



Dissertação

Mestrado em Engenharia de Energia e Ambiente

***Aplicación de métodos de optimización para
electrificación en zonas rurales de Ecuador***

Oscar Mauricio Sigüencia Sigüenza

Leiria, *Setembro* de 2017



Dissertação

Mestrado em Engenharia de Energias y Ambiente

***Aplicación de métodos de optimización para
electrificación en zonas rurales del Ecuador***

Oscar Mauricio Sigüencia Sigüenza

Dissertação de Mestrado realizada sob a orientação do Doutor Luís Miguel Pires Neves, Professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria e coorientação do MsC. Rodrigo Efraim Sempertegui Alvarez, Professor da Universidade de Cuenca-Ecuador.

Leiria, *Setembro de 2017*

Dedicatoria

A mi amada esposa Andrea, por su apoyo incondicional, paciencia y por ser esa luz en esos momentos de oscuridad.

A mi hija Xiomara, por su alegría, su sonrisa, sus ocurrencias y por ser motivo de mi inspiración.

A mi madre María, ejemplo de vida y superación, gracias por todo.

A mis hermanos por que ante todo de una u otra manera estaban ahí apoyándome.

A la memoria de mi abuelo y de mi padre que desde el cielo nos cuidan y motivan a llegar cada día más lejos.

A Dios por la gracia de la vida.

Agradecimientos

Quisiera empezar transmitiendo mi más efusivo agradecimiento a los tutores del presente proyecto. Al Dr. Luis Neves, profesor del Instituto Politécnico de Leiria, por su valiosa guía y orientación. Al MsC. Rodrigo Sempertegui, profesor de la Universidad de Cuenca, por su ayuda y colaboración para la culminación del presente proyecto.

Un agradecimiento especial al Instituto Politécnico de Leiria y a sus profesores por la cálida acogida durante el periodo de clases.

A la Universidad de Cuenca y a la Secretaria de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (Senescyt), por la oportunidad brindada para continuar creciendo profesionalmente.

Resumen

La planificación energética rural requiere de un análisis riguroso en la determinación de alternativas energéticas para el suministro de energía eléctrica, ya sea mediante la extensión de redes eléctricas, o con el aprovechamiento de recursos energéticos locales tales como la energía solar fotovoltaica y la energía eólica por lo que, para minimizar esta complejidad se han desarrollado una variedad de métodos de apoyo a la toma de decisiones en la planificación energética, tomando en consideración criterios no solo del tipo económico o técnico sino además criterios que en la última década son considerados relevantes previos a la ejecución de un determinado proyecto, estos son los criterios sociales y ambientales. Así, al tener más de una función objetivo, los métodos de decisión multicriterio son los que más se adaptan a esta problemática.

Entre los trabajos efectuados en planificación energética, la adopción de una u otra metodología está en función de las magnitudes consideradas, al tener magnitudes tanto cualitativas y cuantitativas consideramos que los métodos de sobre-clasificación ELECTRE con sus varias versiones, y entre una de ellas el método ELECTRE TRI con la principal característica de que permite la clasificación de las alternativas en categorías predefinidas que van desde la peor hasta la mejor, son una buena opción para tratar esta problemática, para la solución, se hará uso del software IRIS desarrollado justamente para este tipo de problemas.

Entre los sistemas energéticos para suministro de electricidad a zonas rurales tenemos: sistemas aislados, sistemas con microrredes, sistemas con extensión de red y sistemas híbridos. Una de las principales conclusiones es la preferencia de los sistemas con microrredes y sistemas aislados, debido principalmente a los altos costos que implica una extensión de red.

Palabras Clave: Planificación energética, Decisión multicriterio, ELECTRE TRI

Abstract

Rural energy planning requires a rigorous analysis in the determination of energy alternatives for the supply of electricity, either through the extension of electricity networks or through the use of local energy resources such as photovoltaic solar energy and wind energy, to minimize this complexity, a variety of methods have been developed to support decision making in energy planning, taking into account criteria not only of economic or technical type but also criteria that in the last decade are considered relevant before the execution of a certain project, these are the social and environmental criteria. Therefore, having more than one objective function, the multi-criteria decision methods are the ones that best adapt to this problem.

Among the studies carried out in energy planning, the adoption of one or another methodology is based on the magnitudes considered, when considering qualitative and quantitative magnitudes we consider that the methods of over-classification ELECTRE with its various versions and among them the method ELECTRE TRI, the main feature that allows the classification of alternatives in predefined categories ranging from the worst to the best, they are a good option to deal with this problem. For the solution, will be made use of the software IRIS developed just for this type of problems

Among the energy systems for the supply of electricity to rural areas we have: isolated systems, systems with micro-networks, network extension systems and hybrid systems. One of the main conclusions is the preference of the systems with micro networks and isolated systems, mainly due to the high costs of a network extension.

***Keywords:* Energy planning, Multicriteria decision, ELECTRE TRI**

Lista de Figuras

Fig. 2.1. Configuraciones para sistemas de electrificación rural (adaptado de Rojas-Zerpa and Yusta 2015, 15)	8
Fig. 2.2. Utilización de sistemas con microrredes en comparación con un sistema aislado (Domenech Léga 2013).....	10
Fig. 2.3. Esquema de un sistema solar fotovoltaico aislado de la red (INEN 2013).....	14
Fig. 2.4. Parque eólico onshore (derecha) Villonaco-Ecuador, (Ministerio de electricidad y energías renovables 2013), parque eólico offshore Dinamarca(izquierda) (“The Wind Power” 2017).....	17
Fig. 2.5 Esquema de un sistema de generación híbrida y la utilización de una microrred para distribución. (Domenech Léga 2013).....	18
Fig. 2.6. Clasificación de MCDM en análisis de decisiones Multicriterio (Romero 1996).24	
Fig. 2.7. Porcentaje de distribución de metodologías utilizadas en planeación de suministro descentralizado de energía. (Rojas-Zerpa and Yusta 2014).	26
Fig. 2.8. MCDM utilizados en planeación de suministro de energía descentralizada en el periodo 2000-2013 (Rojas-Zerpa and Yusta 2015).....	27
Fig. 2.9.Escala numérica propuesta por Saaty para efectuar comparaciones (adaptado de Saaty 2008).....	31
Fig. 2.10. Procedimiento de ayuda a la modelización de la problemática en Planificación Energética Rural (adaptado de Keeney 1996).....	34
Fig. 2.11. Evaluación típica de criterios en sistemas de suministro de energía (Wang et al. 2009).....	37
Fig. 2.12. Estructura de generación de electricidad en Ecuador (Ministerio coordinador de sectores estratégicos 2015).....	38
Fig. 2.13. Mapa de insolación global de Ecuador correspondiente al mes de febrero(CONELEC 2008b).	38
Fig. 2.14. Atlas eólico del Ecuador (Ministerio de electricidad y energías renovables 2013)	39
Fig. 3.1. Esquema general en la planificación para electrificación en zonas rurales con ayuda de MCDM (adaptado de Ochoa Ramón 2009).....	42
Fig. 3.2. Estructura de generación de electricidad(Ministerio coordinador de sectores estratégicos 2015).....	46

Fig. 3.3. Mapa de insolación global de Ecuador correspondiente al mes de febrero(CONELEC 2008b)	47
Fig. 3.4. Atlas eólico del Ecuador con datos de velocidad media anual referenciados a 30m de altura sobre el suelo (Ministerio de electricidad y energías renovables 2013).....	48
Fig. 3.5. Estructuración método ELECTRE TRI (Yu 1992).....	52
Fig. 3.6. Índices de concordancia para el j-ésimo criterio.....	54
Fig. 3.7. Índices de discordancia para el j-ésimo criterio	55
Fig. 4.1. Ubicación del proyecto. Fuente google earth	57
Fig. 4.2. Poblado San Francisco del Vergel. Fuente propia	58
Fig. 4.3. Insolación difusa anual promedio.(CONELEC 2008)	60
Fig. 4.4. Valores de insolación mensual para San Francisco alto del Vergel, valores en (Wh/m ² /día)(CONELEC 2008)	61
Fig. 4.5. Atlas eólico del Ecuador con velocidades media anual de viento a 30m de altura sobre el suelo(Ministerio de electricidad y energías renovables 2013)	63
Fig. 4.6. Alternativa 1.- Sistema solar fotovoltaico + baterías en cada vivienda. Generación descentralizada dispersa	66
Fig. 4.7. Alternativa 2. Sistema con 3 microrredes (variante 1). Sistema solar fotovoltaico + baterías con 3 microrredes con alta concentración de viviendas	67
Fig. 4.8. Alternativa 3. Sistema con 3 microrredes (variante 2). Sistema solar fotovoltaico + baterías con 3 microrredes con baja concentración(M1) y alta concentración de viviendas	68
Fig. 4.9. Alternativa 4. Sistema con 4 microrredes. Sistema solar fotovoltaico + baterías con 4 microrredes con alta concentración de viviendas.....	69
Fig. 4.10. Alternativa 5. Extensión de red y sistemas aislados con baterías en cada vivienda	70
Fig. 4.11. Alternativa 6. Extensión de red, 1 microrred y sistemas aislados más baterías en cada vivienda.....	71
Fig. 4.12. Alternativa 7. Extensión de red de energía. Generación descentralizada dispersa	72
Fig. 4.13. Determinación de valores de forma arbitraria para los límites iniciales.....	75
Fig. 4.14. Valores de la matriz de evaluación ingresados en el programa IRIS	78
Fig. 4.15. Valores de indiferencia, preferencia, veto.	79
Fig. 4.16. Análisis de robustez para el caso de estudio de San Francisco alto del Vergel..	79
Fig. 4.17 Resultados mostrados por orden de variabilidad	80

Fig. 4.18 a) Restricciones implícitas propuestas para el caso de estudio de San Francisco alto del Vergel con inconsistencias en la asignación de categorías, b) Restricciones implícitas consideradas para evitar inconsistencias.	81
Fig. 4.19 Análisis de prevalencia de alternativas en función de la asignación de categorías a las alternativas por IRIS.	82

Lista de Tablas

Tabla 2.1 Datos necesarios para la determinación de la Demanda (adaptado de Peralta Jaramillo 2011).....	11
Tabla 2.2. Determinación de la demanda para zonas urbanas (Centrosur 2017).....	12
Tabla 2.3. Determinación de la demanda para sectores rurales(Centrosur 2017).....	12
Tabla 2.4. Problemáticas de referencia para decisiones multicriterio (Roy and Bouyssou 1993).....	23
Tabla 2.5. Resumen de objetivos planteados en la planificación energética y metodologías aplicadas en estudios realizados utilizados como referencia	28
Tabla 2.6. El método ELECTRE, en todas sus versiones(Romero 1996).....	29
Tabla 2.7. Criterios y tipo de tecnología utilizada en estudios realizados en planificación energética	35
Tabla 2.8. Detalle de criterios utilizados para modelización y tipo de modalidad adoptada en sistemas de planificación energética	36
Tabla 3.1. Criterios a considerar en la modelización para electrificación rural.....	42
Tabla 3.2. Descripción de criterios a utilizar con sus respectivas unidades de medida	43
Tabla 3.3. Matriz de decisión con alternativas y criterios planteados para sistemas de electrificación en zonas rurales	49
Tabla 4.1. Determinación de la demanda para viviendas en San Francisco alto del Vergel.	64
Tabla 4.2. Alternativas propuestas para San Francisco del Vergel	65
Tabla 4.3. Datos calculados para la Alternativa 1.....	65
Tabla 4.4. Datos calculados para la Alternativa 2.....	66
Tabla 4.5. Datos calculados para la Alternativa 3.....	67
Tabla 4.6. Datos calculados para la Alternativa 4.....	68
Tabla 4.7. Datos calculados para la Alternativa 5.....	69
Tabla 4.8. Datos calculados para la Alternativa 6.....	70
Tabla 4.9. Datos calculados para la Alternativa 7	71
Tabla 4.10. Definición de categorías.....	73
Tabla 4.11. Matriz de evaluación con sus respectivos valores para cada criterio y alternativa	73
Tabla 4.12. Valores determinados con procedimiento heurístico	74

Tabla 4.13. Valores de perfiles iniciales b1 y b2 con procedimiento heurístico.....	74
Tabla 4.14. Valores de perfiles iniciales b1 y b2 con análisis de gráficas	76
Tabla 4.15. Valores obtenidos de forma arbitraria para límites de preferencia, indiferencia y veto	76

Lista de Siglas

- AHP. – Analytic Hierarchy Process (Análisis jerárquico de procesos)
- ARCONEL. – Agencia de regulación y control de electricidad (anteriormente CONELEC)
- DM. - Decisión multicriterio
- DP. – Dynamic Programming (programación dinámica)
- ELECTRE. – Elimination and Choice Expressing Reality (Eliminación y elección que expresan la realidad)
- EO. – Enumerative optimization (optimización enumerativa)
- GEAYL. – Generación energética autóctona y limpia.
- INEC. – Instituto ecuatoriano de normalización
- INER. – Instituto nacional de eficiencia energética y energías renovables.
- LP. – Linear Programming (programación lineal)
- MCDM. – Multi-criteria decision making (Métodos de decisión multicriterio)
- MCI. – Machine combustion internal (máquinas de combustión interna)
- MEER. – Ministerio de electricidad y energías renovables.
- NLP. – Non-Linear Programming (programación no lineal)
- SHP. – Small Hydric power (pequeñas centrales hídricas)
- SPV. – solar photovoltaic (solar fotovoltaico)
- WES. – Wind Eolic Small (pequeña generación con energía eólica)
- SW. – simple weighting (Ponderación simple)
- PD. – Profundidad de descarga
- BCP. – Baterías de ciclo profundo
- MOP. – Multi- Objective programming (Programación multi0-objetivo)

Índice

1. Introducción	1
1.1. Justificación	1
1.2. Objetivos	4
1.2.1. Objetivo general	4
1.2.2. Objetivos específicos.....	4
1.3. Alcance	5
1.4. Descripción de los capítulos	5
2. Estado de arte	7
2.1. Sistemas de electrificación en zonas rurales	7
2.1.1. Sistemas aislados.....	8
2.1.2. Sistemas con microrredes.....	9
2.1.3. Sistemas conectados a la red de energía eléctrica	10
2.1.4. Características de consumo y determinación de la demanda	10
2.1.5. Tecnologías de electrificación.....	13
2.1.5.1. Sistemas fotovoltaicos.....	13
2.1.5.2. Sistemas eólicos	14
2.1.5.3. Sistemas híbridos Solar PV- Eólico	18
2.2. Análisis multicriterio en planificación energética rural	21
2.2.1. Las distintas problemáticas	22
2.2.2. Clasificación de los MCDM.....	23
2.2.2.1. Métodos de optimización multiobjetivo	24
2.2.2.2. Métodos satisfacientes	25
2.2.2.3. Métodos discretos	25
2.2.3. MCDM en planificación energética	26
2.2.3.1. Métodos ELECTRE	28

2.2.3.2. Método Promethee	30
2.2.3.3. Método AHP	31
2.3. Estructura de preferencias	32
2.4. Selección de criterios	34
2.5. Análisis de alternativas	37
3. Fundamentación metodológica	41
3.1. Proceso de planificación para electrificación a zonas rurales utilizando MCDM	41
3.2. Definición de criterios	42
3.3. Definición de alternativas	46
3.4. Selección del MCDM	50
3.4.1. El problema de la clasificación	50
3.4.2. El método ELECTRE TRI	51
3.4.2.1. La modelización de las preferencias	52
3.4.2.2. Definición de relación de superación.....	53
3.4.2.3. Regla de asignación.....	55
4. Aplicación a un caso de estudio	57
4.1. Antecedentes generales del proyecto.....	57
4.2. Aspectos socioeconómicos y culturales	58
4.3. Disponibilidad y análisis de los recursos energéticos	59
4.3.1. Recurso solar	59
4.3.2. Recurso eólico	61
4.4. Análisis de la demanda.....	64
4.5. Definición de criterios	64
4.6. Selección de alternativas	65
4.7. Asignación de categorías	72
4.8. Matriz de evaluación	73

4.9.	Definición de perfiles iniciales	73
4.9.1.	Definición de perfiles iniciales utilizando procedimiento Heurístico	74
4.9.2.	Definición de perfiles iniciales utilizando procedimiento arbitrario.....	75
4.9.3.	Definición de los límites de preferencia, indiferencia y veto.....	76
4.10.	Simulación con apoyo computacional IRIS.....	77
4.11.	Resolución del caso de estudio para San Francisco del Vergel	78
4.12.	Análisis de robustez	79
5.	Conclusiones y pistas futuras de investigación	83
6.	Bibliografía	87
7.	Anexos	91
8.	Glosario.....	93

1. Introducción

1.1. Justificación

La cobertura del servicio de energía eléctrica en zonas rurales en Ecuador sigue siendo menor en comparación con el área urbana, 89.03% vs 94.77% (Ministerio de Electricidad y Energía Renovable 2014), esto debido principalmente a mayores restricciones que se tiene que enfrentar al momento de análisis de factibilidad de los proyectos, tales como: la baja demanda, difícil acceso, aspectos ambientales y principalmente debido a los altos costos que implican una extensión de red eléctrica (Rojas-Zerpa and Yusta 2014).

La utilización de recursos no renovables como fuentes de energía eléctrica han sido las que más se han utilizado hasta finales del siglo 90. Sin embargo, debido a factores como el calentamiento global los usos de estas fuentes de energía están siendo desplazadas por fuentes de energías renovables para favorecer el desarrollo económico y social de la población, sobre todo en las zonas rurales donde la cobertura de los servicios básicos aun es limitada.

La planificación energética en áreas rurales define problemas complejos cuando se trata de la implementación de fuentes con energías alternativas, ya que un incorrecto análisis puede conllevar a situaciones como un mal dimensionamiento de los equipos, afectación del medio ambiente, problemas asociados a temas sociales o a un sobre costo del proyecto (Domenech Léga 2013). Las características, tendencias o rangos de aplicación son elementos relevantes para la recopilación de información precisa para la selección de la mejor alternativa.

Existen programas en el Ecuador que han favorecido la utilización de energías alternativas como la solar fotovoltaica con el programa Euro-Solar (Ministerio de Electricidad y Energía Renovable 2014), con el objetivo de mejorar las condiciones de vida de las poblaciones más desfavorecidas de la región, a través de mecanismos de ampliación del acceso a la electricidad y al desarrollo de servicios básicos, que contempla además, el respectivo seguimiento y monitoreo definidos por la impartición de capacitación a la población.

Para la implementación de fuentes de energías renovables en las diferentes zonas rurales es necesario realizar un estudio técnico de las potenciales fuentes de energía locales, con el fin de determinar la factibilidad de un sistema energético, a más del estudio técnico se deben incluir un estudio socio-económico y un estudio ambiental del lugar para determinar cuáles serían las afecciones al medio ambiente y la aceptación social de la energía por parte de la población. Para la determinación de estas fuentes de energía se han elaborado estudios que justifiquen su potencial energético y que puedan ser considerados dentro de las alternativas factibles para su posterior aplicación.

Según la fuente de energía renovable local se puede constituir opciones viables para garantizar de modo sostenible las actividades propias del sector rural. Algunos de estos sistemas se pueden clasificar de acuerdo a la concentración de las viviendas, ya sea de forma centralizada o descentralizada, esto conlleva a problemas complejos por lo que es necesario el uso de herramientas que puedan ayudar a la selección de la mejor alternativa en función de ciertos parámetros comúnmente llamados criterios de selección. Al existir múltiples tecnologías, diferentes objetivos y varios criterios de selección, es necesario realizar una modelización del problema para en función de los datos obtenidos buscar un método que se adecue a esta problemática.

Los métodos de decisión multicriterio (MCDM) permiten el análisis simultáneo de más de una función objetivo, lo cual permite realizar el análisis de un conjunto de alternativas definidas en función del potencial de los recursos energéticos locales con la utilización de uno, varios o una combinación de estas fuentes de energías. De acuerdo a recopilaciones de estudios realizados (Peralta Jaramillo 2011; Benitez Leyva 2015; Domenech Léga 2013; Ochoa Ramon 2009), alternativas energéticas del tipo solar y eólica son una clara opción para suministro de energía eléctrica a zonas rurales. Este tipo de alternativas vienen ligadas directamente a la distribución de las viviendas. En el caso de comunidades con gran dispersión de viviendas, los sistemas individuales domiciliarios resultan más baratos y si las viviendas están muy concentradas, las microrredes suelen ser las opciones más aceptables.

Para escoger una alternativa normalmente se deben establecer prioridades y compromisos, donde los compromisos entre objetivos con conflictos son por ejemplo la mayor parte de los problemas del planeamiento y política energética, se derivan de los costos ambientales sociales y económicos involucrados en el abastecimiento fiable y

conveniente de la energía, puede ayudar a la estructuración del proceso y explicar los compromisos entre criterios.

Según Carlos Romero (1996), se puede clasificar en 3 métodos de decisión multicriterio, estos son: Métodos de optimización multiobjetivo, métodos satisfacientes (programación por metas) y métodos multicriterio discretos. A más de éstos, existen otros métodos que han sido desarrollados como metodologías propias en trabajos de investigación como el GEAYL, desarrollado por Benítez Leyva (2015) y Metodología para el diseño de sistemas de electrificación autónomos para comunidades rurales de Domenech Léga (2013), sin embargo, todas toman como principio fundamental los métodos descritos en Carlos Romero (1996).

En el presente trabajo se han determinado las distintas alternativas para los sistemas de generación con energías renovables. Los sistemas con paneles fotovoltaicos son una buena alternativa en casi todo el territorio ecuatoriano, esto debido principalmente a su ubicación geográfica, otra de las alternativas es la generación con sistemas eólicos, estos sistemas son principalmente potenciales en la región sierra donde existe mejores condiciones de viento, los sistemas con extensión de la red de distribución también son considerados como una de las alternativas. Los criterios de selección fueron determinados en base a trabajos similares y que se adaptan a la realidad ecuatoriana.

Se procede con el análisis de varios MCDM para determinar cuál es el más apropiado para determinar la matriz de evaluación, los métodos de sobre clasificación con el ELECTRE TRI son una buena alternativa para la resolución de la problemática en planificación energética en zonas rurales, conjuntamente con el uso del software IRIS permiten presentar una clasificación de las alternativas de acuerdo a las preferencias del decisor.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Utilización de un método basado en la teoría de la Decisión Multi-Criterio para la ayuda en la toma de decisiones para la selección de un sistema energético que sea adecuado a una zona rural con el aprovechamiento de recursos energéticos locales y que tome en consideración 4 aspectos esenciales: Económico, técnico, ambiental y social.

1.2.2. Objetivos específicos

- Estudiar diferentes alternativas energéticas que puedan ser apropiadas para su instalación en zonas rurales.
- Proponer alternativas energéticas apropiadas en función de los recursos locales.
- Definir los criterios de selección en base a estudios similares, procurando que se adapte a la realidad ecuatoriana.
- Descripción de algunos métodos de decisión multicriterio utilizados en planificación energética presentando sus principales ventajas y desventajas, así como, su ayuda a la resolución de problemas en la búsqueda de una solución adecuada.
- Definir un método de decisión multicriterio en base a la modelización resultante con el análisis de las diferentes opciones tecnológicas existentes y los respectivos criterios de selección.
- Verificación de resultados tomando como un caso de estudio situado en el sur de Ecuador en la provincia de Zamora Chinchipe, barrio San Francisco del Vergel Alto.

1.3. Alcance

Este trabajo evalúa diferentes alternativas que pueden ser utilizadas para sistemas en planificación energética rural, se determinarán en función de las potenciales fuentes de energía del lugar de estudio y en base a criterios de selección determinados de acuerdo a varias condiciones y restricciones que puedan darse en planteamiento de esta problemática. Las fuentes se centrarán principalmente en sistemas eólicos, solares fotovoltaicos y eólico-solares, las alternativas podrán contemplar además sistemas con extensión de red, y sistemas con micro-redes, ya sean con sistemas híbridos o sistemas aislados.

El trabajo se centrará en un caso de estudio para la provincia de Zamora, sin embargo, se podrá acoplar a cualquier otro sitio con características similares. Se evaluará bajo 4 criterios principales: técnicos, económicos, sociales y ambientales.

El método de decisión multicriterio de evaluación será el ELECTRE TRI con la utilización del software IRIS para su resolución, como resultado se obtendrá una clasificación de las alternativas que irán desde la “peor” hasta la “mejor” en función de las preferencias del decisor y de los criterios de selección.

1.4. Descripción de los capítulos

El presente trabajo consta de 5 capítulos. En el capítulo 2 se describirá el estado de arte con las diferentes alternativas propuestas para planificación energética en zonas rurales, así también se describirán los criterios de selección que serán utilizados para la evaluación de estas alternativas, esto con el fin de tener una visión clara de los aspectos a considerar incluyendo sus ventajas y sus carencias para el proceso de selección de alternativas utilizando herramientas de ayuda a la toma de decisiones.

El capítulo 3 presenta la fundamentación metodológica que se va a adoptar en torno a la problemática de la planificación energética rural, se definen los criterios de selección y las alternativas energéticas que dependerán del análisis de los recursos energéticos locales disponibles. Se presentará una matriz de evaluación general con todos los datos necesarios para la selección de un método de decisión multicriterio que pueda adoptarse a este planteamiento, para ello, se presenta una descripción de los métodos que han sido utilizados en la planificación energética.

En el capítulo 4 se presenta un caso de estudio ubicado en la zona sur del Ecuador, este lugar presenta varias restricciones en torno a accesibilidad y a condiciones ambientales, para ello se ha hecho el análisis de las posibles alternativas y la selección de los criterios a considerar, se proponen 7 alternativas, de las cuales las 6 primeras tienen un pequeño margen de diferencia entre pares de alternativas en cuanto a los valores calculados en cada criterio, sin embargo es importante considerar todas éstas para el análisis de los resultados. Se hace uso de un programa computacional diseñado justamente para el método de decisión multicriterio adoptado, el método ELECTRE TRI, se presentan los resultados obtenidos con un análisis de robustez, mostrando cuales alternativas están dentro de las categorías definidas que van desde la “peor” hasta la ‘mejor’.

Finalmente, en el capítulo 5 se presentan algunas de las conclusiones obtenidas respecto de la selección de los criterios, las alternativas y la justificación del método de decisión multicriterio empleado. Además, se presentarán algunas pistas futuras para continuación de la investigación.

2. Estado de arte

2.1. Sistemas de electrificación en zonas rurales

La electrificación rural en comparación con la urbana requiere de un análisis diferente para la toma de decisiones de un determinado proyecto, ya que por lo general la electrificación rural viene asociada a muchas más restricciones, tales como: difícil acceso, falta de recursos de la comunidad, bajo consumo y principalmente debido a los altos costos que implican una extensión de red (Rojas-Zerpa and Yusta 2014), según (Papadopoulos and Karagiannidis 2008) “la extensión de la red no suele ser la solución más rentable, ya que la densidad de población en las zonas rurales puede ser muy baja. La inversión necesaria para la ampliación de la red puede hacer que los costos de conexión sean muy altos”. Por otra parte, hay que tener en cuenta las pérdidas técnicas debido a las largas líneas de transmisión y distribución. El costo de la extensión de la red es generalmente subvencionado y no recuperados por las tarifas eléctricas.

En Rojas-Zerpa and Yusta (2014) se realiza el análisis de 3 opciones de electrificación para este tipo de comunidades: la extensión de la red eléctrica nacional, un sistema individual para cada vivienda, o una única micro red que cubre a toda la comunidad.

En efecto, hasta una cierta distancia la extensión de la red eléctrica nacional resulta la opción más barata. A partir de dicha distancia (que depende de factores diversos como la demanda eléctrica, la orografía o las condiciones climáticas) resultan más adecuados sistemas que aprovechan los recursos locales. En el caso de comunidades con gran dispersión de viviendas, los sistemas individuales domiciliarios resultan más baratos, en cambio, si las viviendas están muy concentradas, las microrredes suelen ser más adecuadas (Domenech Léga 2013).

El presente trabajo se centra en este tipo de alternativas de electrificación tomando en consideración varios criterios y con la utilización de un método de decisión multicriterio para la elección de la mejor decisión, enfocados a proyectos en donde se puedan utilizar recursos energéticos locales, ya sea con la utilización de fuentes de energía solar

fotovoltaica y energía eólica. La configuración típica de estos sistemas se presenta en la Fig. 2.1.

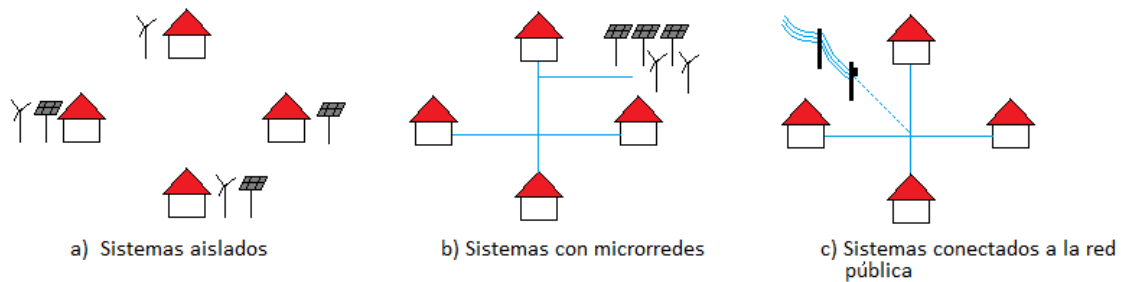


Fig. 2.1. Configuraciones para sistemas de electrificación rural (adaptado de Rojas-Zerpa and Yusta 2015, 15)

2.1.1. Sistemas aislados

Los principales aspectos a considerar en los sistemas aislados en zonas rurales es que los puntos de consumo están o muy dispersos o existe dificultad al momento de instalar una microrred, por lo tanto se debe optar por sistemas autónomos donde cada punto de consumo dependiendo de los recursos energéticos locales deberán ir acompañados de un sistema de acumulación de energía como acumuladores o baterías en función de la autonomía requerida, los resultados a partir de la utilización de un método de decisión deberán ser analizados para ver si cumplen con los principales objetivos planteados. En este tipo de configuración el uso de sistemas híbridos eólico-solares es una opción tecnológica muy adecuada, puesto que ambas tecnologías se pueden complementar, haciendo de esta forma más fiable el sistema.

Dada la dispersión entre viviendas en las comunidades rurales de países en desarrollo, la solución más frecuente en los proyectos de electrificación son los sistemas individuales: generación, acumulación y distribución independiente para cada punto de consumo (viviendas, centros de salud, escuelas o centros comunales) (Ferrer-Martí et al. 2010). Sin embargo, esta solución presenta varias limitaciones (Domenech Léga 2013, 8):

- Se tiende a implementar proyectos con una única tecnología, limitando las ventajas de los sistemas híbridos.
- Puesto que los recursos energéticos no son constantes, algunos puntos de consumo pueden requerir equipos de mayor potencia y, por tanto, resultar más costosos.

- No se considera el suministro eléctrico a más de un usuario simultáneamente, lo que permitiría utilizar equipos de mayor tamaño.
- Son sistemas difícilmente adaptables a posibles incrementos del consumo.

2.1.2. Sistemas con microrredes

Los sistemas eléctricos con una o varias microrredes son adecuados cuando la concentración de la población es más centralizada y con ello se pueden instalar puntos de generación en función de los recursos energéticos locales disponibles. Estas configuraciones consisten en un único punto de generación que abastece a varios puntos de consumo (Domenech Léga 2013, 8). Las ventajas de las microrredes son numerosas (Kirubi et al. 2009):

- No se condiciona el consumo de un punto al potencial energético disponible en su emplazamiento. Un punto con un bajo recurso energético, puede alimentarse con generadores instalados en otro punto de mejor potencial.
- Se favorece la igualdad en el consumo entre usuarios, puesto que varios puntos de consumo se abastecen con los mismos equipos de generación.
- Se pueden ahorrar costes por economías de escala, dado que se concentran los puntos de generación y, por tanto, se pueden utilizar equipos de generación de mayor potencia y con menor ratio entre coste y energía producida.
- Se favorece la flexibilidad en el consumo, es decir, se puede incrementar puntualmente el consumo, ya sea por motivo de días especiales, por adhesión de nuevos puntos de consumo o por el desarrollo de actividades productivas.

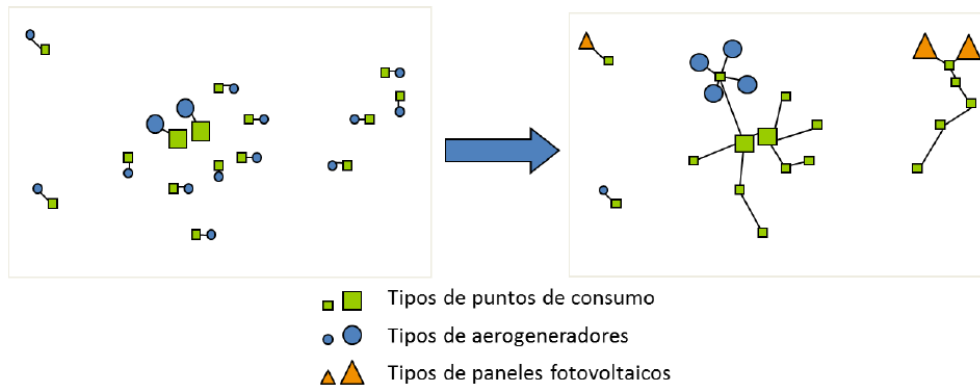


Fig. 2.2. Utilización de sistemas con microrredes en comparación con un sistema aislado (Domenech Léga 2013).

2.1.3. Sistemas conectados a la red de energía eléctrica

Las primeras formas rurales de electrificación desarrolladas son implementadas basados en modelos urbanos. Por lo tanto, la expansión de la red de distribución tiene que ser el modelo más predominante para suministro de energía eléctrica en zonas rurales de países en desarrollo (...). Sin embargo, esta alternativa puede no ser la más adecuada por distintas razones, incluyendo los fallos de energía parcial o total, la falta de mantenimiento de la red eléctrica, los impactos ambientales, el alto costo de invertir en nuevas instalaciones, el alto costo de la electricidad entregada debido al bajo factor de carga, largas líneas de alimentadores primarios, baja densidad de carga y altas pérdidas de transmisión y distribución, y el aumento de la competitividad en la generación distribuida (Rojas-Zerpa and Yusta 2014, 67).

2.1.4. Características de consumo y determinación de la demanda

El consumo de energía eléctrica en zonas rurales es muy diferente al consumo de energía eléctrica en las zonas urbanas. El principal uso de la energía es destinado principalmente para iluminación, además de ciertos equipos de uso diario teniendo en cuenta que la principal actividad que se realiza en las zonas rurales es la agricultura. Cabe recalcar además que el consumo de energía eléctrica es muy bajo por lo que la recuperación de la inversión realizada en cualquier tipo de proyecto de generación no es rentable, sin embargo, se debe considerar como esencial para el desarrollo de los pueblos en el ámbito social y cultural ya que puede por ejemplo favorecer a la educación.

La determinación de la demanda es de gran importancia ya que está estrictamente relacionada con el dimensionamiento de los equipos de generación y protección. Una incorrecta determinación podría:

- Elevar los costos de inversión.
- Sobredimensionar los valores óptimos de las protecciones para brindar seguridad al sistema.
- Déficit de potencia que no cubriría con las necesidades propuestas.
- Elevar costos de operación y mantenimiento.(Benítez Leyva 2015).

En Juan Peralta (2016), se determina la demanda realizando un levantamiento de los principales artefactos eléctricos utilizados a diario, donde consta: Descripción del equipo, potencia de funcionamiento, número de equipos, horas de funcionamiento diarias, con lo cual se procede al cálculo de la demanda total diaria consumida por vivienda, a más de la categoría residencial como punto de consumo, además se debe hacer el análisis para los servicios comunitarios tales como iglesias, escuelas, centros comunitarios y áreas de recreación de existir. Para el caculo inicial de la demanda se procederá a llenar la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Datos necesarios para la determinación de la Demanda (adaptado de Peralta Jaramillo 2011)

Descripción de los equipos	Potencia de funcionamiento	Número de equipos	Horas de funcionamiento diario	Potencia total diaria
...
...

“Para lograr una energización que asegure un desarrollo sostenible preservando el medioambiente, se necesita conocer de manera precisa la demanda energética de los consumidores rurales” (Benítez Leyva 2015, 31)

Para el caso de Ecuador en la mayoría de las empresas eléctricas de distribución se determina la demanda de acuerdo a tablas definidas tanto para el sector urbano y sector rural, como ejemplo presentaremos los valores que utilizan la empresa eléctrica regional centro sur (EERCS), la tabla 2.2 muestra cómo se determinan los valores de demanda máxima unitaria proyectada para líneas de distribución a 10 años y líneas de media tensión

para 15 años, se considera el área promedio de los lotes (m²) y se asigna un tipo de usuario, este tipo de medida es conveniente para cuando la dispersión de las viviendas es concentrada, mientras que en la tabla 2.3 se presenta la tabla de las demandas máximas unitarias proyectadas para el sector rural, existen 3 clasificaciones de tipo de usuario sin depender del área promedio de los lotes, sin embargo para zonas rurales con una baja densidad poblacional, un bajo consumo energético, y que se encuentran alejados de los alimentadores primarios, donde su principal uso es la iluminación y ciertos equipos básicos, es mejor determinar la demanda con el uso de la tabla 2.1, en donde se puede tener datos precisos y certeros para el dimensionamiento óptimo de los equipos.

Tabla 2.2. Determinación de la demanda para zonas urbanas (Centrosur 2017)

Abonados de sectores urbanos (centros cantonales)			
Área Promedio de Lotes (m2)	Abonado Tipo	DMUp(KVA) 10	DMUp(KVA) 15
A > 400	A	7,47	7,99
300 < A < 400	B	3,93	4,29
200 < A < 300	C	2,23	2,48
100 < A < 200	D	1,36	1,55
A < 100	E	0,94	1,09

Tabla 2.3. Determinación de la demanda para sectores rurales(Centrosur 2017)

Abonados del sector rural			
Sector	Abonado Tipo	DMUp (KVA) 10	DMUp (KVA) 15
Periferia ciudad	F	1,02	1,16
Centro parroquial	G	0,84	0,98
Rural	H	0,65	0,76

El dimensionamiento de los elementos de la red y el cómputo de la caída de tensión, potencia y energía, deben desarrollarse considerando la incidencia de la demanda máxima unitaria, sobre la base de la distribución de los abonados en cada uno de los puntos, contemplando además la carga por el alumbrado público y cargas puntuales.

La demanda de diseño para la red secundaria y transformadores de distribución deberá ser calculada para un punto dado, mediante el siguiente procedimiento:

$$DMp = DMUp \times N \times F \text{ (KVA)}$$

Donde:

DMUp	=	Demanda máxima unit. Proyectada
N	=	Número de abonados
F	=	Factor de coincidencia y
DMp	=	Demanda máxima en el punto dado.

Esta demanda corresponde al conjunto de abonados típicos y, por lo tanto, deberán incorporarse además en caso de incidir, la demanda de las cargas especiales y del alumbrado público.

Consecuentemente:

$$D = DMp + A + Ce \quad (3)$$

Donde:

D	=	Demanda de diseño (KVA)
A	=	Carga de alumbrado público (KVA)
Ce	=	Cargas especiales (puntuales) (KVA)

Se deberá desarrollar de una manera similar que para el cálculo de la demanda de diseño de la red secundaria y transformadores de distribución.

El factor de coincidencia mínimo a utilizarse será 0,52 (Centrosur 2017).

2.1.5. Tecnologías de electrificación

2.1.5.1. Sistemas fotovoltaicos

Este tipo de tecnología aprovecha la radiación solar para producir electricidad. El recurso solar es variable a lo largo del día y nulo por las noches, de modo que son necesarios sistemas de acumulación que permitan almacenar la energía producida durante el día para que ésta sea consumida por las noches. La evaluación del recurso solar para el dimensionado de un proyecto de electrificación rural aislada es relativamente sencilla. Sin embargo, la tecnología solar tiene todavía una baja relación entre kW producido y coste de la instalación (Domenech Léga 2013, 15). Sus principales características son:

- Potencia máxima [W]. - Es la potencia máxima que puede generar el panel en condiciones estándar: radiación de 1000W/m² y temperatura de 25°C.
- Tensión de trabajo [V]. - Voltaje al que genera el panel

Es necesario complementar la instalación de paneles fotovoltaicos con reguladores solares, estos dispositivos controlan la sobrecarga y la descarga profunda de las baterías. Si en un momento dado el panel produce más energía de la que la batería puede absorber, el regulador disipa la energía sobrante a un banco de resistencias, y la energía se pierde en forma de calor. Cuando el panel no produce y la batería llega a un nivel mínimo de carga (la tensión en sus bornes es menor que un cierto valor), el regulador desconecta la carga y se interrumpe el suministro, así se prolonga la vida útil de las baterías debido a la sensibilidad a pequeños cambios. A diferencia del caso eólico, los paneles fotovoltaicos producen en corriente continua y no es necesario transformar el tipo de corriente entre los paneles y las baterías. (Domenech Léga 2013, 22)

Las principales características de los reguladores solares son:

- Tensión de trabajo [V]. - Tensión nominal a la que funciona el regulador.
- Intensidad máxima [A]. - El producto de la intensidad máxima por la tensión de trabajo, determinar la potencia máxima [W] del regulador, antes de quemarse.
- Rendimiento [%]. - Al tratarse de electrónica de potencia, las pérdidas en estos dispositivos se pueden despreciar y considerar un rendimiento equivalente al 100%.

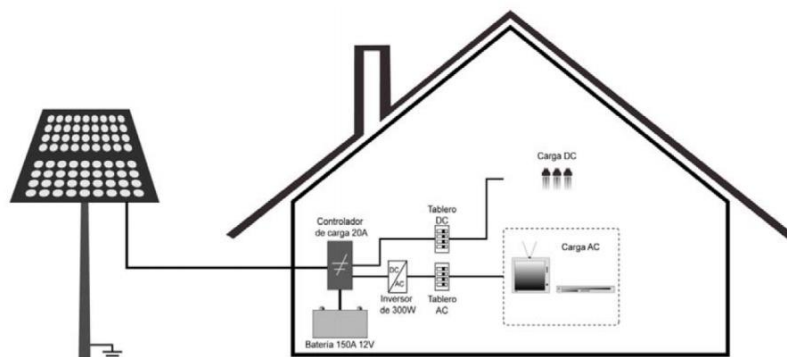


Fig. 2.3. Esquema de un sistema solar fotovoltaico aislado de la red (INEN 2013)

2.1.5.2. Sistemas eólicos

Estos sistemas aprovechan el viento para producir electricidad a través de aerogeneradores. Su mayor inconveniente es la variabilidad del recurso eólico en el territorio y el tiempo, siendo necesarios sistemas de acumulación que compensen el posible desfase entre producción y consumo. Otro inconveniente es que la evaluación detallada del viento es compleja y requiere de mediciones a lo largo de, como mínimo, un año. Sólo así se pueden identificar los períodos de mayor y menor potencial, para un adecuado

dimensionado de los equipos. Por otro lado, la tecnología eólica tiene una buena relación entre kW producido y coste de la instalación, sobre todo a medida que se incrementa el tamaño de los generadores utilizados. Aunque se trata de una tecnología cuyo uso va en aumento, el bagaje técnico es limitado y está aún en desarrollo (Domenech Léga 2013, 19).

Entre sus principales características están:

- Velocidad de arranque [m/s]. - Velocidad a la que el aerogenerador empieza a generar.
- Potencia nominal [W]. - Potencia máxima a la que puede trabajar el aerogenerador de forma continua sin averiarse.
- Velocidad nominal [m/s]. - Velocidad del viento cuando el aerogenerador trabaja a potencia nominal.
- Potencia máxima [W]. - Potencia máxima a la que puede llegar el aerogenerador.
- Velocidad de corte [m/s]. - Velocidad del viento a la que el aerogenerador deja de girar y, así, generar para evitar averiarse por vibraciones demasiado fuertes.
- Voltaje [V]. - Tensión de generación eléctrica.
- Curva de potencia. - Potencia disponible [W] en el aerogenerador a diferentes velocidades del viento [m/s].

La masa de aire en movimiento es energía cinética, la cual puede ser transformada en energía eléctrica. Al chocar el viento sobre las palas de la Aero turbina se produce un trabajo mecánico de rotación; debido a este trabajo se mueve un generador y éste produce electricidad.

La cantidad de energía que contiene el viento antes de chocar con las palas del rotor, depende de tres parámetros: la velocidad del viento incidente, la densidad del aire y el área barrida por el rotor.

La velocidad de viento viene definida de acuerdo a la zona geográfica. En lo que se refiere a la densidad del aire, la energía contenida en el viento aumenta de forma proporcional a la masa por unidad de volumen de aire, que en condiciones normales es de 1,225 kg/m³. Por lo tanto, cuando el aire se enfría, su peso aumenta ya que es más denso, y transfiere más energía al aerogenerador. Por el contrario, cuando el aire se calienta o cuando el aerogenerador está a una mayor altitud, la energía cinética que llegue a la turbina será menor.

En lo que respecta al área barrida, cuanto más aire en movimiento sea capaz de capturar un aerogenerador más energía cinética encontrará. En el caso de un rotor de una turbina de 1MW de potencia nominal, el rotor puede tener un diámetro de unos 54 metros, así que barrerá una superficie de unos 2.300m².

Cabe recalcar que no toda la energía cinética del viento puede ser recogida por las palas del aerogenerador, teóricamente el 59% de la energía del viento es la que puede obtenerse y transformarse en energía eléctrica, a más de que se debe tomar en cuenta las pérdidas durante la transformación dentro del generador. Hoy en día, un aerogenerador aprovecha cerca del 40% de la energía almacenada en el viento.

Se puede clasificar en 2 tipos de sistemas de tecnologías para energía eólica, esto depende de la ubicación de las torres eólicas: Sistemas *onshore* y sistemas *offshore*, que son básicamente torres ubicadas en territorio continental y torres eólicas ubicadas físicamente mar adentro, respectivamente. Una de las características principales es que los sistemas *offshore* son capaces de producir un 50% más de energía en comparación con los sistemas *onshore*. Para nuestro análisis se considerarán sistemas *onshore* teniendo algunas ventajas en comparación con los sistemas offshore tales como (Aguayo Calderón 2012):

- Cimentaciones más económicas.
- Integración más barata con la red eléctrica.
- Instalación más barata y de fácil acceso durante la fase de construcción.
- Es más económica y fácil el acceso a la operación y mantenimiento

En contraste con los sistemas onshore, para evitar conflictos de uso de la tierra y reducir el ruido y el impacto visual que son las principales desventajas, es mover los aerogeneradores costa afuera, es decir, en el mar; teniendo algunas ventajas entre las cuales están:

- Disponibilidad de grandes superficies continuas, adecuados para grandes proyectos.
- Mayores velocidades del viento, que generalmente aumentan con la distancia desde la orilla
- Hay menos turbulencias, lo que permite que las turbinas puedan capturar una energía más eficaz y reducir la fatiga en la turbina.

- Menor efecto de cizalladura del viento, permitiendo el uso de torres más cortas.

Entre las desventajas de los sistemas offshore tenemos:

- Los cimientos marinos son más caros.
- La conexión con la red eléctrica es más cara, y en algunos casos un necesario aumento de la capacidad de cuadrículas costeras débiles.
- Los costos de construcción aumentan debido a los complicados procedimientos de instalación y al acceso restringido durante la construcción por las condiciones meteorológicas.
- El acceso limitado durante la operación y mantenimiento, da como resultado una pena adicional de reducción de la disponibilidad de turbina (“Wind Energy The Facts” 2017).

En Ecuador existen solamente 3 proyectos eólicos onshore. El primer parque eólico del país se inauguró en octubre del 2007 en la isla San Cristóbal del Archipiélago de Galápagos, con una potencia instalada de 2,4 MW, un segundo parque eólico ubicado en otra de las islas del Archipiélago de Galápagos, proyecto Baltra – Santa Cruz, con una potencia instalada de 3,2 MW y un proyecto ubicado en la Provincia de Loja en el cerro Villonaco con 11 aerogeneradores con una potencia de 16,5MW (Ministerio coordinador de sectores estratégicos 2015).



Fig. 2.4. Parque eólico onshore (derecha) Villonaco-Ecuador, (Ministerio de electricidad y energías renovables 2013), parque eólico offshore Dinamarca(izquierda) (“The Wind Power” 2017).

2.1.5.3. Sistemas híbridos Solar PV- Eólico

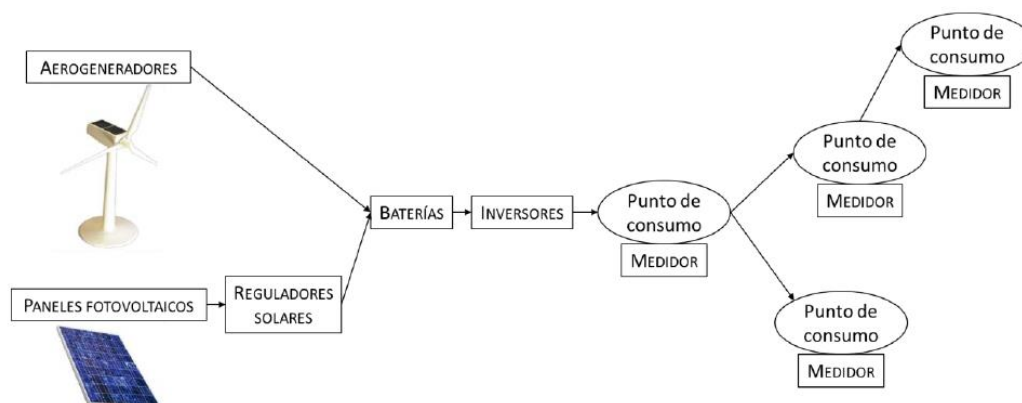


Fig. 2.5 Esquema de un sistema de generación híbrida y la utilización de una microrred para distribución. (Domenech Léga 2013).

La energía se produce en los equipos de generación: aerogeneradores y paneles fotovoltaicos. Los aerogeneradores generan la electricidad a partir de la fuerza del viento, mientras que los paneles fotovoltaicos lo hacen a partir de la radiación solar. Los reguladores (internos o externos en el caso eólico y externos en el caso solar) protegen a las baterías de sobrecargas y descargas profundas, que podrían dañar su buen funcionamiento y causar una reducción de su vida útil. Las baterías permiten almacenar la energía para compensar el desfase entre la generación y el consumo eléctrico. Los inversores transforman la corriente continua, con que se almacena la energía en las baterías, a corriente alterna para la que están pensados la mayoría de equipos eléctricos (Domenech Léga 2013, 19).

Entre las principales ventajas de los sistemas híbridos están:

- La posibilidad del aprovechamiento conjunto y optimizado de los recursos locales disponibles, pudiendo garantizar altos niveles de calidad, confiabilidad y rendimiento. Con reducción de costos en la instalación y operación del sistema.
- Los sistemas híbridos representan actualmente una solución viable para las exigencias de energía eléctrica en áreas aisladas o no electrificadas. altos costos de mantenimiento y un breve tiempo de vida de la instalación.
- Los sistemas híbridos permiten reducir problemas de seguridad de suministro y aprovechan los recursos renovables existentes locales, constituyendo una opción viable y favorable tanto ambiental como social.

Para un sistema híbrido se considera varios elementos entre ellos tenemos los convertidores de corriente directa (CD) a corriente alterna (CA) y que también se conocen como inversores. La función de un inversor es cambiar un voltaje de entrada en corriente directa a un voltaje simétrico de salida en corriente alterna con magnitud y frecuencia deseadas. Tanto el voltaje de entrada como la frecuencia de salida pueden ser fijos o variables. Si se modifica el voltaje de entrada de CD y la ganancia del inversor se mantiene constante, es posible obtener un voltaje variable de salida. Por otra parte, si el voltaje de entrada en CD es fijo y por lo tanto no es controlable, se puede obtener un voltaje de salida variable si se varía la ganancia del inversor. La ganancia del inversor se puede definir como la relación entre el voltaje de salida CA y el voltaje de entrada CD. En los inversores, las formas de onda del voltaje de salida deberán ser sinusoidales. Sin embargo, los inversores reales la forma de onda obtenida no es completamente sinusoidal debido a los armónicos presentes. Para aplicaciones de baja y mediana potencia, se pueden aceptar los voltajes de onda cuadrada o casi cuadrada; para aplicaciones de alta potencia, son necesarias las formas de onda de baja distorsión (Flores Mondragón and Lazcano López 2014).

Otro de los elementos principales son las baterías, la importancia de este componente principalmente dentro del sistema fotovoltaico (FV) hace necesario el conocimiento a fondo de las limitaciones intrínsecas del mismo. Sólo así podrá lograrse la correcta instalación y uso del sistema, prolongando su vida útil y grado de fiabilidad. El mecanismo que permite la utilización de una batería como una fuente portátil de energía eléctrica, es una doble conversión de energía, llevada a cabo mediante el uso de un proceso electroquímico. La primera conversión, de energía eléctrica en energía química, toma lugar durante el proceso de carga. La segunda, de energía química en eléctrica, ocurre cuando la batería es descargada. Para que estas conversiones puedan llevarse a cabo se necesitan dos electrodos metálicos inmersos en un medio que los vincule, llamado electrolito. Este conjunto forma una celda de acumulación, cuyo voltaje, en una batería de plomo-ácido, excede levemente los 2V, dependiendo de su estado de carga. En el proceso electrolítico cada uno de los electrodos toma una polaridad diferente. La batería tiene entonces un terminal negativo y otro positivo, los que están claramente identificados en la caja de plástico con los símbolos correspondientes (- y +). La batería comercial, para poder ofrecer un voltaje de salida práctico, posee varias de estas celdas conectadas en serie. Cada celda está compuesta de varias placas positivas y negativas, las que tienen separadores intermedios. Todas las placas de igual polaridad, dentro de una celda, están conectadas en

paralelo. El uso de varias placas de igual polaridad permite aumentar la superficie activa de una celda. El voltaje proporcionado por una batería de acumulación es de CD. Para cargarla se necesita un generador de CD, el que deberá ser conectado con la polaridad correcta. En principio el “ciclo” de carga-descarga puede ser repetido indefinidamente. En la práctica existen limitaciones para el máximo número de ellos, ya que los electrodos pierden parte del material con cada descarga. La diferencia funcional entre diferentes tipos de baterías obedece al uso de diferentes electrolitos y electrodos metálicos (Flores Mondragón and Lazcano López 2014).

Dos características identifican a una batería solar: la profundidad de descarga (PD) y un alto valor de ciclos. La batería solar permite una PD máxima del 80%, cientos de veces, a niveles de corriente moderados. Es por ello que a estas baterías se las denomina de ciclo profundo (BCP). Se considera que una BCP ha completado todos los ciclos de carga y descarga cuando, al ser cargada nuevamente, la máxima energía que puede almacenar se reduce al 80% de su valor inicial. El número de ciclos de carga/descarga depende de la PD. Cuando ésta disminuye, el número de ciclos aumenta. Para una dada PD, la batería más robusta proporciona el mayor número de ciclos. Las versiones con mayor aceptación son las de 6 y 12 V nominales. Las baterías de 6 V, con una capacidad de unos 200 Ah, son utilizadas en sistemas de mediana capacidad de reserva, donde pasan a formar parte de un banco de baterías con conexión serie o serie-paralelo, a fin de satisfacer los valores de voltaje y corriente del sistema. Esta versión ofrece el mejor compromiso entre peso (facilidad de manejo) y número de Ah de reserva. Como los sistemas fotovoltaicos de bajo consumo son sistemas de 12 V nominales, los requerimientos de reserva pueden ser satisfechos con la versión de 12 V, la que tiene una capacidad de unos 100 Ah (Flores Mondragón and Lazcano López 2014).

2.2. Análisis multicriterio en planificación energética rural

La planificación energética requiere de un análisis riguroso ya que intervienen varios criterios a considerar y más de una función objetivo con las cuales se deberá trabajar, por ejemplo uno de los criterios que se analiza en la planificación energética es el económico, en donde la función de costos va directamente relacionada con todos los costos asociados a la instalación de la tecnología a utilizar más los costos de operación y mantenimiento que en casi todos los proyectos independientemente del tipo de aplicación se deben minimizar, otro de los criterios que se maneja en la planificación energética es el tecnológico que por motivos de utilidad y funcionalidad estos deberán ser maximizados, como veremos después, en la selección de todos los criterios y sub-criterios a considerar para la modelización no se trata de una única función objetivo por lo cual el uso de los Métodos de Decisión Multicriterio (MCDM) son los indicados para realizar estos tipos de análisis.

En su dimensión más básica un proceso de toma de decisión puede concebirse como la elección por parte de un centro decisor (un individuo o un grupo de individuos) de «lo mejor» entre «lo posible». Los problemas analíticos surgen a la hora de definir «lo mejor» y «lo posible» en un determinado contexto decisional (...) El valor de las variables de decisión que satisfacen las restricciones constituyen lo que se denomina el conjunto factible o alcanzable que estructura y formaliza lo que se entiende por lo posible. Este conjunto puede ser continuo (esto es, existen infinitas soluciones factibles) o discreto (esto es, existe un número finito de soluciones factibles) (Romero 1996, 14).

Algunas de las aplicaciones de los MCDM (Benítez Leyva 2015, 40), para trazar una política energética adecuada son:

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

Por lo que nos centraremos justamente en la evaluación de las fuentes de energías renovables y la planificación energética tomando en cuenta además los aspectos ambientales y sociales.

2.2.1. Las distintas problemáticas

Para que en el contexto de la toma de decisiones se pueda hablar de decisión óptima sería necesario poder modelizar la situación de forma que:

- Cada solución considerada fuera exclusiva de todas las otras
- El conjunto de soluciones no tuviera carácter evolutivo
- Las soluciones pudieran ser ordenadas de la peor a la mejor o viceversa

Definamos un conjunto A de acciones potenciales que no siempre disfruta de estas características. Es por ello que, en materia de ayuda a la decisión, es preferible formular el problema en términos menos restrictivos. Desde esta óptica, deben considerarse cuatro *problemáticas de referencia* (de Vicente y Oliva 1998), (ver Tabla 2.4)

Tabla 2.4. Problemáticas de referencia para decisiones multicriterio (Roy and Bouyssou 1993)

Problemática	Objetivo	Resultado
$P\alpha$	Esclarecer la decisión mediante la elección de un subconjunto tan restringido como sea posible con vistas a la elección final de una sola acción, este subconjunto la "mejores" acciones (óptimos) o, en su defecto, acciones "satisfactorias".	Una elección o un procedimiento de selección.
$P\beta$	Esclarecer la decisión mediante una clasificación resultado de una asignación de cada acción a una categoría, estando las categorías definidas a priori en función de las normas que deberán seguir las acciones que están destinadas a recibir.	Una clasificación o un procedimiento de asignación.
$P\gamma$	Esclarecer la decisión mediante una ordenación obtenida reagrupando todo o parte de las acciones (las más satisfactorias) en clases de equivalencia, estando estas clases ordenadas, de forma completa o parcial, conforme a las preferencias.	Una ordenación (rangement) o un procedimiento de clasificación (classement)
$P\delta$	Esclarecer la decisión mediante una descripción, en un lenguaje apropiado, de las acciones y de sus consecuencias	Una descripción o un procedimiento cognitivo.

2.2.2. Clasificación de los MCDM

En el libro Análisis de las decisiones multicriterio de Carlos Romero (1996), se realiza una clasificación de 3 tipos de metodologías que se pueden utilizar según el tipo de problemas a estudiar con la utilización de métodos de decisión(ver Fig. 2.6).

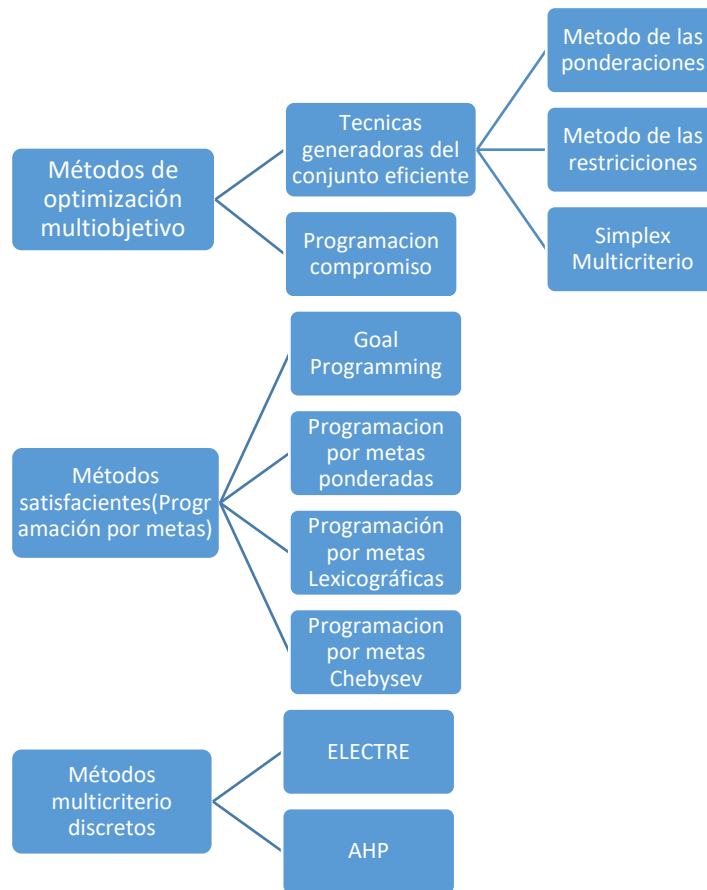


Fig. 2.6. Clasificación de MCDM en análisis de decisiones Multicriterio (Romero 1996).

2.2.2.1. Métodos de optimización multiobjetivo

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

2.2.2.2. Métodos satisfacientes

La programación por metas (“GP” Goal programming) se apoya en una lógica no optimizante sino en lo que Simón (1955) ha acuñado como lógica satisfaciente. En contexto decisional está definido por información incompleta, recursos limitados, multiplicidad de objetivos, conflictos de intereses, etc. Lo que intenta este método es que una serie de metas relevantes se aproximen lo más posible a unos niveles de aspiración fijados de antemano.

Para formular un modelo de programación por metas, igual que sucede con los demás enfoques multicriterio, se comienza por fijar los atributos que se consideran relevantes para el problema a analizar. Una vez establecidos los atributos, se asigna a cada uno de ellos un nivel de aspiración.

2.2.2.3. Métodos discretos

Dentro de lo que sería específicamente decisión multicriterio existen dos escuelas bien diferenciadas; La escuela americana y la escuela europea. El padre fundador de la escuela europea es Bernard Roy que desarrolló la serie de métodos ELECTRE (Roy 1985) y llevó a muchos científicos, principalmente en regiones de habla francesa, a diseñar métodos similares como PROMETHEE (Brans and Vincke 1985). En estos métodos desde el punto de vista de la planificación energética, existen situaciones en las que los expertos deben elegir dentro de un número finito de alternativas evaluadas bajo ciertos criterios en conflicto, un grupo más estrecho de ellas (una relación de mejor rango). El método ELECTRE (Elimination et choice Translating Reality) se ha aplicado en muchas áreas y en una de las aplicaciones más usadas es en la selección de alternativas energéticas con criterios en conflictos (Benitez Leyva 2015).

La escuela americana está inspirada por los trabajos de Keeney y Raiffa (Keeney 1996) sobre funciones multiatributo y teoría de la utilidad multiatributo. Un método popular, dentro de este marco, es el Proceso Analítico Jerárquico de Saaty, AHP, (1980, 1988). Tomando ELECTRE y AHP para representar (como suele ser usual) las respectivas escuelas, se pueden distinguir fácilmente las diferencias y las analogías (Benitez Leyva 2015).

2.2.3. MCDM en planificación energética

Un estudio realizado por Rojas-Zerpa and Yusta (2014) presenta información de 120 trabajos realizados donde se analiza las metodologías, tecnologías y aplicaciones para planeación de suministro eléctrico en zonas remotas rurales, el estudio es realizado en tres rangos de fechas, la primera entre 1980-1989 en donde los métodos utilizados principalmente son: Goal Programming (GP) con 26% y Linear Programming (LP) con 74%, el segundo intervalo entre 1990 y 1999 es en donde los MCDM comienzan a ser considerados con un 26.32% del total de estudios realizados y finalmente entre 2000-2013 se puede notar que de los estudios realizados en planificación energética para zonas rurales con MCDM tienden a tener una mayor incursión con un 34.48% (ver Fig. 2.7), esto debido principalmente a que se comienza a tener en cuenta varios criterios para la selección de las alternativas, de ahí la importancia para la utilización de MCDM.

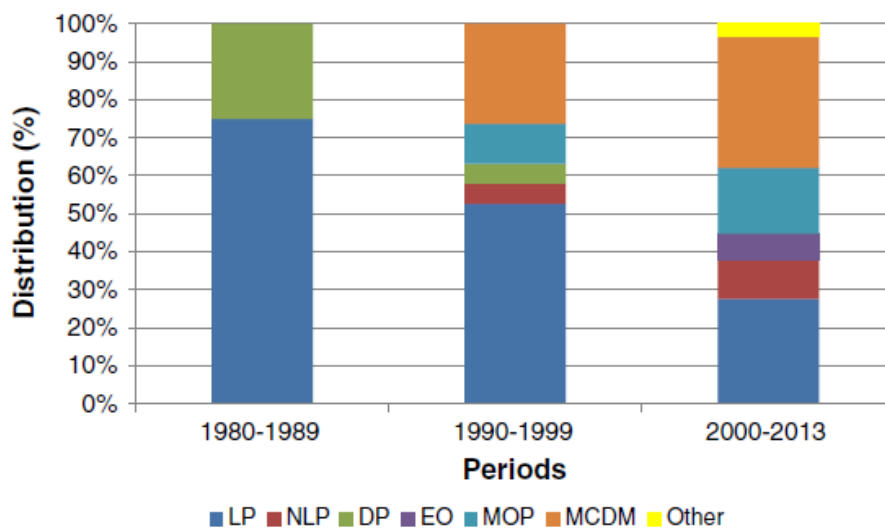


Fig. 2.7. Porcentaje de distribución de metodologías utilizadas en planeación de suministro descentralizado de energía. (Rojas-Zerpa and Yusta 2014).

Considerando el tercer periodo y desglosando los diferentes métodos utilizados, se muestra que entre los MCDM utilizados, la programación por metas (GP) representan un 50%, seguido de los métodos Compromise Programming (CP) con 20%, AHP (Analytic Hierarchy Process) con un 10% y los métodos Electre (Elimination et choice Transalating Reality) con un 10%, datos presentados en la Fig. 2.8.

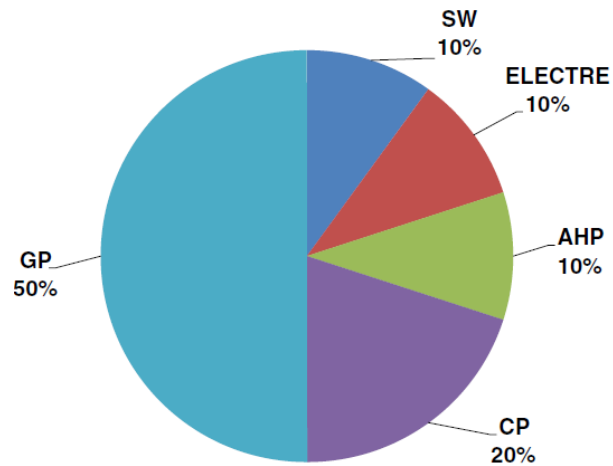


Fig. 2.8. MCDM utilizados en planeación de suministro de energía descentralizada en el periodo 2000-2013 (Rojas-Zerpa and Yusta 2015)

Tomando como referencia varios trabajos efectuados en la problemática de la elección de alternativas para suministro de energía eléctrica a zonas rurales con el uso de fuentes de energía renovables locales y que se describen en la tabla 2.5, donde se incluyen los objetivos planteados y el tipo de metodología utilizada, algunos de los trabajos efectuados como por ejemplo en Domenech Lega (2013), Benítez Leyva (2015), Ramón and Luis (2009), en donde, si bien es cierto para su modelización no utilizan un único Método de Decisión Multicriterio sin embargo realizan la modelización con adaptaciones de los mismos y utilizando algunos de los MDCM, por ejemplo en Rojas-Zerpa (2012), su resolución utiliza una combinación de dos tipos de metodologías multicriterio AHP (Saaty 1970) y VIKOR (Serafín Opricovic 1980).

Tabla 2.5. Resumen de objetivos planteados en la planificación energética y metodologías aplicadas en estudios realizados utilizados como referencia

BIBLIOGRAFIA	METODOLOGIA	OBJETIVOS GENERALES	OBJETIVOS ESPECIFICOS
Domenech Léga 2013	*Aplicación de metodología propia; *Programación lineal entera y mixta; *Programación compromiso; *AHP(Ponderación de criterios para encuestas)	*Proponer y desarrollar una metodología de ayuda a la toma de decisiones para diseñar sistemas de electrificación autónomos para comunidades rurales, basados en la tecnología híbrida (eólica y solar)	*Elaborar un procedimiento de cálculo que diseñe proyectos de electrificación con energía eólica y solar, y que permita generar diferentes alternativas de electrificación . * Proponer y desarrollar un procedimiento para seleccionar la más adecuada de entre las alternativas de electrificación generadas, desde un punto de vista económico, técnico y social. * Validar la metodología de diseño
Rojas Zerpa 2012	Combinación de dos técnicas *AHP y *VIKOR	*Diseñar, desarrollar y validar una nueva metodología de toma de decisiones multicriterio (MCDM) para facilitar la selección de un sistema de suministro eléctrico que aporte mayores beneficios al desarrollo local de pequeñas poblaciones rurales o remotas de países en vías de desarrollo	*Revision de generación centralizada y distribuida; *Revision de los modelos de energía considerados en la planificación del suministro eléctrico; *Formular y justificar la estrategia de planificación de la energía en el ámbito rural-remoto ; *Diseño MCDM en la selección del mejor sistema de suministro eléctrico (solución compromiso). *Aplicación caso de estudio; * análisis de sensibilidad * Destacar las conclusiones de la investigación; *Sugerir alternativas y/o líneas de investigación para trabajos futuros.
Benítez Leyva 2015	* Modelo original de Generación Energética Autóctona y Limpia(GEAYL); *Combinación de Programación lineal(PAMER) y Modelo lineal ; *AHP, Suma ponderada, Producto ponderado, distancias de Manhattan L1, Euclídea L2, L3.	*Desarrollar un procedimiento matemático que permita definir un sistema energético adecuado para una comunidad rural parcialmente o no electrificada; aprovechando los recursos energéticos renovables locales y lograr la máxima cobertura energética	* Formular un modelo de planificación de ayuda a la toma de decisiones que tenga en cuenta aspectos básicos de comunidades rurales aisladas *Validar el modelo de planificación energética aplicándolo a un caso concreto
Peralta Jaramillo 2011	Estudio de viabilidad de proyecto con energías renovables	*Realización de estudios y evaluaciones necesarias para desarrollo sostenible para electrificación con el uso de energías renovables de una determinada región	*Adquirir una visión de la situación socio-económica de la comunidad * Conocer la disponibilidad de recursos energéticos e, enfocado principalmente en el recurso Solar. * Conocer en detalle la demanda eléctrica actual y potencial de cada una de las viviendas y establecimientos comunitarios. *Definir la mejor alternativa, desde el punto de vista técnico - económico, para abastecer de electricidad las 24 horas del día a la
Ochoa Ramon 2009	*Adaptaciones de Metodos de decisión multicriterio y crea un cuadro de analisis para la toma de decisiones	*Definir y contrastar los criterios técnicos y sociales a utilizar en el proceso de toma de decisión, donde se tiene que elegir el tipo de sistema eólico solar de electrificación a instalar, para zonas rurales en comunidades de países en vías de desarrollo.	*Proponer y aplicar una metodología que permita comparar las diferentes alternativas tecnológicas, a partir de los criterios técnicos y sociales definidos, que coadyuve al proceso de la toma de decisiones para definir la mejor solución.

2.2.3.1. Métodos ELECTRE

Se utiliza para proceder a una clasificación de las poblaciones en categorías delimitadas por algunas alternativas de referencia o perfiles de referencia.

Comienza con una comparación por pares de las alternativas bajo cada uno de los criterios por separado. Se introducen las valoraciones de cada una de las acciones bajo cada los respectivos criterios, así como ciertos niveles de holgura para la diferencia entre dos valoraciones de dos acciones distintas bajo cada criterio. El decisor puede declarar que es indiferente entre las alternativas en consideración, que tiene una preferencia débil o estricta por una de las dos, o que es incapaz de expresar ninguna preferencia. La indiferencia entre dos acciones o bien su preferencia débil o estricta se resumen diciendo que la primera acción es tan buena como la segunda o, equivalentemente, que la primera acción sobreclasifica a la segunda. Así, bajo cada criterio hay un sistema completo o incompleto de relaciones binarias entre las alternativas, las denominadas relaciones de sobre-

clasificación. A continuación, se requiere al decisor que asigne pesos o factores de importancia a los criterios para expresar su importancia relativa; ELECTRE no propone realmente un enfoque sistemático para reducir la notoria inconsistencia de los seres humanos cuando establecen tales pesos. Y será precisamente ese el objetivo de la tesis: proponer un método tal. Finalmente, hay un paso de agregación. Para cada par de alternativas **A** y **B** ELECTRE se calcula un denominado índice de concordancia, que se define más o menos como la cantidad total de evidencia de la conclusión de que **A** sobre clasifica globalmente a **B**, así como un índice de discordancia, la cantidad total de contra-evidencia. El índice de concordancia incluye, por ejemplo, el peso total de los criterios bajo los cuales **A** sobre clasifica a **B**; en el índice de discordancia las holguras de veto juegan un papel primordial. Del estudio de los dos índices de ELECTRE se deduce finalmente si **A** sobre clasifica a **B** ó **B** sobre clasifica a **A**, o si no hay una relación de preferencia global entre las dos alternativas. Debido a que el sistema no es necesariamente completo, ELECTRE es a veces incapaz de identificar la alternativa preferida. Más aún, ELECTRE no siempre puede ordenar completamente las alternativas en un orden subjetivo de preferencias (Roy and Bouyssou 1993).

El método ELECTRE en todas sus versiones es conocido no sólo en Francia, sino en toda Europa, demostrándolo así la abundante literatura sobre ellos y sus aplicaciones. Existen algunas variantes del método ELECTRE y se indican en la tabla 3.7. (Romero 1996).

Tabla 2.6. El método ELECTRE, en todas sus versiones(Romero 1996)

Versión ELECTRE	Referencia básica	Tipo de criterios	Ponderaciones	Conceptos Tª de Difusos	Tipo de Problema
I	Roy 1.968	Simple	Si	No	Selección
II	Roy, Bertier 1.963	Simple	Si	Algo	Ordenación
III	Roy 1.978	Pseudo	Si	Si	Ordenación
IV	Roy, Hugonnard 1.982	Pseudo	No	No	Ordenación
IS	Roy, Skalka 1.985	Pseudo	Si	No	Selección
TRI	Roy, 1.981 Yu Wei, 1.992	Pseudo	Si	Si	Clasificación

2.2.3.2. Método Promethee

El método PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations) nace de la mano de Jean Pierre Brans (1984). A partir de entonces empiezan a aparecer numerosas aplicaciones con un especial interés en los problemas de ubicación: plantas hidroeléctricas, instalaciones comerciales en un ambiente competitivo, depósitos de deshechos, evaluación financiera, etc. Uno de los objetivos esenciales del método es el de ser fácilmente comprensible para el decisor, siendo en realidad uno de los más intuitivos de la decisión multi discreta. En las distintas versiones del método se hace un amplio uso del concepto de pseudo-criterio y se procede a asociar a cada criterio original un criterio generalizado, que responde a uno de los seis tipos reconocidos en general en la literatura sobre el tema. Aunque el método PROMETHEE está también sujeto a subjetividades, especialmente en lo que se refiere a la definición de los parámetros de los pseudo-criterios, Es preciso puntualizar, sin embargo, que estos umbrales no intervienen en el mismo momento de cada método, ya que en el ELECTRE I actúan directamente sobre la relación de superación, por lo que no es sorprendente que la influncien directamente, mientras que en el PROMETHEE los umbrales intervienen en la fase preparatoria de definición de los criterios. El método PROMETHEE posee una definición axiomática que permite caracterizarlo como un método de agregación que satisface condiciones de neutralidad (el pre orden agregado no se ve influido por el número de alternativas), monotonía (el pre-orden social se comporta en el buen sentido cuando el número de sujetos que prefieren una alternativa a otra aumenta), y otras condiciones algo más complejas (Bouyssou 1990; Brans, Vincke, and Mareschal 1986). Otras variantes del método PROMETHEE como PROMETHEE I Y II se plantean situaciones más sofisticadas de decisión, en particular problemas con un componente estocástico (Brans, Vincke, and Mareschal 1986; D'Avignon and Vincke 1988). También resaltamos la existencia de las versiones PROMETHEE III, IV, V y VI de muy diverso cariz entre sí. En Mareschal and Brans (1988), se plantea un análisis de intervalos de estabilidad de pesos, con el cual podemos analizar la sensibilidad de los resultados ante variaciones de los pesos de los criterios. Aún más, nos permite examinar la relevancia práctica de los criterios del problema, y eventualmente eliminarlos. (Romero 1996).

2.2.3.3. Método AHP

El Proceso de Análisis Jerárquico, es un método basado en la evaluación de diferentes criterios que permiten jerarquizar un proceso y su objetivo final consiste en optimizar la toma de decisiones gerenciales (Saaty 2008). Esta metodología se utiliza para resolver problemas en los cuales existe la necesidad de priorizar distintas opciones y posteriormente decidir cuál es la opción más conveniente. Las decisiones a ser tomadas con el uso de esta técnica, pueden variar desde simple decisiones personales y cualitativas hasta escenarios de decisiones muy complejas y totalmente cuantitativas.

El método **AHP** (Analytic Hierarchy Process) también comienza con una evaluación por pares de las alternativas bajo cada uno de los criterios por separado. En el experimento básico, donde las alternativas **A** y **B** se presentan bajo el criterio **C**, se requiere al decisor que exprese su indiferencia entre las dos, o su preferencia débil, fuerte o muy fuerte por una de ellas. Su juicio verbal (la gradación de selección) es a continuación convertida en un valor numérico sobre una denominada escala fundamental. Mediante una matriz (ver Fig.2.9), el AHP calcula las puntuaciones parciales bajo cada criterio, también denominadas “impact scores”, aproximando los valores subjetivos de las alternativas bajo cada criterio. Merece la pena notar que las puntuaciones parciales no son únicas. Se define un cociente para cada par de alternativas, con lo cual las puntuaciones parciales tienen un grado multiplicativo de libertad. Pueden obviamente ser normalizadas.

Escala numérica	Escala verbal	Explicación
1	Igualmente preferida.	Dos elementos contribuyen en igual medida al objetivo.
3	Moderadamente preferida.	La experiencia y el juicio favorecen levemente a un elemento sobre el otro.
5	Fuertemente preferida.	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente a un elemento sobre el otro.
7	Preferencia muy fuerte o demostrada.	Un elemento es mucho más favorecido que el otro; su predominancia se demostró en la práctica.
9	Extremadamente preferida.	Preferencia clara y absoluta de un criterio sobre otro.
2, 4, 6, 8		Intermedia entre valores anteriores.

Fig. 2.9.Escala numérica propuesta por Saaty para efectuar comparaciones (adaptado de Saaty 2008).

Comparaciones por pares y cálculos similares conducen a pesos normalizados para los respectivos criterios. Finalmente, hay un paso de agregación que genera puntuaciones multi-criterio globales ya media aritmética. Por medio de estas cantidades, denominadas

puntuaciones finales, tenemos un orden global (o estructura global de preferencia) definida sobre el conjunto de alternativas. En la terminología de la escuela americana, las puntuaciones parciales y globales de las funciones parciales y la función global específicamente. En general, cada una de las alternativas es Pareto-óptima, porque las alternativas dominadas por otras pueden ser inmediatamente eliminadas de consideraciones posteriores (Benítez Leyva 2015).

2.3. Estructura de preferencias

Los criterios relevantes en un problema decisional pueden tener diferente importancia para el centro o persona decisor, por lo que los pesos de los criterios pueden variar uno respecto del otro dependiendo del decisor o centro decisor(...)la estimación de las preferencias relativas conlleva a una fuerte carga subjetiva los que hace necesario que para estimar dichos pesos preferenciales se tenga que interaccionar de una manera u otra con el centro decisor (Romero 1996, 28).

Los métodos para ponderación de criterios que se detallan a continuación son tomados de Romero (1996). La más sencilla de abordar esta tarea es pedir al centro decisor o decisor que clasifique por orden de importancia, es decir si se tiene n criterios, asignar al criterio que se considere más importante el número 1 y seguir así hasta los n criterios, pueden ser obtenidos a partir de estas dos expresiones:

$$W_i = \frac{1/r_j}{\sum_{i=1}^n 1/r_i}$$

Ecuación 1.

$$W_j = \frac{(n-r_j+1)}{\sum_{i=1}^n (n-r_i+1)}$$

Ecuación 2.

En las ecuaciones 1 y 2 el termino r_j es el lugar o posición que ocupa el criterio j -ésimo en la clasificación establecida por el centro decisor. La desventaja de este procedimiento es que ordenar simultáneamente los n criterios es una tarea complicada para cualquier centro decisor, muy especialmente cuando el numero n de criterio es elevado. Otra forma de valorar los criterios puede ser realizada con el método AHP en donde se pide a varios expertos que determinen de acuerdo a una escala que compara en pares los distintos criterios y da una valoración de acuerdo a una escala definida (Saaty 2008).

Un resumen de otras metodologías utilizadas se presentan en un estudio realizado por Wang (et al. 2009), donde se debe tener en claro que la asignación de pesos de los criterios dependen del método empleado, en donde el principal actor es el decisor o los decisores ya que la importancia relativa de los criterios viene definida en primera instancia por estos actores.

Categories	Weighting methods
Subjective weighting	Simple multi-attribute rating technique (SMART) SMARTER Swing Trade-off SIMOS Pair-wise comparison AHP Least-square method Eigenvector method Delphi method Consistent matrix analysis PATTERN
Objective weighting	Least mean square (LMS) method Minmax deviation method Entropy method TOPSIS method Vertical and horizontal method Variation coefficient Multi-objective optimization method Multiple correlation coefficient Principal component analysis
Combination weighting	Multiplication synthesis Additive synthesis Optimal weighting based on sum of squares Optimal weighting based on minimum bias Optimal weighting based on relational coefficient of gradation

Fig. 2.10. Métodos de asignación de pesos para Decisión multicriterio en energía sustentable(Wang et al. 2009)

2.4. Selección de criterios

Los valores son la fuerza que impulsan la toma de decisiones donde la toma de decisiones generalmente se centra en la selección de las alternativas. No se debe concentrar primero en las alternativas y después ocuparse en los objetivos y criterios para evaluar las alternativas. El pensamiento centrado en el valor (*Value-focused thinking*) es la forma de canalizar un recurso crítico o de pensamiento difícil para conducir a una mejor decisión. Las situaciones creadas deben de ser tomadas como oportunidades de decisión y no como un problema de decisión.

En la Fig. 2.11., se describe el procedimiento del Pensamiento centrado en el Valor (VFT) para identificar las oportunidades de decisión en base a esta propuesta, así, definir los criterios de selección y alternativas (Keeney 1996).

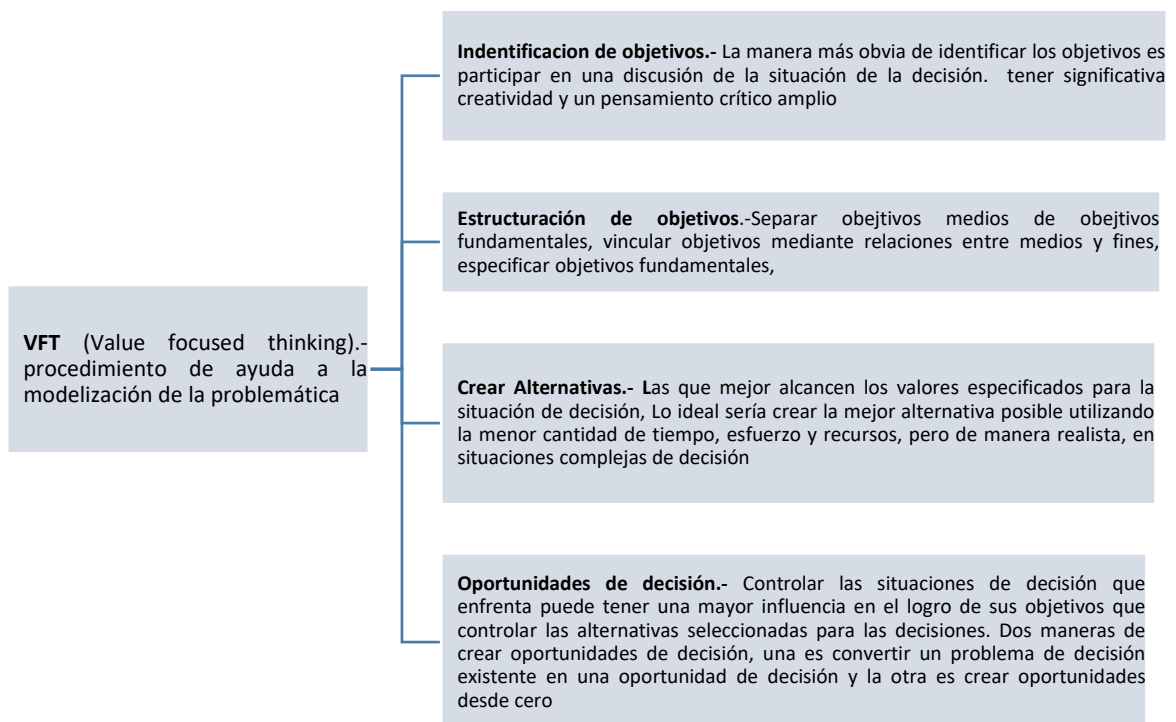


Fig. 2.11. Procedimiento de ayuda a la modelización de la problemática en Planificación Energética Rural (adaptado de Keeney 1996).

El principal objetivo de la planificación energética busca la selección de la alternativa que mejor se adapte a la realidad en base varios criterios de selección, para lo cual se ha empezado justamente por definir estos objetivos. Una manera de realizar esto es participando en una discusión de la situación de la decisión, una primera revisión de los

trabajos similares realizados con un análisis de los objetivos buscados presentados en la tabla 2.4., dando una base para la investigación adicional, así, se responde a la pregunta “¿Qué es lo que se pretende lograr en esta situación?”(Keeney 1996).

Definidos los objetivos fundamentales, y tomando como referencia el procedimiento de ayuda VFT, antes de definir las alternativas se deberá definir primero los criterios de selección para determinar los objetivos cualitativos, así como los enunciados cuantitativos de los valores (por ejemplo, las prioridades), deben ser probados sistemáticamente para iniciar el pensamiento creativo. Lo ideal sería crear la mejor alternativa posible utilizando la menor cantidad de tiempo, esfuerzo y recursos, pero de manera realista, en situaciones complejas de decisión. Estos criterios de selección deberán englobar todos los requerimientos necesarios para el correcto análisis de la problemática energética rural.

“En el pasado la toma de decisiones para escoger las mejores alternativas de electrificación se basaba únicamente en criterios económicos, específicamente en la minimización de costes. Actualmente uno de los retos de la electrificación rural en países en vías de desarrollo es desarrollar herramientas que tomen en cuenta otros aspectos importantes para el desarrollo local y regional”(Ochoa Ramón 2009).

En los MCDM uno de los aspectos más importantes es la identificación de los criterios de selección, para ello hemos tomado varios trabajos similares los cuales se presentan en la Tabla. 2.7, se ha obtenido un resumen de los criterios utilizados y las modalidades de los tipos de sistemas utilizados y que son objeto de referencia en la modelización de nuestro tema de estudio.

Se puede verificar que en su mayoría se utilizan 4 criterios principales: económicos, técnicos, ambientales y sociales, los que a su vez definen sub-criterios de acuerdo al tipo de sistema implementado (ver tabla 2.8).

Tabla 2.7. Criterios y tipo de tecnología utilizada en estudios realizados en planificación energética en zonas rurales.

BIBLIOGRAFIA	CRITERIOS TECNICOS	CRITERIOS ECONOMICOS	CRITERIOS SOCIALES	CRITERIOS AMBIENTALES	TIPO DE SISTEMA							
					SPV	ST	WES	SHP	Biogas	MCI	ENERGY MIX	
Domenech Léga 2013	x	x	x		x		x					x
Rojas Zerpa 2012	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x
Benítez Leyva 2015	x	x	x	x	x		x		x		x	x
Ochoa Ramon 2009	x	x	x	x	x		x					x
Peralta Jarammillo 2011	x	x			x		x				x	x

Tabla 2.8. Detalle de criterios utilizados para modelización y tipo de modalidad adoptada en sistemas de planificación energética

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

Recopilando información adicional, por ejemplo en Wang (et al. 2009), se presenta una revisión de estudios realizados con decisión multicriterio en planificación energética y la mayoría de los criterios detallados (ver Fig. 2.12) coinciden igualmente con los datos presentados en la Tabla 2.8., es así que tomaremos como punto de partida estas referencias, verificando que los criterios de selección sean los acordes a la realidad ecuatoriana.

Aspects	Criteria
Technical	Efficiency Exergy efficiency Primary energy ratio Safety Reliability Maturity Others
Economic	Investment cost Operation and maintenance cost Fuel cost Electric cost Net present value (NPV) Payback period Service life Equivalent annual cost (EAC) Others
Environmental	NO _x emission CO ₂ emission CO emission SO ₂ emission Particles emission Non-methane volatile organic compounds (NMVOCs) Land use Noise Others
Social	Social acceptability Job creation Social benefits Others

Fig. 2.12. Evaluación típica de criterios en sistemas de suministro de energía (Wang et al. 2009).

2.5. Análisis de alternativas

Las alternativas energéticas deberán ir en función de un análisis del lugar objeto de estudio, para lo cual se deberá recolectar información actualizada con datos del potencial energético durante un periodo mínimo de un año, se podrán utilizar estaciones meteorológicas para poder tener resultados más precisos.

En el Ecuador el uso de energías renovables no es aprovechado en su totalidad, si consideramos la Fig.2.13., podemos apreciar que las fuentes de energía que más energía proveen es la energía térmica y la energía hídrica, las cuales representan un alto porcentaje (94.7%) respecto de los otros tipos de energía, la energía solar y eólica apenas representan un 0.39% del total de energía producida.(Ministerio coordinador de sectores estratégicos 2015).

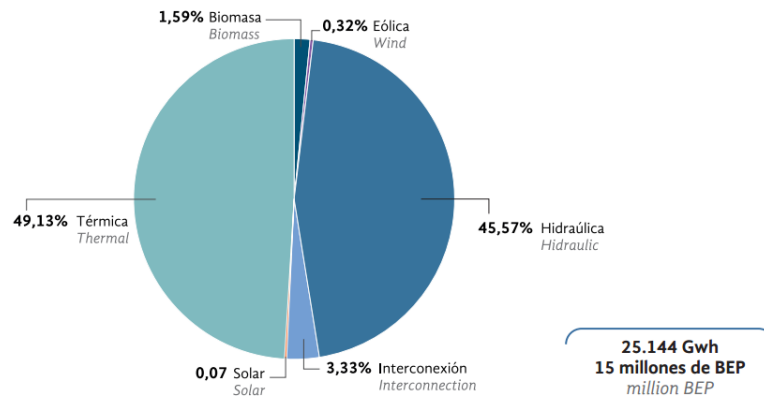


Fig. 2.13. Estructura de generación de electricidad en Ecuador (Ministerio coordinador de sectores estratégicos 2015).

Energías renovables como la solar fotovoltaica y la eólica han sido las más utilizadas en zonas rurales debido a una mayor facilidad de instalación de la tecnología y no requiere de equipos sofisticados o grandes áreas para su implementación (Benítez Leyva 2015; Domenech Léga 2013; Ochoa Ramón 2009; Peralta Jaramillo 2011; Rojas-Zerpa 2012; Ramírez de Alba 2014).

Debido principalmente a la posición geográfica en la que se encuentra el Ecuador tiene un alto potencial solar. La radiación media horizontal se encuentra entre 3-4 KWh/m²/día (Peralta Jaramillo 2011), en la Fig. 2.13 se presenta el mapa de irradiación solar completa tomada como referencia para el mes de febrero.

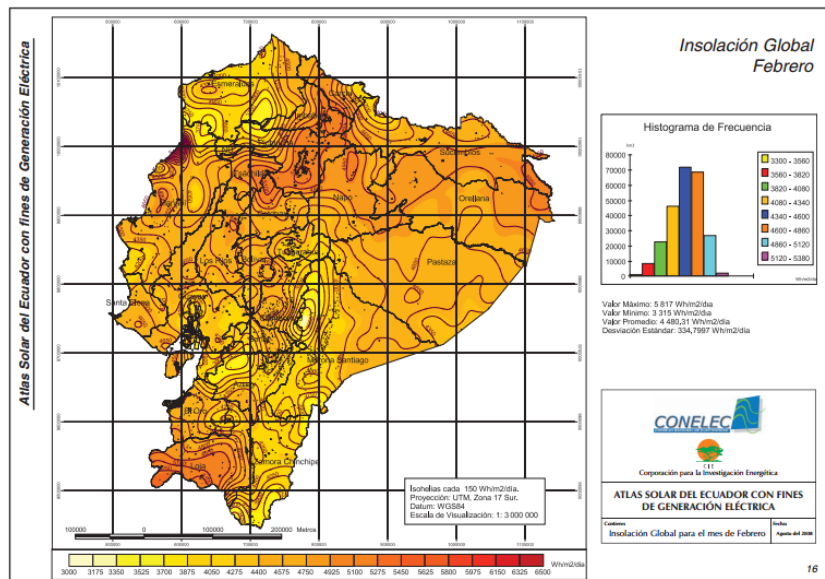


Fig. 2.14. Mapa de insolación global de Ecuador correspondiente al mes de febrero(CONELEC 2008b).

3. Fundamentación metodológica

3.1. Proceso de planificación para electrificación a zonas rurales utilizando MCDM

En el proceso de planificación para electrificación de zonas rurales con la utilización de un método de decisión multicriterio, lo primero a realizar es un estudio de las condiciones socio-económicas y ambientales en el sector donde se pretende realizar un proyecto de electrificación. En el presente trabajo nos centramos en las zonas rurales aisladas, siendo una de las principales características que se encuentra muy alejadas de las redes de energía por lo que es necesario la búsqueda de alternativas para dotar del servicio de energía a dichos sectores, optando por energías renovables tal como la solar PV y la eólica, otra de las características es que la mayoría de los sectores se dedican en su mayor parte a labores de agricultura con limitados recursos económicos, igualmente el consumo de energía eléctrica es bajo por lo que muchas de las veces los proyectos no son rentables, pero entre una de las obligaciones del estado Ecuatoriano esta:

“satisfacer las necesidades del servicio público de energía eléctrica y alumbrado público general del país, mediante el aprovechamiento eficiente de sus recursos, de conformidad con el Plan Nacional de Desarrollo, el Plan Maestro de Electricidad, y los demás planes sectoriales que fueren aplicables.”(Constituyente 2008)

Lo primero a realizar será definir los criterios de selección que deberán ser adecuados a la problemática de la planificación energética ecuatoriana, Luego se procederá a la definición de alternativas tecnológicas para lo cual se deberá realizar una evaluación de los recursos energéticos locales disponibles así también de los costos asociados a la instalación de estas alternativas tecnológicas para luego proceder a evaluar las diferentes opciones.

Para lograr este objetivo deberán tomarse en cuenta las necesidades del sector en análisis, la demanda de energía requerida, el tipo de configuración del sistema, el tipo de tecnología adoptado, la variación del recurso energético disponible y otros elementos que puedan afectar a la viabilidad de un proyecto.

Una vez definida las alternativas se procederá a la elección de la mejor alternativa con un método de ayuda a la decisión. El método seleccionado será aquel que se acople los datos obtenidos y pueda dar un resultado favorable tomando en consideración todos los aspectos considerados frente a la problemática planteada (Ochoa Ramón 2009), en la Fig. 3.1 se presenta un esquema general de los pasos a seguir.

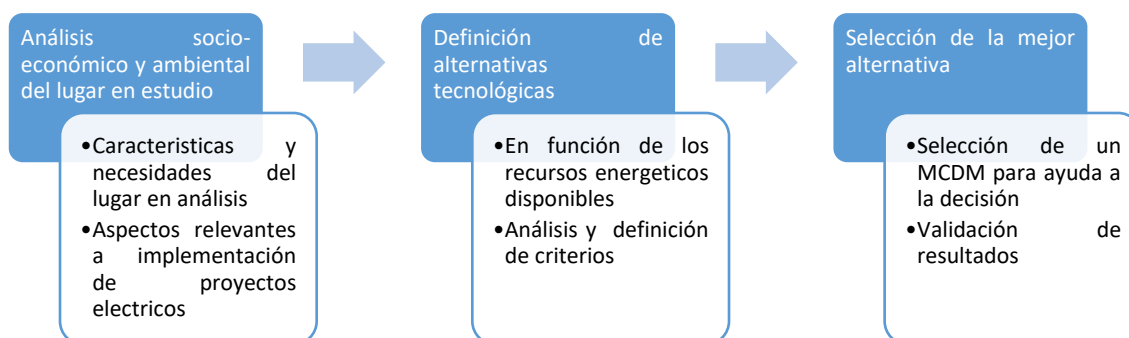


Fig. 3.1. Esquema general en la planificación para electrificación en zonas rurales con ayuda de MCDM (adaptado de Ochoa Ramón 2009)

3.2. Definición de criterios

En base a los estudios analizados y presentados en la Tabla 2.8., los aspectos a considerar además del tipo económico y técnico los cuales han sido los que más se han considerado hasta finales de los años 90 (Rojas-Zerpa and Yusta 2014), se incluirán 2 aspectos adicionales, el ambiental y social.

En este estudio se analizarán 4 aspectos o criterios principales; Técnicos, económicos, ambientales y sociales, los que a su vez constan de sus respectivos sub-criterios que han sido desarrollados en función del tipo de aplicación que se estudia en el presente trabajo y los cuales se presentamos en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Criterios a considerar en la modelización para electrificación rural

CRITERIOS	SUB-CRITERIOS	UNIDAD
Técnicos	- Disponibilidad de suministro de energía primaria	%
	- Capacidad de cobertura de demanda de energía	%
Económicos	- Costos de Inversión	\$
	- Costos variables de operación y mantenimiento	\$
Sociales	- Aceptación social de la energía	%

Ambientales	- Emisiones de CO2	TnCO2/año
	- Ocupación del suelo	%
	- Ruido	Escala (0-3)
	- Impacto visual	Escala (0-3)

La descripción de cada uno de ellos con una breve descripción sobre la aplicación para el caso de electrificación a zonas rurales se presenta en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Descripción de criterios a utilizar con sus respectivas unidades de medida

ASPECTOS	CRITERIOS	DESCRIPCIÓN	SIMBOLOGÍA
Técnicos	- Disponibilidad de suministro de energía primaria	Está definida como el suministro de la energía primaria que puede dotar el sistema para los usuarios dependiendo de la curva de demanda de energía además considerando la cantidad de energía primaria que se puede almacenar para su posterior utilización. El Porcentaje global de energía que puede dotar al sistema.	g1
	- Capacidad de cobertura de demanda de energía eléctrica	Intenta medir del sistema la capacidad o el componente para realizar la función requerida, bajo ciertas condiciones ambientales y de operación, e incluso en un período de tiempo. En este sentido, la capacidad de cobertura se refiere al grado de fiabilidad de poder suministrar energía en un instante determinado	g2

Económicos	- Costos de Inversión	Uno de los aspectos que más peso sin duda tiene al momento de implementar un sistema ya sea con energías renovables para zonas rurales o redes de distribución en zonas urbanas es el costo de inversión que representa el instalar todos los equipos y materiales incluida la mano de obra, ya que para la inversión de deben buscar los mecanismos para su financiación por lo que se deberá justificar correctamente y acorde a las necesidades planteadas	g3
	- Costos variables de operación y mantenimiento	Una vez instalados los diferentes proyectos uno de los requisitos para prolongar la vida útil de los equipos es dar un correcto mantenimiento ya sea este preventivo o correctivo, el cual ayudara a que la eficiencia de los equipos se mantenga muy cercano a los estipulados por el fabricante, este mantenimiento por lo general de acuerdo a datos proporcionados por empresas distribuidoras se lo realiza en un inicio por personal calificado quienes a su vez enseñan a los lugareños para que puedan ser ellos los que se encarguen del mantenimiento preventivo y en caso de requerir mantenimiento	g4

		correctivo se deberá nuevamente acudir al personal calificado	
Sociales	- Aceptación social de la energía	Se refiere al grado de aceptación que se puede obtener luego de instalado el sistema	g5
Ambientales	- Emisiones de CO2	Representan las emisiones tanto de equipos como de combustibles, y serán cruciales para las soluciones multi-objetivas obtenidas como resultado, para que la estimación sea más objetiva, se deberá considerar las emisiones del ciclo de vida	g6
	- Ocupación del suelo	Porción utilizada del suelo en donde se instalará los sistemas y que pueden afectar la utilización del mismo como por ejemplo disminución para zonas dedicadas a la agricultura	g7
	- Ruido	Asociada directamente a la cantidad de ruido producida por el funcionamiento de torres eólicas	g8
	- Impacto visual	El grado de afección visual que se puede obtener luego de la puesta en marcha de un proyecto ya sea eólico o solar fotovoltaico.	g9

3.3. Definición de alternativas

En la creación de alternativas para la optimización de electrificación a zonas rurales en Ecuador se consideran los aspectos más relevantes de la región, aprovechando el uso de los recursos energéticos locales disponibles que alcancen los valores especificados para la situación de decisión y que cumpla con los objetivos fijados.

Alternativas del tipo solar y eólica son una fuente potencial para generación de energía eléctrica, tal como se aprecia en la Fig.3.2, existe un pobre aprovechamiento de estas fuentes de energía, no así las fuentes del tipo hidráulica y térmica que han sido las más utilizadas, sin embargo, este tipo de fuentes no resultan muy convenientes a baja escala, y además, las centrales térmicas utilizan energías no renovables por lo que agudizan el problema de la contaminación ambiental (Ministerio coordinador de sectores estratégicos 2015).

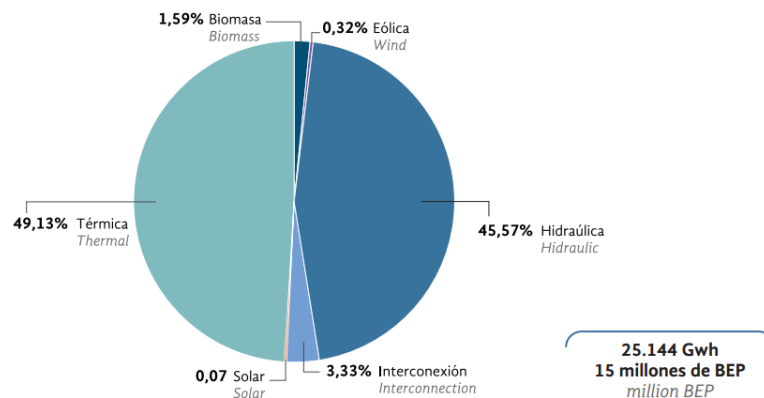


Fig. 3.2. Estructura de generación de electricidad (Ministerio coordinador de sectores estratégicos 2015)

En base a lo expuesto se toman en consideración alternativas energéticas renovables como la solar fotovoltaica y la eólica.

Debido principalmente a la posición geográfica en la que se encuentra el Ecuador tiene un alto potencial solar. La radiación media horizontal se encuentra entre 3-4 KWh/m²/día (Peralta Jaramillo 2011), en la Fig. 3.3 se presenta el mapa de irradiación solar completa tomada como referencia para el mes de febrero.

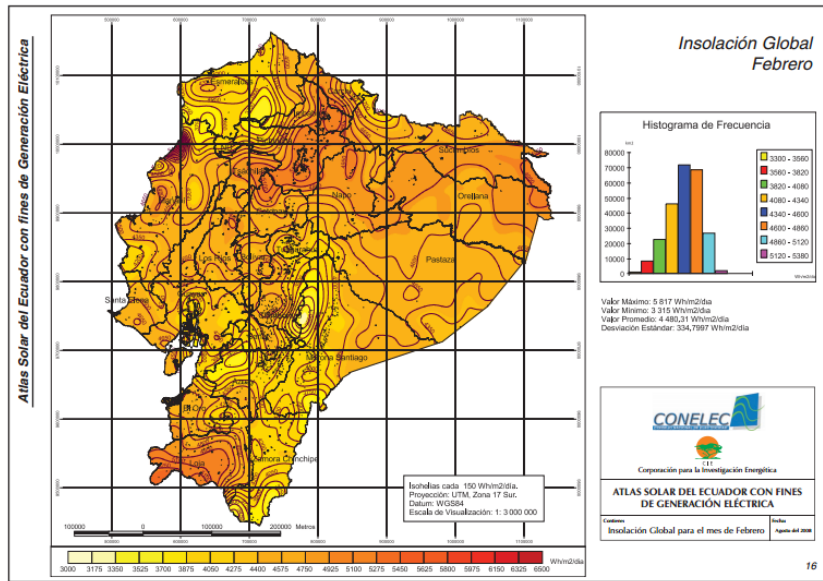


Fig. 3.3. Mapa de insolación global de Ecuador correspondiente al mes de febrero(CONELEC 2008b)

El recurso eólico si bien tiene un gran potencial energético, sobre todo en la parte central de la sierra, tampoco ha sido muy aprovechado. En el Ecuador continental existe un solo proyecto con generación eólica ubicado en la Provincia de Loja con 11 aerogeneradores de 1.5MW c/u con una potencia total de 16MW, así también existen 2 proyectos en la isla Galápagos, el proyecto isla San Cristóbal y el proyecto en la isla Baltra que al estar en una reserva natural requieren de un análisis diferente por lo que no es parte de estudio. En la Fig. 3.4 se presenta el atlas eólico del Ecuador.(Ministerio de electricidad y energías renovables 2013).

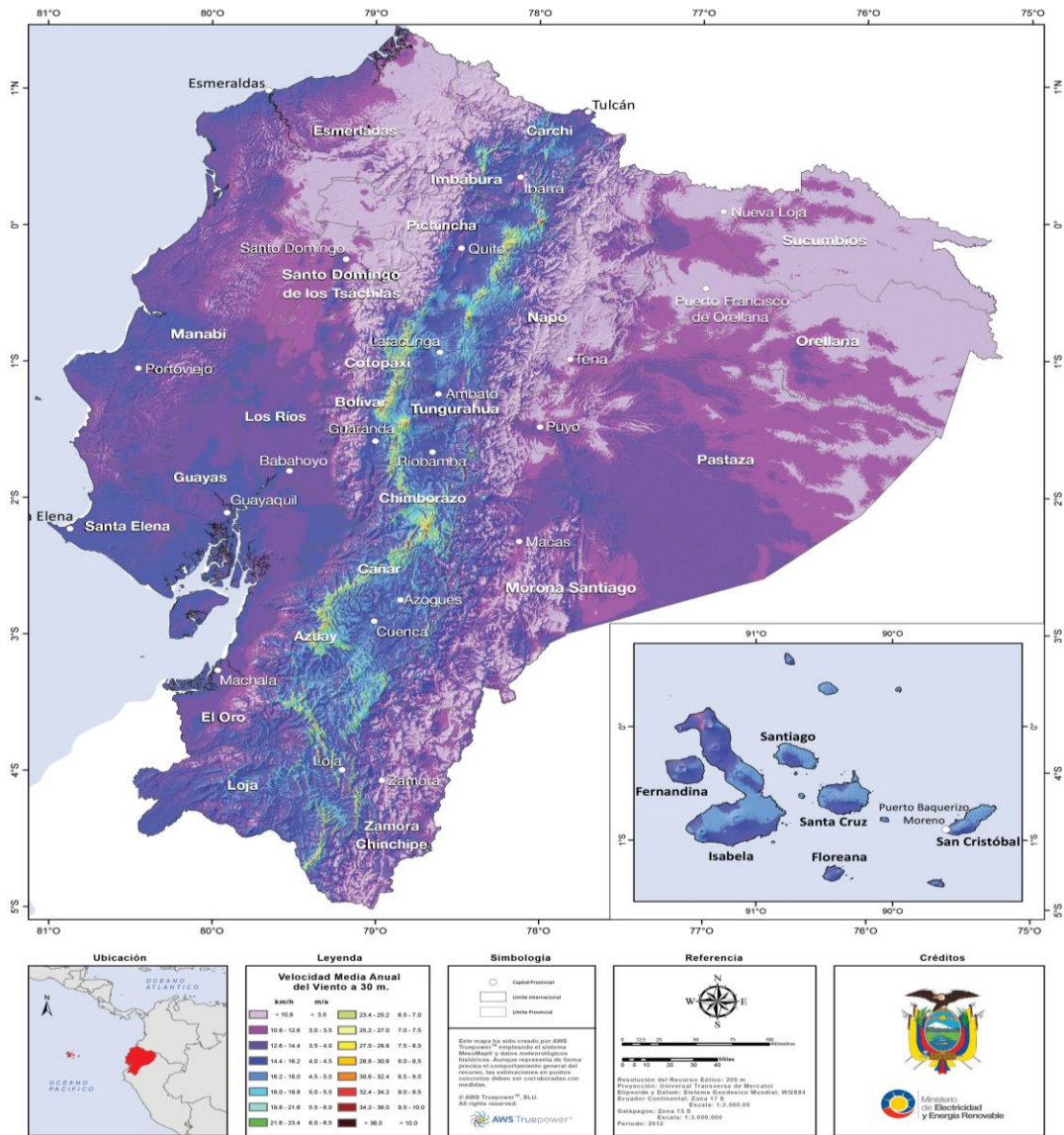


Fig. 3.4. Atlas eólico del Ecuador con datos de velocidad media anual referenciados a 30m de altura sobre el suelo (Ministerio de electricidad y energías renovables 2013)

Teniendo en cuenta el potencial energético de estas fuentes de energía renovable se consideran estos dos tipos de energías en la selección de las alternativas para los MCDM en donde además se considerará la opción de una extensión de la red pública conjuntamente con un mix de producción entre estas alternativas energéticas, en la tabla 3.3 se presentan las posibles alternativas objeto de estudio.

Tabla 3.3. Matriz de decisión con alternativas y criterios planteados para sistemas de electrificación en zonas rurales

		<div style="display: flex; justify-content: space-between; padding: 5px;"> Disponibilidad de suministro Cobertura de demanda Costos de inversión Costos de operación y mant. Aceptación social de la energía Emisiones de CO2 Ocupación de suelo Ruido Impacto visual </div>								
		Técnicos		Económicos		Sociales	Ambientales			
CODIGO	ALTERNATIVAS	g1	g2	g3	g4	g5	g6	g7	g8	g9
A1	SPV y baterías en cada vivienda	a11	a12	a13	...	...	...	...	...	...
A2	HIBRID SPV-WT y baterías en cada vivienda	a21	a22	...	...	...	...	...	...	...
A3	SPV MICRO-GRID y baterías	a31	...	...	...	...	...	...	...	...
A4	SPV, WT MICRO-GRID y baterías	...	...	...	...	...	...	...	...	...
A5	Extensión de la red pública	...	...	...	...	...	...	...	...	...
.....					
DDG	Generación descentralizada dispersa									
CDG	Generación descentralizada compacta									
CG	Generación Centralizada									

3.4. Selección del MCDM

Para la modelización tomando en cuenta los criterios presentados en la tabla 3.1, y el conjunto de alternativas detallados en la tabla 3.3. En función de los métodos utilizados en planificación energética y en base la descripción de los métodos de sobre clasificación el Método ELECTRE, con su versión ELECTRE TRI sería un candidato idóneo para modelar el problema de decisión para la planificación de electrificación de zonas rurales al utilizar pseudos-criterios, además de su indiferencia en las diferentes escalas, pudiendo utilizarse tanto escalas cualitativas y cuantitativas, se podrá realizar la comparación entre pares para la selección de la mejor alternativa clasificando estas alternativas de acuerdo a las necesidades planteadas y bajo los criterios de selección definidos.

En el método ELECTRE TRI hay dos tipos diferentes de escenarios: el pesimista y el optimista. Para la asignación, ELECTRE TRI compara las alternativas con los perfiles utilizando el concepto clásico de relación de superación valorada. Luego, esta relación valorada de clasificación se utiliza para definir la preferencia, la indiferencia y la incomparabilidad.

3.4.1. El problema de la clasificación

Bernard Roy (1985) define cuatro tipos de problemas en la ayuda de decisión multi-criterio:

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

La problemática de clasificación evalúa cada acción según su mérito absoluto intrínseco. Cada acción se asigna a una categoría independientemente de las acciones

restantes. Si las categorías se ordenan según las preferencias del tomador de decisiones (por ejemplo, las categorías "alto riesgo", "riesgo medio", "bajo riesgo", "riesgo muy bajo" en la evaluación de solicitudes de crédito). De lo contrario, la problemática puede denominarse clasificación nominal (por ejemplo, separar a los solicitantes de empleo de acuerdo con las categorías "perfil creativo", "perfil técnico", "Perfil de relaciones ", " perfil de liderazgo ").(Roy 1985).

3.4.2. El método ELECTRE TRI

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

Introduzcamos alguna notación:

- m número de acciones. – el número de alternativas en función de fuentes de energía renovables locales o una combinación de los mismos.
- n número de criterios. – 4 criterios generales: económicos, técnicos, ambientales y sociales
- t Número de categorías. – por rango de importancia de implementación de los diferentes sistemas
- $A = \{a_1, \dots, a_m\}$ conjunto de acciones. – matriz con las diferentes alternativas y datos de los valores de criterios
- $G = \{g_1 (\cdot), \dots, g_n (\cdot)\}$ Conjunto de criterios (funciones valoradas reales en A);
- $C = \{C_1, \dots, C_t\}$ conjunto de categorías ordenadas (C_1 es el peor, C_t es el mejor);
- $B = \{b_0, \dots, b_t\}$ conjunto de perfiles (acciones de referencia) que separan categorías consecutivas. -

Cada categoría C_i está limitada por dos acciones de referencia (perfiles): b_i es su límite superior y b_{i-1} su límite inferior, ver Figura 3.5.

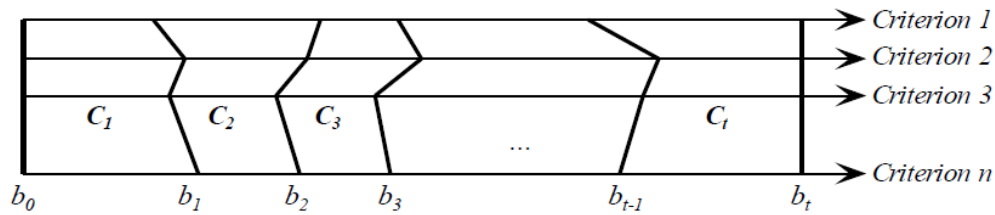


Fig. 3.5. Estructuración método ELECTRE TRI (Yu 1992)

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

3.4.2.1. La modelización de las preferencias

En de Vicente y Oliva (1998) se presenta un estudio para ayuda a la problemática de las decisiones multicriterio. Una etapa fundamental de la ayuda a la decisión es aquella en la cual se tienen en cuenta las preferencias del (o de los) decisor (es) en relación a las acciones. Admitiremos que estas preferencias pueden ser modelizadas mediante las siguientes cuatro situaciones caracterizadas a través de relaciones binarias:

- **Indiferencia:** “la acción a es indiferente a la acción b ” se denota por aIb ; corresponde a la existencia de razones claras y positivas que justifican una equivalencia entre las dos acciones. La relación I es simétrica y reflexiva
- **Preferencia estricta:** “la acción a es estrictamente preferida a la acción b ” se denota por aPb ; La situación de preferencia estricta corresponde a la existencia de razones claras y positivas que justifican una preferencia significativa de una de las dos acciones (estando dicha acción identificada). La relación P es asimétrica e irreflexiva

- **Preferencia débil:** “la acción a es débilmente preferida a la acción b ” se denota por aQb ; Corresponde a la existencia de razones claras y positivas que invalidan una preferencia estricta en favor de una de las dos acciones (estando dicha acción identificada) pero esas razones son insuficientes para deducir bien una preferencia estricta en favor de la otra, bien una indiferencia entre las dos acciones (esas razones no permiten por tanto aislar una de las dos situaciones precedentes como la única apropiada). La relación Q es asimétrica e irreflexiva
- **Incomparabilidad:** “las acciones a y b son incomparables” se denota por aRb . corresponde a la ausencia de razones claras y positivas que justifiquen una de las tres situaciones precedentes. La relación R es simétrica e irreflexiva

3.4.2.2. Definición de relación de superación

Presentamos aquí la definición de la relación de superación en $A \times B$, propuesta por Dias and Mousseau (2002):

- K_j es el coeficiente de importancia (peso) del criterio $g_j(\cdot)$, Que es siempre un número positivo;
- $Q_j(b_h)$ es el umbral de indiferencia asociado al criterio $g_j(\cdot)$ Y al perfil b_h ;
- $P_j(b_h)$ es el umbral de preferencia asociado al criterio $g_j(\cdot)$ Y al perfil b_h ;
- $U_j(b_h)$ es el umbral de discordancia asociado al criterio $g_j(\cdot)$ Y al perfil b_h ;
- $V_j(b_h)$ es el umbral de veto asociado al criterio $g_j(\cdot)$ Y al perfil b_h ;
- Δ_j es la ventaja de a_i sobre b_h en el criterio $g_j(\cdot)$:

$$\Delta_j = \begin{cases} g_j(a_i) - g_j(b_h) & , \text{ si } g_j(\cdot) \text{ debe maximizarse (cuanto más} \\ g_j(b_h) - g_j(a_i) & \text{mejor)} \end{cases}$$

, si $g_j(\cdot)$ debe minimizarse

- $C_j(a_i, b_h)$ es el índice de concordancia para la afirmación " $a_i S b_h$ ", considerando el criterio $g_j(\cdot)$;
- $C(a_i, b_h)$ es el índice de concordancia para la afirmación " $a_i S b_h$ ", considerando todos los criterios;
- $D_j(a_i, b_h)$ es el índice de discordancia para la aserción " $a_i S b_h$ ", considerando el criterio $g_j(\cdot)$;

- $S(a_i, b_h)$ es el índice de credibilidad para la afirmación " $a_i S b_h$ ", considerando todos los criterios;
- λ es el nivel de corte

Para cada criterio ($j = 1, \dots, n$), un índice de concordancia indica cuánto ese criterio concuerda con la hipótesis " $a_i S b_h$ ", que se calcula de la siguiente manera:

$$c_j(a_i, b_h) = \begin{cases} 0 & , \text{ if } \Delta_j < -p_j(b_h) \\ (p_j(b_h) + \Delta_j) / (p_j(b_h) - q_j(b_h)) & , \text{ if } -p_j(b_h) \leq \Delta_j < -q_j(b_h) \\ 1 & , \text{ if } \Delta_j \geq -q_j(b_h) \end{cases}$$

La concordancia es máxima (1) cuando a_i es mejor que b_h o peor, pero por una pequeña diferencia (hasta $q_j(b_h)$). Cuando a_i es peor que b_h , la concordancia comienza a disminuir cuando la diferencia a favor de b_h llega a ser mayor que $q_j(b_h)$ y alcanza su mínimo (0) cuando la diferencia a favor de b_h llega a ser igual o mayor que p_j

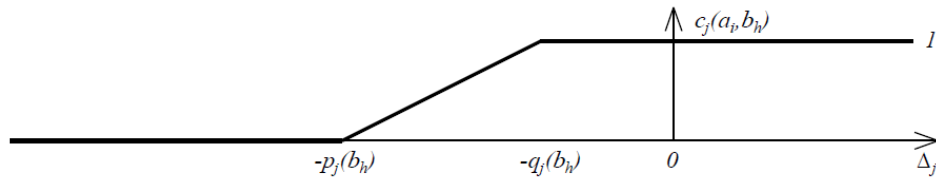


Fig. 3.6. Índices de concordancia para el j -ésimo criterio

El n único-criterio del índice de concordancia (uno para cada criterio) se agregan en un índice de concordancia global (multicriterio), considerando el peso relativo k_j de cada criterio.

$$c(a_i, b_h) = \sum_{j=1}^n k_j c_j(a_i, b_h) \quad , \text{ donde se asume que } \sum_{j=1}^n k_j = 1.$$

Por otro lado, para cada criterio ($j = 1, \dots, n$), un índice de discordancia indica en qué medida ese criterio no está de acuerdo con la hipótesis " $a_i S b_h$ ", que se calcula de la siguiente manera:

$$d_j(a_i, b_h) = \begin{cases} 1 & , \text{ if } \Delta_j < -v_j(b_h) \\ (-\Delta_j - u_j(b_h)) / (v_j(b_h) - u_j(b_h)) & , \text{ if } -v_j(b_h) \leq \Delta_j < -u_j(b_h) \\ 0 & , \text{ if } \Delta_j \geq -u_j(b_h) \end{cases}$$

La discordancia es mínima (0) cuando a_i es mejor que b_h o es peor, pero por una diferencia hasta $u_j(b_h)$ (donde $u_j(b_h) \geq p_j(b_h)$). Cuando a_i es peor que b_h , la discordancia comienza a aumentar cuando la diferencia a favor de b_h llega a ser mayor que $u_j(b_h)$, y alcanza su mínimo (1) cuando la diferencia a favor de b_h llega a ser igual o mayor que $v_j(b_h)$.



Fig. 3.7. Índices de disconcordancia para el j -ésimo criterio

El uso de los parámetros $u_j(b_h)$ es opcional. Si no se usan estos parámetros, entonces IRIS considera el valor por defecto $u_j(b_h) = 0.2p_j(b_h) + 0.75v_j(b_h)$, como lo sugieren (Dias and Mousseau 2002).

El n único-criterio del índice de discordancia (uno por cada criterio) se agregan a un índice de discordancia global (multicriterio), considerando el máximo de estos valores:

$$d^{max}(a_i, b_h) = \max_{j \in \{1, \dots, n\}} d_j(a_i, b_h).$$

Por último, la credibilidad de la declaración " $a_i S b_h$ " está dada por:

$$s(a_i, b_h) = c(a_i, b_h) [1 - d^{max}(a_i, b_h)]$$

El nivel de corte λ es un umbral que indica si la credibilidad es significativa o no

$$a_i \text{ outranks } b_h (a_i S b_h) \Leftrightarrow s(a_i, b_h) \geq \lambda.$$

3.4.2.3. Regla de asignación

Esta variante ha sido tomada de Dias and Mousseau (2002) para la aplicación del método ELECTRE TRI y resolución con el software IRIS, donde se asigna cada acción a_i a una alta categoría C_h tal que a_i supere a b_{h-1} .

Para utilizar esta regla, se deben tener en cuenta las siguientes condiciones al definir el conjunto de perfiles B .

- $g_j(b_h)$ es mejor que $g_j(b_{h-1})$, $\forall j \in \{1, \dots, n\}$ (b_h domina b_{h-1}), para $h = 1, \dots, t$;
- $a_i S b_0$ (a_i supera el peor perfil b_0), $\forall a_i \in A$;
- $(a_i S b_t)$ (a_i no supera el mejor perfil b_t), $\forall a_i \in A$;
- si $a_i \in A$ es indiferente a un perfil $b_h \in B$ (es decir $a_i S b_h \wedge b_h S a_i$), entonces a_i puede no ser indiferente a ningún otro perfil.

Ahora, la regla de asignación se puede implementar de la siguiente manera para colocar a_i en una categoría de C :

- Si a_i no supera b_1 (es decir $S(a_i, b_1) < \lambda$), entonces a_i pertenece a la categoría C_1 ; de otra manera,
- Si a_i no supera a b_2 (pero ha superado b_1), entonces a_i pertenece a la categoría C_2 ; de otra manera,
- Si a_i no supera a b_3 , entonces a_i pertenece a la categoría C_3 ; Etc

Formalmente, la regla puede escribirse como:

$$a_i \text{ pertenece a la categoría } C_h \Leftrightarrow a_i S b_{h-1} \wedge \sim(a_i S b_h) \Leftrightarrow s(a_i, b_{h-1}) \geq \lambda \wedge s(a_i, b_h) < \lambda.$$

4. Aplicación a un caso de estudio

4.1. Antecedentes generales del proyecto

El proyecto en estudio se encuentra ubicado en la zona Sureste del Ecuador en la provincia de Zamora Chinchipe cerca de la frontera con Perú a 36 Km de la ciudad de Palanda, con coordenadas (x:718068; y:9483499), el lugar es de difícil acceso ya que se encuentra en la parte oriental del Ecuador en una zona montañosa con mucha vegetación.



Fig. 4.1. Ubicación del proyecto. Fuente google earth

El ingreso a San Francisco del Vergel es mediante un camino de tercer orden y el lugar en estudio tiene acceso mediante camino de herradura. Entre las actividades que desarrollan en el sector están la agricultura con plantaciones de café y en menor proporción plantaciones de cacao, respecto a la ganadería principalmente con la cría de ganado vacuno y porcino.



Fig. 4.2. Poblado San Francisco del Vergel. Fuente propia

El proyecto es un estudio proporcionado por la Empresa Eléctrica Regional del Sur, consta de 16 usuarios que no disponen del servicio de energía eléctrica, cerca del poblado San Francisco del Vergel.

El alimentador N^o1800220V21 llega hasta el poste N^o17565 considerado como el inicio de la extensión de red eléctrica realizado por la Empresa Eléctrica Regional del Sur, este estudio se encuentra en el ANEXO 1., donde constan los planos con las ubicaciones y en el ANEXO 2 el presupuesto para la extensión de red.

4.2. Aspectos socioeconómicos y culturales

- Las principales actividades económicas son la agricultura y ganadería
- El transporte público es mediante camiones articulados, vehículos particulares y motos
- Viviendas ocupadas entre 4 y 6 personas
- No disponen de todos los servicios básicos
- Dos viviendas tienen generador eléctrico a gasolina.
- Viviendas medianas de construcción mixta (cemento y madera)
- Acceso a las viviendas mediante caminos de herradura.
- Propiedades con zonas para pastoreo y cultivo, disponibilidad de recurso de madera para consumo propio.

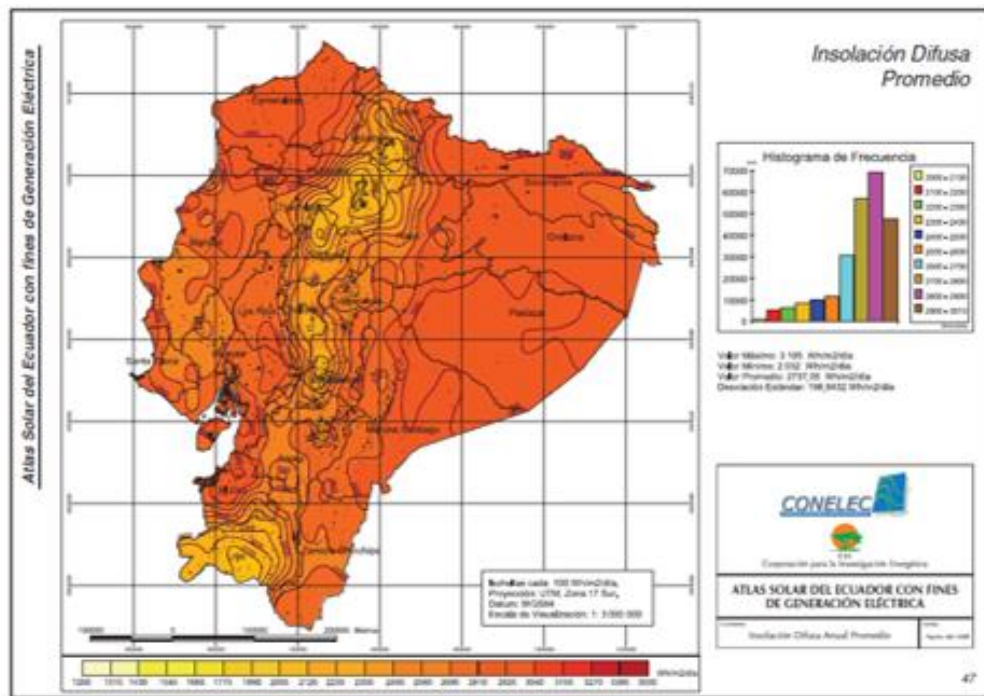
- El poblado más cercano dispone de un centro de salud, una escuela y una pequeña iglesia.

4.3. Disponibilidad y análisis de los recursos energéticos locales disponibles

4.3.1. Recurso solar

El Ecuador al ser atravesado por la línea equinoccial goza de un gran potencial solar, sin embargo, como ya hemos mencionado anteriormente el aprovechamiento de este recurso no ha sido potenciado, hasta fines del 2014 apenas se han elaborado los mapas solares con datos preliminares tomados de 27 estaciones meteorológicas distribuidas en dos zonas, 17 en la ciudad de Cuenca y las 10 restantes en la provincia de Chimborazo, en el resto del país se han hecho estimaciones con el análisis de imágenes satelitales (INER 2014).

En lo que respecta a la zona Sureste del Ecuador se puede utilizar los datos presentados en (CONELEC 2008a), donde se presenta el mapa de insolación difusa, directa y global de manera mensual y el promedio anual. En la Figura 4.3., se puede visualizar los índices de insolación difusa anual promedio para el Ecuador y en la Fig.4.4., los valores mensuales de insolación difusa anual, se considerará el peor escenario que es en el mes de junio con valores entre 2235 y 2465 Wh/m²/día.



valor medio de insolación difusa anual:
2695-2810 (Wh/m²/día)

Valor mínimo: mes de Junio 1890-2235
(Wh/m²/día) ≈ 2005 (Wh/m²/día)

Valor promedio anual: 2702 (Wh/m²/día)

Fig. 4.3. Insolación difusa anual promedio.(CONELEC 2008)

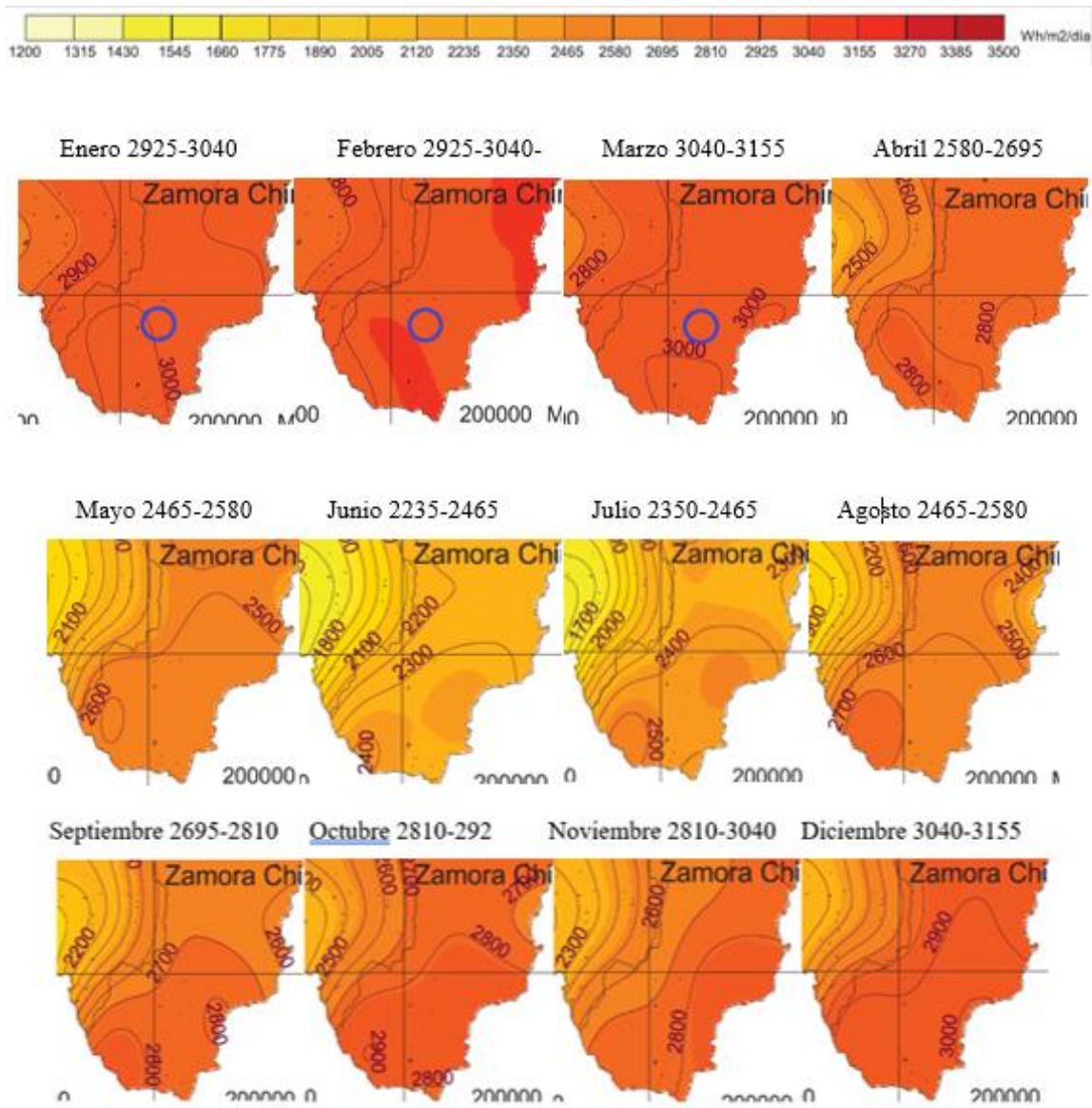


Fig. 4.4. Valores de insolación mensual para San Francisco alto del Vergel, valores en (Wh/m²/día)(CONELEC 2008)

4.3.2. Recurso eólico

Si bien es cierto el Ecuador tiene un alto potencial eólico, tampoco se ha potencializado su utilización en generación de energía eléctrica, salvo un proyecto ubicado en la ciudad de Loja ubicada en Villonaco, sin embargo, se han realizado estudios para identificar proyectos factibles para generación eléctrica de mediana y gran potencia, estos proyectos en su mayoría han sido identificados en la región Sierra, que debido a su geografía es en donde se producen vientos con mayor intensidad (Ministerio de electricidad y energías renovables 2013).

Para la zona objeto de estudio se disponen de datos de la velocidad promedio anual del viento, donde se utilizan los datos presentados por el MEER (Ministerio de electricidad y energías renovables 2013) referenciados a una altura de 30m. Considerando el objeto de estudio del proyecto y al tratarse de sistemas de baja demanda no es factible la utilización de este tipo de energía. Esto debido al análisis de los datos obtenidos y basándonos en los catálogos de los aerogeneradores disponibles en el mercado ecuatoriano para proyectos de baja demanda, podemos ver que las velocidades del viento promedio son inferiores a los 4m/s, por lo que no sería conveniente la utilización de generadores eólicos, debido a que la velocidad mínima promedio para la utilización de un aerogenerador de baja capacidad debe de ser mayor a los 5m/s, de acuerdo a las características de curvas de potencia de aerogeneradores y en base estudios realizados en Ecuador bajo condiciones similares (Peralta Jaramillo 2011; Domenech Léga 2013).

En la Figura 4.5., se puede visualizar la velocidad media anual referida a 30m de altura, Se puede visualizar que las velocidades mayores están en la región central de la sierra, en donde sí se podría utilizar este tipo de tecnología en proyectos de baja y alta demanda.

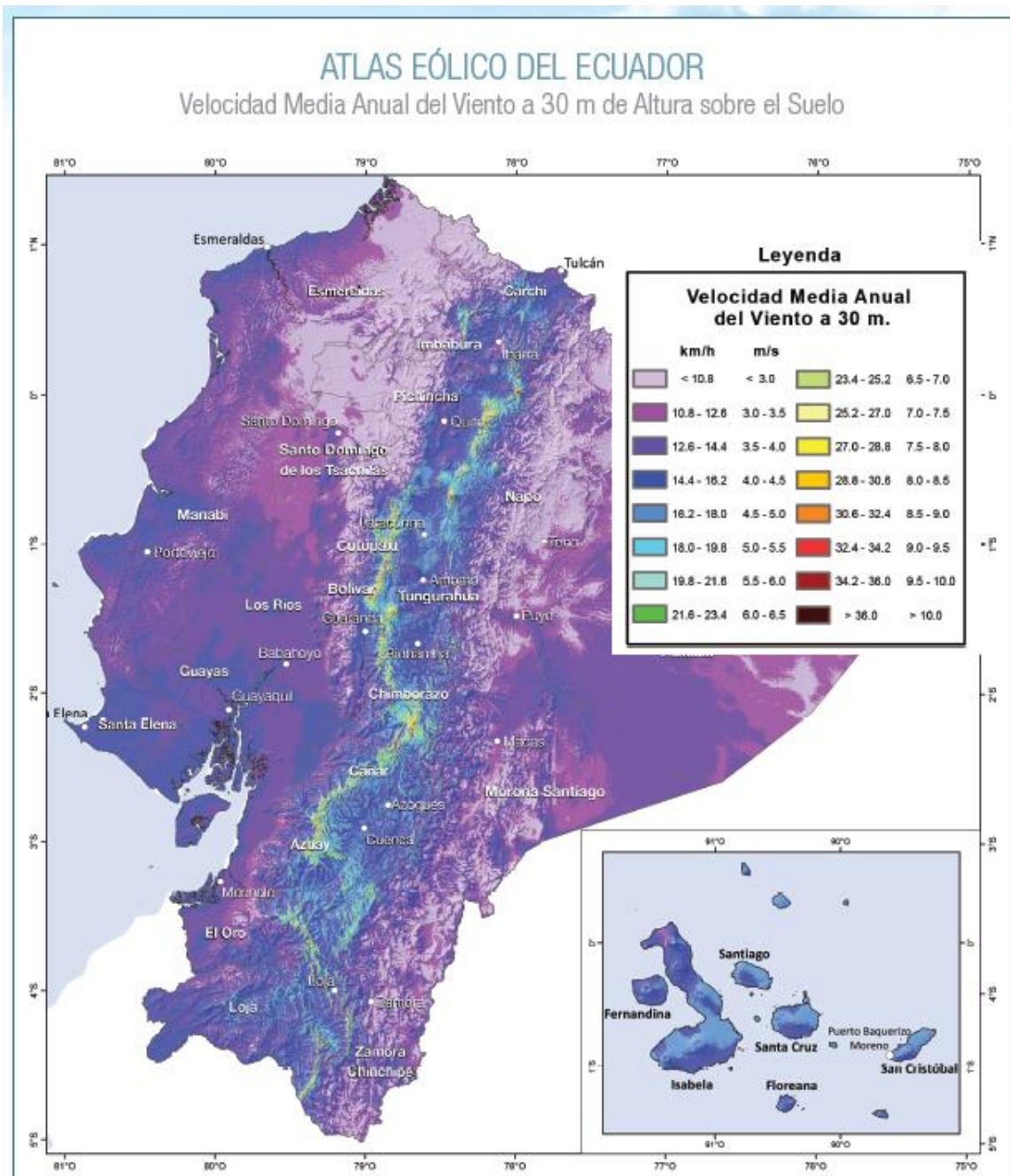


Fig. 4.5. Atlas eólico del Ecuador con velocidades media anual de viento a 30m de altura sobre el suelo (Ministerio de electricidad y energías renovables 2013)

4.4. Análisis de la demanda

El consumo de energía principalmente es para iluminación, al ser una población en su mayoría dedicada a labores agrícolas durante el transcurso del día no se requiere de una demanda elevada, solamente al medio día cuando se realiza la preparación de los alimentos en donde se requiere el uso de una licuadora y durante todo el día de una refrigeradora para la conservación de los alimentos.

Para la estimación de la demanda utilizaremos la Tabla 4.1., adicional se incluirá una columna con la potencia total de los equipos.

Tabla 4.1. Determinación de la demanda para viviendas en San Francisco alto del Vergel.

Descripción de los equipos	Número de equipos	Potencia de funcionamiento (Watts)	Potencia total (Watts)	Tiempo de funcionamiento diario(horas/día)	Energía total diaria(Wh/d)
Focos	5	9	45	4	180
Televisor	1	100	100	2	200
Refrigeradora	1	168	168	6	1008
Licuadora	1	260	260	0,5	130
		Total	573		1518

4.5. Definición de criterios

De la tabla 3.3 se considerarán todos los criterios descritos a excepción del criterio ruido, ya que está directamente relacionado con proyectos eólicos y descrito en la sección 4.3.2, por lo que los criterios a evaluar son:

- g1. - Disponibilidad de suministro de energía primaria (%)
- g2. - Capacidad de cobertura de demanda de energía (%)
- g3. - Costos de Inversión (\$)
- g4. - Costos variables de operación y mantenimiento (\$)
- g5. - Aceptación social de la energía (%)
- g6. - Emisiones de CO2 (TnCO2/año)
- g7. - Ocupación del suelo (0-3)

- g8. - Impacto visual (0-3)

4.6. Selección de alternativas

En función de los valores analizados en la sección 4.3.1 y 4.3.2, las alternativas propuestas se presentan en la tabla 4.2:

Tabla 4.2. Alternativas propuestas para San Francisco del Vergel

N	Alternativas
A1	SPV + Baterías en cada vivienda
A2	SPV, 3 Microrredes + Baterías en cada vivienda (variante 1)
A3	SPV, 3 Microrredes + Baterías en cada vivienda (variante 2)
A4	SPV, 4 Microrredes + Baterías en cada vivienda
A5	SPV + baterías + Extensión de red eléctrica
A6	SPV + Microrredes + baterías + Extensión de red eléctrica
A7	Extensión de red eléctrica

En la alternativa 1, se considera un sistema en donde cada usuario dispone de generación solar fotovoltaica individual con un sistema de baterías para una autonomía de 3 días en caso de ausencia de disponibilidad de energía primaria.

Tabla 4.3. Datos calculados para la Alternativa 1.

CRITERIOS	g1	g2	g3	g4	g5	g6	g7	g8
ALTERNATIVAS								
A1	83%	95%	\$ 94.341,50	\$ 1.774,80	98%	109,140	1	1

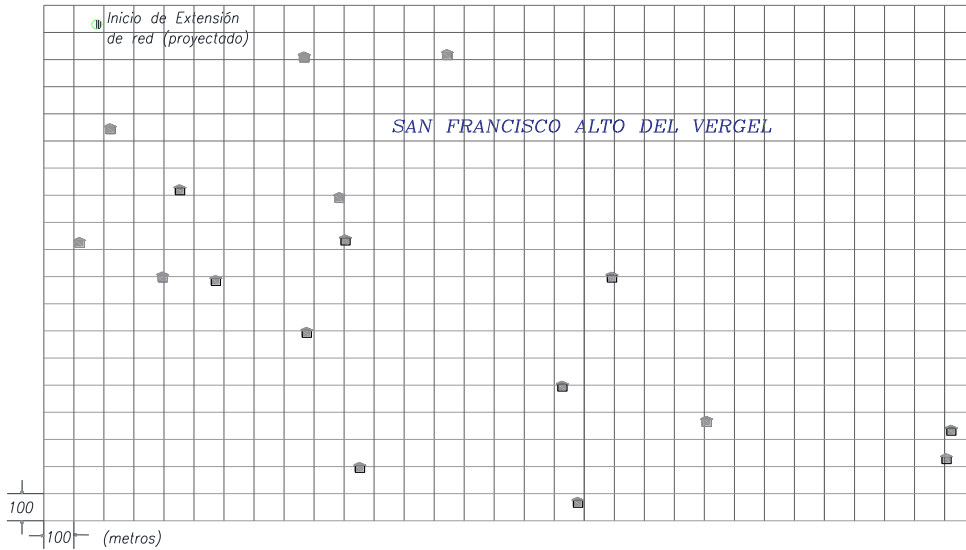


Fig. 4.6. Alternativa 1.- Sistema solar fotovoltaico + baterías en cada vivienda. Generación descentralizada dispersa

En la alternativa 2 se consideran sistemas individuales con generación mediante paneles solares y un banco de baterías para una autonomía de 3 días, además de los sistemas individuales se consideran 3 microrredes en donde la dispersión de viviendas es pequeña comparada con la disposición de las demás viviendas y 1 punto de generación para cada una de las 3 microrredes.

Tabla 4.4. Datos calculados para la Alternativa 2

CRITERIOS	g1	g2	g3	g4	g5	g6	g7	g8
ALTERNATIVAS								
A2	85%	95%	\$ 91.896,50	\$ 1.461,60	98%	97,590	1	1

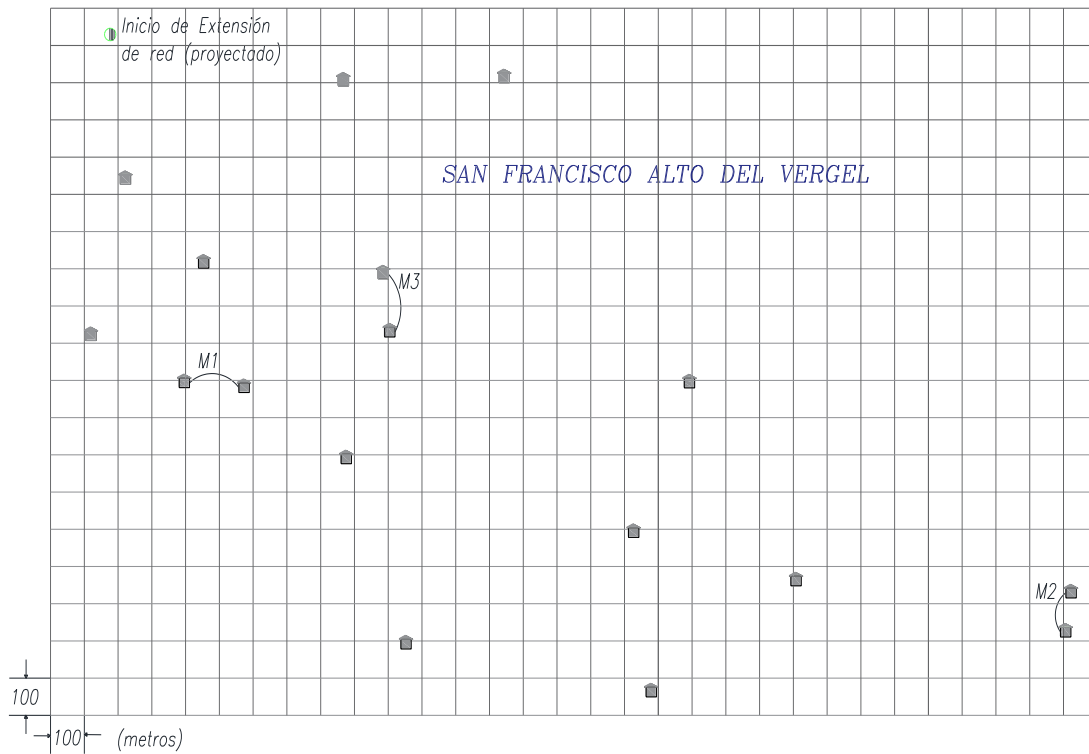


Fig. 4.7. Alternativa 2. Sistema con 3 microrredes (variante 1). Sistema solar fotovoltaico + baterías con 3 microrredes con alta concentración de viviendas

La alternativa 3 es semejante a la alternativa 2, sin embargo, esta alternativa utiliza una dispersión mayor entre viviendas en la microrred M1, a diferencia de la alternativa 2 requiere de dos puntos de generación, teniendo muy en cuenta que la caída de tensión no supera el 5% aceptable en zonas rurales.

Tabla 4.5. Datos calculados para la Alternativa 3

CRITERIOS	g1	g2	g3	g4	g5	g6	g7	g8
ALTERNATIVAS								
A3	87%	96%	\$ 89.863,00	\$ 1.226,70	98%	91,806	2	1

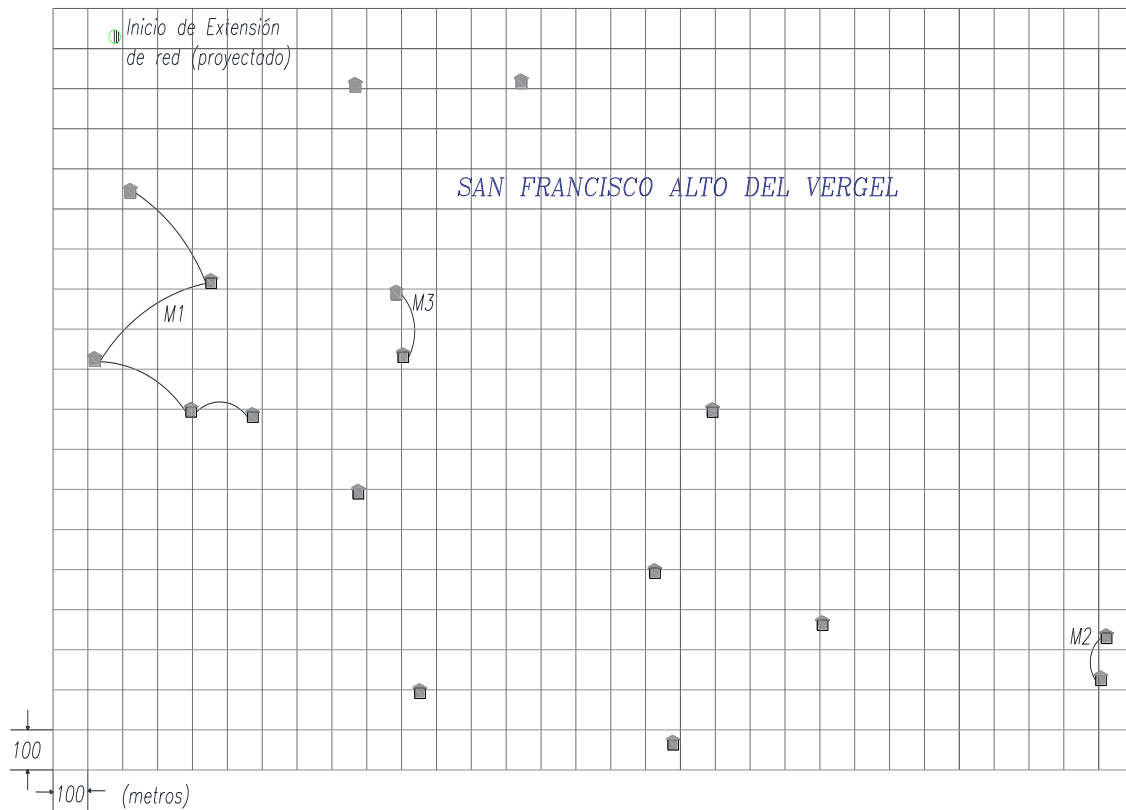


Fig. 4.8. Alternativa 3. Sistema con 3 microrredes (variante 2). Sistema solar fotovoltaico + baterías con 3 microrredes con baja concentración(M1) y alta concentración de viviendas

En la alternativa 4 se consideran igualmente sistemas aislados debido a su alta dispersión entre viviendas y 4 microrredes donde se requieran 1 solo punto de generación.

Tabla 4.6. Datos calculados para la Alternativa 4

CRITERIOS	g1	g2	g3	g4	g5	g6	g7	g8
ALTERNATIVAS								
A4	87	96	\$ 92.886,50	\$ 1.357,20	98	105,290	1	1

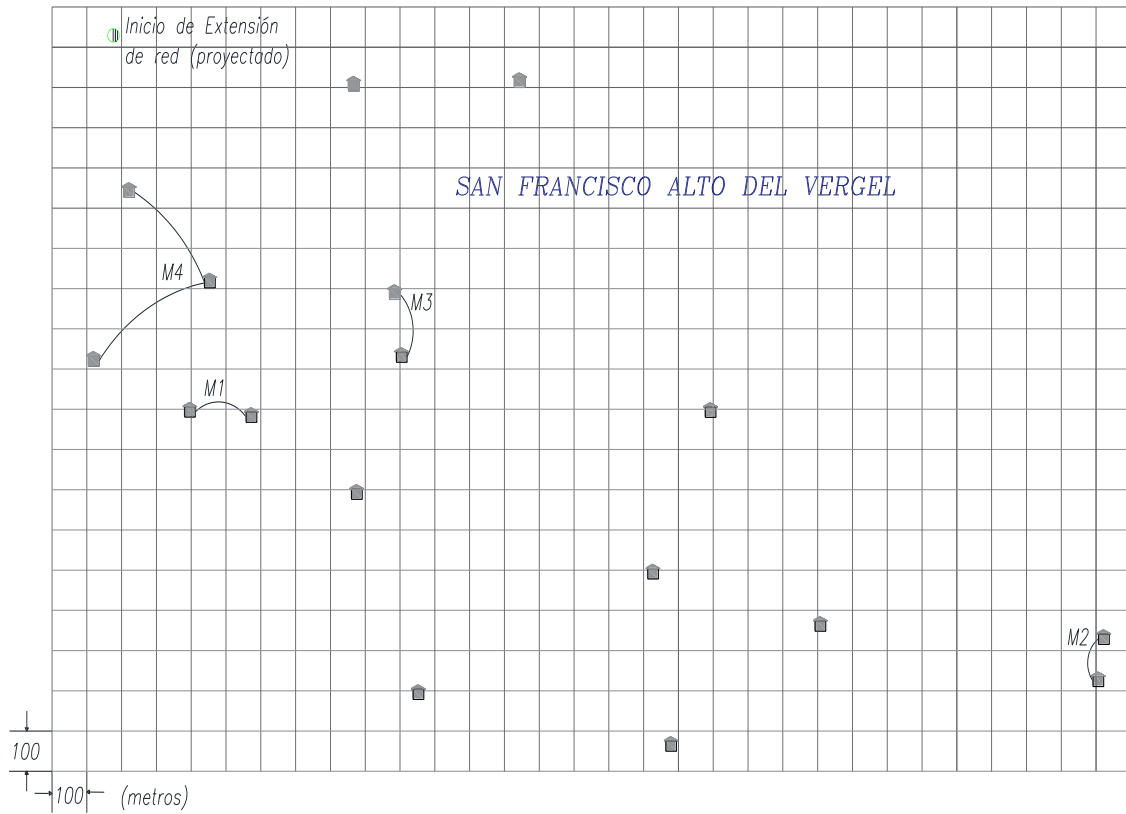


Fig. 4.9. Alternativa 4. Sistema con 4 microrredes. Sistema solar fotovoltaico + baterías con 4 microrredes con alta concentración de viviendas

En la Alternativa 5 se considera ya una extensión de red para 10 usuarios, los cuales se encuentran cercanos al final del alimentador primario, se deja 7 usuarios con sistemas aislados que tienen alta dispersión de viviendas.

Tabla 4.7. Datos calculados para la Alternativa 5

CRITERIOS	g1	g2	g3	g4	g5	g6	g7	g8
ALTERNATIVAS								
A5	96%	98%	\$ 113.913,06	\$ 1.090,80	98	47,69	2	1

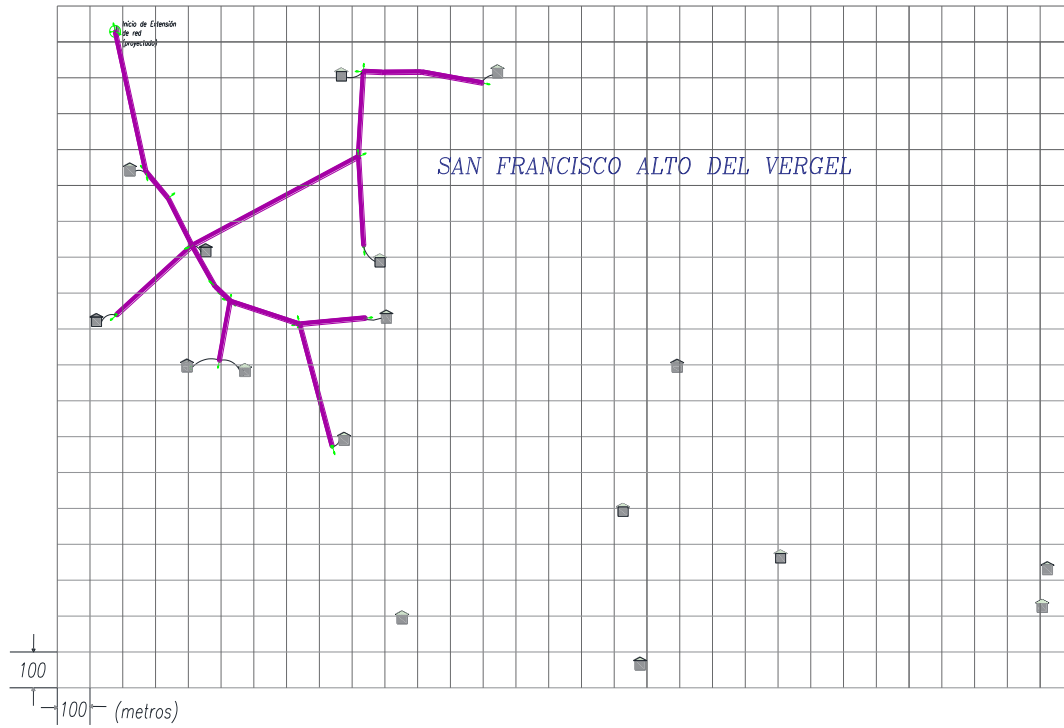


Fig. 4.10. Alternativa 5. Extensión de red y sistemas aislados con baterías en cada vivienda

La alternativa 6 similar a la alternativa anterior, solo que se considera el uso de una microrred M1 debido a su baja dispersión entre viviendas.

Tabla 4.8. Datos calculados para la Alternativa 6

CRITERIOS	g1	g2	g3	g4	g5	g6	g7	g8
ALTERNATIVAS								
A6	96%	98%	\$ 101.989,06	\$ 804,00	99%	43,836	2	2

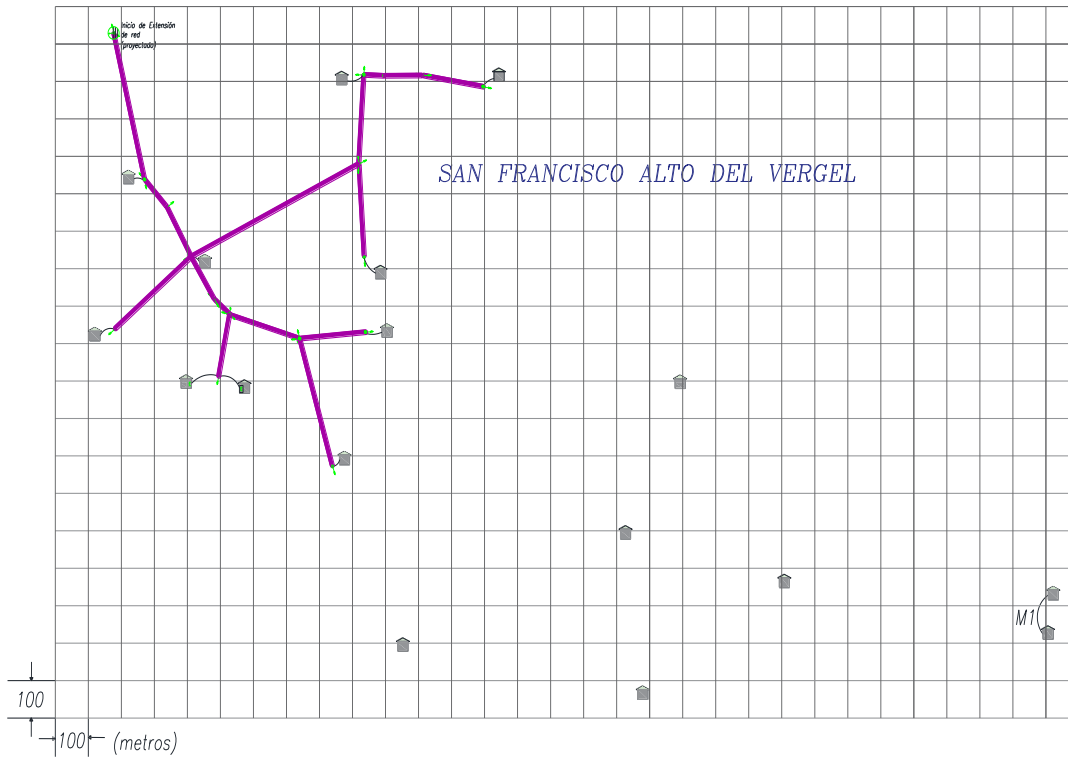


Fig. 4.11. Alternativa 6. Extensión de red, 1 microrred y sistemas aislados más baterías en cada vivienda

En la alternativa 7 se presenta la extensión para todos los usuarios, este diseño es el propuesto por la Empresa Eléctrica Regional del Sur, la ubicación de los postes ha sido considerada dependiendo de la geografía del lugar para lo cual se hizo el respectivo levantamiento, para el posterior diseño del sistema. Una de las características es que es el valor más elevado de las alternativas propuestas, pero en comparación con las otras alternativas es el de mayor aceptación social y con una mayor disponibilidad de energía primaria.

Tabla 4.9. Datos calculados para la Alternativa 7

CRITERIOS	g1	g2	g3	g4	g5	g6	g7	g8
ALTERNATIVAS								
A7	99%	99%	\$ 137.259,00	\$ 301,92	100%	1,705	3	3

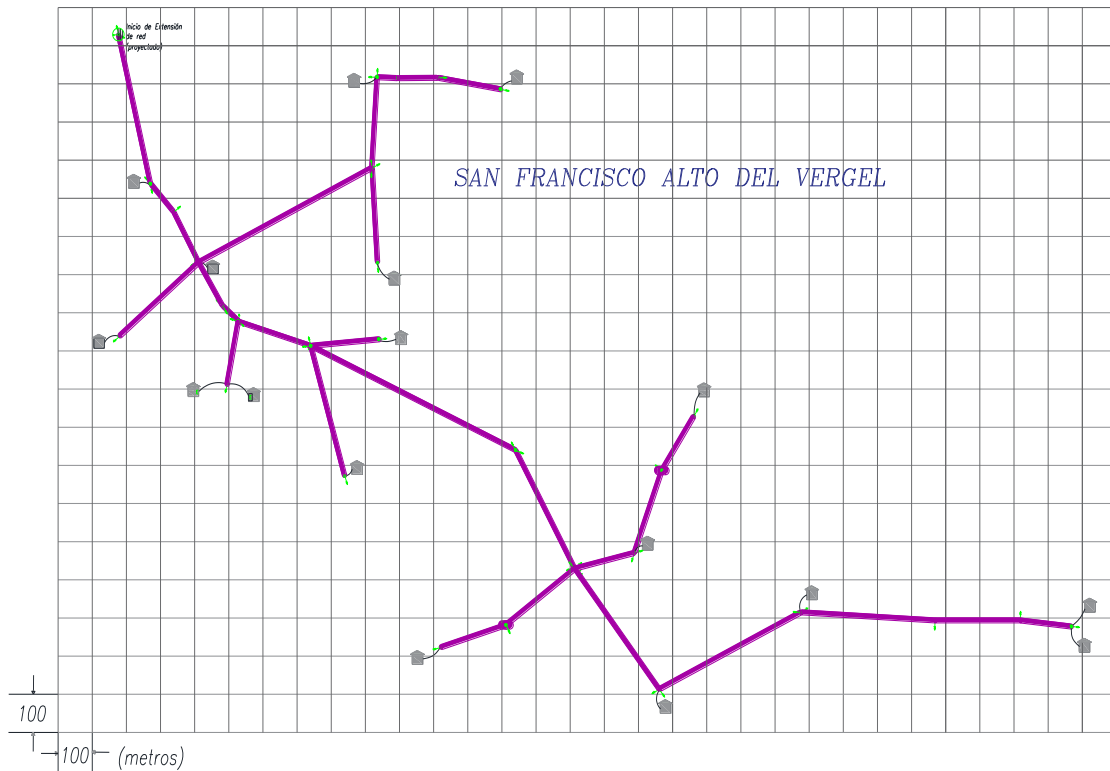


Fig. 4.12. Alternativa 7. Extensión de red de energía. Generación descentralizada dispersa

4.7. Asignación de categorías

Una de las características en la presentación de resultados con el método ELECTRE TRI es que una alternativa podrá ser asignada a una determinada categoría dependiendo de su evaluación, esta asignación dependerá del análisis efectuado tomando en consideración el tipo de criterio y su ponderación, así como sus restricciones, para el problema de electrificación en zonas rurales la elección de las categorías deberán ir en el contexto de su importancia de implementación por parte de las entidades encargadas de la planificación eléctrica en zonas rurales. Para el caso de estudio se tomarán en consideración 3 categorías en orden de importancia de implementación.

En lo que respecta a energías renovables se considera también la energía producida por las centrales hidroeléctricas, por lo que las empresas de distribución de energía consideran como mejor opción para dotar del servicio de energía eléctrica la extensión de redes de energía hacia los lugares de consumo. Debido a estas consideraciones las categorías pueden ser clasificadas de acuerdo a la importancia de implementación (ver tabla 4.10).

Tabla 4.10. Definición de categorías

Según el tipo de prioridad de ejecución	
Categorías	Denominación
Baja prioridad de ejecución	C1
Media prioridad de ejecución	C2
Alta prioridad de ejecución	C3

4.8. Matriz de evaluación

Tabla 4.11. Matriz de evaluación con sus respectivos valores para cada criterio y alternativa

CRITERIOS	g1	g2	g3	g4	g5	g6	g7	g8
ALTERNATIVAS								
A1	83%	95%	\$ 101.354,00	\$ 1.774,80	96%	109,14	1	1
A2	85%	95%	\$ 91.731,50	\$ 1.461,60	96%	97,59	1	1
A3	87%	96%	\$ 89.863,00	\$ 1.226,70	96%	91,81	2	1
A4	87%	96%	\$ 92.886,50	\$ 1.357,20	96%	105,29	1	1
A5	96%	98%	\$ 113.913,06	\$ 908,40	98%	47,69	2	1
A6	96%	98%	\$ 101.989,06	\$ 804,00	99%	43,836	2	2
A7	99%	99%	\$ 137.259,00	\$ 301,92	100%	1,705	3	3
	Maximizar	Maximizar	Minimizar	Minimizar	Maximizar	Maximizar	Minimizar	Minimizar

4.9. Definición de perfiles iniciales

Al considerar 3 categorías ya definidas se consideran 2 perfiles iniciales $b1$ y $b2$, para lo cual se deberá analizar la matriz de evaluación y encontrar la manera más adecuada para definir estos límites. Una forma es la utilización de un procedimiento Heurístico (Mousseau and Slowinski 1998), otra forma es mediante el análisis de los valores de cada criterio y su comportamiento frente a cada alternativa propuesta.

Para el presente estudio presentaremos las dos formas de cálculo y según los resultados podremos considerar una u otra opción.

4.9.1. Definición de perfiles iniciales utilizando procedimiento Heurístico

Para el cálculo mediante este procedimiento se hará uso de la siguiente ecuación:

$$g_j(b_h) = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\sum_{a_i \rightarrow C_{h-1}} g_j(a_i)}{n_{h-1}} + \frac{\sum_{a_i \rightarrow C_h} g_j(a_i)}{n_h} \right\}$$

En donde para cada criterio tenemos:

Tabla 4.12. Valores determinados con procedimiento heurístico

		c1	c2	b1			c2	c3	b2
g1(b1)	0,5	1,68	2,82	89%	g1(b2)	0,5	2,82	1,83	93%
g2(b1)	0,5	1,9	2,93	96%	g2(b2)	0,5	2,93	1,94	97%
g3(b1)	0,5	193085,5	341035,058	105.110,55	g3(b2)	0,5	341035,06	194875,56	5.558,07
g4(b1)	0,5	3236,4	2437,02	1.215,27	g4(b2)	0,5	2437,02	2161,20	946,47
g5(b1)	0,5	1,92	2,94	97%	g5(b2)	0,5	2,94	1,95	98%
g6(b1)	0,5	206,73	141,198	75,2	g6(b2)	0,5	141,20	149,13	60,81
g7(b1)	0,5	2	5	1,3	g7(b2)	0,5	7,00	3,00	1,92
g8(b1)	0,5	2	5	1,3	g8(b2)	0,5	5,00	3,00	1,58

De donde se obtienen los perfiles iniciales:

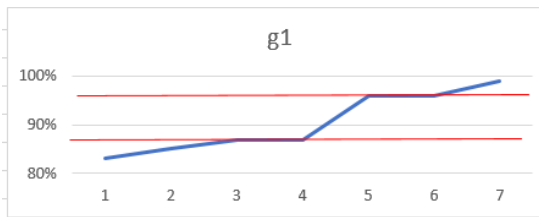
Tabla 4.13. Valores de perfiles iniciales b1 y b2 con procedimiento heurístico

Procedimiento Heurístico								
b1	89	96	105110,55	1215,27	97	75,2	1,3	1,3
b2	93	95	105558,07	946,47	98	60,81	1,92	1,58
	Maximizar	Maximizar	Minimizar	Minimizar	Maximizar	Maximizar	Minimizar	Minimizar

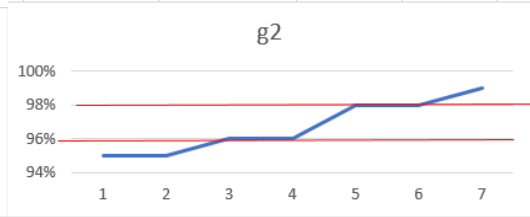
4.9.2. Definición de perfiles iniciales utilizando procedimiento arbitrario.

Al no existir una metodología única definida para la determinación de los límites entre categorías, se puede considerar el análisis de cada criterio para cada alternativa propuesta, analizando gráficas para obtener los valores de los perfiles iniciales:

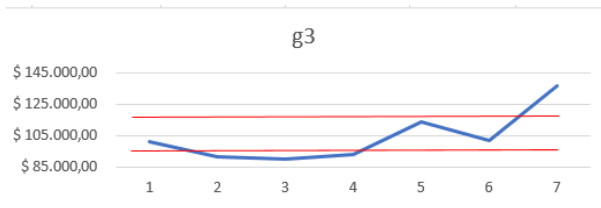
Para el criterio $g1$:



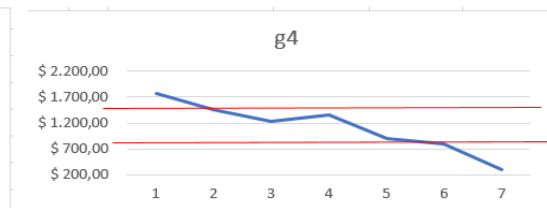
Para el criterio $g2$:



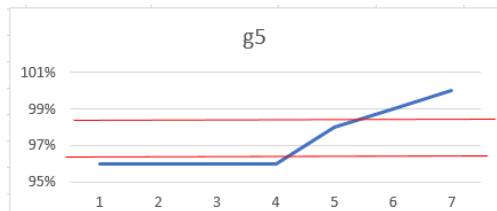
Para el criterio $g3$:



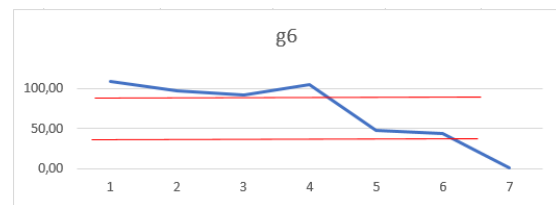
Para el criterio $g4$:



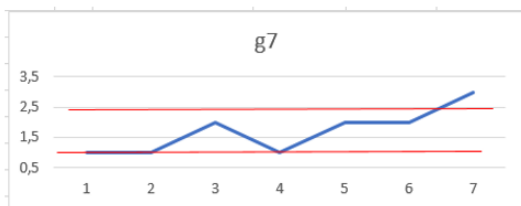
Para el criterio $g5$:



Para el criterio $g6$:



Para el criterio $g7$:



Para el criterio $g8$:

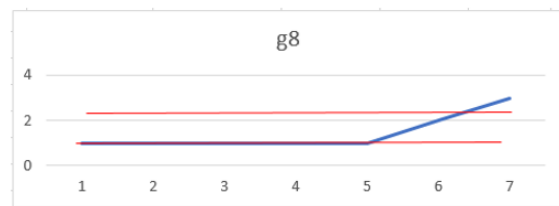


Fig. 4.13. Determinación de valores de forma arbitraria para los límites iniciales.

Los valores obtenidos para los perfiles iniciales de forma arbitraria y basados en el análisis de las gráficas de la Fig. 4.13 son:

Tabla 4.14. Valores de perfiles iniciales *b1* y *b2* con análisis de gráficas

Procedimiento Arbitrario								
b1	87	96	115000	1300	96,5	40	2,5	2
b2	96	98	92000	800	98,5	90	1	1
	Maximizar	Maximizar	Minimizar	Minimizar	Maximizar	Maximizar	Minimizar	Minimizar

Comparando los valores de los perfiles iniciales tanto del procedimiento heurístico y de forma arbitraria se determina que para este caso en particular es mejor la utilización de los datos obtenidos de forma arbitraria, se puede notar además de que algunos valores calculados con ambos métodos presentan una pequeña diferencia mientras que en otros la diferencia es muy amplia, con el método heurístico algunos valores como por ejemplo en el del criterio *g3* la diferencia entre el perfil *b1* y *b2* es mínima por lo que luego podría existir discrepancia en el análisis de los resultados.

4.9.3. Definición de los límites de preferencia, indiferencia y veto.

Una vez obtenido los límites iniciales entre categorías, se procederá de igual manera a obtener los valores para la determinación de los límites de preferencia, indiferencia y veto, se considerará distintos valores ya que se tienen distintas magnitudes de los criterios, estos datos se presentan en la tabla 4.15:

Tabla 4.15. Valores obtenidos de forma arbitraria para límites de preferencia, indiferencia y veto

		Datos de forma arbitraria							
indiferencia	qj(bh)=	5,0%	5,0%	5,0%	1,0%	2,0%			
preferencia	pj(bh)=	12,0%	10,0%	15,0%	5,0%	40,0%			
		g1	g2	g3	g4	g5	g6	g7	g8
	q(b1)	4,35	4,80	5750,00	65,00	4,83	0,40	0,00	0,00
	p(b1)	10,44	11,52	11500,00	130,00	14,48	2,00	1,00	1,00
	v	15	15	15500	700	18	45	2	2
	q(b2)	4,80	4,90	4600,00	40,00	4,93	0,90	0,00	0,00
	p(b2)	11,52	11,76	9200,00	80,00	14,78	4,50	1,00	1,00
	v	15	15	15500	700	18	45	2,0	2,0

4.10. Simulación con apoyo computacional

IRIS

Una vez definido los valores de los perfiles iniciales, los límites de preferencia, indiferencia y veto, se puede hacer uso de herramientas computacionales para la resolución del problema. Un software diseñado propiamente para trabajar con el método ELECTRE TRI como apoyo a la decisión para tratar con el problema de atribuir un conjunto de acciones o alternativas a categorías predefinidas de acuerdo con sus evaluaciones es el programa computacional IRIS (Interactive Robustness analysis and parameters' Inference for multicriteria Sorting problems).

IRIS permite introducir restricciones sobre estos valores, es decir, ejemplos de asignación que intenta restaurar. Añade un módulo para identificar la fuente de inconsistencia entre las restricciones cuando no es posible respetarlas todas al mismo tiempo. Por otro lado, si las restricciones son compatibles con múltiples asignaciones para las acciones, IRIS permite sacar conclusiones sólidas indicando el rango de asignaciones (para cada acción) que no contradicen ninguna restricción (Dias and Mousseau 2002). Algunas de sus características son:

- IRIS implementa el escenario ELECTRE TRI pesimista, utilizando una variante de la función original para calcular la discordancia (efectos de veto), tal como lo propuso Mousseau y Dias (2002).
- IRIS acepta la imprecisión con respecto a los pesos de los criterios y el nivel de corte. Los usuarios pueden indicar intervalos para cada uno de estos parámetros, así como restricciones lineales en los pesos. Además, las restricciones pueden definirse indirectamente, como se indica en el punto siguiente.
- IRIS acepta ejemplos de asignación, donde los usuarios indican categorías mínimas y máximas para algunas de las acciones, según su juicio holístico. Estos ejemplos de asignación se traducen en restricciones sobre los valores de los parámetros.
- Cuando las restricciones son inconsistentes, IRIS infiere una combinación parámetros de valores que menos violen las restricciones, minimizando la desviación máxima. Además, un módulo está disponible para determinar los subconjuntos alternativos de restricciones que deben eliminarse para restaurar la consistencia.

- Cuando las restricciones son consistentes, IRIS infiere una combinación "central" de parámetros de valores minimizando la holgura máxima. Para cada acción, representa la categoría correspondiente a esa combinación, así como el rango de categorías en las que se podría asignar la acción sin violar ninguna restricción (análisis de robustez). Para cada categoría del rango IRIS también puede determinar una combinación de valores de parámetro que asigna la acción a esa categoría.

Además, cuando las restricciones son coherentes, IRIS puede calcular algunos indicadores relativos a la precisión de las entradas (estimando el volumen del poliedro de todas las combinaciones factibles de valores de parámetros) y la precisión de las salidas (indicando la media geométrica del número de posibles asignaciones por acción) (Dias and Mousseau 2002).

4.11. Resolución del caso de estudio para San Francisco del Vergel

Empezaremos ingresando los valores de la matriz de evaluación obtenida en la sección 4.8, en la pantalla "Actions" del programa IRIS:

The screenshot shows the IRIS 2.0 software interface. The title bar reads 'IRIS 2.0 - C:\Users\MAURICO\Favorites\Documents\MAESTRIA MEENA VARIOS\TESIS TEMAS\ELECTRE'. The menu bar includes 'File', 'Categories', 'Criteria', 'Actions', 'Constraints', 'Results', 'Inconsistency', and 'Help'. Below the menu bar is a toolbar with icons for file operations and a status bar showing 'CELLS: Height 16, Width 48, Font size 8'. The main window has tabs for 'Actions', 'Fixed Par.', 'Bounds', and 'Constraints'. The 'Actions' tab is active, displaying a table with the following data:

Action	ELow	EHigh	g1	g2	g3	g4	g5	g6	g7	g8
A1	1	3	83	95	101354	1774	96	109	1	1
A2	1	3	85	95	91731	1461	96	97	1	1
A3	1	3	87	96	89863	1226	96	91	2	1
A4	1	3	87	96	92886	1357	96	105	1	1
A5	1	3	96	98	113913	908	98	47	2	1
A6	1	3	96	98	101989	804	99	43	2	2
A7	1	3	99	99	137259	301	100	1.7	3	3

Fig. 4.14. Valores de la matriz de evaluación ingresados en el programa IRIS

En la segunda ventana podemos ingresar los valores calculados de los límites de preferencia, indiferencia y veto, analizados en la sección 4.9.3, donde estos valores han sido calculados de forma arbitraria, en la última fila de la ventana del programa los valores

I y $-I$ indican que el criterio es maximizado o minimizado respectivamente, como se puede ver en la Fig. 4.15.

En la sección de IRIS existe la opción de poder usar además umbrales de discordancia en el caso de activar la casilla U_j , en el caso de no utilizar el programa utilizara el valor por defecto $u_j(b_h) = 0.25 p_j(b_h) + 0.75 v_j(b_h)$.

	g1	g2	g3	g4	g5	g6	g7	g8
g(b1)	87	96	115000	1300	96.5	40	2.5	2
q1	4.35	4.8	5750	65	4.83	0.4	0	0
p1	10.44	11.52	11500	130	14.48	2	1	1
v1	15	15	15500	700	18	45	2	2
g(b2)	96	98	92000	800	98.5	90	1	1
q2	4.8	4.9	4600	40	4.93	0.9	0	0
p2	11.52	11.76	9200	80	14.8	4.5	1	1
v2	15	15	15500	700	18	45	2	2
MAX/min	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1

Fig. 4.15. Valores de indiferencia, preferencia, veto.

4.12. Análisis de robustez

Una vez ingresado todos los valores necesarios como restricciones explícitas, límites de preferencia, indiferencia, veto, nivel de corte, rango de pesos. Se presentan los resultados obtenidos por IRIS en la Fig. 4.16:

Action	ELow	EHigh	g1	g2	g3	g4	g5	g6	g7	g8
A1	1	3	83	95	101354	1774	96	109	1	1
A2	1	3	85	95	91731	1461	96	97	1	1
A3	1	3	87	96	89863	1226	96	91	2	1
A4	1	3	87	96	92886	1357	96	105	1	1
A5	1	3	96	98	113913	908	98	47	2	1
A6	1	3	96	98	101989	804	99	43	2	2
A7	1	3	99	99	137259	301	100	1.7	3	3

lambda	k1	k2	k3	k4	k5	k6	k7	k8
0.605	0.11312	0.11312	0.20812	0.11313	0.11312	0.11313	0.11312	0.11312
0.605	0.12667	0.105	0.22167	0.105	0.105	0.105	0.105	0.12667

Fig. 4.16. Análisis de robustez para el caso de estudio de San Francisco alto del Vergel

La página de Resultados utiliza color para indicar el rango de asignaciones posibles para cada acción (análisis de robustez), es decir, las categorías en las que se puede asignar sin violar las restricciones, los límites y los ejemplos de asignación. Estos rangos aparecen en color verde. En algunas situaciones, hay algunas categorías intermedias en las que no se puede asignar una acción que se suelen presentar en color negro denominadas como “agujero” en un rango. Además, cuando existen situaciones en la que las alternativas no pueden ser asignadas a una categoría debido a inconsistencias se presentan con un color de fuente rojo.

En cada rango, una de las celdas tiene un tono más oscuro de color verde, lo que significa que es la asignación recomendada por IRIS, basada en la combinación inferida de valores de parámetros. Esta combinación se elige para ser relativamente central para el conjunto de combinaciones que respetan todos los límites y restricciones.

Results		Infer. Prog.			Indices				
	C1	C2	C3						
A1									
A2									
A3									
A4									
A5									
A6									
A7									
lambda	k1	k2	k3	k4	k5	k6	k7	k8	
0.605	0.11312	0.11312	0.20812	0.11313	0.11312	0.11313	0.11312	0.11312	
0.605	0.12667	0.105	0.22167	0.105	0.105	0.105	0.105	0.12667	

Fig. 4.17 Resultados mostrados por orden de variabilidad

Analizando los datos presentados podemos darnos cuenta que existen pares de alternativas con asignaciones de categorías semejantes, estas son: A1 con A2, A3 con A4 y A5 con A6, esto se debe a la pequeña diferencia existente entre los valores calculados. En cuanto a la asignación de categorías a las alternativas propuestas tenemos: Por ejemplo, en los resultados por orden de variabilidad mostrados en al Fig. 4.17, muestra una asignación preferencial en color verde oscuro a la alternativa A4 y A3 a C3, sin embargo, estas alternativas se asignan también a la categoría C2, aunque esta asignación es no preferencial debido al color verde claro presentado.

Otro dato interesante es la asignación de la alternativa A7 a la categoría C1, esto a pesar de que al realizar una restricción implícita (ver fig. 4.18), considerada como una

alternativa preferencial asignada a la categoría C3, aún se mantiene, debido principalmente a la restricción explícita dada al criterio g3, ya que los costos de inversión son los que mayor peso o ponderación reciben al momento de ejecución de un proyecto, y al tener el costo más elevado no se considera como la mejor alternativa.

Para el caso de restricciones implícitas sugeridas en la matriz de evaluación y que se muestran en la sección “actions” el resultado presenta inconsistencias en la asignación de las categorías, esto debido a los pesos de los criterios que no permiten que alternativas con un elevado coste puedan considerarse dentro de determinada categoría, por lo que variando las restricciones implícitas para evitar las inconsistencias se consideraría según valores presentados en la Fig. 4.18 b.

IRIS 2.0 - C:\Users\MAURICO\Favorites\Documents\MAESTRIA MEENA VARIOS\TESIS TEMAS\ELECTRE TRI\Ejercicio de aplicacion Tesis Final.tri

File Categories Criteria Actions Constraints Results Inconsistency Help

CELLS: Height 16 Width 48 Font size 8

Action	Fixed Par.	Bounds	Constraints							
Action	ELow	EHigh	g1	g2	g3	g4	g5	g6	g7	g8
A1	1	1	98	95	101354	1774	96	109	1	1
A2	1	1	85	95	91731	1461	96	97	1	1
A3	2	2	87	96	89863	1226	96	91	2	1
A4	3	3	87	96	92886	1357	96	105	1	1
A5	2	2	96	98	113913	908	98	47	2	1
A6	3	3	96	98	101989	804	99	43	2	2
A7	3	3	99	99	137259	301	100	1.7	3	3

Results	Inferred constraints			Infer. Prog.							
	C1	C2	C3								
A1											
A2											
A3											
A4											
A5											
A6											
A7											

lambda	k1	k2	k3	k4	k5	k6	k7	k8
0.255	0.2748	0	0.2351	0.4901	0	0	0	0

a)

Action	Fixed Par.	Bounds	Constraints							
Action	ELow	EHigh	g1	g2	g3	g4	g5	g6	g7	g8
A1	1	2	83	95	101354	1774	96	109	1	1
A2	1	2	85	95	91731	1461	96	97	1	1
A3	2	3	87	96	89863	1226	96	91	2	1
A4	2	3	87	96	92886	1357	96	105	1	1
A5	2	3	96	98	113913	908	98	47	2	1
A6	2	3	96	98	101989	804	99	43	2	2
A7	1	3	99	99	137259	301	100	1.7	3	3

Results	Inferred constraints			Infer. Prog.							
	C1	C2	C3								
A1											
A2											
A3											
A4											
A5											
A6											
A7											

lambda	k1	k2	k3	k4	k5	k6	k7	k8
0.255	0.2748	0	0.2351	0.4901	0	0	0	0

b)

Fig. 4.18 a) Restricciones implícitas propuestas para el caso de estudio de San Francisco alto del Vergel con inconsistencias en la asignación de categorías, b) Restricciones implícitas consideradas para evitar inconsistencias.

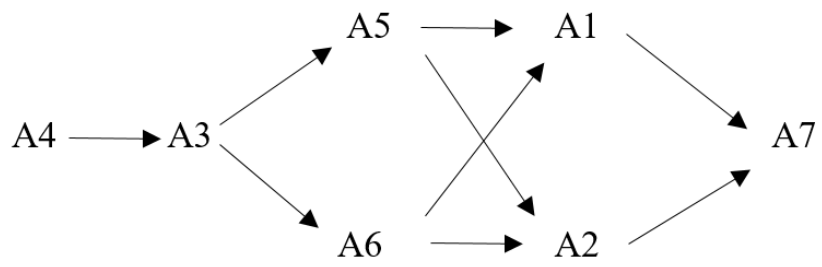


Fig. 4.19 Análisis de prevalencia de alternativas en función de la asignación de categorías a las alternativas por IRIS.

5. Conclusiones y pistas futuras de investigación

El presente trabajo propone la búsqueda de una metodología de decisión multicriterio para el problema de electrificación en zonas rurales, tomando en consideración aspectos muy importantes al momento de la implementación de un sistema eléctrico, no solo del aspecto económico o técnico como hasta hace mucho se lo venía haciendo, sino además incluyendo aspectos sociales y ambientales que en estas últimas décadas han tomado fuerza debido a la contaminación del medio ambiente que produce determinados sistemas de generación para producción de electricidad. El disponer del servicio de energía eléctrica contribuye al desarrollo social y humano de la población ya que permite entre otras cosas, mejora en la educación al disponer de iluminación y así poder realizar deberes o tareas en la noche mientras en el día se puede continuar con otro tipo de actividades, mejora en la salud al poder conservar de una mejor manera alimentos perecibles y medicinas en el caso de un centro de salud, mejora en las comunicaciones o para diversión.

Con el advenimiento de nuevas tecnologías y costos más asequibles para el aprovechamiento de fuentes de energías renovables limpias tales como la solar y la eólica, teniendo en cuenta, además, que el acceso al servicio de energía eléctrica es un derecho para el ser humano y que los costos por una extensión de red de energía eléctrica es elevado, es necesario aprovechar los recursos energéticos locales, para poder dotar de este servicio tan indispensable hoy en día.

El resultado de este avance tecnológico, ha hecho que, muchas empresas eléctricas de distribución opten por estos tipos de sistemas en donde la extensión de una red eléctrica supondría una fuerte inversión, tal es el caso de la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur, la cual ha venido implementando sistemas solares fotovoltaicos en la región amazónica, este tipo de tecnología ha tenido muy buena aceptación por parte de la población, sin embargo, tecnologías nuevas requieren servicios de operación y mantenimiento, que van asociados a un costo, además de sociabilización con la población para que la aceptación de la población a este tipo de energía sea bien vista y no conlleve a problemas futuros como el rechazo a la instalación de las mismas, donde además se debe realizar un correcto análisis de la afección al medio ambiente.

Son diferentes variables y criterios que se requieren analizar para varios escenarios, por lo que el uso de un método multicriterio de ayuda a la decisión es el más apropiado.

Las ventajas de los métodos de decisión multicriterio nos permiten:

- Análisis de varias funciones de utilidad, analizando diferentes criterios y variables para la selección de la mejor alternativa
- Existe una diversidad de factores que se logran integrar en el proceso de evaluación.
- Son una base, sustentada en elementos científicos, que aporta mejoras distintivas para asumir una decisión.
- Permite al decisor comprender mejor el problema y así obtener información relevante para la utilización de las metodologías.

El punto de partida inicia con la búsqueda de información en trabajos similares efectuados en el área de planificación energética para la selección de los criterios a evaluar, teniendo en cuenta que en su mayoría son comunes en casi todos los estudios revisados, estos criterios han sido considerados para que se adopten a la realidad ecuatoriana en los sectores rurales.

El desarrollo de los modelos de evaluación debe seguir ciertas reglas para la definición de los criterios y del conjunto de alternativas. La metodología “Value Focused Thinking (VFT)” (Keeney 1996) es una buena opción como punto de partida ya que nos permite:

- La identificación de los objetivos
- La estructuración de los objetivos
- Crear alternativas
- Analizar las alternativas

Definida las potenciales alternativas procedemos a los cálculos de los criterios considerando todas las posibles restricciones que puedan darse en cada una de las alternativas restricciones tales como:

- Para el caso de microrredes tener en cuenta la distancia máxima permitida para que no supere el rango permitido de caída de tensión.
- La dispersión de las viviendas para el diseño de microrredes.

- La estimación de la demanda deberá ser en función de las necesidades mínimas requeridas para un servicio confiable y q cumpla con los índices de calidad de energía.
- El análisis de los recursos energéticos locales para brindar un servicio de energía continuo y autónomo.
- Criterios que sean consistentes de acuerdo al problema de estudio y no sean reiterados.

La metodología utilizada para planificación energética en zonas rurales es el método ELECTRE TRI ya que se acopla a los requerimientos planteados en la modelización del problema, esto porque entre otras nos permite:

- Una evaluación de los criterios tanto de manera cualitativa como cuantitativa.
- Permite una asignación de las alternativas a categorías predefinidas que van desde la “peor” hasta la “mejor”
- Permite tratar la problemática de elección y clasificación, y es un método para a tratar la problemática ordinal de clasificación.
- Al ser un método de sobre-clasificación permite la comparación por pares de alternativas y determinando cuando una alternativa supera a otra.

Al tratar con diferentes criterios, la elección de la alternativa no va necesariamente ligada a los aspectos económicos, tal como se vio en los resultados a pesar de no tener el menor costo, dos alternativas fueron asignadas a la mejor categoría C3.

Los sistemas híbridos conectados a una microrred son mejor evaluados que los sistemas individuales(Ochoa Ramón 2009), pero debido al análisis de los recursos energéticos locales, la no factibilidad de la utilización de energía eólica hace que se utilice solamente un tipo de energía (solar fotovoltaica).

La extensión de la red eléctrica es prioridad en la mayoría de las empresas de distribución de energía, sin embargo, cuando están muy alejadas es conveniente el uso de estos sistemas, esto se demuestra con el creciente número de usuarios con sistemas solares fotovoltaicos aislados, especialmente en la región amazónica.

Para finalizar con las conclusiones, para la resolución del problema se hizo uso del software IRIS, el cual ha sido diseñado justamente para trabajar con el método ELECTRE TRI (Dias and Mousseau 2002), el cual nos permite introducir restricciones explícitas e

implícitas, determinar los resultados en base a los criterios establecidos, señalar cuál de los criterios debe ser maximizado o minimizado, imponer las restricciones para la determinación de los pesos, realizar un análisis de robustez donde se pueden variar la asignación en caso de inconsistencia y finalmente presentar los resultados en un gráfico fácil de interpretar.

En lo que se refiere específicamente a Ecuador no se ha encontrado trabajos similares en relación a planificación energética con el uso de métodos de decisión multicriterio, en su gran mayoría existen trabajos que abordan la optimización de recursos energéticos y diseños de sistemas de electrificación utilizando energías renovables, pero sin la utilización de una metodología multicriterio, sino más bien se han abordado mediante programación lineal proponiendo simplemente diseños de factibilidad sin considerar aspectos sociales o ambientales.

Este trabajo propone la utilización de un método de decisión multicriterio específicamente el ELECTRE TRI, sin embargo, para investigaciones futuras se podría realizar un análisis con un método diferente y así poder comparar resultados, el presente trabajo al no tener estudios similares efectuados en el país no se puede comparar sino con trabajos de otros países con situaciones similares, por ejemplo podría utilizarse el método AHP con la consideración de buscar varios expertos en planificación energética que puedan colaborar al momento de la asignación de los pesos a los criterios de selección.

Otra consideración podría ser recabar información mejor detallada, esto es mediante la realización de encuestas, mediciones in situ para tener información actualizada, ya que la información obtenida para el presente estudio no es actual sino en base a estudios efectuados por parte de las empresas eléctricas de distribución tanto de las alternativas como de los criterios de selección.

En cuanto a los criterios de selección se podría contemplar la incorporación de otros aspectos adicionales que no fueron considerados, justamente por la información no actualizada.

A pesar de realizar una visita al sitio de estudio, no fue posible obtener datos certeros sino aproximaciones, esto debido principalmente al difícil acceso, por lo que en trabajos futuros se podría sociabilizar este tipo de análisis ya que en lugares en donde el acceso a la energía continúa siendo nula la aceptación por parte de los lugareños es bien recibida.

6. Bibliografía

- Aguayo Calderón, Leandro. 2012. “Propuesta de Optimización Estructural de Torre Eólica Metálica Sometida a Cargas Estáticas.” Universidad Politécnica de Cataluña/2012. <http://repositorio.educacionsuperior.gob.ec/handle/28000/745>.
- Avignon, Gilles R. d', and Ph Vincke. 1988. “An Outranking Method under Uncertainty.” *European Journal of Operational Research* 36 (3): 311–321.
- Benitez Leyva, Lázaro Ventura. 2015. “Procedimiento Multicriterio-Multiobjetivo en planificación energética a comunidades rurales aisladas.” Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid.
- Bouyssou, Denis. 1990. “Méthodes D'aide Multicritère À La Décision - Fondements et Mise En Oeuvre.” Université Paris-Dauphine.
- Brans, Jean-Pierre, and Ph Vincke. 1985. “A Preference Ranking Organisation Method: (The PROMETHEE Method for Multiple Criteria Decision-Making).” *Management Science* 31 (6): 647–656.
- Brans, Jean-Pierre, Ph Vincke, and Bertrand Mareschal. 1986. “How to Select and How to Rank Projects: The PROMETHEE Method.” *European Journal of Operational Research* 24 (2): 228–238.
- Centrosur. 2017. “Revisión Y Recepción de Obras | Centrosur.” Accessed August 30. <http://www.centrosur.gob.ec>.
- CONELEC. 2008a. “Atlas solar del Ecuador con fines de generación eléctrica.” <http://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/cg00041.pdf>.
- . 2008b. “Atlas Solar del Ecuador.”
- Constituyente, Ecuador Asamblea. 2008. “Ley Orgánica Del Servicio Público de Energía Eléctrica.” Constitución del Ecuador 2008.
- Dias, Luis, and Vincent Mousseau. 2002. “IRIS-Interactive Robustness Analysis and Parameters Inference for Multicriteria Sorting Problem (2.0). Usual Manual.” https://www.researchgate.net/IRIS__Interactive_Robustness_analysis_and_parameters_Inference_for_multicriteria_Sorting_problem_20_Usual_manual.pdf.
- Domenech Léga, Bruno. 2013. “Metodología para el diseño de sistemas de electrificación autónomos para comunidades rurales.” Catalunya: Universitat Politècnica de Catalunya.

- Ferrer-Martí, Laia, Anna Garwood, José Chiroque, Rafael Escobar, Javier Coello, and Miguel Castro. 2010. "A Community Small-Scale Wind Generation Project in Peru." *Wind Engineering* 34 (3): 277–288.
- Flores Mondragón, Josué, and Juan Pablo Lazcano López. 2014. "Sistema Híbrido Eólico-Fotovoltaico Para Casa- Habitación Con Tarifa DAC." México: Universidad Autónoma de México.
- INEN. 2013. "Sistemas de energía solar fotovoltaica - Terminos, definiciones y simbolos (IEC/TS 61836:2007, IDT)." <http://www.normalizacion.gob.ec>
- INER. 2014. "Estimación del Potencial de Energía Renovable Mediante la Instalación de Estaciones Meteorológicas." <http://www.iner.gob.ec>.
- Keeney, Ralph L. 1996. "Value-Focused Thinking: Identifying Decision Opportunities and Creating Alternatives." *European Journal of Operational Research* 92 (3): 537–549.
- Kirubi, Charles, Arne Jacobson, Daniel M. Kammen, and Andrew Mills. 2009. "Community-Based Electric Micro-Grids Can Contribute to Rural Development: Evidence from Kenya." *World Development* 37 (7): 1208–21. doi:10.1016/j.worlddev.2008.11.005.
- Mareschal, Bertrand, and Jean-Pierre Brans. 1988. "Geometrical Representations for MCDA." *European Journal of Operational Research* 34 (1): 69–77.
- Ministerio de electricidad y energías renovables, MEER. 2015. "Balance Energético Nacional 2015 Parte 1." *Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos*.
- Ministerio de electricidad y energías renovables. MEER. 2014. "Electrificación rural con energías renovables." <http://www.energia.gob.ec/electrificacion-rural-con-energias-renovables/>.
- Ministerio de electricidad y energías renovables. 2013. "Atlas eólico Ecuador MEER 2013." <http://www.forosecuador.ec>.
- Mousseau, Vincent, and Roman Slowinski. 1998. "Inferring an ELECTRE TRI Model from Assignment Examples." *Journal of Global Optimization* 12 (2): 157–174.
- Ochoa Ramon, Jorge Luis. 2009. "Criterios de Evaluación Y Análisis de Alternativas Para El Diseño de Proyectos de Electrificación Rural Con Energía Eólica Y Solar En Países En Desarrollo." Universitat Politècnica de Catalunya. <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/11564>.

- Papadopoulos, Agis, and Avraam Karagiannidis. 2008. "Application of the Multi-Criteria Analysis Method Electre III for the Optimisation of Decentralised Energy Systems." *Omega* 36 (5): 766–76. doi:10.1016/j.omega.2006.01.004.
- Peralta Jaramillo, Juan. 2011. "Estudio de viabilidad de un sistema energético." Santiago de Compostela: Universidade de Santiago de Compostela.
- Ramirez de Alba, Viclhes. 2014. "Sistemas aislados para electrificación rural en zonas Subsaharianas de Argelia." Pamplona: Universidad publica de Navarra.
- Rojas-Zerpa, Juan C. 2012. "Planificación del suministro eléctrico en áreas rurales de los países en vías de desarrollo: un marco de referencia para la toma de decisiones." Zaragoza, España: Universidad de Zaragoza.
- Rojas-Zerpa, Juan C., and Jose M. Yusta. 2014. "Methodologies, Technologies and Applications for Electric Supply Planning in Rural Remote Areas." *Energy for Sustainable Development* 20 (June): 66–76. doi:10.1016/j.esd.2014.03.003.
- . 2015. "Application of Multicriteria Decision Methods for Electric Supply Planning in Rural and Remote Areas." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 52 (December): 557–71. doi:10.1016/j.rser.2015.07.139.
- Romero, Carlos. 1996. *Publicación de ingeniería de sistemas: análisis de las decisiones multicriterio*. Madrid: Isdefe.
- Roy, Bernard. 1985. *Méthodologie multicritère d'aide à la décision*,. Paris. <http://www.lamsade.dauphine.fr/~roy/>.
- Roy, Bernard, and D Bouyssou. 1993. "Aide Multicritère Á La Décision: Méthodes et Cas." In .
- Saaty, Thomas L. 2008. "Decision Making with the Analytic Hierarchy Process." *International Journal of Services Sciences* 1 (1): 83–98.
- Simon, Herbert. 1955. "A Behavioral Model of Rational Choice," *The Quarterly Journal of Economics*, 69 (February): 99–118.
- "The Wind Power." 2017. Accessed September 5. http://www.thewindpower.net/operator_es_2162_dong-energy.php.
- Vicente y Oliva, María A de. 1998. "Ayuda multicriterio a la decisión: Problemática de los criterios en los métodos de sobre clasificación." Madrid, España: Universidad Complutense de Madrid.
- Wang, Jiang-Jiang, You-Yin Jing, Chun-Fa Zhang, and Jun-Hong Zhao. 2009. "Review on Multi-Criteria Decision Analysis Aid in Sustainable Energy Decision-Making."

Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (9): 2263–78.
doi:10.1016/j.rser.2009.06.021.

“Wind Energy The Facts.” 2017. Accessed September 5. <http://www.wind-energy-the-facts.org/index-9.html>.

Yu, Wei. 1992. “Aide multicritère à la décision dans le cadre de la problématique du tri : concepts, méthodes et applications.” Université de Paris Dauphine.
<http://www.theses.fr/1992PA090032>.

7. Anexos

Anexo 1: Plano de diseño de extensión de red de energía para San Francisco del Vergel

Anexo 2: Memoria técnica y presupuesto de la extensión de red de energía para San Francisco del Vergel.

8. Glosario

Alternativa: Solución de electrificación que se obtiene a partir de la evaluación de los recursos energéticos.

Atributo: Característica de las soluciones de electrificación que se evalúa con la metodología de diseño de sistemas de electrificación autónomos. Existe un atributo asociado a cada sub criterio. Así, el criterio proporciona una idea de la naturaleza de la consideración a estudiar, el sub criterio concreta esa idea, y el atributo define exactamente de qué modo se valora.

Criterio: Aspecto general de las soluciones de electrificación que se analiza con la metodología de diseño de sistemas de electrificación autónomos. Se analizan 4 criterios: Técnicos, ambientales, económicos y sociales.

Decisor: Persona o grupo de personas que utilizan la metodología de diseño de sistemas de electrificación autónomos con un análisis de los métodos de decisión multicriterio y plasman sus preferencias para la selección de un determinado método.

Diseño de sistemas de electrificación autónomos: Proceso mediante el cual se diseña un sistema de electrificación para una zona rural donde no existe sistemas eléctricos instalados.

Planificación energética: Proceso mediante el que, partiendo de una región que no está electrificada al 100%, se decide el orden y la forma en que se puede dotar de energía eléctrica a una zona rural.

Procedimientos de diseño de sistemas de electrificación autónomos: Técnicas habitualmente utilizadas en el proceso de diseño de sistemas de electrificación autónomos.

Punto de consumo: Punto en el que se concentra la actividad de los usuarios y que es el emplazamiento que se desea electrificar. Puede tratarse de, por ejemplo, una vivienda, una escuela, un centro de salud o un centro comunal.

Punto de generación: Punto de consumo en el que se instala algún generador, ya sea eólico o solar, y para suministrar únicamente al propio punto (sistema individual) o a un conjunto de puntos (microrred).

Sub criterio: Aspecto específico de las soluciones de electrificación que se analiza con la metodología de diseño de sistemas de electrificación autónomos. Los subcriterios se agrupan conformando los criterios:

El criterio técnico contiene subcriterios como: Disponibilidad de suministro de energía primaria, capacidad de cobertura de la demanda de energía.

El criterio económico contiene los subcriterios: costos de inversión, costos de operación y mantenimiento.

El criterio ambiental contiene los subcriterios: impacto visual, emisiones de CO₂, ocupación del suelo y ruido

El criterio social contiene los subcriterios: aceptación social de la energía.

Usuario: Habitante de las comunidades a electrificar.