales³.

³ INSTITUTO DE PLANIFICACIÓN Y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas no Interconectadas. [Sitio Web] [Consultado el 30 julio 2015]. Disponible en: <http://www.ipse.gov.co/atencion-ciudadano/preguntas-frecuentes-y-respuestas/2-Institucional/3-Qu%C3%A9%20son%20las%20ZNI>.

Figura 1. Mapa de zonas interconectadas y zonas no interconectadas



Fuente: Presentación Oficial del IPSE. IPSE, mayo 2011

Las ZNI también se caracterizan por estar ubicadas en lugares de difícil acceso, a largas distancias de los centros urbanos, lo que acarrea a su vez problemas de inseguridad debido a la presencia de grupos violentos al margen de la ley; tampoco cuentan con infraestructura física y carecen de vías de acceso apropiadas. Estas características hacen que no sea viable, ni ambiental ni financieramente, la distribución de energía eléctrica a través del SIN, por lo que la prestación del servicio eléctrico en estas zonas depende en su mayoría de plantas térmicas que utilizan combustibles fósiles para su funcionamiento. Sin embargo, este servicio se ha identificado según la UPME⁴ por sus bajas coberturas, altos costos, deficiente gestión por parte de las empresas de servicios públicos, carencia de adecuados mecanismos de inspección, vigilancia y control, y

⁴ COLOMBIA. DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN. Base de datos Simec. Bogotá D.C., 2006. [Base de datos en línea]. Recuperado de <http://www.upme.gov.co/zni/portals/0/resoluciones/conpes3453.pdf> el 30 julio 2015.

constante asistencia de la nación con recursos para el mantenimiento e inversión para la expansión del servicio.

Cabe resaltar que estas zonas aisladas utilizan principalmente sistemas basados en generadores de diésel como única fuente de suministro incurriendo en altos costos ambientales, de transporte y mantenimiento. Muchas de las poblaciones no interconectadas no cuentan con un servicio disponible 24 horas, existiendo incluso municipios con servicio de únicamente 4 horas al día⁵.

4.1.1 Casos de estudio. Los casos de estudio seleccionados por el proyecto raíz y que serán estudiados en esta investigación fueron determinados a partir de las siguientes características: estar clasificado como ZNI, disponer del suministro de energía eléctrica por un período limitado de horas y presentar una mayor demanda de energía respecto a otras ZNI.

Según los resultados del PIEC 2013-2017 el porcentaje de cobertura de energía eléctrica para los municipios Alto Baudó, Medio Atrato, La Macarena, Puerto Concordia, Valle de Guamuez y San Andrés de 41,13%, 43,99%, 81,84%, 62,24%, 87,18% y 100% respectivamente; cabe resaltar que la generación de esta energía es por medio de plantas diésel. En el Anexo A se encontrará una breve descripción de los casos de estudio seleccionados.

⁵ GARCÍA, Helena, et al. Análisis costo beneficio de energías renovables no convencionales en Colombia. Fedesarrollo, centro de investigación económica y social. 2013.

4.2 SUSTENTABILIDAD

Según la Real Academia Española⁶, "sostenible" se define como: "desarrollo que, cubriendo las necesidades del presente, preserva la posibilidad de que las generaciones futuras satisfagan las suyas."

El origen de la palabra sostenibilidad se sitúa en 1987 con el informe socio-económico Brundtland elaborado para la ONU, por una comisión encabezada por la doctora Gro Harlem Brundtland. En este informe, se utilizó por primera vez el término desarrollo sostenible (o desarrollo sustentable), definido como "Satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las del futuro para atender sus propias necesidades".⁷

En este sentido, la sustentabilidad o sostenibilidad es la capacidad que tiene una sociedad para hacer un uso consciente y responsable de sus recursos, sin agotarlos o exceder su capacidad de renovación, y sin comprometer el acceso a estos por parte de las generaciones futuras.

La sustentabilidad para una sociedad significa la existencia de condiciones económicas, ecológicas, sociales y políticas que permitan su funcionamiento de forma armónica a lo largo del tiempo y del espacio. En el tiempo, la armonía debe darse entre las generaciones actuales y las venideras; en el espacio, la armonía debe generarse entre los diferentes sectores sociales, entre mujeres y hombres y entre la población con su ambiente⁸.

⁶ RAE. Real Academia Española. [Sitio Web] Sostenibilidad. [Consultado 10 agosto de 2015] Disponible en: <http://www.concienciaeco.com/2010/08/29/sostenibilidad-en-la-rae/>.

⁷ *Ibíd.*

⁸ SUSTENTABILIDAD. [Anónimo] [en línea] [consultado 10 agosto de 2015] Disponible en: http://www.amartya.org.ar/index.php?option=com_content&view=article&id=133&Itemid=59

La sustentabilidad como un modelo integral para el futuro exige la integración de tres aspectos principales: sustentabilidad económica, ambiental y social.

4.2.1. Sustentabilidad Ambiental.⁹ La sustentabilidad ambiental considera el impacto y manejo de recursos tales como agua, suelo, paisaje, aire (incluyendo emisiones de material particulado, compuestos sulfurados y nitrogenados, dioxinas y otros contaminantes), y emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), las que contribuyen al calentamiento global y estimulan el cambio climático. También tiene en cuenta los impactos sobre el medio biótico; la generación y manejo de residuos; la eficiencia en el uso de los recursos, y el uso de sustancias químicas sobre las cuales existe evidencia o sospecha que puedan tener impactos negativos, ya sea sobre los ecosistemas o sobre la salud humana (incluye el uso de pesticidas y otros agroquímicos).

4.2.2. Sustentabilidad Social.¹⁰ La sustentabilidad social ocurre cuando los procesos, sistemas, estructuras y relaciones, tanto formales como informales, aportan activamente a las personas, creando comunidades saludables y sanas. Las comunidades socialmente sustentables son equitativas, diversas, conectadas, democráticas y proveen una buena calidad de vida.

Dentro de la dimensión social, la sustentabilidad no es muy proactiva, está principalmente relacionada con el cumplimiento de los requisitos mínimos de las normativas legales y con acciones caritativas y bondadosas. Este desequilibrio se debe al origen del concepto sustentabilidad, que viene de los movimientos ambientales.

⁹ Ibid

¹⁰ Ibíd.

Algunos aspectos fundamentales, pero no exclusivos, están relacionados con: derechos humanos; prácticas laborales; prácticas justas de operación; asuntos del consumidor; participación activa y desarrollo de la comunidad, y cadena de valor.

4.2.3. Sustentabilidad Económica.¹¹ La sustentabilidad económica describe las formas de negocio que garantizan un bienestar duradero y sólido a través de un crecimiento económico continuo y estable. El objetivo es la consideración y conciliación equilibrada del éxito económico, de la compatibilidad social y del trato cuidadoso de los recursos naturales.

La sustentabilidad económica se mide a través de tres categorías de impacto:

- Desempeño económico
- Presencia en el mercado
- Impactos económicos indirectos.

Los indicadores del desempeño económico pretenden medir las consecuencias económicas de las actividades de una organización, y los efectos de éstos en su entorno y en los grupos de interés involucrados.

Además, en el presente proyecto se incluye el factor tecnológico por lo cual será tenido en cuenta como sustentabilidad tecnológica.

4.2.4. Sustentabilidad Tecnológica.¹² La sostenibilidad tecnológica sigue los conceptos de la sostenibilidad y el desarrollo sostenible con énfasis en la tecnología y la aceleración que ella está sufriendo, así como con la tendencia a convertirse en superestructura y los impactos de no estar preparados para este

¹¹ *Ibíd.*

¹² GIL PÉREZ, D., VILCHES, A., TOSCANO, J.C. y MACÍAS, O. "Década de la educación para un futuro sostenible (2005-2014): un punto de inflexión necesario en la atención a la situación del planeta" Revista Ibero Americana. [En línea] 2007. Enero-abril, Número 40. [Consultado 10 agosto de 2015]. Disponible en: <http://www.rieoei.org/rie40a06.pdf>.

escenario donde las tecnologías emergentes tendrán un papel fundamental. Este ámbito busca el equilibrio de las tecnologías con su entorno, basado en una relación que permita la sustitución de los recursos naturales por artificiales sin afectar la renovación, partiendo del principio que el entorno artificial que se vaya construyendo, no debe sustituir al entorno natural de forma destructiva.

4.3 TECNOLOGÍAS Y FUENTES DE ENERGÍA A CONSIDERAR EN EL ESTUDIO

Las energías renovables son aquellas que se producen de forma continua y son inagotables a escala humana; se renuevan continuamente, a diferencia de los combustibles fósiles, de los que existen unas determinadas reservas que pueden ser agotadas en un plazo más o menos determinado.

En Colombia las fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER). Son aquellos recursos de energía renovable disponibles a nivel mundial y que son ambientalmente sostenibles, se consideran FNCER la biomasa, los pequeños aprovechamientos hidroeléctricos, la eólica, la geotérmica, la solar y los mares¹³.

Para el caso de las ZNI, las soluciones convencionales para la provisión de energía eléctrica se basan principalmente en el uso de grupos electrógenos diésel; las FNCER tales como las pequeñas centrales hidroeléctricas, paneles solares, pequeños aerogeneradores y aprovechamientos energéticos de biomasa, representan soluciones costo efectivas que resultan competitivas con esa

¹³ COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPUBLICA. Ley 1715 (13, mayo, 2014). Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional. Bogotá D.C., 2014.

tecnología convencional dados los altos costos asociados principalmente con el transporte y consumo del diésel¹⁴.

Por esta razón, las tecnologías seleccionadas para el proyecto raíz y que soportan esta investigación, estuvieron basadas en aspectos relacionados a la madurez de la tecnología en Colombia, la viabilidad de éstas en las ZNI y su reconocimiento por el ministerio de minas y energía como FNCER. Cabe resaltar que estas energías renovables serán comparadas con las energías convencionales actualmente utilizadas para la generación de energía eléctrica en las ZNI.

4.3.1. Energía Solar. La energía solar es la energía transportada por las ondas electromagnéticas que proviene del sol. La emisión de energía desde la superficie del sol se denomina radiación solar; y a la energía emitida, energía radiante. La energía solar es una fuente de energía renovable y con la que se pueden generar calor y electricidad.

El aprovechamiento de la energía solar se puede realizar de dos formas¹⁵:

- Paneles solares: aprovechamiento de la radiación solar para la generación de energía eléctrica.
- Energía Solar Térmica: aprovechamiento del calor solar para calentar un fluido (típicamente agua y aire).

¹⁴ UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGETICA, [Sitio Web]. Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia. Bogotá D.C. 2015. [Consultado el 10 agosto 2015]. Disponible en: http://www.upme.gov.co/Estudios/2015/Integracion_Energias_Renovables/INTEGRACION_ENERGIAS_RENOVANLES_WEB.pdf.

¹⁵ RUIZ, B.J. y RODRÍGUEZ PADILLA, V. “Renewable energy sources in the Colombia energy policy, analysis and perspectives” Energy policy, vol. 34, pp3684-3690, 2006. [Consultado 04 de Agosto 2015]. Disponible en: sciencedirect, vía Universidad Industrial de Santander: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421505002120>.

Tecnología de paneles solares

La tecnología de paneles solares busca convertir directamente la radiación solar en electricidad (efecto fotoeléctrico). En el proceso se emplean dispositivos denominados celdas fotovoltaicas, las cuales son semiconductores sensibles a la luz solar; de manera que cuando se exponen a esta, circula corriente eléctrica entre las dos caras de la celda.¹⁶ La cantidad de electricidad que puede producir una celda fotovoltaica es pequeña. Sin embargo, es posible interconectar varias celdas dependiendo de la cantidad de energía que se requiera producir.

Un sistema fotovoltaico para zonas aisladas está conformado por paneles fotovoltaicos, baterías, regulador de carga e inversores. Las baterías almacenan la electricidad generada por los paneles para poder utilizarla, los reguladores de carga controlan el proceso de carga y descarga de la batería y por último los inversores transforman la corriente continua en alterna, que es la que se usa de forma habitual en los hogares.¹⁷

En Colombia la energía fotovoltaica ha sido adoptada principalmente en zonas rurales del país donde no hay acceso a energía por redes eléctricas, debido a los altos costos de generación originados principalmente en el precio del combustible, y los costos de operación y mantenimiento. Es por esto que la energía fotovoltaica se ha convertido en una herramienta vital para el acceso a la energía eléctrica gracias a sus características de sencillez, modularidad, fiabilidad y operatividad además de presentar un gran campo de aplicaciones para los pequeños consumos como fuente de electricidad en el mismo lugar de la demanda.¹⁸ En general Colombia tiene un buen potencial solar en todo el territorio, con un promedio diario multianual cercano a 4,5 kWh/m² (destacándose la península de

¹⁶ SECRETARÍA DE ENERGÍA. Energía solar: Energías renovables. [En línea]. Buenos Aires: Coordinación de Energías Renovables, Dirección de Promoción, Secretaría de Energía Eléctrica, 2008. [Consultado 2 agosto 2015]. Disponible en: http://www.inti.gob.ar/e-renova/erTO/pdf/libro_energia_solar.pdf.

¹⁷ INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CANARIAS. Energías renovables y eficiencia energética. Energía solar fotovoltaica. España: Institución Tecnológica de Canarias, S.A., 2008. 67 p.

¹⁸ RODRÍGUEZ, Humberto. Desarrollo de la energía solar en Colombia y sus perspectivas. Revista de Ingeniería Universidad de los Andes. Noviembre, 2008. No. 28; p 83-89. [Consultado 04 de Agosto 2015]. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=121015051011>.

La Guajira, con un valor promedio de 6,0 kWh/m² y la Orinoquia, con un valor un poco menor), propicio para un adecuado aprovechamiento¹⁹.

4.3.2. Energía Eólica. El viento es aire en movimiento, una forma indirecta de la energía solar, este movimiento de las masas de aire se origina por la diferencia de temperatura causada por la radiación solar sobre la tierra. Cuando el aire se calienta, su densidad se hace menor y sube, mientras que las capas frías descienden, estableciéndose una doble corriente de aire²⁰. La energía del viento depende de su velocidad y, en menor medida, de su densidad (disminuye con la altitud). Cerca del suelo, la velocidad es baja, pero aumenta rápidamente con la altura. La energía cinética del viento puede ser transformada en energía mecánica rotacional, al generar el movimiento de las palas de un rotor.

La energía mecánica puede ser implementada para desarrollar trabajo mecánico (ej., molinos, bombas de agua), o puede ser transformada en electricidad mediante un generador. En cada transformación, parte de la energía es disipada en forma de calor (energía calórica)²¹.

Tecnología de generadores eólicos o aerogeneradores

Los aerogeneradores son los sistemas de aprovechamiento eólico más utilizados hoy en día, su funcionamiento consiste básicamente en que al incidir el viento sobre sus palas se produce un trabajo mecánico de rotación que mueve un generador que su vez produce electricidad.

¹⁹ COLOMBIA. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Atlas de radiación solar en Colombia. Bogotá: UPME-IDEAM, 2005. 19 p.

²⁰ COLOMBIA. MINISTERIO DE EDUCACIÓN NACIONAL. Colombia una potencial mundial de energías alternativas. [En línea] 2009. [Consultado 2 agosto 2015]. Disponible en: <http://www.mineduacion.gov.co/cvn/1665/article-117028.html>.

²¹ ESTEVE GÓMEZ, Natalia. Energización de las zonas no interconectadas a partir de las energías renovables solar y eólica. Tesis de Magíster en Gestión Ambiental. Bogotá D.C.: Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Estudios Ambientales y Rurales, 2011.20p.

Los aerogeneradores se clasifican según su potencia en pequeños (<100 kW) los cuales se emplean en sistemas aislados o mini-redes y grandes (>100) que con una mayor potencia se emplean en sistemas interconectados a la red, otra distinción de los aerogeneradores se da con base en la orientación del rotor la cual puede ser vertical u horizontal²².

Los componentes principales de un aerogenerador de eje horizontal son:

- Rotor: su función es transformar la energía cinética del viento en energía mecánica; está conformado por las palas y el buje que las une.
- Palas: similares a las alas de un avión, la mayoría de aerogeneradores tiene tres palas.
- Góndola: su función es transformar la energía mecánica del rotor en energía eléctrica; está conformado por diferentes dispositivos en el interior (como el generador y el multiplicador), y un anemómetro y una veleta en su exterior.
- Multiplicador: multiplica la velocidad de giro que llega del rotor
- Generador: transforma la energía mecánica en eléctrica, normalmente generando corriente alterna.
- Torre: soporta la góndola y el rotor.

²² INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CANARIAS. Op. Cit. 86 p.

En Colombia según el Plan energético nacional 2025²³ la mayor disponibilidad de recurso eólico se encuentra en la costa Atlántica, donde los vientos aumentan en dirección a la península de La Guajira, en donde se encuentra el único parque eólico (Jepirachi) con una capacidad de 19.5 MW y un sistema híbrido empleado para la comunidad Nazaret en la Alta Guajira que combina tecnología diésel con eólica. Adicionalmente en el país se han instalado sistemas de pequeños aerogeneradores en zonas de difícil acceso y apartadas de la red de distribución.

4.3.3. Biomasa. Las plantas utilizan la energía del sol para sintetizar la materia orgánica mediante el proceso de fotosíntesis. Esta materia orgánica puede ser incorporada y transformada por los animales y por el hombre. La biomasa es la utilización de la materia orgánica como fuente energética. Por su amplia definición, la biomasa abarca un amplio conjunto de materias orgánicas que se pueden clasificar en natural (producida en ecosistemas naturales) y residual (generada por cualquier actividad humana, principalmente en procesos agrícolas, industriales, o propios del hombre, como basuras y aguas residuales)²⁴.

Para transformar la energía almacenada en la biomasa se pueden utilizar tres procesos diferentes: termoquímicos, fisicoquímicos y bioquímicos para los cuales se han desarrollado diversas tecnologías que dependen de la cantidad y clase de biomasa disponible. Con los principales sistemas de transformación pueden obtenerse combustibles, energía eléctrica, fuerza motriz o energía térmica.

Tecnología de gasificación de biomasa

Es un proceso termoquímico que convierte la materia prima sólida (madera, restos de madera, residuos agrícolas, etc.) en una mezcla de gases combustibles

²³ UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGETICA, [Sitio Web]. Plan energético nacional Colombia: ideario energético 2050. Bogotá. 2015. [Consultado el 10 agosto 2015]. Disponible en: http://www.upme.gov.co/Docs/PEN/PEN_IdearioEnergetico2050.pdf.

²⁴ INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CANARIAS. Op. Cit. 103 p.

(hidrógeno, monóxido de carbono y metano)²⁵, este gas es luego utilizado como combustible en plantas de ciclo combinado, las cuales combinan turbinas de gas y turbinas de vapor para producir electricidad.

Durante la gasificación de la biomasa se llevan a cabo tres subprocesos: secado, carbonizado (o pirolisis) y gasificación, estos subprocesos se pueden realizar en un solo reactor (gasificación en una etapa) o en reactores separados (gasificación en dos etapas)²⁶. Los equipos usados para la gasificación de la biomasa se dividen de manera general en: gasificadores de lecho fijo y semimóvil, de lecho móvil, de lecho fluidalizado y de flujo de arrastre. Los gasificadores de lecho fijo son especialmente apropiados para la producción de energía a pequeña y mediana escala y la operación de los gasificadores de lecho fijo está altamente influenciada por las propiedades morfológicas, físicas y químicas de la biomasa²⁷.

La gasificación de biomasa es uno de los sistemas con mayor potencial ya que permite la generación tanto de energía térmica como eléctrica, además presenta diferentes beneficios ambientales muy claros, si se le compara con el proceso de combustión directa en donde se destruye el combustible, produciendo humos que generan la emisión de sustancias tóxicas; haciendo de éste un proceso energéticamente ineficiente. Esta tecnología se puede proyectar como una alternativa eficiente para resolver las necesidades energéticas de las ZNI y como una manera sostenible de aprovechar mejor sus recursos²⁸.

El país cuenta con sectores agroindustriales que generan grandes cantidades de biomasa residual, como los correspondientes a la caña de azúcar, al café y a la

²⁵ UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGETICA, [Sitio Web]. Energías renovables: Descripción, tecnologías y usos finales. Bogotá D.C., [Consultado el 10 agosto 2015]. Disponible en: <http://www.si3ea.gov.co/Portals/0/Iluminacion/CarFNCE.pdf>.

²⁶ RINCÓN, Sonia; GÓMEZ, Alexander y KLOSE, Wolfgang. Gasificación de biomasa residual de procesamiento agroindustrial. Alemania: Universidad de Kassel. Facultad de Ingeniería Mecánica, 2011. 12p.

²⁷ Ibid., p. 22

²⁸ GUTIÉRREZ. Juan. La gasificación de madera: Una opción inteligente. Revista M&M. No. 57. [Consultado 04 de Agosto 2015]. Disponible en: <http://www.revista-mm.com/ediciones/rev57/procesos.pdf>.

palma de aceite, estas características de biomasa hacen de los procesos termoquímicos una alternativa viable para su aprovechamiento energético. Estos procesos tienen la ventaja adicional, de que su implementación no compite con el cultivo de productos alimenticios como ocurre en procesos como la fermentación alcohólica para la producción de bioetanol a partir de caña de azúcar o de maíz para la producción de biodiesel a partir de aceites comestibles, como el aceite de palma o de soya.²⁹

En las ZNI se han desarrollado diferentes proyectos que utilizan la energía de la biomasa, uno de estos es el proyecto de generación de energía eléctrica a partir de la gasificación de la biomasa que se acumulaba en las playas del municipio de Necocli Antioquia, donde se construyó una central de generación de 40 kW a base de gasificación de madera. La energía que se producía alimentaba a 48 hogares, aproximadamente, de la vereda Nueva Pampa, beneficiando a 200 habitantes de éstas zonas, con seis horas de energía en promedio al día³⁰.

4.3.4. Energía Hidráulica. La energía hidráulica o energía hídrica pertenece a las fuentes de energía renovable que aprovecha la energía potencial del agua que se encuentra a cierta altura y la energía cinética de la corriente o del salto de agua natural para generar energía eléctrica a través de una turbina. Esta energía aprovecha los recursos tal y como surgen en la naturaleza o por medio de la construcción de presas. Las instalaciones más comunes hoy en día son las centrales hidroeléctricas.

Tecnología de pequeñas centrales hidroeléctricas PCH

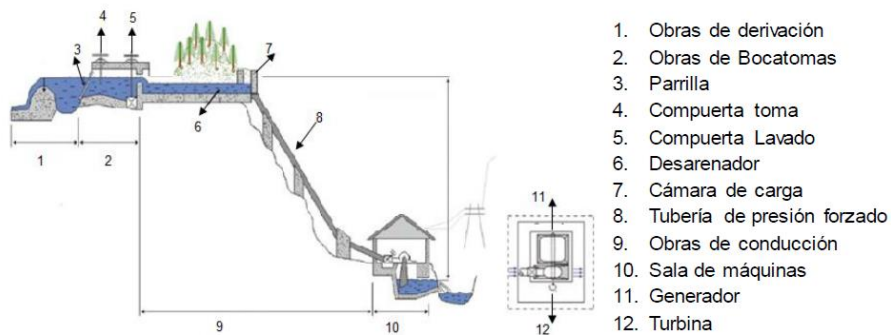
²⁹ GARCÍA, Harol. Modelación de gasificación de biomasa en un reactor de lecho fijo. Tesis de Magíster en Ingeniería Mecánica. Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería, 2011. 9 p

³⁰ INSTITUTO DE PLANIFICACIÓN Y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas no Interconectadas. [Sitio Web] [Consultado el 22 agosto 2015]. Disponible en: <http://www.ipse.gov.co/ipse/comunicaciones-ipse/noticias-ipse/359-en-necocli-los-residuos-de-madera-se-convierten-en-importante-recurso-energetico>.

Una PCH es una instalación en la cual se utiliza la energía hidráulica para generar pequeñas cantidades de electricidad, estos sistemas se incluyen dentro de las tecnologías alternativas de generación eléctrica ya que su diseño y construcción tiene un bajo impacto ambiental, además estas pequeñas centrales hidroeléctricas se utilizan en zonas aisladas donde pueden ser operadas por personal local³¹.

Las PHC se clasifican según la comisión de regulación de energía y gas (GREC) en su potencia neta instalada de la siguiente manera; micro turbinas (1-100 kW), mini centrales (100-1000 kW) y pequeñas centrales (1000-10000 kW) y dependiendo del sitio, existen varios esquemas de aprovechamiento hidroeléctrico, con regulación a pie de presa y a filo de agua, este último es el más usado en zonas aisladas. Ver figura

Figura 2. Esquema transversal de un sistema hidroeléctrico a filo de agua



Fuente: Fortalecimiento de la capacidad en energía renovable para américa central 2002.

En los esquemas a filo de agua, el agua es derivada a través de una bocatoma en el río. Un desarenador es ubicado aguas abajo de la bocatoma con el fin de

³¹ MORA, Diego y HURTADO, Jorge. Guía para estudios de pre factibilidad de pequeñas centrales hidroeléctricas como parte de sistemas híbridos. Tesis de grado Ingeniero Civil. Bogotá D.C.: Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ingeniería, 2011. 23p.

remover las partículas que transporta el río y que son perjudiciales para el funcionamiento del sistema, especialmente para el desgaste de las turbinas, luego el agua es conducida por medio de un canal o túnel que permite alimentar un tanque de carga que garantiza la altura de generación para la producción de energía. Esta última estructura es conectada con las turbinas por medio de una tubería de carga. Finalmente se proyecta un canal de restitución que es el encargado de devolver el agua al río³².

Las pequeñas centrales hidroeléctricas contribuyen al desarrollo sostenible debido a su factibilidad económica, respeto por el medio ambiente y su conveniencia para la producción y desarrollo en zonas aisladas

Cabe resaltar que la energía hidráulica es el segundo recurso renovable más utilizado en el mundo. Colombia, debido a su situación privilegiada desde el punto de vista hidrológico, tiene un gran potencial para desarrollar proyectos que impliquen aprovechamientos hidráulicos.

4.3.5. Tecnología grupos electrógenos. El diésel es un combustible líquido derivado del petróleo y es comúnmente utilizado en máquinas y generadores diésel. El trabajo producido por un motor de combustión interna (diésel) es utilizado para mover un generador, el cual convierte la energía mecánica que se le ha transmitido desde el motor diésel en energía eléctrica, a la unión de motor y generador se le denomina grupo electrógeno³³.

³² CORPOEMA. Determinación de inversiones y gastos de administración, operación y mantenimiento para la actividad de generación en zonas no interconectadas utilizando recursos renovables. Informe final. Bogotá, diciembre de 2012.

³³ HAGLER BAILLY SERVICES. AENE. 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. Bogotá D. C., 2001. [Consultado el 9 agosto 2015]. Disponible en: <http://www.upme.gov.co>, consultado 5 de abril de 2007.

El abastecimiento de energía en las ZNI se realiza principalmente con base en generación diésel la cual representa el 96.3% del total de la capacidad de generación que está distribuido entre 116 plantas de menos de 100kW³⁴.

La generación diésel ha sido la solución para un considerable número de localidades en las ZNI, pero la experiencia en energización a través de plantas térmicas alimentadas con diésel revela que esta alternativa no es sostenible. Por un lado, porque el costo de sostenimiento y mantenimiento preventivo y correctivo de estas plantas es muy alto debido a que las características geográficas de estas regiones dificultan y encarecen el transporte de los insumos requeridos (combustibles, lubricantes, repuestos, etc.) y por el otro, porque los consumidores ubicados en estas zonas tienen una baja capacidad de pago. La anterior situación requiere diversificar las tecnologías destinadas a la electrificación de las ZNI y reorientar la concepción y las estrategias que guían los planes de energización rural, con el fin de que los proyectos sean sostenibles³⁵.

4.4 METODOLOGÍA DELPHI CON ENFOQUE DIFUSO

4.4.1 Método Delphi. Linston y Turoff ³⁶ definen la técnica Delphi como un método de estructuración de un proceso de comunicación grupal que es efectivo a la hora de permitir a un grupo de individuos, como un todo, tratar un problema complejo. Lo que se persigue con esta técnica es obtener el grado de consenso o acuerdo

³⁴ FLÓREZ, J.H; TOBÓN, D. y CASTILLO, G.A. “¿Ha sido efectiva la promoción de soluciones energéticas en las zonas no interconectadas (ZNI) en Colombia?: un análisis de la estructura institucional”. Revista Javeriana. 2009, Vol. 22, No. 38. [Consultado 04 de Agosto 2015]. Disponible en: http://revistas.javeriana.edu.co/index.php/cuadernos_admon/article/view/3872.

³⁵ UPME. Op. Cit., p. 15

³⁶ LINSTONE, H, y TUROFF, M. The Delphi Method. Techniques and Applications. United States of America: Addison-Wesley, 1975. ISBN 0-201-04293-2.

de los especialistas sobre el problema planteado, utilizando los resultados de investigaciones anteriores, en lugar de dejar la decisión a un solo profesional.

Una Delphi consiste en la selección de un grupo de expertos a los que se les pregunta su opinión sobre cuestiones referidas a acontecimientos del futuro. Las estimaciones de los expertos se realizan en sucesivas rondas, anónimas, al objeto de tratar de conseguir consenso, pero con la máxima autonomía por parte de los participantes. Por lo tanto, la capacidad de predicción de la Delphi se basa en la utilización sistemática de un juicio intuitivo emitido por un grupo de expertos.

Es decir, el método Delphi procede por medio de la interrogación a expertos con la ayuda de cuestionarios sucesivos, a fin de poner de manifiesto convergencias de opiniones y deducir eventuales consensos. El objetivo de los cuestionarios sucesivos, es "disminuir el espacio intercuartil precisando la mediana" esto es cuanto se desvía la opinión del experto de la opinión del conjunto.

Las preguntas se refieren, por ejemplo, a las probabilidades de realización de hipótesis o de acontecimientos con relación al tema de estudio (que en nuestro caso sería las diferentes alternativas de generación de energía en ZNI de Colombia). La calidad de los resultados depende, sobre todo, del cuidado que se ponga en la elaboración del cuestionario y en la elección de los expertos consultados³⁷.

Aunque, la formulación teórica del método Delphi propiamente dicho comprende varias etapas sucesivas de envíos de cuestionarios, en buena parte de los casos puede limitarse a dos etapas, lo que sin embargo no afecta a la calidad de los resultados tal y como lo demuestra la experiencia acumulada en estudios similares.

³⁷ ASTIGARRAGA, Eneko. El método Delphi. [Blog Internet] Universidad de Deusto. Facultad de CC.EE. y Empresariales [En línea] [Consultado 04 agosto 2015]. Disponible en: <http://jrprospectiva.blogspot.com/2013/10/delphi.html>

El objetivo del primer cuestionario es calcular la desviación estándar, el segundo suministra a cada experto las opiniones de sus colegas, y abre un debate transdisciplinario, para obtener un consenso en los resultados y una generación de conocimiento sobre el tema. Cada experto argumentará los pros y los contras de las opiniones de los demás y de la suya propia³⁸.

Características³⁹

- **Proceso iterativo.** Los expertos participantes en el proceso deben emitir su opinión o respuestas en más de una ocasión, a través de varias rondas que llevan a estabilizar las opiniones. Con esta secuencia el experto tiene la posibilidad de reflexionar o reconsiderar su opinión, a la luz de los planteamientos propios o de otros expertos.
- **Anonimato.** Ningún miembro del grupo conoce a quién corresponde, una respuesta en particular. Entre las ventajas del anonimato, se encuentra el evitar las influencias negativas de los miembros dominantes del grupo o la inhibición de algún participante. El control de la comunicación está en manos del grupo coordinador y nunca se establece una participación directa, entre los expertos involucrados.

³⁸ LANDETA, Jon. El método Delphi. Ariel. 1999. Barcelona. [En línea] [Consultado 04 agosto 2015] Disponible en: http://www.prospectiva.eu/zaharra/Metodo_delphi.pdf.

³⁹ DALKEY NC. El Método Delphi: Un estudio experimental de la opinión del grupo, Memorando de Investigación, RM-5888-PR. Santa Mónica, California: El Rand Corp; 1969. [En Línea] [Consultado 04 agosto 2015]. Disponible en: <http://www.elsevier.es/es-revista-revista-investigacion-educacion-medica-343-articulo-descripcion-usos-del-metodo-delphi-90122899>

- **Realimentación o *feedback* controlado.** Antes del inicio de cada ronda, el grupo coordinador transmite la posición de los expertos como conjunto frente al problema o situación que se analiza, destacando las aportaciones significativas de algún experto, las posturas discordantes o información adicional solicitada por algún experto. De esta manera, la realimentación a través del análisis del grupo conductor del método permite la circulación de información entre los expertos y facilita establecer un lenguaje común.
- **Respuesta estadística del grupo.** En caso de que al grupo se le haya solicitado una estimación numérica, se maneja la mediana de las respuestas individuales. Con ello, se consigue la inclusión de las respuestas individuales en el resultado final del grupo.

Fases del Método Delphi⁴⁰

1. Definición de objetivos: En esta primera fase se plantea la formulación del problema y un objetivo general que estaría compuesto por el objetivo del estudio, el marco espacial de referencia y el horizonte temporal para el estudio.
2. Selección de Expertos: La etapa es importante en cuanto que el término de "experto" es ambiguo. Con independencia de sus títulos, su función o su nivel jerárquico, el experto será elegido por su capacidad de encarar el futuro y posea conocimientos sobre el tema consultado. Esta fase presenta dos dimensiones:
 - Dimensión cualitativa: Se seleccionan en función del objetivo prefijado y atendiendo a criterios de experiencia posición responsabilidad acceso a la información y disponibilidad.

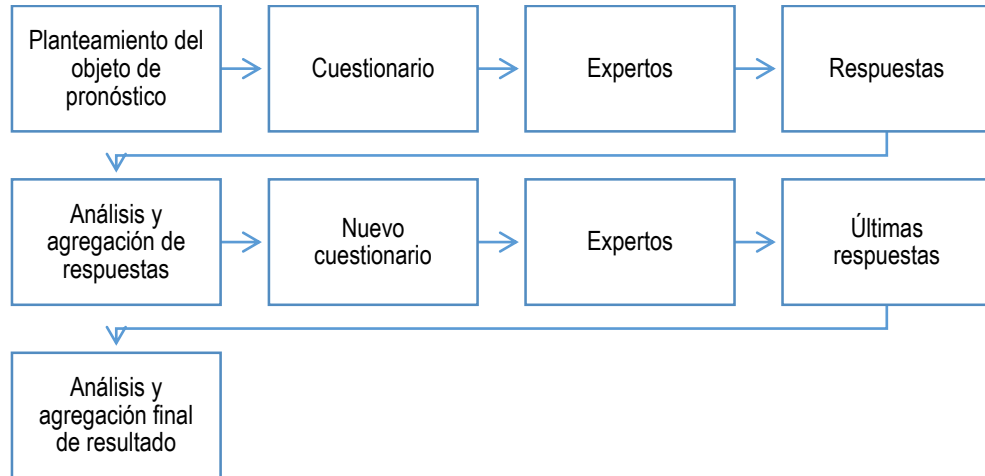
⁴⁰ POWELL Catherine. The Delphi technique: myths and realities. *Journal of Advanced Nursing*. [En línea] 2003. February. Vol 41 N° 4, 376-382 [consultado 04 de Agosto 2015] Disponible en: Wiley Online Library, vía Universidad Industrial de Santander: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1046/j.1365-2648.2003.02537.x/full>.

- Dimensión Cuantitativa: Elección del tamaño de la muestra en función de los recursos medios y tiempo disponible.
3. Elaboración y lanzamiento de los cuestionarios: Los cuestionarios se elaborarán de manera que faciliten, en la medida en que una investigación de estas características lo permite, la respuesta por parte de los consultados. Preferentemente las respuestas habrán de poder ser cuantificadas y ponderadas. De acuerdo a Powell, los aspectos clave de la técnica es el número y la calidad de los expertos participantes.
 4. Explotación de resultados: El objetivo de los cuestionarios sucesivos es disminuir la dispersión y precisar la opinión media consensuada. En el segundo envío del cuestionario, los expertos son informados de los resultados de la primera consulta, debiendo dar una nueva respuesta. Se extraen las razones de las diferencias y se realiza una evaluación de ellas. Si fuera necesario se realizaría una tercera oleada⁴¹.

A continuación, el esquema global del proceso Delphi

⁴¹ SUÁREZ. Natalia. EOI [Blog Internet] Natalia Suarez. Feb 11 del 2012. [Consultado 04 agosto 2015] Disponible en: <http://www.eoi.es/blogs/nataliasuarez-bustamante/2012/02/11/%C2%BFque-es-el-metodo-delphi/>.

Figura 3. Esquema global del proceso Delphi



Fuente: Una aplicación al método Delphi borroso al nivel universitario

4.4.2 Lógica Difusa. La teoría de conjuntos borrosos fue introducida por Lotfi A. Zadeh a mediados de los años 60 con el fin de representar matemáticamente la imprecisión intrínseca de ciertas categorías de objetos. Mientras la motivación original fue ayudar a manejar aspectos imprecisos del mundo real, la práctica temprana de la lógica difusa permitió el desarrollo de aplicaciones prácticas⁴².

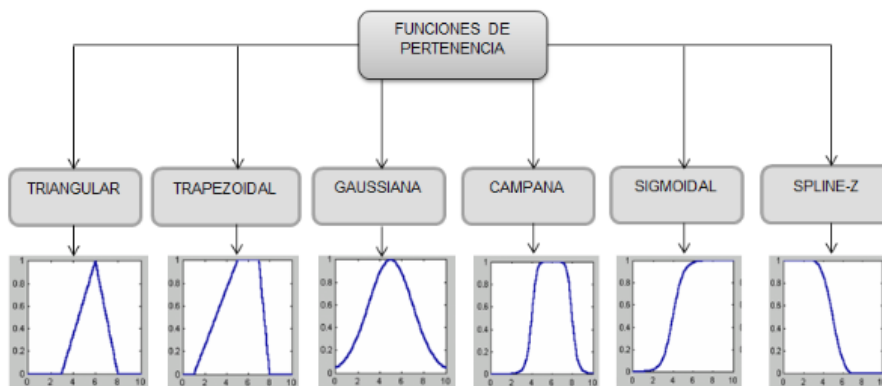
Esta técnica no exige valores exactos que son denominados en la literatura como información crisp, soporta valoraciones subjetivas e, incluso, valoraciones lingüísticas para los parámetros del problema y las incorpora apropiadamente a modelos matemáticos complejos⁴³.

⁴² JARAMILLO, Patricia y VINASCO, Liliana. Análisis multiobjetivo difuso espacial: Una herramienta para localizar proyectos lineales con un enfoque de gestión ambiental. Revista Redalyc, Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal. Vol. 8, no. 1, 2005. [Consultado 04 de Agosto 2015] Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=169421171005>.

⁴³ VINASCO, L. y JARAMILLO, G.P. Propuesta metodológica para la localización de proyectos lineales con base en criterios de gestión ambiental, en condiciones de imprecisión en la información, aplicando análisis multiobjetivo difuso a bases de datos espaciales. Medellín. Trabajo de Grado (Magíster en Medio Ambiente y Desarrollo). Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Facultad de Minas. Posgrado en Gestión Ambiental. 2005.

Los números difusos tienen diferentes formas. Los más usados son los triangulares y trapezoidales, dado el mayor desarrollo de operadores que permiten realizar operaciones matemáticas, de conjuntos y comparaciones con mayor facilidad y operatividad para los diferentes usuarios.

Figura 4. Funciones de Pertenencia Lógica Fuzzy



Fuente: Análisis multiobjetivo difuso espacial: Una herramienta para localizar proyectos lineales con un enfoque de gestión ambiental

Adicionalmente, el uso de lógica difusa permite el uso directo de la información precisa (exacta o crisp) o imprecisa, en términos numéricos o lingüísticos, y evita la estandarización en rangos, la cual puede enmascarar información y ocultar la gran variabilidad de las alternativas⁴⁴.

El proceso para el uso de la lógica difusa consiste básicamente en cuatro etapas⁴⁵:

⁴⁴ JARAMILLO. Op. cit., pág. 45

⁴⁵ RAMÍREZ, Osvaldo. Simulación en simmechanics de un sistema de control difuso para el robot udlap. México, junio 12 de 2009. [En Línea] [Consultado el 04 agosto de 2015]. Disponible en: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lmt/ramirez_r_o/capitulo3.pdf.

1. Fusificación: Tiene como objetivo convertir valores críps o valores reales en valores difusos. En la fusificación se asignan grados de pertenencia a cada una de las variables de entrada con relación a los conjuntos difusos previamente definidos utilizando las funciones de pertenencia asociadas a los conjuntos difusos.
2. Base de conocimiento: Contiene el conocimiento asociado con el dominio de la aplicación y los objetivos de control. En esta etapa se deben definir reglas lingüísticas de control que realizarán la toma de decisiones que decidirán la forma en la que debe actuar el sistema.
3. Inferencia: Relaciona los conjuntos difusos de entrada y salida para representar las reglas que definirán el sistema. En la inferencia se utiliza la información de la base de conocimiento para generar reglas mediante el uso de condiciones, por ejemplo: si caso 1 y caso 2, entonces acción 1.
4. Defusificación: Realiza el proceso de adecuar los valores difusos generados en la inferencia de valores crisp, que posteriormente se utilizarán en el proceso de control. En la defusificación se utilizan métodos matemáticos simples como el método del centroide, Método del promedio ponderado y Método de membresía del medio del máximo.

4.4.3 Enfoque difuso del método Delphi. El método Delphi descrito anteriormente implica un análisis estadístico del producto de cada una de las rondas de cuestionarios; es aquí donde comienza la diferencia con el método Delphi aplicado en lógica clásica. Cabe señalar que el experto que responde a las sucesivas encuestas no sabe de qué modo están tratados sus datos pues él responde a las evaluaciones con números naturales o etiquetas lingüísticas que serán “traducidas” o “borrosificadas” por el coordinador.

El método Delphi Difuso consiste en una agregación y filtrado iterativo de las opiniones o recomendaciones de expertos sobre una cuestión, que reduce la

dispersión y, generalmente, unifica la tendencia de estas opiniones y recomendaciones. El modo de tratar los datos borrosos por el coordinador es una elección de este, pero en cualquier caso hará uso de las medidas estadísticas pues son las que garantizan que la opinión de cada uno de los expertos se encuentre representada en la respuesta final, que será reenviada previa “desborrosificación”, es decir, que será presentada en forma de números naturales⁴⁶.

⁴⁶ KONOW, I. y PÉREZ, G. “Método Delphi”. 1990. [En Línea] [consultado 05 agosto de 2015]. Disponible en: <http://geocities.com/Pentagon/Quarters/7578/pros01-03.html>

5. DISEÑO METODOLÓGICO

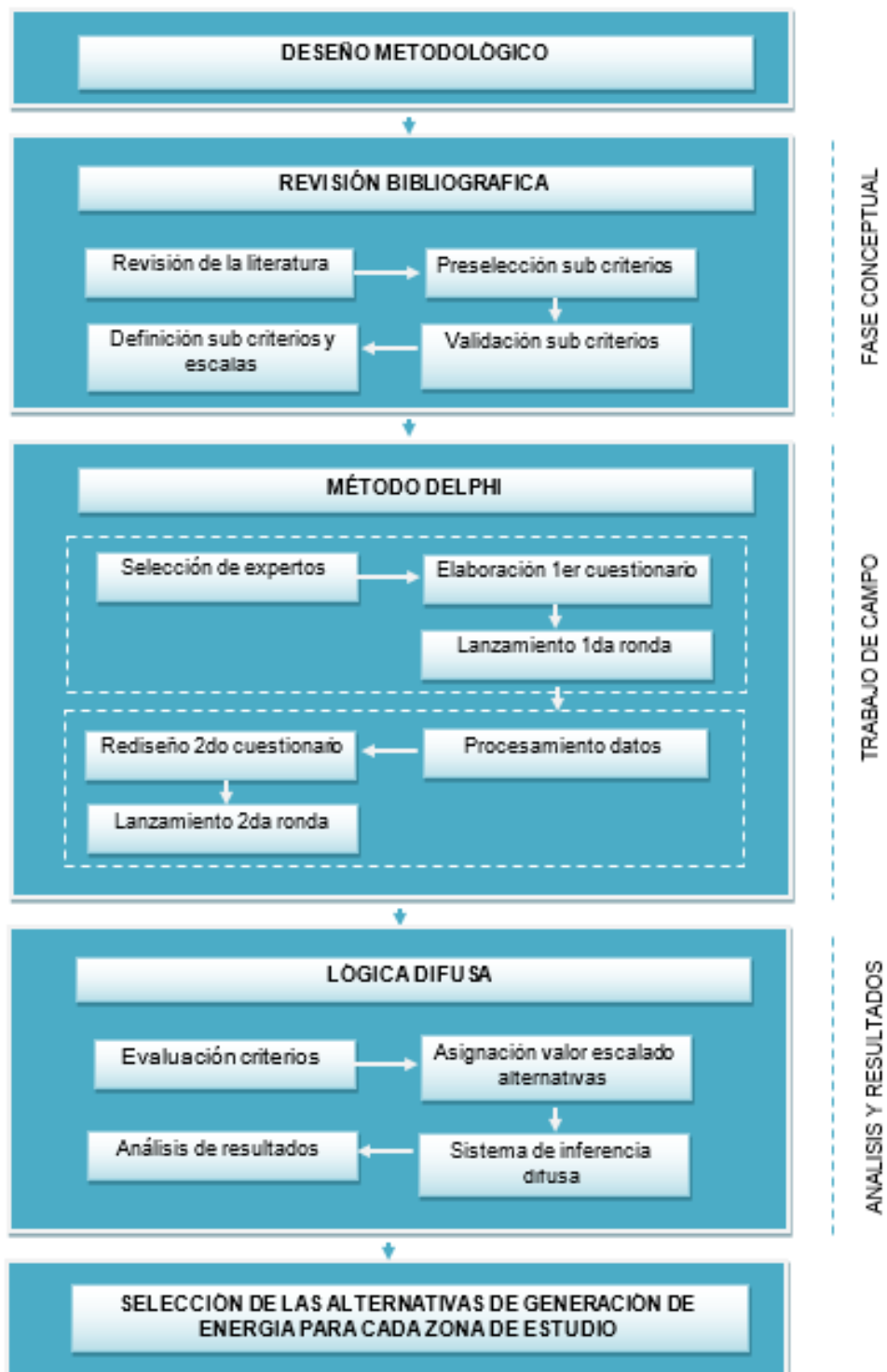
Este capítulo presenta la metodología y el plan de tareas a seguir para cumplir con los objetivos específicos enunciados en la parte introductoria de este documento; y con su objetivo central; esto es, el uso de la metodología Delphi con enfoque difuso para la selección de alternativas de generación de energía

El trabajo a desarrollar se divide en las etapas que se listan a continuación:

- Revisión de la literatura
- Método Delphi
- Lógica difusa
- Selección de alternativas

La figura 5 es un diagrama que muestra la secuencia en que se ejecutarán las actividades y el flujo de información entre ellas. Cada etapa toma información de las etapas precedentes y suministra información consolidada o procesada a las etapas siguientes.

Figura 5. Esquema general del diseño metodológico



5.1. REVISIÓN DE LA LITERATURA PARA LA SELECCIÓN DE LOS INDICADORES DE LOS CRITERIOS AMBIENTAL, ECONÓMICO TECNOLÓGICO Y SOCIAL

Para la elección de los atributos, criterios, indicadores que le darán forma y contenido a la propuesta de alternativas energéticas en cada municipio se realizó a través de las siguientes actividades:

Figura 6. Proceso de selección de sub criterios



5.1.1 Revisión de la literatura de artículos y tesis del sector energético. Esta primera etapa incluyó la revisión de 68 artículos especializados en el problema del sector energético, en donde los diversos autores identificaron 64 aspectos o atributos importantes a considerar, los cuales están contenidos en los cuatro criterios anteriormente definidos: Ambiental, Económico, Tecnológico y Social. A continuación, se muestran los más representativos.

Criterios más relevantes en la literatura

La selección de las alternativas de generación de energía eléctrica depende fundamentalmente, no solo del método utilizado para ello, sino también de los criterios o aspectos de evaluación que se consideren en el proceso. Si bien existen criterios de selección tradicionales tales como económicos, tecnológicos, sociales y ambientales, existen una gran variedad de categorías de estos.

Diferentes estudios y trabajos de investigación realizados hasta el momento, han permitido determinar una gran variedad de sub-criterios que son considerados como los más relevantes en el proceso de selección de los criterios de las alternativas de generación de energía eléctrica, los cuales serán tenidos en cuenta para el desarrollo de esta sección.

J. Wang, et al (2009)⁴⁷, en su artículo los autores realizan una revisión bibliográfica sobre los métodos utilizados en las diferentes etapas del método de toma de decisión multicriterio (MCDM) para la energía sostenible, es decir, realizan una revisión de la literatura para: la selección de criterios, los criterios de ponderación, la evaluación y la agregación final. En la revisión de los criterios utilizados para evaluar los sistemas de suministro de energía, el autor los divide en cuatro aspectos principales: técnicos, económicos, ambientales y sociales, La tabla 1 muestra una lista de los criterios utilizados en estudios de planificación de la energía MCDM orientada hasta el 2009, en donde se relacionan los criterios anteriormente mencionados, con sus respectivos sub criterios y la referencia que los sustenta. Según el autor la eficiencia, costo de la inversión, las emisiones de CO₂ y la creación de empleo son los criterios de evaluación más frecuentemente utilizados en los aspectos técnicos, económicos, ambientales y sociales, respectivamente.

⁴⁷ Jiang-Jiang Wang et al. Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (2009) 2263–2278.

Tabla 1. Criterios de evaluación J. Wang

| CRITERIO | SUBCRITERIO | AUTORES | TOTAL |
|------------------|--|--|-----------|
| Técnico | Eficiencia | 1, 2, 4, 5-14, 18, 28 | 15 |
| | Eficiencia exergía | 3, 14, 17 | 3 |
| | Relación de energía primaria | 3, 15, 17, 23 | 4 |
| | Seguridad | 3, 9-12, 15, 17, 24, 27 | 9 |
| | Confiabilidad | 9-14, 21, 22, 24 | 9 |
| | Madurez | 3, 23, 25 | 3 |
| | Otros | 2, 3, 10, 11, 13, 24-26 | - |
| Económico | Costo de la inversión | 1, 2, 3, 4, 5-15, 16, 17-19, 24-28, 33 | 24 |
| | Operación y costo de mantenimiento | 4, 9-14, 16, 17, 25, 26, 28, 33 | 13 |
| | Costo de combustible | 1, 8, 10-13, 18, 19, 28 | 9 |
| | Costo eléctrico | 4, 5-7, 18, 24, 28 | 7 |
| | Valor actual neto (VAN) | 3, 15, 29-31 | 5 |
| | Periodo de recuperación de la inversión | 2, 3, 15, 29 | 4 |
| | Vida útil | 4, 6, 17, 26 | 4 |
| | Costo anual equivalente (CAE) | 3, 15, 29, 32 | 4 |
| | Otros | 1, 9-12, 14 | - |
| Ambiental | Emisiones de NO_x | 1, 3, 6-8, 15, 17, 20-22, 24, 33 | 12 |
| | Emisiones de CO_2 | 1, 3, 4, 5-8, 15, 17-26, 28, 29, 33 | 21 |
| | Emisiones de CO | 3, 15, 17 | 3 |
| | Emisiones de SO_x | 1, 8, 16, 19-22, 24 | 8 |
| | Emisión de partículas | 19-23 | 5 |
| | Compuestos que no contienen metano orgánicos volátiles (COVNM) | 20-22 | 3 |
| | Uso de la tierra | 3, 5, 6, 17, 18, 21-23, 27, 28 | 10 |
| | Ruido | 3, 15, 17, 25-27 | 6 |
| | Otros | 2, 14, 16, 25, 26, 32, 33 | - |

| CRITERIO | SUBCRITERIO | AUTORES | TOTAL |
|---------------|---------------------|---------------------------------|-------|
| Social | Aceptación social | 19, 21, 22, 25 | 4 |
| | Creación de empleo | 2, 6, 8, 21-23, 27, 30, 31 | 9 |
| | Beneficios sociales | 2, 9-12 | 5 |
| | Otros | 1, 3, 10-12, 15, 17, 19, 21, 23 | - |

1, Jovanovic M et al (2009), 2, Doukas HC et al (2007), 3, Wang JJ et al (2008), 4, Pilavachi PA et al (2009), 5, Afgan NH, Carvalho MG. (2002), 6, Afgan NH, Carvalho MG. (2004), 7, Afgan NH, Carvalho MG. (2008), 8, Begic F, Afgan NH. (2007), 9, Mamlook R et al (2001), 10, Mamlook R et al (2001), 11, Akash BA (1999), 12, Mohsen MS, Akash BA. (1997), 13, Chatzimouratidis AI, Pilavachi PA. (2009), 14, Dinca C. et al (2007), 15, Huang Fu Y et al (2005), 16, Chattopadhyay D, Ramanathan R. (1998), 17, Wang JJ et al (2008), 18, Pilavachi PA et al (2006), 19, Liposcak M et al (2006), 20, Chatzimouratidis AI, Pilavachi PA.(2007), 21, Chatzimouratidis AI, Pilavachi PA (2008), 22, Chatzimouratidis AI, Pilavachi PA (2008), 23, Beccali M et al (2003), 24, Diakoulaki D, Karangelis F. (2007), 25, Cavallaro F, Ciralo L (2005), 26, Burton J, Hubacek K. (2007), 27, Madlener R et al (2007), 28, Wang JJ et al, 29, Papadopoulos A, Karagiannidis A. (2008), 30, Goumas MG. Et al (1999), 31, Haralambopoulos DA, Polatidis H (2003), 32, Alanne et al (2007), 33, Løken E et al (2009).

Fuente: Adaptado por Wang, et al (2009)

Cavallaro y Ciralo⁴⁸ utilizaron un grupo más pequeño de los criterios de evaluación para un estudio de caso de la selección del sitio de producción de energía en una isla italiana. Los once criterios utilizados por los autores se pueden agrupar en categorías técnicas, económicas, ambientales y sociales, tal como aparecen en la siguiente tabla:

Tabla 2. Criterios de evaluación Cavallaro y Ciralo.

| Aspecto | Criterio |
|-------------|---------------------------------------|
| Tecnológico | La capacidad de producción de energía |
| | La madurez tecnológica |
| Económico | Costo de inversión |
| | Costo de operación y mantenimiento |
| | Coste del combustible |

⁴⁸ CAVALLARO F, CIRAOLLO L. A multicriteria approach to evaluate wind energy plants on an Italian island. Energy Policy 2005; 33:235–44. 2005.

| Aspecto | Criterio |
|-----------|----------------------------|
| | Tiempos de realización |
| Ambiental | Impacto en los ecosistemas |
| | Emisión de CO ₂ |
| | Impacto Visual |
| | Ruido |
| Social | Aceptabilidad Social |

Fuente: Cavallaro y Ciraolo. Un enfoque multicriterio para evaluar las plantas de energía eólica en una isla italiana

Cengiz Kahraman y İhsan Kaya⁴⁹ presentan en su trabajo una metodología que se ocupa de la evaluación de la toma de decisiones de múltiples atributos de los recursos energéticos, que permiten la selección de una alternativa adecuada para la generación de electricidad en Turquía. Ellos analizaron posibles alternativas energéticas basadas en aspectos físicos, ambientales, económicos, políticos y otros. En este trabajo los principales sub-criterios se obtienen al tener en cuenta las investigaciones anteriores de Becalli et al. (2003) que revisó el plan de acción de la tecnología para la energía renovable, Goletsis et al. (2003) que ocupa el proyecto de planificación energética y Topcu and Ulengin (2004). Los autores proponen los siguientes criterios para la selección de la mejor política energética: Tecnológico, en términos de factibilidad, riesgo, confiabilidad, duración fase de preparación, duración fase implementación, continuidad, y know how. Ambiental, en consonancia con la emisión de contaminantes, requisitos de los terrenos y necesidad de eliminación de residuos. Socio-Político, en relación a la compatibilidad en las políticas energéticas nacionales, aceptación política, aceptación social e impacto en el trabajo. Económico, teniendo en cuenta el costo de implementación, la disponibilidad de fondos y valor económico.

⁴⁹ CENGİZ KAHRAMAN, İhsan Kaya. A fuzzy multicriteria methodology for selection among energy alternatives. *Expert Systems with Applications* 37. 2010. 6270–6281.

De igual forma Ling Zhang⁵⁰ en su investigación presenta un método MCDM mejorado basado en lógica difusa e integral, el cual se desarrolla y se aplica para evaluar cuatro opciones de energía limpia primarias de la provincia de Jiangsu, China. Los criterios más utilizados que actúan como base para la evaluación de alternativas de energía limpia incluyen: aspectos técnicos, económicos, ambientales y sociales. El uso de diferentes técnicas de evaluación debe satisfacer las preferencias de los diversos grupos de interés. Por ejemplo, los inversores se centraron en la eficiencia de la tecnología, el TRL (nivel de preparación de tecnología), seguridad, costo o FIT de inversión. El gobierno puede estar más preocupado por la seguridad, las emisiones de CO₂, uso de la tierra y la creación de empleo, mientras que en lo público son más propensos a estar preocupados por la seguridad y la creación de empleo. Una lista completa de los criterios de evaluación claves se elabora a partir de la consideración de todos los principales puntos de vista de las partes interesadas, la disponibilidad de datos actuales específicos de Jiangsu, y el potencial para clasificar alternativas. Los resultados confirman que la opción de energía limpia recomendado por Jiangsu es la energía solar fotovoltaica, seguido por la eólica, la biomasa y finalmente nuclear.

Continuando con la revisión de modelos de selección de alternativas de generación de energía desarrollados con base en la lógica difusa, se encuentra Adek Tasri (2014)⁵¹ en cuyo trabajo se propuso una metodología de selección basada en fuzzy AHP, que involucró un nuevo procedimiento para la agregación de opiniones de expertos. También se introdujeron algunos criterios de selección adecuados para Indonesia, tales como económicos, socio-políticos, tecnológicos y ambientales. Además, se tuvo en consideración un nuevo criterio denominado Calidad de las fuentes de energía, el cual mide la calidad de la energía

⁵⁰ ZHANG, Ling. Evaluating clean energy alternatives for Jiangsu, China: An improved multi-criteria decision making method.

⁵¹ TASRI, Adek. Selection among renewable energy alternatives based on a fuzzy analytic hierarchy process in Indonesia.

suministrada al cliente y la seguridad de la inversión para la exploración de la energía. Estas fuentes de energía de buena calidad deben satisfacer al usuario final mediante la entrega constante de energía, al igual que garantizar inversiones seguras debido a su buena durabilidad. Este criterio se utilizó además de los cuatro criterios descritos anteriormente. El criterio final, que consta de cinco criterios principales y 15 sub-criterios, se describe a continuación:

- Criterio calidad de la fuente de energía: sostenibilidad, durabilidad y distancia al usuario.
- Criterio socio-político: política gubernamental, impacto en el trabajo y aceptación social.
- Criterio económico: costo de implementación, valor económico y asequibilidad.
- Criterio tecnológico: continuidad y previsibilidad de la actuación, riesgo y conocimiento técnico local.
- Criterio ambiental: emisión de contaminantes, requisitos de los terrenos y requisitos en la eliminación de residuos.

Theocharis Tsoutsos (2008)⁵², continúan reconociendo la importancia que tiene el manejo de criterios cualitativos dentro del proceso de la planificación energética sostenible. Sustentan que los métodos tradicionales de evaluación, como el análisis de costo-beneficio y los indicadores macroeconómicos, no son suficientes para integrar todos los elementos incluidos en un plan energético. Por el contrario, los métodos de criterios cualitativos múltiples proporcionan una herramienta, que es más apropiada para manejar una amplia gama de variables que se evalúa de diferentes maneras y por lo tanto ofrecen apoyo a la decisión final. En su trabajo explora la metodología multicriterio para la planificación energética sostenible en la isla de Creta en Grecia. Un conjunto de alternativas de planificación de energía se determinan sobre la ejecución de las instalaciones de fuentes de energía

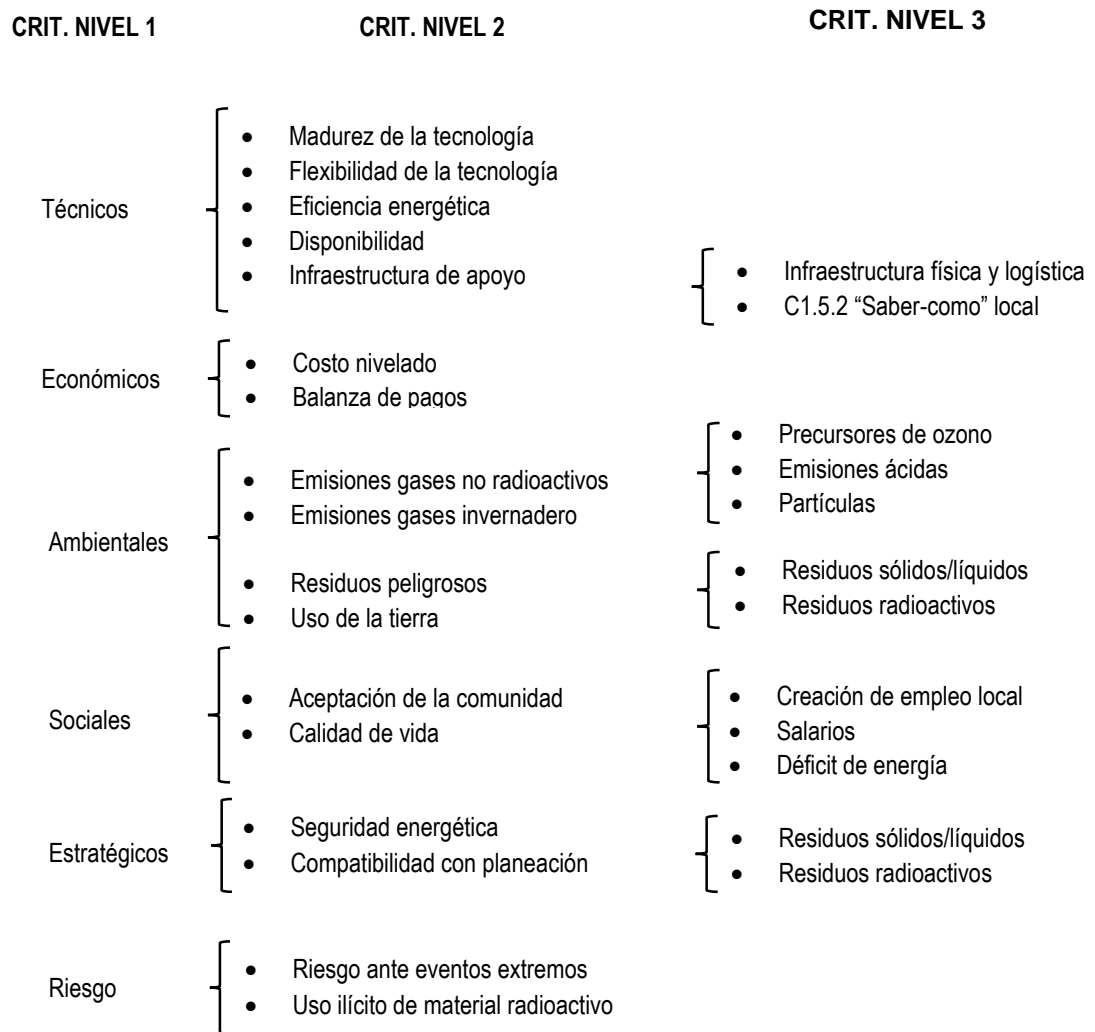
⁵² Theocharis Tsoutsos. Sustainable energy planning by using multi-criteria analysis application in the island of Crete. 2008.

renovables en la isla y se evalúan respecto a siete criterios, de los cuales cuatro son tecno-económico (Inversión, operaciones y costos de mantenimiento; ahorro en los combustibles convencionales; madurez en la tecnología; y seguridad del suministro) y el resto socio-ambientales (Emisiones de CO₂; contribución al desarrollo y bienestar local; y aceptación social) identificados por los actores involucrados en el ámbito de planificación energética.

Violeta Parodi (2013)⁵³ en su tesis doctoral desarrolló una propuesta metodológica para la evaluación integral de proyectos en el sector energético, una etapa fundamental en su propuesta fue la elección de los atributos, criterios e indicadores para su modelo, estos se seleccionaron a partir de una serie de actividades que permitieron identificar en primera instancia un grupo de 76 aspectos diferenciadores que podían afectar la priorización de proyectos en el área; éstos fueron reducidos progresivamente a 59, 44 y 24 aspectos principales que se agruparon de acuerdo a su naturaleza, en seis dimensiones: técnica, económica, ambiental, social, estratégica y de riesgo. La reducción se realizó utilizando técnicas de consulta a expertos, reflexión y análisis estadístico de las opiniones obtenidas. El proceso permitió la reducción de aproximadamente un 50% del número de atributos/criterios de la lista original que pasó de contener 44 aspectos principales a contener 17 criterios principales y 12 criterios subordinados; e incrementó la calidad de los criterios en su conjunto, en cuanto a su simplicidad, facilidad de medición, independencia y cualidades diferenciadoras para la evaluación. Los criterios seleccionados fueron agrupados en una estructura jerárquica de tres niveles como se muestra a continuación.

⁵³ PARODI DE CAMARGO, Violeta. Propuesta metodológica para la evaluación integral de proyectos en el sector energético. Universidad Politécnica de Valencia. Tesis doctoral. Valencia 2013.

Figura 7. Jerarquía de los criterios de Violeta Parodi



Fuente: Violeta Parodi de Camargo. 2013

Por otra parte, Diana Gallego y Alexander Mack (2010)⁵⁴, desarrollaron un conjunto de indicadores sociales con el fin de considerar en las evaluaciones de sostenibilidad de las tecnologías de energía las repercusiones sociales, los efectos negativos a largo plazo y los beneficios de los sistemas de energía. Para esto se utilizó la herramienta de consulta a expertos en la que se entrevistaron a

⁵⁴ GALLEGO, Diana; MACK, Alexander. Sustainability assessment of energy technologies via social indicators: Results of a survey among European energy experts.

científicos especializados en energía y ciencias sociales de los países de Francia, Alemania, Italia y Suiza, los cuales seleccionaron los indicadores sociales para la evaluación de los efectos sociales de los sistemas de energía. El proceso de consulta a expertos logro identificar 9 indicadores principales los cuales están relacionados a los siguientes criterios: seguridad y fiabilidad del suministro de energía (flexibilidad para incorporar innovaciones tecnológicas y disponibilidad de la infraestructura de eliminación de residuos), la estabilidad política y legitimidad (potencial de conflictos inducidos por los sistemas de energía y la necesidad de los procesos de toma de decisiones participativas), los riesgos sociales e individuales (consecuencias para la salud esperados, subjetivas de funcionamiento normal, potencial catastrófico y familiaridad con los riesgos) y la calidad de vida (impacto funcional de la infraestructura energética en el paisaje e impacto estético de la infraestructura energética en el paisaje).

La tendencia sobre los criterios es sustentada una vez más por diferentes autores, You-Yin Jing, et al. (2012)⁵⁵, exponen en su trabajo un modelo de evaluación que integra la teoría difusa a los procesos de toma de decisiones multicriterio, el cual propone evaluar los beneficios integrales de los sistemas de calefacción CCHP. En primera medida, la mayoría de los investigadores seleccionaron criterios económicos y tecnológicos como los principales indicadores para evaluar los beneficios completos de sistemas de CCHP. Recientemente, el ahorro de energía y reducción de emisiones contaminantes se han tomado en consideración, por tanto, indicadores ambientales y sociales también se tomaron en cuenta al evaluar las actuaciones integradas de los sistemas de CCHP. Por lo tanto, los indicadores de evaluación seleccionados en este trabajo se clasifican en criterios tecnológicos, económicos, ambientales y sociales (Feng y Jin, 2005 y Pilavachi et al., 2006). Los sub-criterios usados por los autores hacen referencia a: relación del consumo de energía primaria, eficiencia de la exergía, madurez, costo de inversión, periodo de

⁵⁵ JING Y-Y, A fuzzy multi-criteria decision-making model for trigeneration system. Energy Policy 2008; 36:3823–32.

recuperación de inversiones, valor presente neto, emisiones de NOx y CO2, ruido, mantenimiento, rendimiento y protección.

5.1.2 Selección de los indicadores de los criterios tecnológico, social, económico y ambiental. Luego de la revisión bibliográfica realizada en la que se tuvo en cuenta los distintos criterios utilizados en el proceso de selección de las alternativas de generación de energía eléctrica, se puede identificar claramente la frecuencia en el uso de sub-criterios.

El grupo de atributos y criterios seleccionados debe contribuir a conformar un modelo de valor preliminar para la evaluación de proyectos en el sector energético que represente de forma lo más completa posible, pero a la vez concisa y sencilla en su aplicación, lo esencial de un problema extenso y complejo. Los atributos y criterios incluidos en el grupo deben ser relevantes, significativos, fácilmente entendibles, no redundantes y medibles objetiva o subjetivamente. Si los atributos no cumplen con estas condiciones deben ser redefinidos, agrupados o subdivididos hasta que se alcance una situación satisfactoria.

Dichos atributos se pueden observar en las siguientes graficas que muestran el número de veces que fueron seleccionados en su correspondiente dimensión como aspecto diferenciador importante que constituyeron la base del trabajo de investigación de cada autor.

Figura 8. Histograma Indicadores ambientales

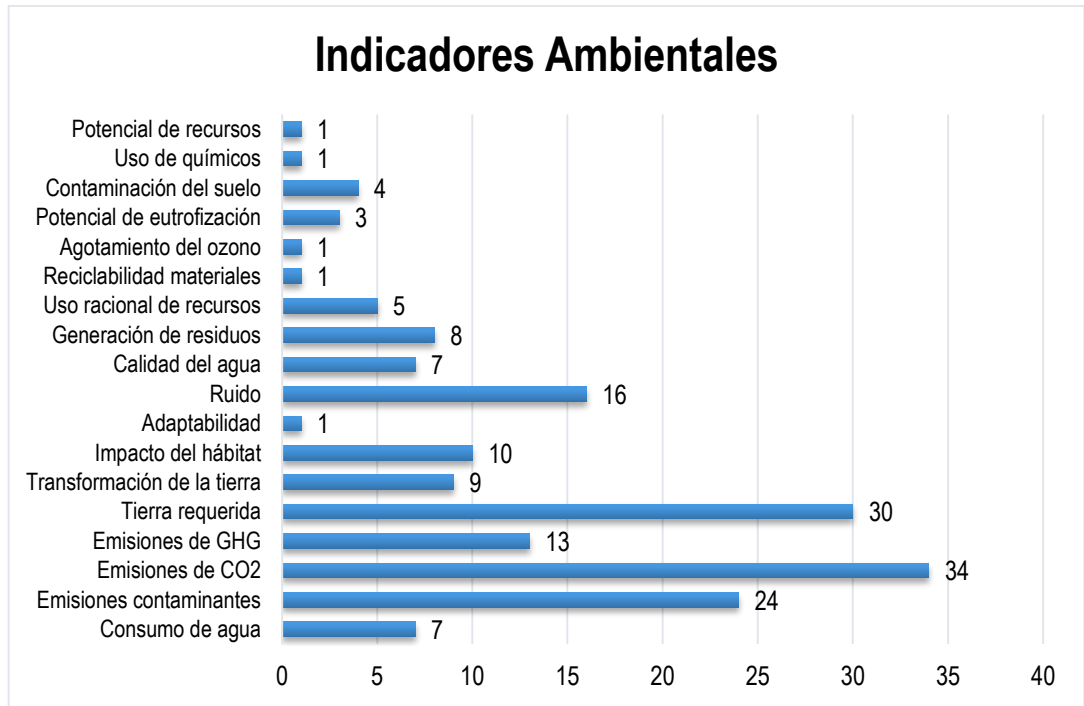


Figura 9. Histograma Indicadores económicos

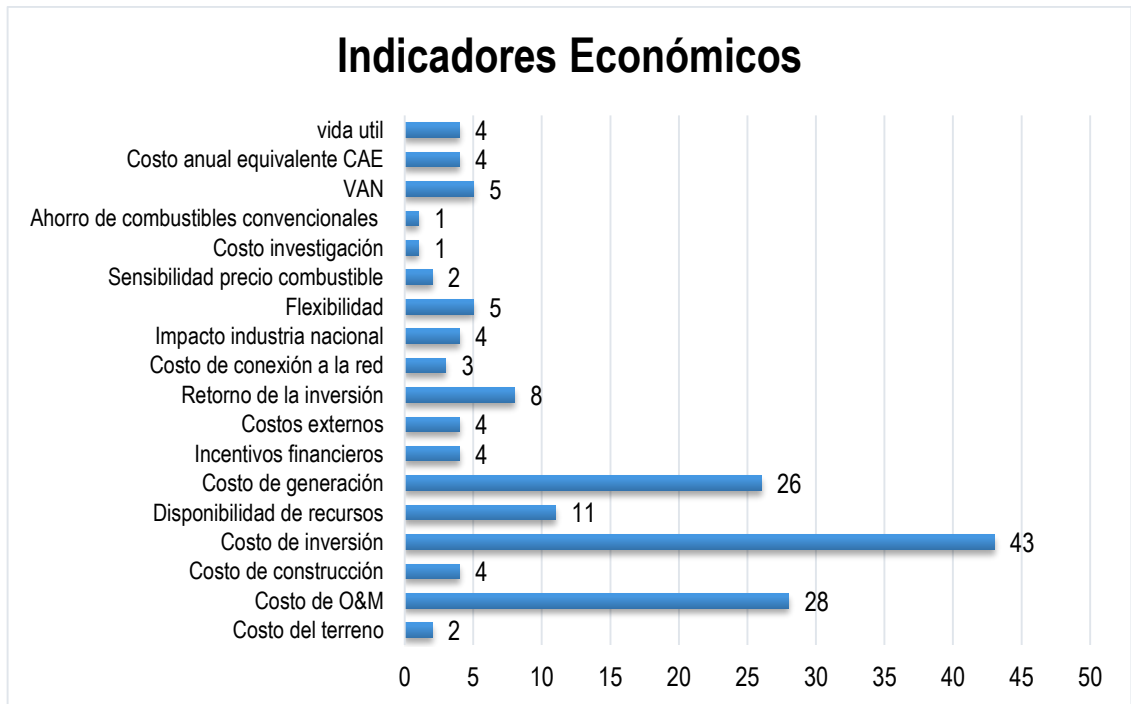


Figura 10. Histograma Indicadores Tecnológicos.

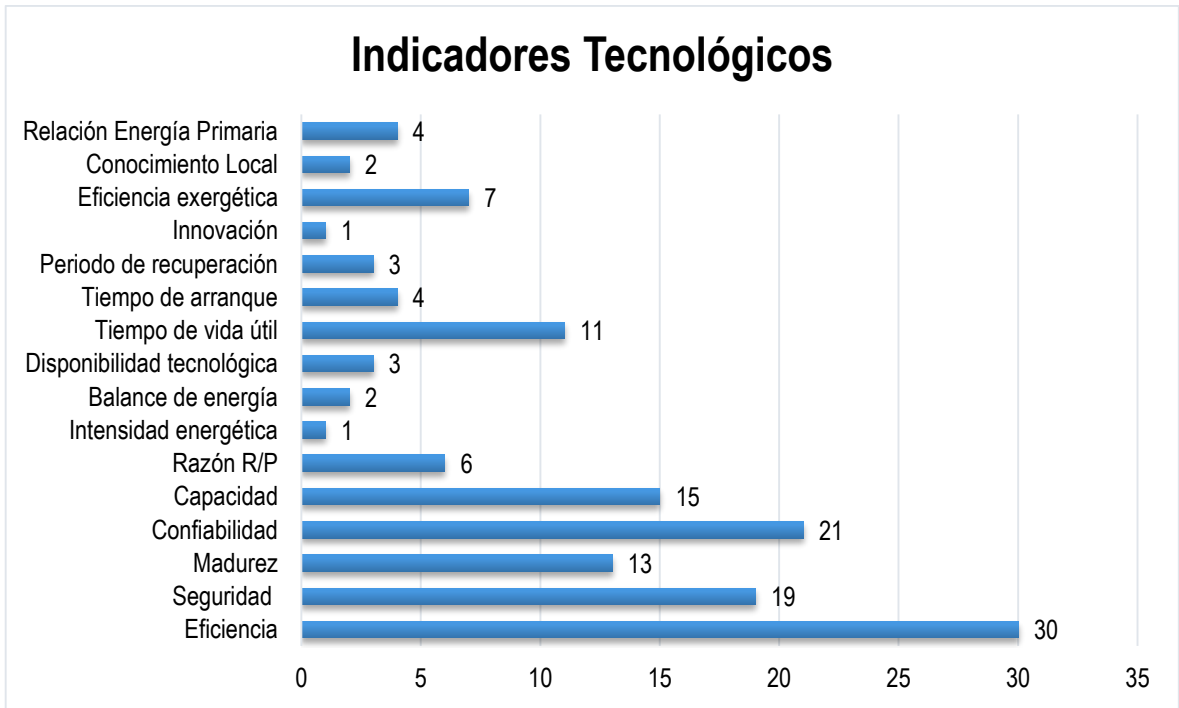
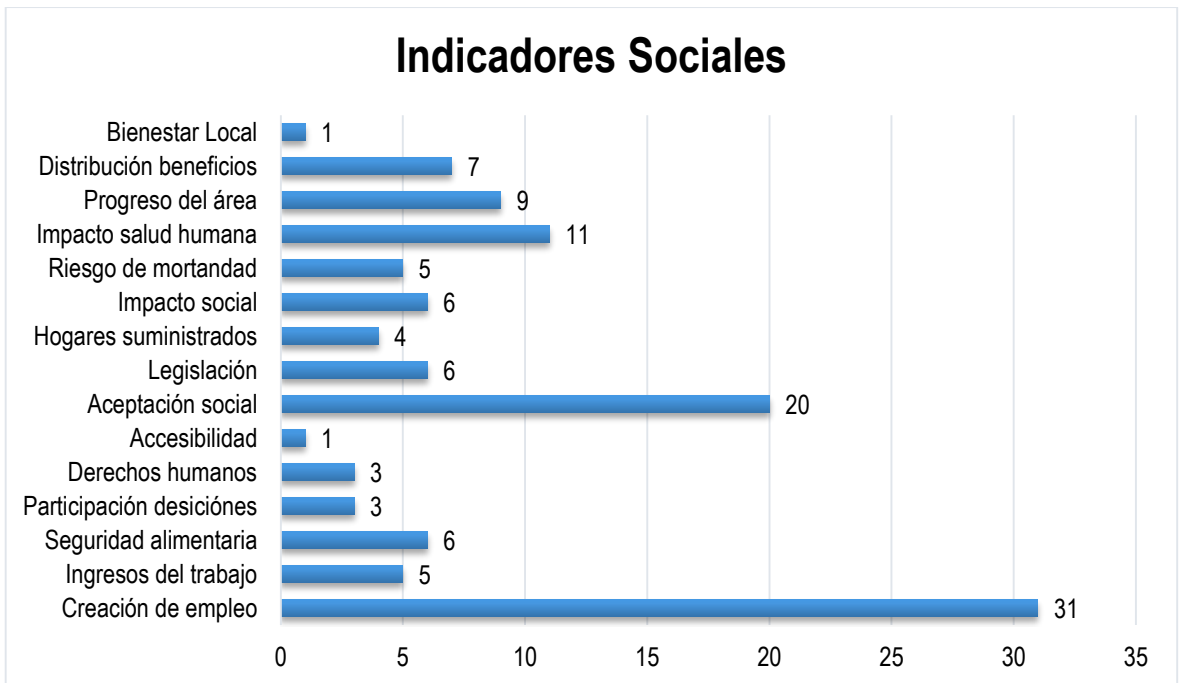


Figura 11. Histograma Indicadores Sociales.



La consideración de los sub criterios señalados sumados a los aspectos económicos, relacionados a la optimización del uso de los recursos disponibles; a los aspectos ambientales asociados a los efectos que se pueden producir sobre la atmósfera, la tierra y las aguas del planeta; a los aspectos sociales que tienen que ver con el mejoramiento de las condiciones de vida de la población; y finalmente, a los aspectos tecnológicos sobre las características de las tecnologías utilizadas, sus requerimientos y sus rendimientos; servirán de estructura a seguir en la elección de los atributos estudiados.

Preselección de los sub criterios: En el Anexo B se presentan las hojas de EXCEL con la información levantada en la etapa anterior.

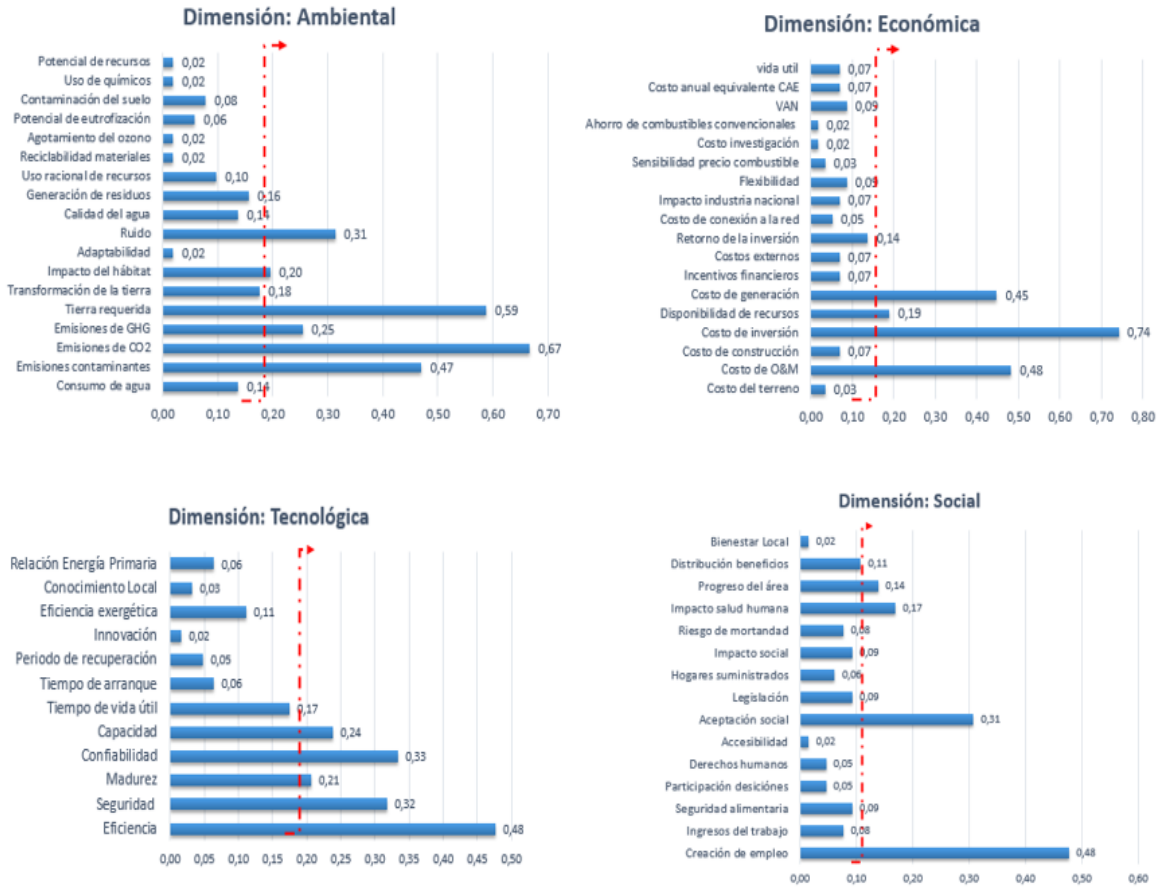
Como puede observarse, cada criterio se ubicó en la dimensión originalmente asignada. Las valuaciones sobre la pertinencia e importancia de cada criterio a validar se obtuvieron mediante el uso de la media aritmética. Sobre la información así revisada y clasificada, se efectuaron las siguientes operaciones:

- Estimación de la media aritmética de cada sub criterio en cada dimensión
- Estimación de la media aritmética por dimensión de las medias de los sub criterios.

Es importante resaltar que la estimación de la media aritmética de los sub criterios asignados a una dimensión es una forma de obtener un límite inferior para su selección. La figura 12 muestra los resultados consolidados para todos los sub criterios clasificados por dimensión. Las líneas punteadas rojas representan la media de las preferencias de los sub criterios en cada dimensión y sirven como límite de referencia para la eliminación de los sub criterios que captaron la preferencia más baja dentro de sus respectivas dimensiones, por parte de los artículos revisados. Las barras que sobrepasan tal límite representan los aspectos

finalmente seleccionados para su inclusión como sub criterios de evaluación en la selección de alternativas de generación de energía.

Figura 12. Preselección de los sub criterios



El proceso permitió la reducción de aproximadamente un 67% del número de sub criterios de la lista original que pasó de contener 64 aspectos principales a contener 21 sub criterios. La tabla 3 presenta la propuesta de estructuración jerárquica en dos niveles de los criterios seleccionados en la etapa anterior para evaluar las alternativas de generación de energía eléctrica.

Tabla 3. Criterios preseleccionados según revisión bibliografía

| Criterios | Sub criterios |
|----------------|---|
| C1 Ambiental | C1.1 Emisiones contaminantes C1.2 Emisiones de gas de efecto invernadero C1.3 Emisiones de CO2 C1.4 Tierra requerida C1.5 Impacto del habitat C1.6 Ruido |
| C2 Económico | C2.1 Costo de operación y mantenimiento C2.2 Costo de inversión C2.3 Disponibilidad de recursos C2.4 Costo de combustible |
| C3 Social | C3.1 Creación de empleo C3.2 Aceptación social C3.3 Impacto en la salud humana C3.4 Progreso del área |
| C4 Tecnológico | C4.1 Eficiencia C4.2 Seguridad C4.3 Madurez C4.4 Confiabilidad C4.5 Capacidad |

Validación de los criterios: Esta etapa tiene como objetivo validar los criterios preseleccionados en la tabla 3, para ello fueron desarrollados algunos requisitos que no se abordaron plenamente en las anteriores etapas, y los cuales se pueden encontrar en la literatura sobre el campo de la evaluación de la sostenibilidad en general, así como acerca de los campos de la energía y de la bioenergía en particular⁵⁶.

⁵⁶ THOMAS KURKA, David Blackwood. Participatory selection of sustainability criteria and indicators for bioenergy developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 24. 2013. 92–102.

Los requisitos para los criterios preseleccionados están relacionados con:

1. La simplicidad de cada indicador sin que se pierda la esencia de lo que se quiere evaluar.
2. La disponibilidad efectiva de la información para su cálculo.
3. La inclusión de las condiciones, prioridades y capacidades del país sede del proyecto.
4. Un número manejable de indicadores.

En otras palabras, los sub criterios e indicadores deben medir cuestiones importantes, integrales y de una manera significativa, son tanto más útiles en cuanto sean fácilmente entendibles y estén basados en información confiable que exista o que se pueda recabar oportunamente al menor costo posible. Por lo tanto, deben ser relevantes manteniendo el objetivo del problema⁵⁷. Como resultado del proceso anterior, y considerando el criterio de selección dado por la autora de la Tesis Doctoral el cual este proyecto apoya, se redefinió el modelo jerárquico propuesto en la tabla 3, realizando las siguientes modificaciones:

- Para la dimensión ambiental, se encontró en la literatura que las emisiones de CO₂ equivalentes era un indicador altamente relevante con el sub criterio Emisiones GEI⁵⁸. Por lo tanto, al aplicar los requisitos anteriormente mencionados se procedió a unir estos dos sub criterios. Así mismo se integraron los sub criterios contaminación acústica y el impacto del hábitat, ya que este último implícitamente contenía al otro.
- En la dimensión económica por fines prácticos para la evaluación del criterio se decidió unir los sub criterios: costo de operación y mantenimiento, costo de inversión y costo de combustible en uno solo llamado costo total, además se

⁵⁷ Ibid.

⁵⁸ Ibid.

eliminó el sub criterio disponibilidad de recursos porque este ya encuentra relacionado directamente con los otros sub criterios.

- En la dimensión social se consideró que los indicadores de creación de empleo y aceptación social eran los más significativos según la revisión realizada, por lo tanto, el impacto en la salud humana y el progreso de la región fueron eliminados al ser considerados medibles en los sub criterios anteriormente nombrados.
- En la dimensión tecnológica se verificó que el indicador de seguridad mide la fiabilidad de la tecnología; por este motivo se unificó con el indicador de confiabilidad el cual lo abarca. Y por último se agregó un nuevo indicador el cual se refiere a la accesibilidad a las Zonas No Interconectadas siendo de gran importancia tener en cuenta las vías de acceso a los municipios estudiados como un factor de factibilidad al implementar la tecnología.

Definición de indicadores y sus escalas: A continuación, se presenta la información de los indicadores finalmente seleccionados; esto es, la dimensión donde se ubica, el objetivo o dirección de mejora del atributo al cual se asocia y su criterio asociado; su definición, y su escala de medición.

Dimensión ambiental

Los criterios ambientales incorporan a la evaluación multicriterio aspectos que tienen que ver con la potencial incidencia sobre el ambiente que tendría la ejecución y explotación del proyecto en estudio. Los indicadores asociados respectivamente a los criterios ambientales son:

C1.1 Emisiones de CO₂

El dióxido de carbono (CO₂) es uno de los gases que contribuyen en mayor proporción con el efecto invernadero⁵⁹. El gas se produce fundamentalmente en la

⁵⁹ JIANG-JIANG, Wang et al. A fuzzy multi-criteria decision-making model for trigeneration system. Energy Policy 36 (2008) 3823–3832.

combustión de carbón, gas, petróleo y sus derivados en el sector transporte o para la producción de energía eléctrica; y en la producción de calor para las industrias, comercios y hogares.

| DIMENSIÓN AMBIENTAL | |
|--|---|
| SUB CRITERIO: C1.1 Emisiones de CO2 | |
| OBJETIVO ASOCIADO: MIN [Emisiones de CO2] | |
| INDICADOR: Emisiones de CO2 | |
| DEFINICIÓN: Este indicador representa las emisiones de dióxido de carbono proveniente de la generación eléctrica. Cabe resaltar que el dióxido de carbono es uno de los gases que contribuyen en mayor proporción con el efecto invernadero. | |
| ESCALA: ⁶⁰ | |
| 1 | Emisiones muy altas. |
| 2 | Emisiones altas. |
| 3 | Emisiones medias. |
| 4 | Emisiones insignificantes o no existen. |

C1.2 Residuos contaminantes

La mayoría de los contaminantes del aire vienen como resultado de la generación de energía que se derivan directa o indirectamente de la combustión en la producción y procesamiento de materia prima, así como en el uso final.

Los residuos contaminantes se dividen en las siguientes categorías:

- Residuos a la atmósfera, debido principalmente al proceso de combustión (incluyen: emisiones de NO_x, CO, SO₂ y material particulado⁶¹) la concentración en el aire de las emisiones de NO_x, CO, SO₂ tienen efecto sobre

⁶⁰ 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. 2003. 2063–2087.

⁶¹ THOMAS KURKA. Op. Cit.

el medio ambiente (ej: lluvia acida), así mismo el material particulado produce depósitos en las arterias cuando se respiran tales emisiones, afectando la salud de las personas⁶².

- Los residuos líquidos, que se asocian principalmente con productos secundarios por el tratamiento de humos o con agua de proceso.
- Los residuos sólidos, que se generan durante el ciclo de vida de las acciones.

| DIMENSIÓN AMBIENTAL | |
|--|--|
| SUB CRITERIO: C1.2 Residuos contaminantes | |
| OBJETIVO ASOCIADO: MIN [Residuos contaminantes] | |
| INDICADOR: Residuos contaminantes | |
| DEFINICIÓN: Suma de las emisiones estimadas de gases contaminantes las cuales se dividen en las siguientes categorías: Residuos a la atmosfera, residuos líquidos, residuos sólidos. | |
| ESCALA: ⁶³ | |
| 1 | Residuos muy altos: Cuando cada categoría es relevante |
| 2 | Residuos altos: Cuando al menos dos de las categorías son relevantes |
| 3 | Residuos medios: Cuando al menos una categoría es relevante |
| 4 | Residuos bajos: Cuando todas las categorías de residuos son insignificantes o no existen |

C1.3 Tierra requerida

El terreno requerido por cada planta es un asunto de gran preocupación para su evaluación ya que el medio ambiente y el paisaje se ven afectados directamente por los terrenos que estas plantas ocupan. Por lo tanto, la calidad de vida de las personas se ve afectada, ya que estos terrenos podrían haber sido utilizado para otras actividades en beneficio de la comunidad⁶⁴. Además, las excavaciones,

⁶² CHATZIMOURATIDIS, A. y PILAVACHI, P. “Objective and subjective evaluation of power plants and their non-radioactive emissions using the analytic hierarchy process”, *Energy Policy*, 35, 4027–4038. 2007

⁶³ 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 (2003) 2063–2087.

⁶⁴ CHATZIMOURATIDIS A. y PILAVACHI P. “Multicriteria evaluation of power plants impact on the living standard using the analytic hierarchy process”, *Energy Policy* 36, 1074–1089. 2008.

túneles y otras obras necesarias para el funcionamiento de sistemas de energía desestabilizan la flora, la fauna y el ecosistema en general⁶⁵.

| DIMENSIÓN AMBIENTAL | |
|---|--|
| SUB CRITERIO: C1.3 Tierra requerida | |
| OBJETIVO ASOCIADO: MIN [el uso de tierra requerida] | |
| INDICADOR: Tierra requerida | |
| DEFINICIÓN: Este criterio representa como el uso de la tierra afecta directamente el medio ambiente y el paisaje. | |
| ESCALA: ⁶⁶ | |
| 1 | Los requisitos de tierra son altos y existe una alteración significativa del paisaje que puede limitar el crecimiento socioeconómico futuro de la zona. |
| 2 | Los requisitos de tierra son altos y existe una alteración significativa del paisaje pero que no tienen ningún efecto sobre el crecimiento socioeconómico futuro de la zona. |
| 3 | Los requerimientos de tierra y alteración del paisaje son medios. |
| 4 | Los requerimientos de tierra y alteración del paisaje son bajo. |
| 5 | No hay requisitos de tierra ni alteración del paisaje. |

C1.4 Impacto del hábitat

El impacto en la vida vegetal y animal es un obstáculo importante para permitir la construcción de plantas de energía. El mayor impacto para la vida silvestre y el hábitat se debe a la tierra ocupada por la planta de energía en sí. Debido a ciertas condiciones que limitan el movimiento de los animales, alteran significativamente a la vegetación y causan mortandad de aves e insectos.⁶⁷

⁶⁵ JIANG-JIANG. Op. Cit.

⁶⁶ EVRENDILEK, F. Ertekin, C. Assessing the potential of renewable energy sources in Turkey *Renewable Energy* 28, 2003, pp. 2303–2315

⁶⁷ DAMON TURNEY, Vasilis Fthenakis. Environmental impacts from the installation and operation of large-scale solar power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2011) 3261–3270.

| DIMENSIÓN AMBIENTAL | |
|--|--|
| SUB CRITERIO: C1.4 Impacto del hábitat | |
| OBJETIVO ASOCIADO: MIN [Impacto del hábitat] | |
| INDICADOR: Impacto del hábitat | |
| DEFINICIÓN: El indicador representa el riesgo potencial sobre el ecosistema a causa de la instalación y operación de la planta de generación. El indicador combina los efectos sobre la (1) flora, (2) la fauna, (3) el nivel de ruido, y (4) la contaminación visual que se estima tendrá la instalación y operación de las instalaciones del proyecto. | |
| ESCALA: ⁶⁸ | |
| 1 | Impactos de muy alta intensidad sobre todos los elementos citados. |
| 2 | Impactos de alta intensidad sobre tres de los elementos citados. |
| 3 | Impactos de intensidad media sobre dos de los elementos citados. |
| 4 | Impactos de baja intensidad sobre uno de los elementos citados. |
| 5 | Intensidad de impacto nulo o bajo. |

Dimensión económica

C2.1 Costo total

Cuando se trata de tomar una decisión para la mejor alternativa de generación de energía eléctrica, varios costos deben ser tenidos en cuenta. El indicar costo total incluye: los costos de operación y mantenimiento, los costos de inversión y los costos de combustible⁶⁹. Cabe resaltar que cuanto menor sea el costo, mejor será el rendimiento del tipo de planta de energía.

- Costo de operación y mantenimiento- Costos O&M. Estos incluyen: salarios de los empleados y los productos y servicios de la operación del sistema de energía; el costo de mantenimiento que tiene como objetivo prolongar la vida

⁶⁸ BECCALI, M., CELLURA, M. y 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 2003. 2063–2087.

⁶⁹ U.S. Energy Information Administration. Independent Statistics & Analysis, Levelized Cost of New Generation Resources in the Annual Energy Outlook 2011, 2012c, Disponible en: http://www.eia.gov/forecasts/aeo/electricity_generation.cfm. 2012.

útil del sistema de energía y evitar fallos que puedan dar lugar a la suspensión de la operación⁷⁰.

- Costo de inversión. Los costos de inversión están relacionados a los gastos de estudios de viabilidad, predios, infraestructura, adquisición, transporte e instalación de equipos y el establecimiento de la ingeniería necesaria⁷¹.
- Costo de combustible. Los costos de combustible se refieren a los fondos gastados para la provisión de materia prima necesaria para la operación de la planta de energía⁷².

| DIMENSIÓN ECONÓMICA | |
|--|---|
| SUB CRITERIO: C2 Costo total | |
| OBJETIVO ASOCIADO: MIN [Costo total] | |
| INDICADOR: Costo total | |
| DEFINICIÓN: El indicador incluye costos de inversión, costos de operación y mantenimiento (O&M) y costos de combustible. | |
| ESCALA: | |
| 1 | Costos muy altos teniendo en cuenta los costos de inversión, operación y mantenimiento, en relación a las otras tecnologías |
| 2 | Costos altos teniendo en cuenta los costos de inversión, operación y mantenimiento, en relación a las otras tecnologías |
| 3 | Costos medios teniendo en cuenta los costos de inversión, operación y mantenimiento, en relación a las otras tecnologías |
| 4 | Costos bajos teniendo en cuenta los costos de inversión, operación y mantenimiento, en relación a las otras tecnologías |
| 5 | Costos muy bajos teniendo en cuenta los costos de inversión, operación y mantenimiento, en relación a las otras tecnologías |

⁷⁰ ATHANASIOS I., CHATZIMOURATIDIS, Petros PILAVACHI, A. Technological, economic and sustainability evaluation of power plants using the Analytic Hierarchy Process. Energy Policy 37 (2009) 778–787.

⁷¹ Comisión de regulación de energía y gas CREG. Metodología para la remuneración de las actividades de generación, distribución y comercialización de las zni. Documento CREG-002. Enero 2014.

⁷² ATHANASIOS I., CHATZIMOURATIDIS, Petros PILAVACHI, A. Op. Cit.

Dimensión social

Los criterios sociales tienen que ver con los beneficios que recibe o los perjuicios que sufre la población como consecuencia de la instalación del proyecto bajo estudio. Para evaluar estos aspectos se proponen dos indicadores; ellos son:

C3.1 Creación de empleo

Los sistemas de suministro de energía emplean muchas personas durante su ciclo de vida, desde la construcción y operación hasta la clausura. Los sistemas de energía están estrechamente relacionados con el desarrollo de la sociedad durante muchas décadas. La creación de más puestos de trabajo para las personas es beneficioso para mejorar la calidad de vida de las poblaciones locales⁷³.

| DIMENSIÓN SOCIAL | |
|--|---|
| SUB CRITERIO: C3.1 Creación de empleo | |
| OBJETIVO ASOCIADO: MAX [creación de empleo] | |
| INDICADOR: Impacto en la economía | |
| DEFINICIÓN: Constituye el número de empleos directos e indirectos creados durante el ciclo de vida de la planta de energía. Los empleos directos son aquellos establecidos durante la construcción, operación y mantenimiento de la planta; y los indirectos son todos los empleos creados diferentes a la actividad principal | |
| ESCALA ⁷⁴ | |
| 1 | Muy bajo nivel de empleo que ocurre sólo en el proceso de instalación de la alternativa. |
| 2 | Bajo nivel de empleo que proporcionará nuevos puestos de trabajo durante el mantenimiento |
| 3 | Medio nivel de empleo durante la instalación, operación y mantenimiento |
| 4 | Alto nivel de empleo durante la instalación sin embargo baja durante la operación y mantenimiento |
| 5 | Muy alto nivel de empleo, tanto durante la instalación, operación y mantenimiento |

⁷³ WANG, Jiang-Jiang. Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. December 2009

⁷⁴ SAVVAS, Theodorou. The Parameters used in Multiple Criteria Decision Making Methodologies for Drafting out Renewable Energy Sources Support Schemes. Brunel University, Uxbridge, United Kingdom.

C3.2 Aceptación Social

La aceptación social expresa la visión general de opiniones relacionadas con los sistemas de energía por la población local con respecto a la realización de los proyectos de energía renovable. Es muy importante ya que la opinión de la población y de los grupos de presión puede influir fuertemente en la cantidad de tiempo necesario para seguir adelante y completar un proyecto energético⁷⁵.

| DIMENSIÓN SOCIAL | |
|--|--------------------|
| SUB CRITERIO: C3.2 Aceptación social | |
| OBJETIVO ASOCIADO: MAX [aceptación de la comunidad] | |
| INDICADOR: Aceptación de la comunidad | |
| DEFINICIÓN: La aceptación social expresa la opinión de la población local, la aceptación a nivel socio-político y la aceptación del mercado, con respecto a la planta de generación de energía, esta es importante debido a que influye significativamente en la ejecución del proyecto. | |
| UNIDADES: Apreciación cualitativa | |
| ESCALA ⁷⁶ | |
| 1 | Baja aceptación |
| 2 | Mediana aceptación |
| 3 | Alta aceptación |

Dimensión tecnológica

Los criterios técnicos pretenden incorporar explícitamente a la evaluación multicriterio aspectos que tienen que ver con la conveniencia de utilización de la tecnología propuesta por el proyecto. Los indicadores asociados son:

⁷⁵ *Ibíd*

⁷⁶ ROSSO, Ana María y KAFAROV Viatcheslav. Barriers to social acceptance of renewable energy systems in Colombia. 2015.

C4.1 Eficiencia energética

La eficiencia se refiere a la cantidad de energía útil que se puede obtener de una fuente de energía. El coeficiente de eficiencia es la relación de la energía de salida a la energía de entrada, que se utiliza para evaluar los sistemas de energía. La eficiencia energética se dice que es uno de los "pilares" de una política energética sostenible. Se ha demostrado que la mejora de la eficiencia que es consistente con una alta fiabilidad de la planta y de bajo costo de producción es económicamente beneficioso. El uso eficiente de la energía es esencial para frenar el crecimiento de la demanda de energía⁷⁷.

| DIMENSIÓN TECNOLÓGICA | |
|--|--|
| SUB CRITERIO: C4.1 Eficiencia energética | |
| OBJETIVO ASOCIADO: MAX [eficiencia energética] | |
| INDICADOR: % Relación entre salida/entrada de energía | |
| DEFINICIÓN: Simboliza la cantidad de energía útil que es posible obtener a partir de una fuente de energía primaria, dado que siempre se presentan pérdidas en el proceso de conversión de una forma de energía a otra, el porcentaje de eficiencia será siempre < 100%. | |
| ESCALA ⁷⁸ | |
| 1 | Inaceptable: Eficiencia <65% Se producen importantes pérdidas, muy baja competitividad |
| 2 | Regular: 65%<Eficiencia<75% Aceptable sólo si está en proceso de mejora, baja competitividad |
| 3 | Aceptable: 75%<Eficiencia<85% Ligeras pérdidas, competitividad ligeramente baja |
| 4 | Buena: 85%<Eficiencia<95% Entra en valores de clase mundial en eficiencia energética, buena competitividad |
| 5 | Excelencia Eficiencia>95% Valores de clase mundial en eficiencia energética, excelente competitividad |

⁷⁷ Ibíd

⁷⁸ MONTERO, José Carlos, DÍAZ, Cesar Augusto y GUEVARA, Fabián Enrique. Modelo para medición de eficiencia real de producción y administración integrada de información en Planta de Beneficio. Área de Ingeniería Programa de Procesamiento Centro de Investigación en Palma de Aceite - Cenipalma Bogotá, julio de 2013.

C4.2 Madurez de la tecnología

La madurez técnica es un criterio para evaluar la tecnología aplicada de sistemas de energía. Medir el grado de madurez de la tecnología puede referirse lo extendido que la tecnología es, tanto a nivel nacional como internacional. Así mismo se refiere a la etapa de desarrollo de la tecnología en cuanto a su desempeño técnico, operacional y comercial⁷⁹.

| DIMENSIÓN TECNOLÓGICA | |
|---|--|
| SUB CRITERIO: C4.2 Madurez de la tecnología | |
| OBJETIVO ASOCIADO: MAX [madurez de la tecnología] | |
| INDICADOR: Nivel de madurez de la tecnología | |
| DEFINICIÓN: Etapa de desarrollo de la tecnología propuesta. Una tecnología ha alcanzado la madurez cuando se ha usado por un tiempo tal que sus fallas iniciales y problemas técnicos, operacionales y comerciales hayan sido superados o reducidos significativamente. | |
| ESCALA ⁸⁰ | |
| 1 | Tecnología obsoleta |
| 2 | Tecnología sólo probada a nivel de laboratorio |
| 3 | Tecnología técnica y operacionalmente probada en una planta piloto |
| 4 | Tecnología probada en fase de mejoramiento |
| 5 | Tecnología que ha alcanzado su madurez |

C4.3 Confiabilidad

Es importante saber si pueden existir condiciones de patrones operacionales no continuos. Esta condición es a menudo una característica de una tecnología dada y no indica un factor de falta de fiabilidad. Sin embargo, cuando la condición

⁷⁹ *Ibíd*

⁸⁰ BECCALI, M. Decision-making in energy planning. Application of the Electre method at regional level for the diffusion of renewable energy technology. October 2013.

operativa no es continua migra hacia la condición de imprevisibilidad, podría ser un signo de debilidad de dicha tecnología⁸¹.

| DIMENSIÓN TECNOLÓGICA | |
|---|---|
| SUB CRITERIO: C4.3 Confiabilidad | |
| OBJETIVO ASOCIADO: MAX [confiabilidad] | |
| INDICADOR: Confiabilidad de la tecnología | |
| DEFINICIÓN: Este criterio refleja si el suministro de energía se enfrenta a algún tipo de interrupciones. La presencia de tales interrupciones afecta a la estabilidad de la red eléctrica. | |
| UNIDADES: Apreciación cualitativa | |
| ESCALA ⁸² | |
| 1 | Impredecible y funcionamiento no continuo |
| 2 | Predecible, pero funcionamiento no continuo |
| 3 | Predecible y funcionamiento continuo |

C4.4 Rutas de acceso

Este sub criterio depende del tipo de transporte posible en cada localidad, así como de la distancia en referencia a sus centros de abastecimiento. Además, comprende la construcción de vías para las etapas de construcción, entrada de equipos y accesos de operación, por ende, depende de cada tecnología a implementar⁸³.

⁸¹ *Ibíd*

⁸² *Ibíd*

⁸³ ARTEAGA, Henry, y MANRIQUE, Cristian. Planeación de la expansión en generación de la energía eléctrica: caso de aplicación a zonas no interconectadas en Colombia. Universidad Industrial de Santander 2015.

| DIMENSIÓN TECNOLÓGICA | |
|---|---|
| SUB CRITERIO: C4.4 Rutas de acceso | |
| OBJETIVO ASOCIADO: MAX [calidad de vías de acceso] | |
| INDICADOR: Calidad de rutas de acceso | |
| DEFINICIÓN: Es un indicador que mide la conectividad vial con el nivel de accesibilidad que está referido a la calidad de caminos existentes y el cual determina la cobertura vial. | |
| ESCALA ⁸⁴ | |
| 1 | Acceso nulo o muy complicado |
| 2 | Acceso complicado: Trocha o Carreteables, son las vías que, a pesar de no estar pavimentadas, permiten la circulación de vehículos |
| 3 | Acceso medio: Fluvial o marítimo debido a la inexistencia de carretera. |
| 4 | Acceso normal: Carretera con dificultades o secundarias, que representan alternativas de movilidad que, en comparación con las carreteras principales, pueden no ser tan rápidas o fáciles de recorrer. |
| 5 | Acceso en buen estado: Carreteras principales, son las que permiten la entrada y salida de vehículos y conectan con otras vías más pequeñas |

5.2 APLICACIÓN DEL MÉTODO DELPHI PARA EL LEVANTAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

Esta sección describe el desarrollo de la metodología Delphi utilizada en el diseño de las encuestas como mecanismo para el levantamiento de la información necesaria con el fin de seleccionar la mejor alternativa de generación de energía en cada zona de estudio.

La metodología para la validación de los criterios seleccionados se realizó de acuerdo al siguiente plan de actividades

1. Selección de los expertos
2. Elaboración de cuestionarios
3. Lanzamiento del segundo cuestionario

⁸⁴ Idem.

5.2.1 Selección de expertos. En este estudio se considera que “experto” es toda persona que tenga experiencia como profesional en el sector energético o profesor investigador experto en dicha área. Para que el estudio sea representativo y objetivo se ha seleccionado un panel de expertos heterogéneo.

Los expertos están clasificados en tres grupos:

Grupo 1: Profesionales del IPSE y la UPME con amplia trayectoria profesional en instituciones del sector energético de Colombia, con experiencia laboral en el sector público y/o privado, expertos en una o más de las siguientes áreas: energía, energías renovables, generación y distribución de energía eléctrica, planificación y evaluación de proyectos.

Grupo 2: Profesores Investigadores del área energética con estudios de postgrado trabajando en el sector público nacional, actualizados tecnológicamente, con experiencia en investigación que oscila entre los 7 y 12 años, expertos afines en el área de formulación, evaluación, control de ejecución, gerencia de proyectos en sus respectivas áreas de desempeño.

Grupo 3: Empresarios del sector energético con experiencia laboral en el sector público y/o privado, expertos en una o más de las siguientes áreas: energía, energías renovables, generación y distribución de energía eléctrica, planificación y evaluación de proyectos.

Para la selección de los expertos se tuvo en cuenta principalmente dos criterios, (i) el conocimiento, experticia y/o afinidad sobre uno o más de uno de los diferentes aspectos del problema bajo estudio, por parte de cada candidato a entrevistar, y (ii) la disponibilidad del candidato para la entrevista.

Aunque no hay forma de determinar el número óptimo de expertos para participar en una encuesta Delphi, estudios realizados por investigadores de la Rand Corporation⁸⁵, señalan que el número ideal de expertos a consultar está en un rango de 7 a 30, cabe resaltar que no es aconsejable recurrir a más de 30 expertos, pues la mejora en la previsión es muy pequeña y normalmente el incremento en costo y trabajo de investigación no compensa la mejora.

En este proyecto participaron 9 personas en ambas rondas, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 4. Composición de los Grupos: Sector público, privado y académico

| GRUPO | POSICIÓN DEL ENTREVISTADO EN SECTOR ENERGÍA Y AFINES | INSTITUCIÓN/ ENTIDAD | SECTOR/ÁREA |
|---|---|----------------------|---------------------------------|
| GRUPO 1: Expertos de instituciones del sector energético de Colombia | Asesor de Energía Ingeniero Electricista | IPSE | Público/ Energía |
| | Coordinación Planeación energética Ingeniero Electrónico | IPSE | Público/ Energía |
| | Asesor de Energía Ingeniero Electricista Magister en Ingeniería Eléctrica Doctorado en Ingeniería | UPME | Público/ Energía |
| | Jefe de Oficina de Proyectos Economista | UPME | Público/ Energía |
| | Profesor UIS Doctorado en Ingeniería Industrial | UIS | Académico / Energías Renovables |
| GRUPO 2: Profesores Investigadores del área energética | Profesor UIS Especialización, Maestría, Doctorado | UIS | Académico/ Energías Renovables |

⁸⁵ DALKEY, Norman C.; BROWN, Bernice y COCHRAN, S. “The Delphi Method, III: Use of self rating to improve group estimates”. Technological Forecasting and Social Change, vol 1, 1970, pp. 283-91. Citado por Landeta, Jon. 1999.

| GRUPO | POSICIÓN DEL ENTREVISTADO EN SECTOR ENERGÍA Y AFINES | INSTITUCIÓN/ ENTIDAD | SECTOR/ÁREA |
|--|---|---|-------------|
| GRUPO 3: Empresarios del sector energético. | Ingeniero Electricista | CIDET | Privado |
| | Sub Gerente Técnico y de Proyectos Ingeniero Electricista | EEDAS S.A E.S.P | Público |
| | Director -Ingeniero Electricista. -Especialista en Sistemas de Transmisión y Distribución. -Especialista en Derecho Minero Energético. -Especialista en Gerencia de Proyectos. -Aspirante al título de Magister en Administración de Empresas. | PROYECTOS Y SERVICIOS DE INGENIERÍA WMSAS | Privado |

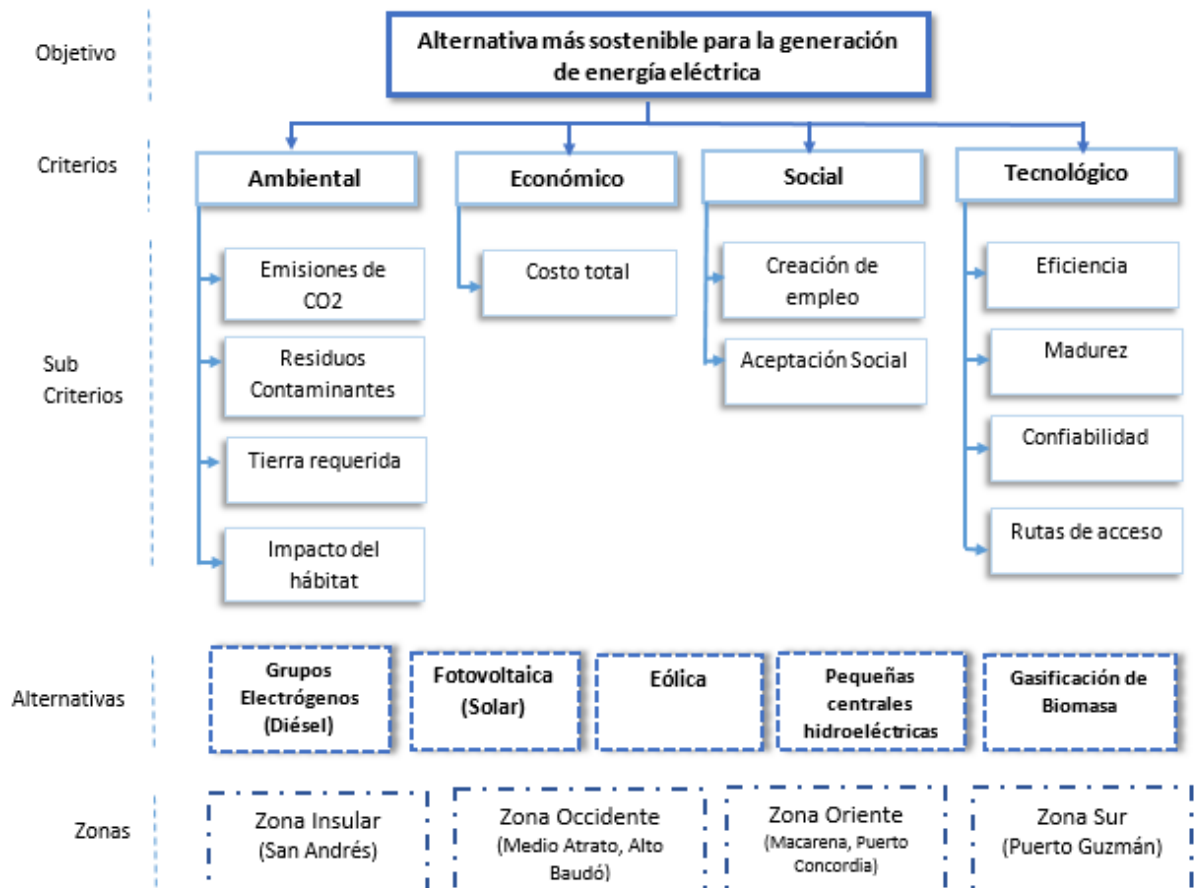
5.2.2 Elaboración de los cuestionarios. La recolección de la información necesaria para cumplir con los objetivos planteados inicialmente se realizó con la ayuda de un instrumento especialmente diseñado para la validación de los criterios y la asignación de sus respectivas importancias relativas.

Como ya se ha comentado, el método Delphi con enfoque difuso que se aplicó exige que a cada respuesta que se le propone al experto se debe asociar una etiqueta lingüística y que las proposiciones sean por tanto susceptibles de ser evaluadas en esos términos. Por lo tanto, los cuestionarios se elaboraron de manera lo cual facilitó la respuesta por parte de los expertos.

Habiendo señalado lo anterior, se requirió la validación y obtención de la importancia relativa de cada criterio tomando como base las opiniones de una muestra de expertos relacionados con el área de la energía y/o materias afines. El proceso contempló la elaboración de dos encuestas:

1. Encuesta principal: Con el objetivo de recolectar la información el cuestionario incluye preguntas referentes a los 11 sub criterios seleccionados en el capítulo anterior, los cuales hacen referencia a las cuatro dimensiones donde cada alternativa será evaluada. A cada experto consultado, se le explica detalladamente el alcance y estructuración de la misma; paralelamente a la entrega de breves definiciones de cada uno de los criterios de evaluación junto a las características de la medición con su respectiva escala. El instrumento consta de 11 preguntas referentes a cada uno de los sub criterios, y enfocadas a las 4 zonas de estudio como se muestra en la siguiente figura.

Figura 13. Mapa jerárquico



2. Ponderación de los criterios: Dado que nuestro modelo requiere el peso de cada factor, se solicitó la opinión sobre la importancia relativa de los criterios de evaluación. La información fue registrada en una encuesta estructurada como un grupo de matrices de juicios de valor. A cada grupo de criterios y sub criterios correspondió una matriz para el registro de los resultados de la comparación por pares de los criterios del grupo. En el cuestionario se muestran 2 tipos de matrices, la primera representa la comparación entre los criterios, y la segunda muestra la comparación entre los sub criterios dentro de su respectiva categoría. Las encuestas completas se presentan en el Anexo C de este documento.

Después de la validación de los cuestionarios y la confirmación de disponibilidad y compromiso por parte de los expertos a participar en ambas rondas, se procedió a realizar el contacto vía Internet con cada uno de ellos.

5.2.3 Lanzamiento de la segunda vuelta. Diversos experimentos han demostrado que los resultados del grupo son superiores a los individuales, gracias, fundamentalmente, a la interacción que en ellos se da. El Delphi mantiene y promueve esa interacción, por lo tanto, el objetivo de los cuestionarios sucesivos es disminuir la dispersión de las opiniones y precisar la opinión media consensuada.

Una vez realizada la primera ronda de preguntas se procede a analizar cada una de las respuestas emitidas por los expertos con el fin de realizar la segunda ronda. La realización de una segunda vuelta en el estudio se plantea con un doble objetivo:

- Retroalimentar a los expertos de la información obtenida con el fin de evitar la aparición de “ruidos”, es decir, la transmisión efectiva de información no relevante para el objetivo del estudio.

- Consolidar y revalidar los resultados obtenidos en la consulta inicial.

La metodología usada para el lanzamiento de la segunda vuelta fue la siguiente:

1. Debido a la gran cantidad de datos de entrada con los que se tenía que trabajar y considerando que cada uno de estos números corresponden a un número borroso definido por 3 parámetros, se tabularon mediante Excel para cada una de las Zonas de Estudio, realizando así el tratamiento para un total de 2140 datos.
2. Para tener una visión de conjunto de los resultados obtenidos en cada una de las preguntas, se empleó la estadística a través el uso de medidas de tendencia central y dispersión. La elección de la medida estadística u otra depende del objetivo que se persigue con la utilización del proceso Delphi⁸⁶. Normalmente se utilizan dos medidas estadísticas: las que sirven para representar promedios y las indican la dispersión respecto a dicho promedio. Las medidas de promedio que se suelen usar son la media aritmética y la mediana. Las medidas de dispersión sirven para mostrar como varían los datos alrededor del promedio. Son necesarias para dos propósitos básicos; verificar la confiabilidad de los promedios, y servir de base para controlar la variación. Las medidas de dispersión más usuales son la desviación típica o desviación estándar y la desviación media⁸⁷.

En nuestro estudio se utilizó como criterio de análisis la desviación estándar la cual señaló el grado de dispersión de las respuestas para cada una de las preguntas. A continuación, se muestra un ejemplo del análisis realizado para la Alternativa Solar en la Zona Insular, así mismo se realizó para todas las tecnologías en las 4 zonas de estudio.

⁸⁶ ASTIGARRAGA, Eneko. El método Delphi. Universidad de Deusto. Facultad de CC.EE y Empresariales.

⁸⁷ Una aplicación del método Delphi borroso al modelo universitario. En línea. Disponible en: <http://www.iit.comillas.edu/pfc/resumenes/42bbd89447f87.pdf>.

Figura 14. Análisis de desviación estándar para la alternativa solar

| | | E1 | E2 | E3 | E4 | E5 | E6 | E7 | E8 | E9 | Media | Mediana | Desv. | Rango Inf | Rango Sup |
|----------------------|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|-------|-----------|-----------|
| Alternativa 1: Solar | Emisiones Co2 | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 0,00 | 10,00 | 10,00 |
| | Emisiones contaminantes | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 7,50 | 10,00 | 10,00 | 9,72 | 10,00 | 0,83 | 8,89 | 10,56 |
| | Tierra requerida | 6,00 | 2,00 | 8,00 | 4,00 | 2,00 | 8,00 | 4,00 | 6,00 | 2,00 | 4,67 | 4,00 | 2,45 | 2,22 | 7,12 |
| | Impacto del Habitat | 6,00 | 6,00 | 8,00 | 4,00 | 8,00 | 10,00 | 8,00 | 6,00 | 8,00 | 7,11 | 8,00 | 1,76 | 5,35 | 8,87 |
| | Indice Ambiental | 3,20 | 2,80 | 3,60 | 2,80 | 3,00 | 3,80 | 2,95 | 3,20 | 3,00 | 3,15 | 3,00 | 0,35 | 2,80 | 3,50 |
| | Eficiencia | 2,00 | 2,00 | 6,00 | 8,00 | 6,00 | 8,00 | 6,00 | 2,00 | 6,00 | 5,11 | 6,00 | 2,47 | 2,64 | 7,58 |
| | Madurez | 8,00 | 8,00 | 8,00 | 8,00 | 6,00 | 10,00 | 8,00 | 8,00 | 8,00 | 8,00 | 8,00 | 1,00 | 7,00 | 9,00 |
| | Confiabilidad | 3,33 | 6,67 | 6,67 | 3,33 | 10,00 | 10,00 | 6,67 | 3,33 | 6,67 | 6,30 | 6,67 | 2,61 | 3,69 | 8,90 |
| | Rutas de acceso | 6,00 | 6,00 | 6,00 | 10,00 | 6,00 | 6,00 | 6,00 | 6,00 | 6,00 | 6,44 | 6,00 | 1,33 | 5,11 | 7,78 |
| | Indice Tecnológico | 1,93 | 2,27 | 2,67 | 2,93 | 2,80 | 3,40 | 2,67 | 1,93 | 2,67 | 2,59 | 2,67 | 0,47 | 2,11 | 3,06 |
| | Creación de Empleo | 6,00 | 6,00 | 8,00 | 4,00 | 6,00 | 2,00 | 4,00 | 6,00 | 4,00 | 5,11 | 6,00 | 1,76 | 3,35 | 6,87 |
| | Aceptación Social | 6,67 | 6,67 | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 6,67 | 10,00 | 8,89 | 10,00 | 1,67 | 7,22 | 10,56 |
| | Indice Social | 1,27 | 1,27 | 1,80 | 1,40 | 1,60 | 1,20 | 1,40 | 1,27 | 1,40 | 1,40 | 1,40 | 0,19 | 1,21 | 1,59 |
| | Costo Total | 6,67 | 3,33 | 6,67 | 6,67 | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 6,67 | 10,00 | 7,78 | 6,67 | 2,36 | 5,42 | 10,13 |
| | Indice Económico | 0,67 | 0,33 | 0,67 | 0,67 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 0,67 | 1,00 | 0,78 | 0,67 | 0,24 | 0,54 | 1,01 |

Como se mencionó anteriormente se utilizó la desviación estándar para identificar aquellos expertos que se encontraban fuera del rango, esto significa que sus respuestas no están dentro del 68 % de los datos que se encuentran a una desviación estándar alrededor de la media de la distribución. Como se observa en el ejemplo, el caso de la pregunta correspondiente al sub criterio tierra requerida, las respuestas de los expertos 2, 3, 5,6, y 9 se encuentran fuera del rango, es decir sus respuestas no se encuentran dentro del intervalo [2,22-7,12]; este intervalo corresponde al valor de la media del sub criterio +/- una desviación.

$$\begin{aligned}
 \text{Tierra} & \quad \bar{X} = 4,67 \\
 \text{Requerida} & \quad \sigma = 2,45 \\
 & \quad \text{Intervalo} = 4,67 \pm 2,45 \\
 & \quad \text{Intervalo} = [2.22 - 7.12]
 \end{aligned}$$

Este procedimiento se realizó para cada una de las preguntas de cada alternativa de las cuatro zonas de estudio (Anexo D), a partir de este análisis se rediseñó cada una de las preguntas de forma personalizada para los expertos que así lo requirieran, con el fin de hacer la respectiva retroalimentación. Es decir, si la respuesta de X experto no se encontraba dentro del intervalo se le remitió la media global de la pregunta junto con su respuesta individual. A la luz de esta

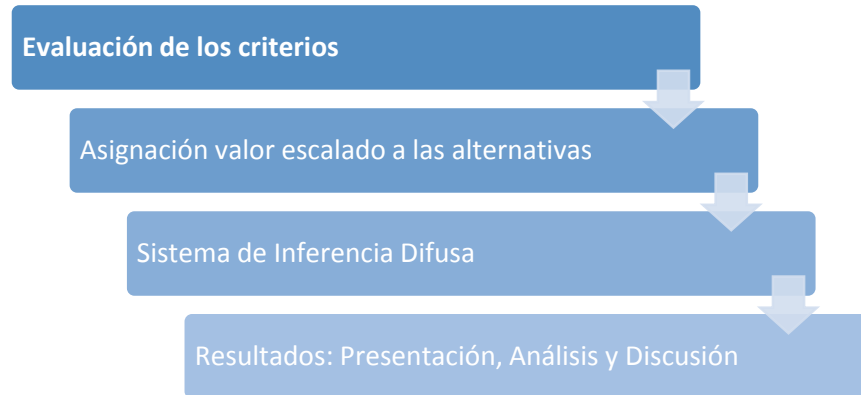
nueva información, los expertos son requeridos para que revisen sus primeras estimaciones si es que lo consideran oportuno, contrastando con su respuesta anterior y por último se solicita que vuelva a estimar que valoración ha de dar y sobre todo deben justificarla en el caso de que sea fuertemente divergente con respecto al grupo. Aunque se promueva el consenso este no es el objetivo último y no tiene por qué alcanzarse necesariamente.

Hay que destacar que en esta nueva ronda es más sencillo responder el cuestionario pues ya no se solicitan nuevas propuestas y además se ha reducido significativamente el número de elementos de la matriz que hay que evaluar. Aunque, la formulación teórica del método Delphi propiamente dicho comprende varias etapas sucesivas de envíos de cuestionarios, en buena parte de los casos puede limitarse a dos etapas, lo que sin embargo no afecta a la calidad de los resultados tal y como lo demuestra la experiencia acumulada en estudios similares.

5.3 METODOLOGÍA LÓGICA DIFUSA PARA LA EVALUACIÓN DE LOS CRITERIOS Y SELECCIÓN DE LAS ALTERNATIVAS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA EN LAS ZNI

Esta etapa consistió en realizar la evaluación de los criterios para la toma de decisiones en cuanto a la selección de alternativas de generación de energía eléctrica. La metodología desarrollada incorpora criterios de evaluación económicos, ambientales, tecnológicos y sociales de las tecnologías propuestas y está implementada en ambiente Matlab a partir del uso del método Delphi con enfoque difuso y un sistema de inferencia difusa para la asistencia en la toma de decisiones. La figura 15 muestra los pasos básicos de la metodología.

Figura 15. Pasos para el desarrollo de la metodología



5.3.1 Evaluación de los criterios ambientales, económicos, tecnológicos y sociales. En la metodología que se propone se incorporan como variables influyentes en la selección de alternativas de generación de energía eléctrica consideraciones ambientales, económicas, sociales y tecnológicas como se ha mencionado anteriormente. Estas consideraciones se representan a partir de cuatro factores denominados Criterio Ambiental (CA), Criterio Económico (CE), Criterio Social (CS) e Criterio Tecnológico (CT), para determinarlas se emplea como metodología la opinión de expertos.

El primer paso es la construcción de la matriz de opinión en la que la primera columna contiene los k sub criterios a evaluar por indicador y la segunda columna se ubica los valores de juicio dados por cada experto i (en nuestro caso, 9 expertos) para la alternativa a considerar. Cabe aclarar que los expertos evalúan de acuerdo a la escala previamente definida en la sección 3.1.2.3 para cada uno de los sub criterios. De esta forma se obtiene un total de matrices de cada uno de los cuatro criterios globales igual al producto del número de expertos por el número de alternativas. En la siguiente figura se ilustra el ejemplo de la matriz de opinión para la Alternativa Solar en la Zona 1.

Figura 16. Matriz de Opinión para la Alternativa Solar en la Zona 1

| | Sub criterios Ambiental | E1 | E2 | E3 | E4 | E5 | E6 | E7 | E8 | E9 |
|----------------------|---------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Alternativa 1: Solar | Emisiones Co2 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| | Emisiones contaminantes | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | 4 | 4 |
| | Tierra requerida | 3 | 1 | 4 | 2 | 1 | 4 | 2 | 3 | 1 |
| | Impacto del Habitud | 3 | 3 | 4 | 2 | 4 | 5 | 4 | 3 | 4 |
| | Sub criterio Tecnológico | | | | | | | | | |
| | Eficiencia | 1 | 1 | 3 | 4 | 3 | 4 | 3 | 1 | 3 |
| | Madurez | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | 5 | 4 | 4 | 4 |
| | Confiabilidad | 1 | 2 | 2 | 1 | 3 | 3 | 2 | 1 | 2 |
| | Rutas de acceso | 3 | 4 | 4 | 3 | 4 | 4 | 3 | 3 | 2 |
| | Sub criterio Social | | | | | | | | | |
| | Creación de Empleo | 3 | 3 | 4 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 2 |
| | Aceptación Social | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 |
| | Sub criterio | | | | | | | | | |
| | Costo Total | 2 | 1 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 2 | 4 |

Dado que las opiniones de los expertos están representadas por un término lingüístico es necesario normalizarlas a una escala de 1 a 10 por medio de un número difuso triangular. La normalización se hace mediante una distribución lineal que conlleve a un valor escalado global. Por ende, como segundo paso se construye una matriz en la cual los elementos de cada k sub criterio se encuentra normalizado como se muestra en la siguiente figura:

Figura 17. Matriz de juicios normalizada

| | Sub criterios ambiental | E1 | E2 | E3 | E4 | E5 | E6 | E7 | E8 | E9 |
|----------------------|--------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Alternativa 1: Solar | Emisiones Co2 | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 |
| | Emisiones contaminantes | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 7,50 | 10,00 | 10,00 |
| | Tierra requerida | 6,00 | 2,00 | 8,00 | 4,00 | 2,00 | 8,00 | 4,00 | 6,00 | 2,00 |
| | Impacto del Habitud | 6,00 | 6,00 | 8,00 | 4,00 | 8,00 | 10,00 | 8,00 | 6,00 | 8,00 |
| | Sub criterios ambiental | | | | | | | | | |
| | Eficiencia | 2,00 | 2,00 | 6,00 | 8,00 | 6,00 | 8,00 | 6,00 | 2,00 | 6,00 |
| | Madurez | 8,00 | 8,00 | 8,00 | 8,00 | 6,00 | 10,00 | 8,00 | 8,00 | 8,00 |
| | Confiabilidad | 3,33 | 6,67 | 6,67 | 3,33 | 10,00 | 10,00 | 6,67 | 3,33 | 6,67 |
| | Rutas de acceso | 6,00 | 6,00 | 6,00 | 10,00 | 6,00 | 6,00 | 6,00 | 6,00 | 6,00 |
| | Tiempo de Implementación | 10,00 | 10,00 | 3,33 | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 6,67 |
| | Sub criterios ambiental | | | | | | | | | |
| | Creación de Empleo | 6,00 | 6,00 | 8,00 | 4,00 | 6,00 | 2,00 | 4,00 | 6,00 | 4,00 |
| | Aceptación Social | 6,67 | 6,67 | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 6,67 | 10,00 |
| | Sub criterios ambiental | | | | | | | | | |
| Costo Total | 6,67 | 3,33 | 6,67 | 6,67 | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 6,67 | 10,00 | |

En el tercer paso se calculan los factores de los criterios ambientales, sociales, económicos y tecnológicos por experto en cada alternativa, para realizar este proceso es necesario calcular el peso de cada sub criterio, el cual se obtiene a partir de la metodología AHP que utiliza comparaciones entre pares de elementos, construyendo matrices a partir de estas comparaciones.

En este estudio estas comparaciones se realizaron mediante la encuesta 2 realizada a los expertos anteriormente mencionados, en la cual se hace uso de la escala de evaluación de 9 puntos de Saaty en la que se asigna un valor numérico entre 1 y 9 dependiendo de la importancia relativa entre cada uno de los sub criterios, para el caso en el que el sub criterio es menos predominante se asigna la calificación inversa, por ejemplo, 1/9. Siendo el sub criterio más importante aquel que obtenga por parte de los expertos la calificación más favorable en relación a la consecución del objetivo global.

A continuación, se muestra un ejemplo para hallar el peso de los sub criterios pertenecientes al criterio ambiental. Las siguientes matrices corresponden a las evaluaciones emitidas por los expertos.

Tabla 5. Matriz de comparación por parejas de los cuatro sub criterios por el evaluador 1

| Criterios Ambientales | | C1 | C2 | C3 | C4 |
|-----------------------|------------------------|-----|-----|----|----|
| C1 | Emisiones de CO2 | 1 | 1 | 3 | 3 |
| C2 | Residuos Contaminantes | 1 | 1 | 3 | 3 |
| C3 | Tierra requerida | 1/3 | 1/3 | 1 | 1 |
| C4 | Impacto del Hábitat | 1/3 | 1/3 | 1 | 1 |

Tabla 6. Matriz de comparación por parejas de los cuatro sub criterios por el evaluador 2

| Criterios Ambientales | | C1 | C2 | C3 | C4 |
|-----------------------|------------------------|-----|-----|----|-----|
| C1 | Emisiones de CO2 | 1 | 1 | 3 | 1 |
| C2 | Residuos Contaminantes | 1 | 1 | 3 | 1 |
| C3 | Tierra requerida | 1/3 | 1/3 | 1 | 1/3 |
| C4 | Impacto del Hábitat | 1 | 1 | 3 | 1 |

Tabla 7. Matriz de comparación por parejas de los cuatro sub criterios por el evaluador 3

| Criterios Ambientales | | C1 | C2 | C3 | C4 |
|-----------------------|------------------------|-----|-----|----|----|
| C1 | Emisiones de CO2 | 1 | 1 | 7 | 1 |
| C2 | Residuos Contaminantes | 1 | 1 | 7 | 1 |
| C3 | Tierra requerida | 1/7 | 1/7 | 1 | 1 |
| C4 | Impacto del Hábitat | 1 | 1 | 1 | 1 |

Tabla 8. Matriz de comparación por parejas de los cuatro sub criterios por el evaluador 4

| Criterios Ambientales | | C1 | C2 | C3 | C4 |
|-----------------------|------------------------|-----|-----|----|-----|
| C1 | Emisiones de CO2 | 1 | 1 | 3 | 1 |
| C2 | Residuos Contaminantes | 1 | 1 | 3 | 1 |
| C3 | Tierra requerida | 1/3 | 1/3 | 1 | 1/3 |
| C4 | Impacto del Hábitat | 1 | 1 | 3 | 1 |

Tabla 9. Matriz de comparación por parejas de los cuatro sub criterios por el evaluador 5

| Criterios Ambientales | | C1 | C2 | C3 | C4 |
|-----------------------|------------------------|----|-----|-----|-----|
| C1 | Emisiones de CO2 | 1 | 1/3 | 1/5 | 1/5 |
| C2 | Residuos Contaminantes | 3 | 1 | 3 | 3 |
| C3 | Tierra requerida | 5 | 1/3 | 1 | 1 |
| C4 | Impacto del Hábitat | 5 | 1/3 | 1 | 1 |

Tabla 10. Matriz de comparación por parejas de los cuatro sub criterios por el evaluador 6

| Criterios Ambientales | | C1 | C2 | C3 | C4 |
|-----------------------|------------------------|-----|-----|----|----|
| C1 | Emisiones de CO2 | 1 | 1 | 3 | 1 |
| C2 | Residuos Contaminantes | 1 | 1 | 3 | 1 |
| C3 | Tierra requerida | 1/3 | 1/3 | 1 | 1 |
| C4 | Impacto del Hábitat | 1 | 1 | 1 | 1 |

Tabla 11. Matriz de comparación por parejas de los cuatro sub criterios por el evaluador 7

| Criterios Ambientales | | C1 | C2 | C3 | C4 |
|-----------------------|------------------------|-----|-----|----|-----|
| C1 | Emisiones de CO2 | 1 | 1/7 | 7 | 1/5 |
| C2 | Residuos Contaminantes | 7 | 1 | 7 | 1/5 |
| C3 | Tierra requerida | 1/7 | 1/7 | 1 | 1/7 |
| C4 | Impacto del Hábitat | 5 | 5 | 7 | 1 |

Tabla 12. Matriz de comparación por parejas de los cuatro sub criterios por el evaluador 8

| Criterios Ambientales | | C1 | C2 | C3 | C4 |
|-----------------------|------------------------|----|-----|-----|-----|
| C1 | Emisiones de CO2 | 1 | 1/5 | 1/3 | 1/5 |
| C2 | Residuos Contaminantes | 5 | 1 | 3 | 3 |
| C3 | Tierra requerida | 3 | 1/3 | 1 | 1 |
| C4 | Impacto del Hábitat | 5 | 1/3 | 1 | 1 |

Tabla 13. Matriz de comparación por parejas de los cuatro sub criterios por el evaluador 9

| Criterios Ambientales | | C1 | C2 | C3 | C4 |
|-----------------------|------------------------|-----|-----|----|-----|
| C1 | Emisiones de CO2 | 1 | 1 | 5 | 5 |
| C2 | Residuos Contaminantes | 1 | 1 | 5 | 5 |
| C3 | Tierra requerida | 1/5 | 1/5 | 1 | 1/5 |
| C4 | Impacto del Hábitat | 1/5 | 1/5 | 5 | 1 |

Estas matrices se sintetizaron utilizando el código “*Factores de peso AHP*” programado en Matlab. (Anexo E) para obtener la matriz integrada de puntuación (ISM por sus siglas en inglés) en donde se empleó el método de promedio geométrico el cual se define en la siguiente ecuación.

$$ISM = \left(\prod_{i=1}^m X_{ij} \right)^{1/m} ; \forall j$$

Donde X_{ij} representa el puntaje designado por el evaluador i para cada par de comparación j y m el número total

Tabla 14. Matriz integrada de puntuación para el criterio ambiental

| Criterios Ambientales | | C1 | C2 | C3 | C4 |
|-----------------------|------------------------|-------|-------|-------|-------|
| C1 | Emisiones de CO2 | 1 | 0,596 | 2,222 | 0,790 |
| C2 | Residuos Contaminantes | 1,678 | 1 | 3,833 | 1,442 |
| C3 | Tierra requerida | 0,450 | 0,783 | 1 | 0,527 |
| C4 | Impacto del Hábitat | 1,266 | 0,037 | 1,895 | 1 |

Para realizar el cálculo de los vectores de peso se normalizan los elementos de la ISM, usando la siguiente ecuación:

$$r'_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{k=1}^n r_{k,j}} \quad i = 1, 2, \dots, n$$

Donde n indica el tamaño de la ISM, siendo i sus filas y j sus columnas.

Seguidamente se calcula el vector de peso (W_i), el cual indica la importancia relativa de cada sub criterio en el criterio ambiental, eso se hace mediante la siguiente ecuación:

$$W_i = \frac{1}{n} * \sum_{j=1}^n r'_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, n$$

Tabla 15. Vector de peso de la ISM para el criterio ambiental

| Emisiones de CO2 | Residuos Contaminantes | Tierra requerida | Impacto del hábitat |
|------------------|------------------------|------------------|---------------------|
| 0,230 | 0,396 | 0,114 | 0,259 |

Para los criterios y sub criterios restantes se realizó el procedimiento mostrado anteriormente, los resultados se muestran en la Tabla 16. Los factores de peso obtenidos determinan la importancia relativa de cada sub criterio por criterio,

resaltando que cuanto más grande sea el valor de cada uno de estos más favorece el objetivo global.

Tabla 16. Factor de peso de los sub criterios

| Criterios | Sub criterios | Factores de Peso |
|-----------------------------|------------------------|------------------|
| Criterio Ambiental | Emisiones de CO2 | 0,230 |
| | Residuos Contaminantes | 0,396 |
| | Tierra requerida | 0,114 |
| | Impacto del hábitat | 0,259 |
| Criterio Tecnológico | Eficiencia | 0,267 |
| | Madurez | 0,359 |
| | Confiabilidad | 0,281 |
| | Rutas de acceso | 0,092 |
| Criterio Social | Creación de empleo | 0,554 |
| | Aceptación social | 0,445 |
| Criterio Económico | Costo total | 1 |

Los sub criterios con mayor influencia sobre el objetivo global son: Residuos contaminantes, impacto del hábitat, madurez, confiabilidad, creación de empleo y costo total correspondientes a los criterios ambiental, tecnológico, social y económico.

Una vez hallado el peso de los sub criterios se procedió a calcular el valor de los criterios por experto según la siguiente ecuación:

$$C = \frac{\sum_k^n W_k * Valor Normalizado_{ik}}{10}$$

La anterior fórmula representa la multiplicación del valor normalizado de cada uno de los sub criterios por el peso de global de este sub criterio, y el valor del criterio

corresponde a la suma de estos, dividido en 10. Obteniendo finalmente un número entre 0 y 1 que representa el valor del criterio para cada alternativa por experto.

Figura 18. Criterios de los expertos para la Alternativa Solar en la Zona Insular

| | Sub criterios ambiental | E1 | E2 | E3 | E4 | E5 | E6 | E7 | E8 | E9 |
|----------------------|--------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Alternativa 1: Solar | Emisiones Co2 | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 |
| | Emisiones contaminantes | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 7,50 | 10,00 | 10,00 |
| | Tierra requerida | 6,00 | 2,00 | 8,00 | 4,00 | 2,00 | 8,00 | 4,00 | 6,00 | 2,00 |
| | Impacto del Habidad | 6,00 | 6,00 | 8,00 | 4,00 | 8,00 | 10,00 | 8,00 | 6,00 | 8,00 |
| | Sub criterios ambiental | 0,84 | 0,76 | 0,92 | 0,76 | 0,80 | 0,96 | 0,77 | 0,84 | 0,80 |
| | Eficiencia | 2,00 | 2,00 | 6,00 | 8,00 | 6,00 | 8,00 | 6,00 | 2,00 | 6,00 |
| | Madurez | 8,00 | 8,00 | 8,00 | 8,00 | 6,00 | 10,00 | 8,00 | 8,00 | 8,00 |
| | Confiabilidad | 3,33 | 6,67 | 6,67 | 3,33 | 10,00 | 10,00 | 6,67 | 3,33 | 6,67 |
| | Rutas de acceso | 6,00 | 6,00 | 6,00 | 10,00 | 6,00 | 6,00 | 6,00 | 6,00 | 6,00 |
| | Tiempo de Implementación | 10,00 | 10,00 | 3,33 | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 6,67 |
| | Sub criterios ambiental | 0,56 | 0,66 | 0,57 | 0,74 | 0,82 | 0,90 | 0,74 | 0,56 | 0,66 |
| | Creación de Empleo | 6,00 | 6,00 | 8,00 | 4,00 | 6,00 | 2,00 | 4,00 | 6,00 | 4,00 |
| | Aceptación Social | 6,67 | 6,67 | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 6,67 | 10,00 |
| | Sub criterios ambiental | 0,49 | 0,49 | 0,68 | 0,44 | 0,56 | 0,32 | 0,44 | 0,49 | 0,44 |
| | Costo Total | 6,67 | 3,33 | 6,67 | 6,67 | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 6,67 | 10,00 |

Al obtener cada uno de los criterios sociales, económicos, ambientales y tecnológicos por cada una de las alternativas de generación de energía se construye la matriz de datos para el método Delphi con enfoque difuso. Esta matriz está compuesta de tantas filas como alternativas se vayan a evaluar, en nuestro caso son cinco alternativas; y el número de columnas coincide con los expertos.

Figura 19. Criterio ambiental de los expertos para cada alternativa de la Zona Insular

| Alternativa | E1 | E2 | E3 | E4 | E5 | E6 | E7 | E8 | E9 |
|-------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Solar | 0,85 | 0,80 | 0,80 | 0,78 | 0,90 | 0,95 | 0,78 | 0,85 | 0,76 |
| Eólica | 0,85 | 0,80 | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 0,87 | 0,68 | 0,93 | 0,73 |
| Diésel | 0,35 | 0,54 | 0,56 | 0,35 | 0,51 | 0,33 | 0,51 | 0,56 | 0,43 |

Por último, se repite este procedimiento para cada criterio en cada Zona. En el Anexo F se encuentra los resultados de los pasos anteriormente descritos.

5.3.2 Asignar un valor escalado a las alternativas según el consenso generalizado de los expertos. En todo estudio prospectivo se enfrenta con la necesidad de formar consenso entre un número de expertos de más de dos personas, por lo que se requiere un esquema matemático que permita hacer comparaciones entre parejas de expertos. En este estudio se aplicará el método Delphi con enfoque difuso del cual se obtienen los números difusos globales que integran la opinión de los expertos y que cuantifican los criterios globales de cada alternativa. Este proceso se describirá a continuación:

Enfoque difuso de los criterios de expertos ⁸⁸

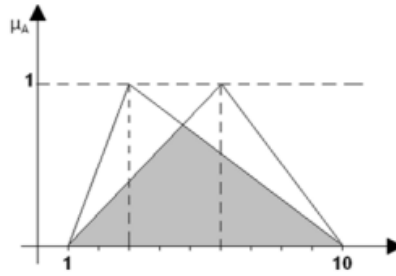
Cada una de las opiniones emitidas por los expertos para identificar las alternativas más importantes se asocia a un número difuso triangular A. La cima α (o el centro) de este número triangular difuso coincide con el criterio del experto de manera que: $\alpha \in [1,2,3,4,5,6,7,8,9,10]$

Este número difuso tiene un ancho $\theta > 0$ a la izquierda y un ancho $\lambda > 0$ a la derecha tal que $\alpha - \theta = 1$ y $\alpha + \lambda = 10$, o sea: $\theta = \alpha - 1$ $\lambda = 10 - \alpha$

El número difuso triangular puede expresarse como $A = (\alpha, \theta, \lambda)$. En la figura 21 se muestra la representación de dos opiniones definidas por números difusos. El área de intersección representa el grado de coincidencia de las opiniones.

⁸⁸ RAMOS, Fernando, et al. Modelo de decisión para seleccionar alternativas de inversiones de reconversión azucarera y biorrefinerías basado en el método DELPHI con enfoque difuso ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar [en línea] 2014. [Consultado: 20 de agosto de 2015]. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223131465006>.

Figura 20. Intersección entre dos opiniones



Fuente: Modelo de decisión para seleccionar alternativas de inversiones de reconversión azucarera y biorrefinerías basado en el método DELPHI con enfoque difuso.

Para formar el consenso entre los expertos, se requiere un procedimiento que permita hacer comparaciones entre parejas de expertos. Para esto se construye una matriz cuyas filas y columnas estén identificadas con los expertos y cuyos elementos sean igual al valor del cociente, entre el área de intersección y el área de unión, o sea, los elementos de esta matriz representarán el grado de consenso entre dos expertos. Esta es una matriz cuadrada simétrica (figura 21) denominada Matriz de Acuerdo, e indica cuán cercanas están las opiniones entre cada par de expertos. Los elementos de la diagonal principal son iguales a uno, ya que el grado de consenso de un experto consigo mismo es del 100 %.

Figura 21. Matriz de acuerdo

| | e_1 | e_2 | e_3 | e_4 | | e_n |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| e_1 | 1 | | | | | |
| e_2 | | 1 | | | | |
| e_3 | | | 1 | | | |
| e_4 | | | | 1 | | |
| ⋮ | | | | | 1 | |
| ⋮ | | | | | | 1 |
| ⋮ | | | | | | |
| e_n | | | | | | 1 |

Fuente: Modelo de decisión para seleccionar alternativas de inversiones de reconversión azucarera y biorrefinerías basado en el método DELPHI con enfoque difuso

Los pasos para establecer el consenso son los siguientes:

- Grado de coincidencia entre las opiniones de los expertos: El grado de coincidencia entre los expertos 1 y 2 se determina por la intersección de los números difusos. Un área mayor, producto de la intersección entre los expertos indica mayor grado de coincidencia.
- Importancia de cada experto: El procedimiento para determinar el consenso generalizado considera el nivel de importancia de cada experto. Este factor se puede determinar valorando la experiencia, conocimiento y experticia en el tema a tratar, por lo cual se le asocia a un factor r_i (grado de importancia del experto i). Con el propósito de generar una escala uniforme, se utiliza una medida relativa (w_i) que toma valores entre cero y uno. El grado de importancia relativa w_i se determina como:

$$w_i = \frac{r_i}{\sum_{i=1}^n r_i}, \text{ donde } i = 1, 2, \dots, n$$

- Nivel de acuerdo: Un aspecto importante que se debe establecer es el nivel de acuerdo que existe entre la opinión de los expertos, porque en la medida que esta cifra sea mayor, la estimación definitiva del juicio del criterio tendrá mayor consistencia y el error será menor entre el número fuzzy de consenso global (respuesta de grupo) y los diversos números fuzzy individuales.

Suponiendo que las opiniones de dos expertos presenten la misma área de intersección no significa que tengan el mismo nivel de acuerdo, esto obliga a tener en cuenta no sólo el grado de coincidencia entre las opiniones sino el área total que ocupan los dos números fuzzy.

Para solucionar dicho inconveniente se define un cociente entre la intersección y la unión de los dos números difusos triangulares, este valor se conoce como la función de medida de la similitud $S(\hat{R}_i, \hat{R}_j)$ o grado de consenso entre el experto E1 y el experto E2. Esta función permite calcular el nivel de acuerdo, mediante la siguiente expresión:

$$S(\hat{R}_i, \hat{R}_j) = \frac{\int (\min(\{\mu_{R_i}(x), \mu_{R_j}(x)\}) dx}{\int (\max(\{\mu_{R_i}(x), \mu_{R_j}(x)\}) dx}$$

En la expresión anterior el numerador no es más que el área de intersección de los dos números difusos y el denominador es el área de la unión.

- Matriz de Acuerdo: Después que se han medido todos los niveles de acuerdo entre los expertos se construye la matriz de acuerdo (MA) de la siguiente manera:

$$MA = \begin{bmatrix} 1 & S_{12} & S_{13} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & 1 & S_{23} & \cdots & S_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & S_{n3} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix}$$

Donde:

$$S_{ij} = S(\tilde{R}_i, \tilde{R}_j), \quad \forall i \neq j \text{ y } S_{ij} = 1, \quad \forall i = j$$

- Nivel de acuerdo relativo: El nivel de acuerdo relativo del experto E_i ($i=1, 2, \dots, n$) se calcula como:

$$NAR_i = \frac{A(E_i)}{\sum_{i=1}^n A(E_i)}$$

Dónde: $A(E_i)$ es el nivel de acuerdo promedio para cada uno de los expertos, que no tiene en cuenta el valor de la diagonal en el cálculo, o sea:

$$A(E_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n S_{ij}$$

- Coeficiente del nivel de consenso: Se define para cada experto E_i ($i=1, 2, \dots, n$) como:

$$CNC_i = \beta \cdot W_i + (1 - \beta) \cdot NAR_i$$

Donde β es un coeficiente que permite ponderar el peso que se da tanto al nivel de acuerdo relativo como al grado de importancia relativo en la respuesta final

- Número difuso global \hat{R} : Este es quien integra la opinión de los expertos. A partir de la definición del coeficiente del nivel de consenso del experto E_i ($i=1, 2, \dots, n$), se define como:

$$\hat{R} = \sum_{i=1}^n CNC_i \cdot \hat{R}_i$$

El coeficiente del nivel de consenso (CNC_i) de cada experto es una buena medida para evaluar el mérito relativo que tiene la estimación de cada uno de los expertos (Kjir & Yuan, 1995).

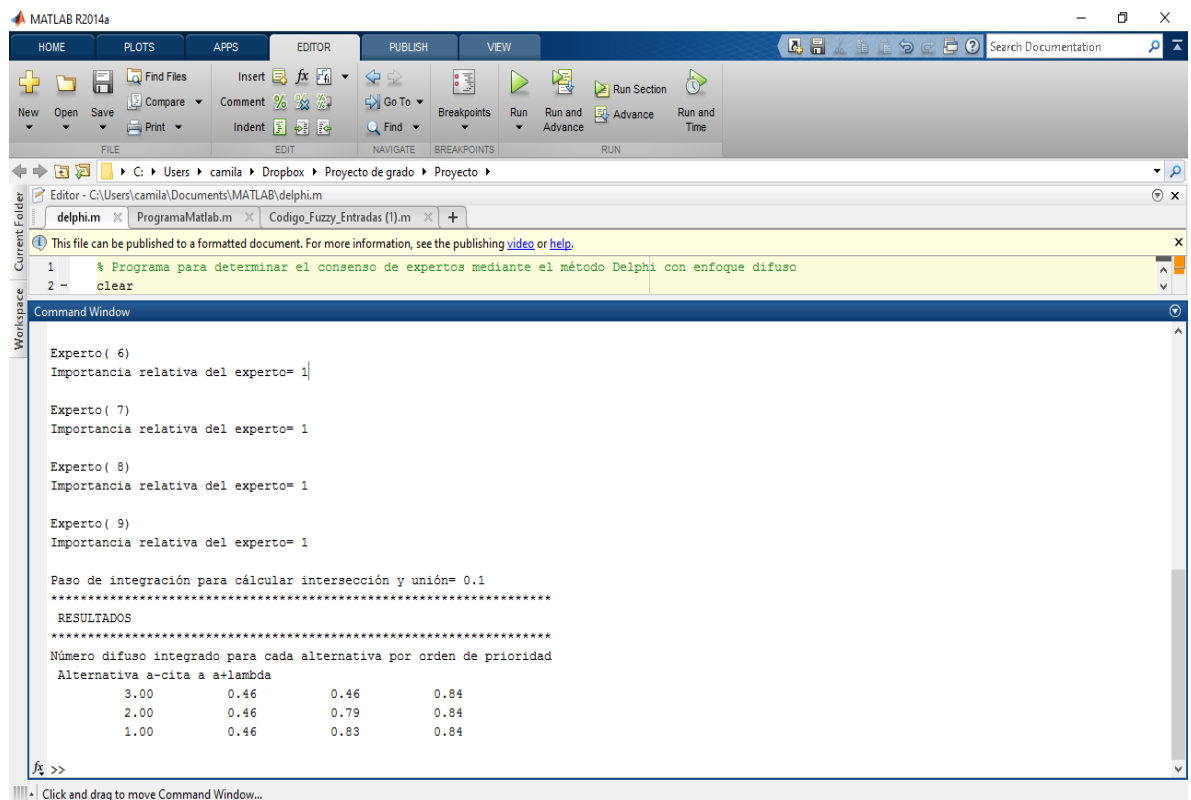
En resumen, el procedimiento permite integrar la opinión difusa de cada uno de los expertos consultados dentro de un único número difuso que representa la opinión común. En nuestro estudio cada una de las opiniones de los expertos se integró dando como resultado un criterio global para cada una de las alternativas.

El método Delphi con enfoque difuso descrito anteriormente se implementó en una aplicación en Matlab versión R2014a (8.3.0.532). El programa solicita como datos de entrada un documento en Excel el cual contiene la matriz de datos, en donde las filas corresponden a las alternativas y las columnas constituyen la opinión normalizada de los expertos. A su vez solicita el coeficiente β y el grado de importancia de cada experto. Para este caso se determinó un valor de β de 0,5 dado que se requiere que el nivel de acuerdo relativo y el grado de importancia impacten de igual manera en la respuesta final. Y respecto al grado de importancia se determinó el mismo peso para cada uno de los expertos ya que todos tienen experiencia y estudios en el sector energético y afines⁸⁹.

El software identifica la cantidad de alternativas y de expertos, realiza los respectivos cálculos y devuelve el número difuso integrado el cual es representativo de la opinión grupal de los expertos. Este número difuso global es considerado para cada criterio en cada una de las alternativas.

⁸⁹ RAMOS, Miranda et al. Modelo de decisión para seleccionar alternativas de inversiones de reconversión azucarera y biorrefinerías basado en el método DELPHI con enfoque difuso. ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar, vol. 48, núm. 2, mayo-agosto, 2014, pp. 42-49.

Figura 22. Ventana mostrando resultados de la corrida del Software para el criterio ambiental en la Zona 1.



Finalmente se construye una matriz que contiene los criterios globales para cada alternativa como se muestra en la Tablas 17,18,19 y 20, estas tablas constituyen una de las entradas de datos al sistema de inferencia difusa que se describe posteriormente, y es la cuantificación numérica de las variables cualitativas incluidas.

Tabla 17. Zona 1 Insular (San Andrés).

| Alternativa | Criterio Ambiental | Criterio Tecnológico | Criterio Social | Criterio Económico |
|---------------|--------------------|----------------------|-----------------|--------------------|
| Solar | 0,83 | 0,59 | 0,69 | 0,51 |
| Eólica | 0,79 | 0,68 | 0,76 | 0,54 |
| Diésel | 0,46 | 0,82 | 0,66 | 0,38 |

Tabla 18. Zona 2 Sur: Putumayo (Valle del Guamuez)

| Alternativa | Criterio Ambiental | Criterio Tecnológico | Criterio Social | Criterio Económico |
|---------------------|--------------------|----------------------|-----------------|--------------------|
| Solar | 0,83 | 0,59 | 0,73 | 0,51 |
| Gasificación | 0,63 | 0,70 | 0,81 | 0,54 |
| PCH | 0,84 | 0,81 | 0,82 | 0,65 |
| Diésel | 0,46 | 0,83 | 0,67 | 0,39 |

Tabla 19. Zona 3 Oriente: Meta (La Macarena y Puerto Concordia)

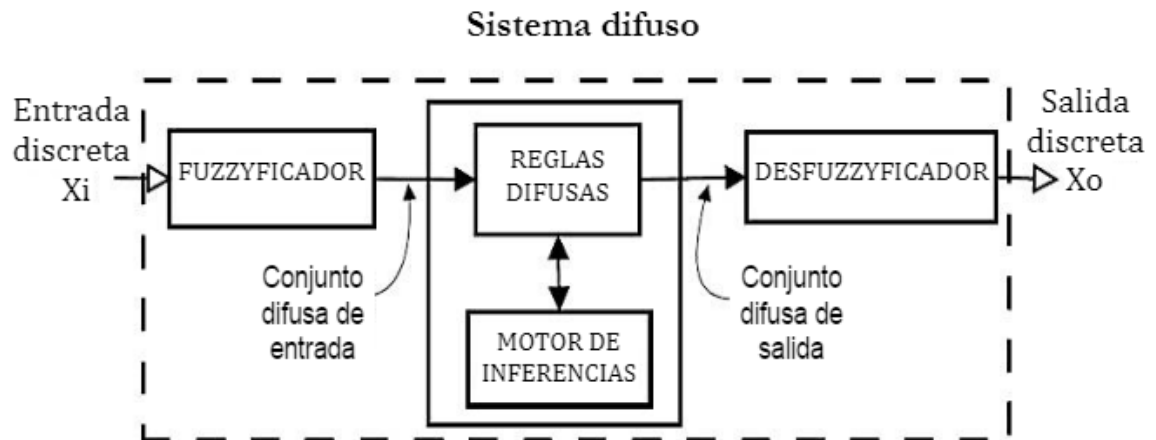
| Alternativa | Criterio Ambiental | Criterio Tecnológico | Criterio Social | Criterio Económico |
|---------------------|--------------------|----------------------|-----------------|--------------------|
| Solar | 0,83 | 0,59 | 0,70 | 0,51 |
| Gasificación | 0,63 | 0,70 | 0,80 | 0,54 |
| PCH | 0,84 | 0,81 | 0,78 | 0,64 |
| Diésel | 0,46 | 0,82 | 0,68 | 0,39 |

Tabla 20. Zona 4 Occidente: Chocó (Medio Atrato y Alto Baudó)

| Alternativa | Criterio Ambiental | Criterio Tecnológico | Criterio Social | Criterio Económico |
|---------------------|--------------------|----------------------|-----------------|--------------------|
| Solar | 0,83 | 0,58 | 0,68 | 0,51 |
| Gasificación | 0,63 | 0,69 | 0,79 | 0,54 |
| PCH | 0,84 | 0,80 | 0,74 | 0,65 |
| Diésel | 0,46 | 0,81 | 0,60 | 0,39 |

5.3.3 Sistema de inferencia difusa. La inferencia difusa puede definirse como el proceso de obtener un valor de salida para un valor de entrada empleando la teoría de conjuntos difusos, el cual permite incorporar en los modelos, un componente de incertidumbre que los hace más efectivos en términos de aproximación de la realidad. En ellos emplean variables lingüísticas usadas para manejar información cualitativa o cuantitativa imprecisa, de esta manera el contenido de las variables se puede etiquetar al tomar como valores palabras del lenguaje natural. En el sistema de inferencia difusa lo primero es la formación de una base de conocimiento dada por un experto en el problema a tratar, por esta razón es necesario definir la forma y rango de las etiquetas de todas las variables en términos difusos. El proceso del diseño del sistema de inferencia difuso utilizado en este proyecto es el modelo de Mamdani el cual consta de 3 pasos como se muestra en la figura:

Figura 23. Sistema de Inferencia Difuso.



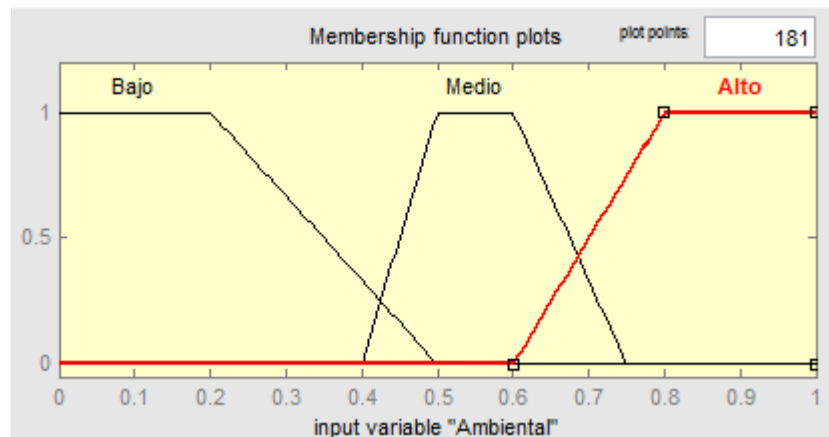
Fuente: Encarnación, Yamir. La lógica difusa aplicada al sector manufacturero. Instituto tecnológico de Santo Domingo. Diciembre 2013.

El sistema de decisión difuso se implementó utilizando el Toolbox Fuzzy Logic de Matlab versión R2014a (8.3.0.532). Este sistema es de tipo Mamdani y determina el atractivo de una alternativa para la generación de energía eléctrica en las zonas de estudio. A continuación, se mostrarán las etapas en el proceso de inferencia:

1. Fusificación: El primer paso consiste en tomar los valores de las entradas y determinar el grado de pertenencia de estas entradas a los conjuntos difusos asociados. En nuestro caso son cuatro las variables de entradas: el criterio ambiental, el criterio económico, el criterio social y el criterio tecnológico.

La fusificación de cada variable consistió en la asignación de una función de pertenencia o conjunto borroso y dado que todos los criterios del sistema tenían el mismo rango (0 a 1) utilizamos los valores lingüísticos bajo, medio y alto para cada uno de ellos. Las funciones de pertenencia utilizadas son trapezoidales. La figura 24 muestra los rangos y las etiquetas definidas para las variables, las funciones de pertenencia se definieron a través de cuatro parámetros: a, b, c, d.

Figura 24. Fusificación de las variables de entrada



2. Evaluación de reglas: A continuación, se realizó la inferencia, la cual consiste en la asignación de las reglas que definen el sistema. Para esto, se tuvieron en cuenta todas las posibles combinaciones entre las funciones altas, medias y bajas de cada índice (el número de combinaciones posibles es 81 y está dado por 3^n base 3 por ser un sistema de tres funciones de pertenencia, es decir alto-medio-bajo y n es el número de índices). Las respuestas del sistema se basaron de acuerdo a un puntaje determinado para cada etiqueta, establecidos de la siguiente forma:

- Alto: 10 puntos
- Medio: 5 puntos
- Bajo: 0 puntos

Es decir, la combinación de las etiquetas dadas a cada índice determina el puntaje obtenido por alternativa. Entre mayor sea el puntaje será mayor el valor de la alternativa.

Tabla 21. Categorías lingüísticas para la defusificación de las alternativas

| Categorías lingüísticas | Puntaje obtenido |
|-------------------------|------------------|
| Muy Elegible | 35-40 |
| Elegible | 25-30 |
| Medianamente Elegible | 15-20 |
| Poco Elegible | 0-10 |

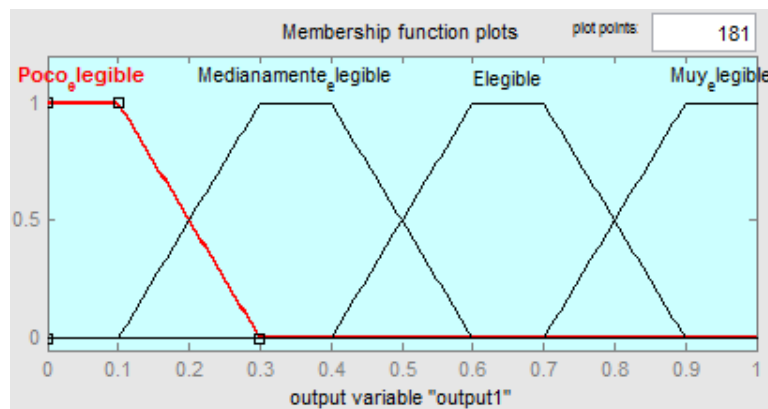
A continuación, se muestra un ejemplo de la estructura general de las reglas:

Regla N. 12. SI (Criterio Ambiental es alto) y (Criterio económico es medio) y (Criterio Social es alto) y (Criterio tecnológico es bajo) entonces (la evaluación de la tecnología es Elegible). Ver Anexo G.

3. Desfusificación: En esta etapa se toma como entrada el conjunto difuso anteriormente obtenido, y se encarga de transformar los valores difusos al terminar las evaluaciones de las reglas y convertirlos en valores dentro del dominio de las variables de salida.

La variable de salida se ha estructurado en cuatro funciones de pertenencia "Trapezoidal-shaped membership function" (trapmf) para describir las cuatro categorías: Poco elegible, Medianamente Elegible, Elegible y Muy Elegible, distribuidas en un rango de 0 a 1 que representan el valor de la evaluación de la tecnología, como se muestra a continuación en la Figura 25.

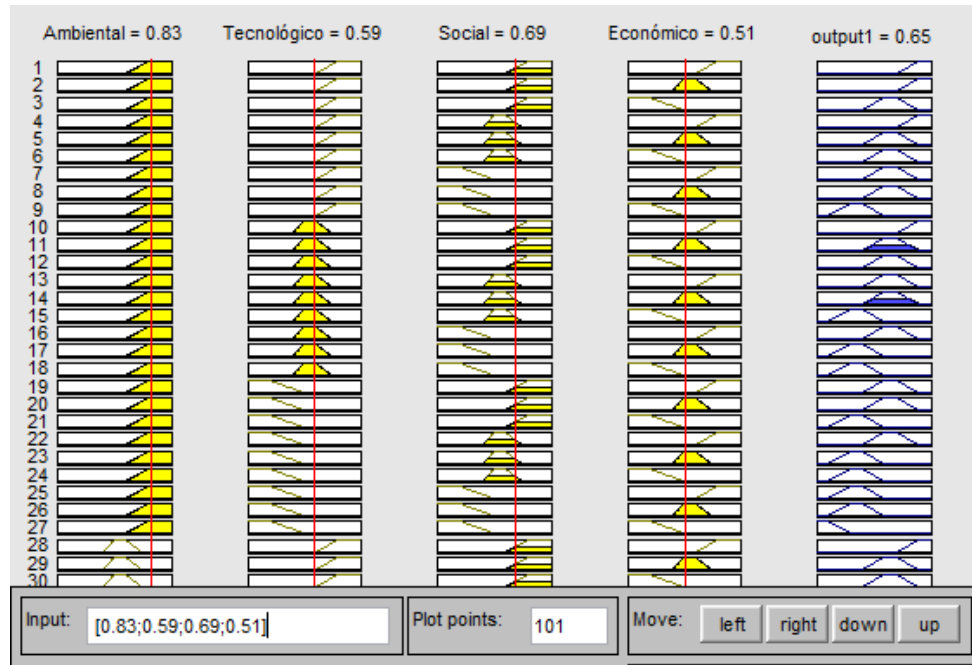
Figura 25. Respuesta a la variable de salida.



Un ejemplo de aplicación que ilustra el funcionamiento de este sistema de Inferencia difuso es el caso de una alternativa "Solar" en la Zona 1 con los siguientes datos resultado de su evaluación: Criterio económico = 0,51, Criterio

Tecnológico = 0,59, Criterio Ambiental = 0,83 y el Criterio Social = 0,69. Para este caso el visor de reglas se muestra en la figura 26 con una salida igual a 0,65 lo que tiene mayor grado de pertenencia Elegible.

Figura 26. Reglas del Sistema de Inferencia



Las siguientes figuras corresponden a los gráficos de superficie que muestran el comportamiento de la salida en función de dos entradas seleccionadas, manteniendo los dos restantes en valores previamente seleccionados.

Figura 27. Variable de Salida Vs C.Tecnológico y C. Ambiental para un C. Social =0,69 y un C. Económico = 0,51

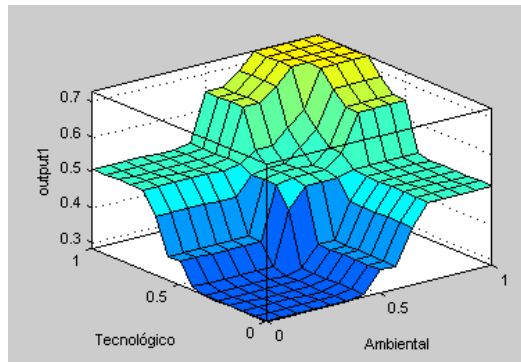


Figura 28. Variable de Salida Vs C.Social y C. Ambiental para un C. Tecnológico =0,59 y un C. Económico = 0,51

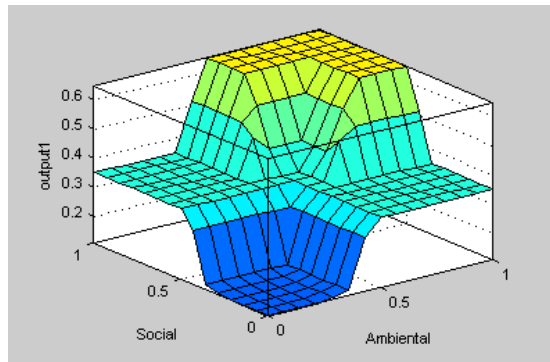


Figura 29. Variable de Salida Vs C.Económico y C. Ambiental para un C. Tecnológico =0,59 y un C. Social = 0,69

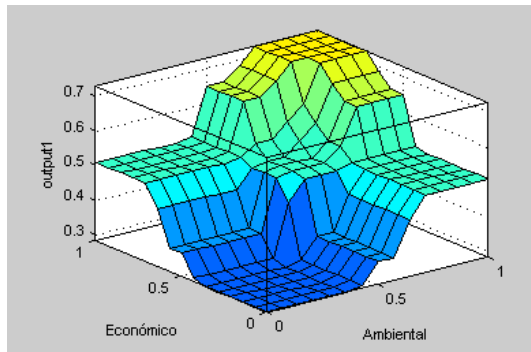


Figura 30. Variable de Salida Vs C.Social y C. Tecnológico para un C. Ambiental =0,83 y un C. Económico = 0,51

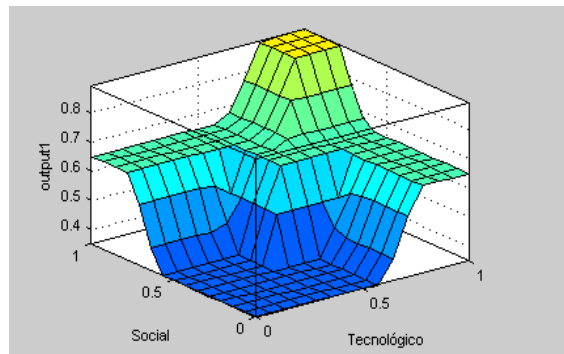


Figura 31. Variable de Salida Vs C.Económico y C. Tecnológico para un C. Ambiental =0,83 y un C. Social = 0,69

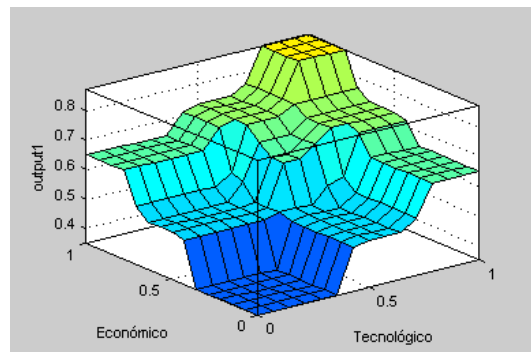
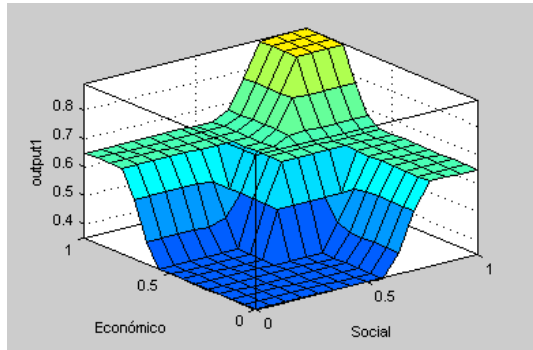


Figura 32. Variable de Salida Vs C.Económico y C. Social para un C. Ambiental =0,83 y un C. Tecnológico = 0,59



5.3.4 Resultados: Presentación, análisis, discusión y principales conclusiones. El desarrollo metodológico anterior permitió identificar las alternativas con mayor elegibilidad en las zonas de estudio. La figura 33 muestra gráficamente los resultados consolidados del proceso Delphi con enfoque difuso.

Figura 33. Evaluación de las alternativas de generación de energía

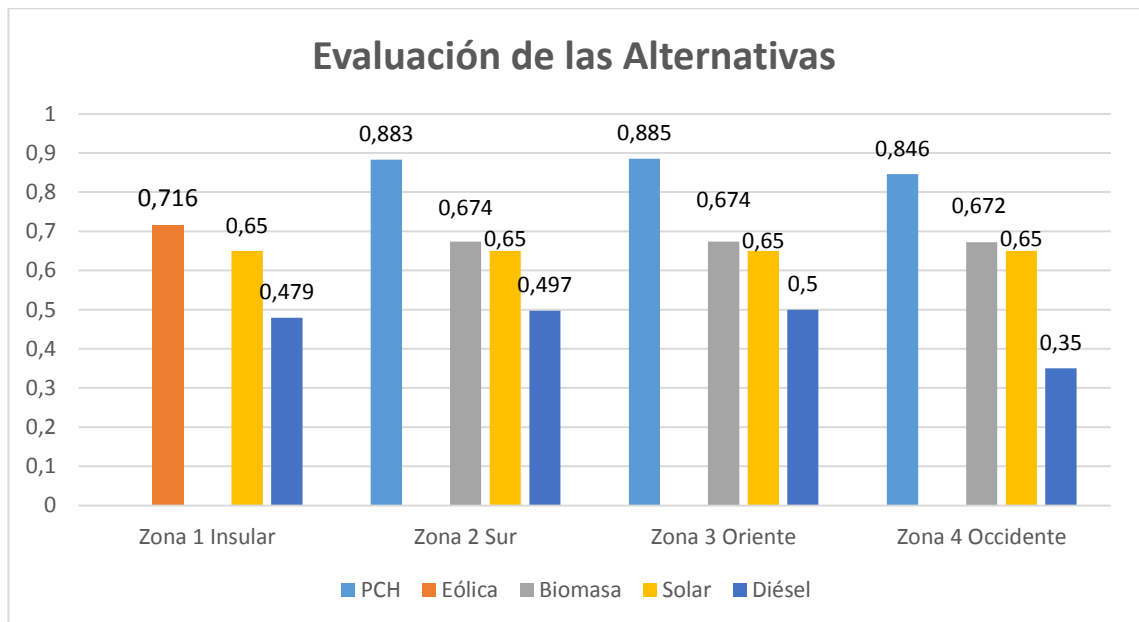


Tabla 22. Elegibilidad de las alternativas en las zonas de estudio

| Zona Insular | Zona Sur |
|-------------------------------|-------------------------------|
| Eólica: Elegible | PCH: Muy elegible |
| Solar: Elegible | Biomasa: Elegible |
| Diésel: Medianamente elegible | Solar: Elegible |
| | Diésel: Medianamente elegible |
| Zona Oriente | Zona Occidente |
| PCH: Muy elegible | PCH: Muy elegible |
| Biomasa: Elegible | Biomasa: Elegible |
| Solar: Elegible | Solar: Elegible |
| Diésel: Medianamente elegible | Diésel: Medianamente elegible |

La alternativa eólica sobresale con la mejor puntuación para la Zona 1 Insular ya que posee la mejor calificación global sobresaliendo favorablemente en los aspectos ambientales, económicos, sociales y tecnológicos. En segundo lugar, se encuentra la alternativa solar que se destaca en el criterio ambiental y social ya que es una tecnología limpia y no afecta significativamente el medio ambiente a diferencia de la alternativa diésel la cual ocupa el tercer lugar destacando en el criterio tecnológico por ser una tecnología altamente confiable y con mayor grado de madurez.

Con respecto a las Zona Sur, Oriente y Occidente en términos generales las alternativas obtuvieron la misma elegibilidad, es decir presentan una valoración semejante en cada una de las zonas, esto se debe a que los sub criterios evaluados están enfocados más en la tecnología en sí que a la Zona donde se va a desarrollar. Por ejemplo, la evaluación de los sub criterios como rutas de acceso, aceptación social y creación de empleo dependen de la zona estudio, pero sin embargo no impactan en gran magnitud para que la elección de la alternativa cambie.

Para las zonas anteriormente mencionadas la alternativa PCH es la que se destaca como la mejor alternativa para ser elegida debido a sus altas puntuaciones en todos los criterios, por lo que se considera la tecnología más sostenible, esto se debe a que genera bajas emisiones contaminantes, poco impacto en el hábitat y en tierra requerida, además se caracteriza por ser una tecnología con alto grado de madurez y eficiencia, y bajos costos de inversión, operación y mantenimiento en relación a las demás alternativas.

En un segundo nivel se encuentran las alternativas de biomasa y solar las cuales presentan una evaluación similar. Los criterios en los que resalta biomasa son el tecnológico y el social, por el contrario, presenta una baja puntuación en el ambiental debido a la alta cantidad de residuos contaminantes que genera. Respecto a la alternativa solar a pesar de presentar un buen desempeño ambiental por ser una tecnología limpia y presentar bajas emisiones y residuos contaminantes, sin embargo, obtuvo la menor puntuación en los sub criterios de eficiencia y confiabilidad.

Por otra parte, las plantas de generación diésel pasan a tener el peor comportamiento en todas las zonas debido a que es la tecnología que presenta los valores más altos en emisiones, sin embargo, sobresale en el sub criterio tierra requerida ya que no demanda grandes extensiones de terreno para su operación, además obtuvo la mejor puntuación en lo referente a la eficiencia, confiabilidad ya que es una tecnología con un alto grado de madurez. Por último, es una tecnología influenciada por el alto costo de combustible haciendo de ésta insostenible económicamente, lo cual va enlazado a su baja aceptación social. En consecuencia, se vio la necesidad de buscar alternativas que reduzcan la dependencia de la generación de energía eléctrica a partir de combustibles fósiles (diésel), aprovechando las demás tecnologías sostenibles.

En resumen, el objetivo de este estudio es encontrar la alternativa más sostenible para los seis casos de estudio San Andrés, Medio Atrato, Alto Baudó, La Macarena, Puerto Concordia y Valle del Guamuez. La tecnología eólica resulto la más conveniente en San Andrés al obtener la mayor puntuación global, por lo que se consideró la tecnología más sostenible. Respecto a los demás municipios la tecnología PCH sobresalió como la más elegible gracias a su buen desempeño ambiental, social, económico y tecnológico. Por otro lado, los criterios social y tecnológico sobresalieron ubicando a la alternativa de gasificación de biomasa como la segunda más sostenible, contrario a lo sucedido en la alternativa solar, hecho que la ubicó en la tercera posición. Finalmente, para la alternativa diésel los criterios no alcanzaron individualmente altas puntuaciones lo cual la ubica en la última posición.

En la siguiente gráfica se muestra la jerarquización de las alternativas de generación de energía para cada caso de estudio.

Figura 34. Jerarquización de las alternativas de generación de energía



En estudios realizados para las Zonas no interconectadas de Colombia, se destacan dos proyectos, el primero corresponde a la tesis de Laura Caicedo y Rodrigo Suárez ⁹⁰ en el cual mediante un análisis de sostenibilidad en el que se implementó la metodología de análisis multicriterio AHP para determinar la tecnología considerando los criterios: social, ambiental económico y tecnológico y los sub criterios asociados a cada una de estas en San Andrés, Providencia y Santa Catalina. Como resultado de este estudio se determinó que la alternativa más sostenible es la tecnología eólica, destacándose en los criterios ambiental y económico, seguida por las tecnologías solar, diésel y residuos sólidos urbanos.

De igual manera, Harvey Medina y Libardo Pimiento ⁹¹ desarrollaron un proyecto en el cual se analizan los aspectos ambientales y sociales como criterios de evaluación para la selección y planificación del suministro eléctrico en zonas no interconectadas. Esto lleva a desarrollar una metodología que evalúa la sustentabilidad ambiental a partir del uso de tres herramientas básicas: Indicadores ambientales, análisis de ciclo de vida y métodos de decisión multicriterio, los cuales se evalúan utilizando el proceso o lógica difusa; así mismo se seleccionaron las energías solar, eólica, biomasa, hidráulica y diésel como las cinco tecnologías para la generación de energía eléctrica. Como resultado del estudio la tecnología de pequeñas centrales hidroeléctricas se muestra como primera alternativa en los departamentos de Amazonas, Caquetá, Chocó, Guaviare, Putumayo y Vaupés, mientras que los paneles fotovoltaicos se destacaron en Arauca, Casanare, Guainía, Meta y Vichada.

⁹⁰ CAICEDO Laura y SUAREZ Rodrigo. Análisis de Sostenibilidad de Tecnologías de generación eléctrica a partir de fuentes convencionales y no convencionales de energía en el archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina utilizado el Método multicriterio de análisis jerárquico. Trabajo de grado Ingeniero Químico. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico - Química. Bucaramanga, 2014.

⁹¹ MEDINA, Harvey y PIMIENTO, Libardo. Análisis de sustentabilidad ambiental de tecnologías de generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables de energía para zonas no interconectadas de Colombia mediante el uso de lógica difusa. Trabajo de grado Ingeniero Químico. Bucaramanga.: Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingeniería Química, Escuela de Ingeniería Química, 2014.

Los estudios anteriores presentan resultados similares a los obtenidos en este trabajo. Esto debido a que se analizaron criterios similares aplicables a las zonas no interconectadas de Colombia, dando como resultado la necesidad de implementar tecnologías limpias que aprovechen los recursos naturales de cada región y que permita a su vez eliminar la dependencia de combustibles fósiles.

Por último, los resultados obtenidos y el desarrollo metodológico utilizado en la presente investigación son reflejados en un artículo de carácter publicable adjunto en el Anexo H.

6. CONCLUSIONES

A manera de resumen se ha desarrollado una metodología Delphi con enfoque difuso para evaluar a partir de criterios económicos, ambientales, tecnológicos y sociales la selección de alternativas de generación eléctrica para seis casos de estudio en Zonas no interconectadas de Colombia. El método permitió cuantificar el consenso del grupo de expertos en un número difuso global y a través de un sistema de inferencia difuso se obtuvo el orden de importancia de las alternativas de generación de energía.

Como resultado de esta investigación se encontró que en La Isla de San Andrés la alternativa eólica resultó ser la opción más elegible dentro de las alternativas consideradas en este trabajo, seguida de la alternativa solar y diésel. Para los municipios La Macarena, Puerto Concordia, Valle del Guamuez, Medio Atrato, Alto Baudó en primer lugar se ubicó la alternativa Pequeñas Centrales Hidroeléctricas como la tecnología más sostenible debido a sus altas puntuaciones en todos los criterios, en segundo lugar, la alternativa de gasificación de biomasa, seguido de alternativa solar y diésel.

La evaluación de las alternativas estuvo mayormente relacionada a las características de la tecnología, que a las características de las zonas en donde se van a implementar. Por tal motivo, se observó que para los municipios de Medio Atrato, Alto Baudó, La Macarena Puerto Concordia y Valle del Guamuez, la jerarquización de las alternativas fue similar.

Así mismo, los resultados son claros en posicionar a las alternativas sostenibles como opción principal para el abastecimiento de energía eléctrica, de manera que se sustituya progresivamente la alternativa diésel por tecnologías limpias eliminando así la dependencia a combustibles fósiles.

Por otro lado, el uso del método Delphi es ampliamente utilizado en todos los ambientes de la ciencia, el enfoque tradicional da como resultado una tendencia hacia dónde se inclina el grupo, pero no una convergencia que es lo que realmente se necesita para ordenar por prioridades las alternativas identificadas, por ello la importancia de utilizar un enfoque difuso que haga converger la opinión de los expertos para la elección de la mejor alternativa.

Por último, el software utilizado en Matlab ayudó a la automatización de los cálculos facilitando la aplicación rápida y flexible, permitiendo visualizar gráficamente toda la información numérica y lingüística de las variables y las relaciones entre ellas.

7. RECOMENDACIONES

Si bien hasta el momento no se ha seleccionado una alternativa de generación de energía como la óptima, es preciso seguir investigando alrededor de este tema, dado el gran impacto que tiene esta decisión sobre la calidad de vida y el impacto económico de las regiones que no cuentan con el servicio de suministro de energía eléctrica; en este sentido se deja para futuras investigaciones el desarrollo de métodos de solución, especialmente en aquellos que se apoyen en el uso de tecnologías sostenibles.

Adicionalmente, teniendo en cuenta que la realización de este estudio se basó en variables cualitativas, se recomienda para futuras investigaciones el uso de datos cuantitativos que permitan validar los resultados obtenidos en este proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

ALCALDÍA DE ALTO BAUDÓ-CHOCÓ. [Sitio Web] Baudó, Chocó, 2015. [Consultado el 10 agosto 2015]. Disponible en <http://www.altobaudo-choco.gov.co/index.shtml>.

ALCALDÍA DE LA MACARENA - META. [Sitio Web] La Macarena, Meta, 2015. [Consultado el 10 agosto 2015]. Disponible en: http://www.lamacarena-meta.gov.co/informacion_general.shtml.

ALCALDÍA DE MEDIO ATRATO - CHOCÓ. [Sitio Web] Atrato, Chocó, 2015. [Consultado el 10 agosto 2015]. Disponible en: <http://www.altobaudo-choco.gov.co/index.shtml>.

ALCALDÍA DE PUERTO CONCORDIA - META. [Sitio Web] Puerto Concordia, Meta, 2015. [Consultado el 10 agosto 2015]. Disponible en: http://www.puertoconcordia-meta.gov.co/informacion_general.shtml.

ALCALDÍA VALLE DE GUAMEZ – PUTUMAYO. [Sitio Web] Valle Guamez, Putumayo, 2015 [Consultado el 10 agosto 2015]. Disponible en: http://valledelguamez-putumayo.gov.co/informacion_general.shtml.

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. 2003. 2063–2087. [Consultado 04 de Agosto 2015] Disponible en: sciencedirect, vía Universidad Industrial de Santander: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148103001022>.

CAICEDO Laura y SUAREZ Rodrigo. Análisis de Sostenibilidad de Tecnologías de generación eléctrica a partir de fuentes convencionales y no convencionales de energía en el archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina utilizado el Método multicriterio de análisis jerárquico. Trabajo de grado Ingeniero Químico. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico - Química. Bucaramanga, 2014.

CASTRO FERIA, Juan José y HERNÁNDEZ MORENO, Omar Daniel. Definición de características técnicas y económicas de tres zonas no interconectadas de Colombia para la implementación de fuentes renovables de energía. Trabajo de grado Ingeniero Electricista. Bogotá: D.C.: Universidad de la Salle, Facultad de Ingeniería, Programa de Ingeniería Eléctrica, 2010.

COLOMBIA. DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN. Base de datos Simec. Bogotá D.C., 2006. [Base de datos en línea]. Recuperado de <http://www.upme.gov.co/zni/portals/0/resoluciones/conpes3453.pdf> el 30 julio 2015.

COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPUBLICA. Ley 1715 (13, mayo, 2014). Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional. Bogotá D.C., 2014.

COLOMBIA. MINISTERIO DE EDUCACIÓN NACIONAL. Colombia una potencial mundial de energías alternativas. [En línea] 2009. [Consultado 2 agosto 2015]. Disponible en: <http://www.mineducacion.gov.co/cvn/1665/article-117028.html>.

CORPOEMA. Determinación de inversiones y gastos de administración, operación y mantenimiento para la actividad de generación en zonas no interconectadas utilizando recursos renovables. Informe final. Bogotá, diciembre de 2012.

ESTEVE GÓMEZ, Natalia. Energización de las zonas no interconectadas a partir de las energías renovables solar y eólica. Tesis de Magíster en Gestión Ambiental. Bogotá D.C.: Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Estudios Ambientales y Rurales, 2011.

ESCUELA DE ORGANIZACIÓN INDUSTRIAL. [Sitio Web]. Natalia Suarez. Feb 11 del 2012. [Consultado 04 agosto 2015]. Disponible en: <http://www.eoi.es/blogs/nataliasuarez-bustamante/2012/02/11/%C2%BFque-es-el-metodo-delphi/>.

FLÓREZ, J.H; TOBÓN, D. y CASTILLO, G.A. “¿Ha sido efectiva la promoción de soluciones energéticas en las zonas no interconectadas (ZNI) en Colombia?: un análisis de la estructura institucional”. *Revista Javeriana*. 2009, Vol. 22, No. 38. [Consultado 04 de Agosto 2015]. Disponible en: http://revistas.javeriana.edu.co/index.php/cuadernos_admon/article/view/3872.

GALLEGO, Diana y MACK, Alexander. Sustainability assessment of energy technologies via social indicators: Results of a survey among European energy experts. [Consultado 04 de Agosto 2015]. Disponible en: sciencedirect, vía Universidad Industrial de Santander: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421509008143>

GARCÍA, Harol. Modelación de gasificación de biomasa en un reactor de lecho fijo. Tesis de Magíster en Ingeniería Mecánica. Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería, 2011.

GARCÍA, Helena, et al. Análisis costo beneficio de energías renovables no convencionales en Colombia. Fedesarrollo, centro de investigación económica y social. 2013.

GIL PÉREZ, D., VILCHES, A., TOSCANO, J.C. y MACÍAS, O. "Década de la educación para un futuro sostenible (2005-2014): un punto de inflexión necesario en la atención a la situación del planeta" *Revista Ibero Americana*. [En línea] 2007. Enero-abril, Número 40. [Consultado 10 agosto de 2015]. Disponible en: <http://www.rieoei.org/rie40a06.pdf>.

GOBERNACIÓN DEL ARCHIPIÉLAGO DE SAN ANDRÉS PROVIDENCIA Y SANTA CATALINA. [Sitio Web] San Andrés providencia y Santa Catalina, 2015. [Consultado el 10 agosto 2015]. Disponible en: http://www.sanandres.gov.co/index.php?option=com_content&view=article&id=116&Itemid=138#.

GUTIÉRREZ. Juan. La gasificación de madera: Una opción inteligente. *Revista M&M*. No. 57. [Consultado 04 de Agosto 2015]. Disponible en: <http://www.revista-mm.com/ediciones/rev57/procesos.pdf>.

HAGLER BAILLY SERVICES. AENE. 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. Bogotá D. C., 2001. [Consultado el 9 agosto 2015]. Disponible en: <http://www.upme.gov.co>, consultado 5 de abril de 2007.

INSTITUTO DE PLANIFICACIÓN Y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas no Interconectadas. [Sitio Web] [Consultado el 30 julio 2015]. Disponible en: <http://www.ipse.gov.co/atencion-ciudadano/preguntas-frecuentes-y-respuestas/2-Institucional/3-Qu%C3%A9%20son%20las%20ZNI>.

INSTITUTO DE PLANIFICACIÓN Y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas no Interconectadas. [Sitio Web] [Consultado el 22 agosto 2015].

Disponible en: <http://www.ipse.gov.co/ipse/comunicaciones-ipse/noticias-ipse/359-en-necocli-los-residuos-de-madera-se-convierten-en-importante-recurso-energetico>.

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CANARIAS. Energías renovables y eficiencia energética. Energía solar fotovoltaica. España: Institución Tecnológico de Canarias, S.A., 2008.

JARAMILLO, Patricia y VINASCO, Liliana. Análisis multiobjetivo difuso espacial: Una herramienta para localizar proyectos lineales con un enfoque de gestión ambiental. Revista Redalyc, Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal. Vol. 8, no. 1, 2005. [Consultado 04 de Agosto 2015] Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=169421171005>.

KAHRAMAN, Cengiz y KAYA, Ihsan. A fuzzy multicriteria methodology for selection among energy alternatives. Istanbul Technical University. Department of Industrial Engineering. 2010. Disponible en: sciencedirect, vía Universidad Industrial de Santander: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095741741000134X>.

LANDETA, Jon. El método Delphi. Ariel. 1999. Barcelona. [En línea] [Consultado 04 agosto 2015] Disponible en: http://www.prospectiva.eu/zaharra/Metodo_delphi.pdf.

LINSTONE, H, y TUROFF, M. The Delphi Method. Techniques and Applications. United States of America: Addison-Wesley, 1975. ISBN 0-201-04293-2.

MEDINA, Harvey y PIMIENTO, Libardo. Análisis de sustentabilidad ambiental de tecnologías de generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables de energía para zonas no interconectadas de Colombia mediante el uso de lógica

difusa. Trabajo de grado Ingeniero Químico. Bucaramanga.: Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingeniería Química, Escuela de Ingeniería Química, 2014.

MORA, Diego y HURTADO, Jorge. Guía para estudios de pre factibilidad de pequeñas centrales hidroeléctricas como parte de sistemas híbridos. Tesis de grado Ingeniero Civil. Bogotá D.C.: Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ingeniería, 2011. 23p.

PARODI DE CAMARGO, Violeta. Propuesta metodológica para la evaluación integral de proyectos en el sector energético. Universidad Politécnica de Valencia. Tesis doctoral. Valencia. 2013.

POWELL Catherine. The Delphi technique: myths and realities. *Journal of Advanced Nursing*. [En línea] 2003. February. Vol 41 N° 4, 376-382 [consultado 04 de Agosto 2015] Disponible en: Wiley Online Library, vía Universidad Industrial de Santander: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1046/j.1365-2648.2003.02537.x/full>.

RAE. Real Academia Española. [Sitio Web] Sostenibilidad. [Consultado 10 agosto de 2015] Disponible en: <http://www.concienciaeco.com/2010/08/29/sostenibilidad-en-la-rae/>.

RAMÍREZ, Osvaldo. Simulación en simmechanics de un sistema de control difuso para el robot udlap. México, junio 12 de 2009. [En Línea] [Consultado el 04 agosto de 2015]. Disponible en: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lmt/ramirez_r_o/capitulo3.pdf.

RAMOS, Fernando, et al. Modelo de decisión para seleccionar alternativas de inversiones de reconversión azucarera y biorrefinerías basado en el método DELPHI con enfoque difuso ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar [en línea] 2014. [Consultado: 20 de agosto de 2015]. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223131465006>.

RINCÓN, Sonia; GÓMEZ, Alexander y KLOSE, Wolfgang. Gasificación de biomasa residual de procesamiento agroindustrial. Alemania: Universidad de Kassel. Facultad de Ingeniería Mecánica, 2011. 12p.

RODRÍGUEZ, Humberto. Desarrollo de la energía solar en Colombia y sus perspectivas. *Revista de Ingeniería Universidad de los Andes*. Noviembre, 2008. No. 28; p 83-89. [Consultado 04 de Agosto 2015]. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=121015051011>.

RUIZ, B.J. y RODRÍGUEZ PADILLA, V. "Renewable energy sources in the Colombia energy policy, analysis and perspectives" *Energy policy*, vol. 34, pp3684-3690, 2006. [Consultado 04 de Agosto 2015]. Disponible en: sciencedirect, vía Universidad Industrial de Santander: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421505002120>.

SECRETARÍA DE ENERGÍA. Energía solar: Energías renovables. [En línea]. Buenos Aires: Coordinación de Energías Renovables, Dirección de Promoción, Secretaría de Energía Eléctrica, 2008. [Consultado 2 agosto 2015]. Disponible en: http://www.inti.gob.ar/e-renova/erTO/pdf/libro_energia_solar.pdf.

UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGETICA, [Sitio Web]. Energías renovables: Descripción, tecnologías y usos finales. Bogotá D.C., [Consultado el 10 agosto 2015]. Disponible en: <http://www.si3ea.gov.co/Portals/0/Iluminacion/CarFNCE.pdf>.

UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGETICA, [Sitio Web]. Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia. Bogotá D.C. 2015. [Consultado el 10 agosto 2015]. Disponible en: http://www.upme.gov.co/Estudios/2015/Integracion_Energias_Renovables/INTEGRACION_ENERGIAS_RENOVANLES_WEB.pdf.

UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGETICA, [Sitio Web]. Plan energético nacional Colombia: ideario energético 2050. Bogotá. 2015. [Consultado el 10 agosto 2015]. Disponible en: http://www.upme.gov.co/Docs/PEN/PEN_IdearioEnergetico2050.pdf.

VINASCO, L. y JARAMILLO, G.P. Propuesta metodológica para la localización de proyectos lineales con base en criterios de gestión ambiental, en condiciones de imprecisión en la información, aplicando análisis multiobjetivo difuso a bases de datos espaciales. Medellín. Trabajo de Grado (Magíster en Medio Ambiente y Desarrollo). Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Facultad de Minas. Posgrado en Gestión Ambiental. 2005.

ANEXOS

**NOTA: LOS ANEXOS CORRESPONDIENTES A ESTA INVESTIGACIÓN
PUEDEN SER CONSULTADOS EN LA BIBLIOTECA DE LA UNIVERSIDAD
INDUSTRIAL DE SANTANDER: SALA BASE DE DATOS**