

**Criterios de evaluación y análisis de alternativas para el
diseño de proyectos de electrificación rural con energía
eólica y solar en países en desarrollo**

MEMORIA

Autor: Jorge Luis Ochoa Ramón

Director: Enrique Velo García

Codirectora: Laia Ferrer Martí

Convocatòria: Diciembre 2009



**Màster Interuniversitari UB-UPC
d'Enginyeria en Energia**

Màster Interuniversitari UB-UPC d'Enginyeria en Energia

Sol·licitud d'acceptació de presentació del Projecte Final de Màster i sol·licitud de defensa pública.

Alumne: JORGE LUIS OCHOA RAMÓN

DNI: X9208939S

Títol: CRITERIOS DE EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS
PARA EL DISEÑO DE PROYECTOS DE ELECTRIFICACIÓN RURAL
CON ENERGÍA EÓLICA Y SOLAR EN PAÍSES EN DESARROLLO.

Director: ENRIC VELO GARCÍA Y LAIA FERRER MARTÍ

Acceptació de la presentació del projecte:

Confirmo l'acceptació de la presentació del Projecte Final de Màster.

Per a que consti,



VELO GARCÍA, ENRIC
Cognoms, nom (director del Projecte)

Sol·licito:

La defensa pública del meu Projecte Final de Màster.

Per a que consti,



OCHOA RAMÓN, JORGE LUIS
Cognoms, nom (Alumne)

Barcelona, 16 de desembre de 2009

RESUMEN

El propósito de este trabajo es comparar diferentes soluciones tecnológicas eólico-solares de electrificación rural (sistemas individuales, conectados a una microrred e híbridos) en la sierra norte de Cajamarca (Perú) y evaluarlas mediante una serie de criterios técnicos y sociales para definir su pertinencia.

Asimismo, se propone aplicar una metodología multicriterio que permita realizar la comparación y utilizar el listado de criterios mencionados.

Se busca que los resultados obtenidos sean de utilidad para la evaluación de alternativas de electrificación con energías renovables y que sean aplicables en cualquier sitio con características similares a las de comunidades rurales en países en desarrollo.

ÍNDICE

1. Introducción.....	2
1.1 Justificación.....	3
1.2 Objetivo.....	3
1.3 Alcance.....	3
1.4 Descripción del trabajo.....	3
2. Estado del Arte.....	4
2.1 Modelos de análisis multicriterio.....	4
2.2 Herramientas disponibles.....	6
2.2.1. HOMER.....	6
2.2.2. SURE.....	7
2.2.3. RETScreen.....	7
2.2.4. ViPOR.....	8
2.2.5. LAP (Low voltage electrification Analysis and Planning).....	8
2.2.6. Solar-GIS.....	8
2.2.7. Hybrid2.....	9
2.3 Análisis comparativo de las distintas herramientas.....	9
3. Propuesta de Metodología para la Evaluación de Criterios	14
3.1 Identificación de criterios.....	14
3.2 Asignación de los pesos relativos de los criterios.....	15
3.3 Normalización de la valoración de los criterios.....	15
3.4 Comparación de las alternativas de solución.....	16
4. Propuesta de Definición de Criterios de Decisión.....	18
4.1 Proceso de planificación.....	18
4.2 Definición y cálculo de los criterios de evaluación.....	21
4.2.1. Criterios técnicos (eólico-solares).....	21
4.2.2. Criterios sociales.....	29
5. Aplicación a un caso práctico.....	30
5.1. Alternativas de solución.....	30
5.2. Cálculo de los pesos relativos.....	31
5.3. Valoración y normalización de los criterios.....	32
5.4. Comparación de alternativas y resultados.....	32
6. Conclusiones.....	43
7. Referencias bibliográficas.....	45

1. Introducción

1.1 Justificación

Los objetivos planteados por el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo en el sector de la energía incluyen metas para el ámbito rural. Dichas metas están enfocadas a dotar de servicios energéticos (combustibles y electricidad) modernos, asequibles y fiables, en todas las poblaciones rurales a lo largo del mundo. Estos objetivos se han planteado para cumplir los Objetivos de Desarrollo del Milenio en 2015 (PNUD, 2005).

Los sistemas autónomos siguen siendo muy utilizados en comunidades dentro de países en vías de desarrollo para cubrir sus necesidades energéticas básicas (servicios domésticos, comunicación, usos productivos, servicios sociales, entre otros), debido principalmente a la dificultad y el coste que involucra extender las redes eléctricas locales a sitios remotos. Además, debido a la importancia que ha venido cobrando la promoción de las energías renovables en el ámbito rural, las convierte en un área de oportunidad para la electrificación de poblaciones aisladas.

Sin embargo, la aplicación de estas tecnologías en programas de electrificación en comunidades rurales se enfrenta a diversos obstáculos. La existencia de criterios específicos que permitan valorar conjuntamente su pertinencia técnica y social es uno de ellos, ya que los lineamientos técnicos existentes están orientados a la creación de instalaciones de gran potencia, donde el objetivo principal es maximizar la energía producida y la generación de ingresos.

Diversas experiencias en la implementación de proyectos de electrificación rural con distintas Organizaciones No Gubernamentales (ONGs), denotan la importancia de la participación y la aceptación de los resultados por las comunidades locales. Por esto es necesario encontrar herramientas que permitan evaluar la pertinencia de dichos proyectos involucrando tanto aspectos tecnológicos como sociales.

Por ejemplo, ITDG – Soluciones Prácticas, Ingenieros Sin Fronteras (ESF) y Green Empowerment, conjuntamente con los ayuntamientos y representantes de las comunidades de la provincia de San Pablo, en Cajamarca (Perú), han realizado un plan de electrificación provincial previo. En él se han seguido una serie de pasos con vistas a tomar en cuenta todos los factores que puedan intervenir o afectar a dicha planeación.

El proceso de planificación busca facilitar y agilizar los procesos de toma de decisión a largo plazo para la electrificación de las comunidades de toda la región. Un factor muy importante para la efectividad de la planificación es definir una metodología que permita determinar un grupo de alternativas de electrificación (en base a los recursos energéticos existentes en cada comunidad) y que puedan ser evaluadas de acuerdo a un grupo de criterios para llegar a la toma de decisión y elegir la mejor opción. Dichos criterios deben contemplar tanto aspectos técnicos-económicos como aspectos sociales.

El proceso de la toma de decisiones llevado a cabo por ITDG, ESF, Green Empowerment y las autoridades locales se muestra en el capítulo 4 de este trabajo. En cuanto a la definición de criterios de evaluación, no se cuenta con un listado específico enfocado a las necesidades y características de la zona de estudio.

Existen diversas experiencias donde han desarrollado una serie de criterios para evaluar proyectos de electrificación. Dichos estudios han sido aplicados a circunstancias distintas a las necesidades que se muestran o presentan en los sistemas autónomos de generación en países en vías de desarrollo. Estas

experiencias pueden ser útiles para considerar algunos criterios de evaluación pero existe el riesgo de que haya ciertos aspectos que no se tomen en cuenta o que otros cobren una relevancia distinta al considerar la totalidad de estos criterios.

Ya que no existe una herramienta en el mercado que realice un estudio de evaluación de alternativas energéticas de electrificación rural y que nos permita personalizar los criterios a evaluar, se realizará un análisis multicriterio el cual se definirá en el capítulo tres de este trabajo.

1.2 Objetivos

A continuación se describen los objetivos planteados en este trabajo:

- 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.

1.3 Alcance

Este trabajo evaluará criterios técnicos y sociales solamente dentro de las tecnologías y sistemas eólico, solar y eólico-solar, por lo que no tomará en cuenta otro tipo de sistemas autónomos como pueden ser minihidráulica o turbinas diesel de generación.

La aplicación del trabajo se centrará en el caso práctico implementado en la provincia de Cajamarca, en el Perú, aunque su aplicabilidad es extendible a proyectos con características y necesidades similares en cualquier sitio del mundo.

Las opciones tecnológicas a considerar en el desarrollo del caso práctico serán: solar-eólica-híbridos, microrredes o estaciones individuales y opciones con una demanda alta o demanda baja cubierta.

1.4 Descripción del trabajo

En esta memoria, inicialmente se describirá el estado del arte de los criterios de decisión para el análisis de alternativas de proyectos de electrificación rural con energías renovables, con la finalidad de definir los aspectos positivos y carencias que puedan ser recuperados para este estudio.

Después, en el capítulo 3, se propondrá una metodología multicriterio a utilizar para evaluar un proyecto de electrificación rural con diferentes alternativas posibles de solución. En el capítulo 4 se explicará el contexto real donde se evaluarán las diferentes alternativas de solución y se definirá la propuesta de criterios técnicos a utilizar para dicha evaluación, dando una guía de cómo valorar cada uno. También se mencionarán los criterios sociales incluidos en el proceso de toma de decisión. El estudio y validación de la metodología propuesta se realizan mediante su aplicación en un caso práctico en el capítulo 5, un proyecto de electrificación rural con energías renovables implementado en la sierra andina en la región de Cajamarca, en el Perú. Finalmente se expondrán los resultados y las conclusiones.

2. Estado del Arte.

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.

Uno de los principales problemas de la valoración de alternativas de sistemas de electrificación en zonas rurales en países en vías de desarrollo es encontrar un grupo de criterios personalizados y definidos que permitan su valoración, tanto cualitativa como cuantitativa. Existen diversos instrumentos de evaluación de proyectos de electrificación que toman en cuenta varios tipos de criterios, algunos de ellos desarrollados a partir de una herramienta informática y otros presentados a través de diversos métodos de análisis comparativo.

La mayoría de las herramientas que existen en el mercado evalúan básicamente criterios de carácter técnico y económico. Estas herramientas suelen basarse en un programa informático que parten del diseño o generación de diversas opciones de sistemas de electrificación, tanto combinaciones de energías convencionales y energías renovables como de sistemas híbridos. Posteriormente realizan una evaluación de las alternativas dando ponderaciones y realizando una comparación entre ellas.

Por otra parte existen otras metodologías que en su proceso de análisis toman en cuenta tanto criterios cuantitativos como cualitativos, abarcando aspectos tanto sociales y ambientales como técnicos y económicos. Estas metodologías son desarrolladas a través de diversas líneas de investigación, las cuales se basan en un análisis multicriterio para la evaluación de distintas alternativas de sistemas de generación. La mayoría de estas metodologías llevan a cabo un proceso que pasa por las siguientes etapas: definición y selección de criterios, asignación de pesos a los criterios, valoración de las alternativas y toma de decisión.

En este apartado se describen brevemente algunos casos aplicados y diferentes herramientas actualmente utilizadas para la evaluación de alternativas de electrificación rural, con la finalidad de exponer los tipos de criterios de evaluación que abarca cada una. Posteriormente se realiza un análisis comparativo de cada herramienta indicando sus ventajas y desventajas respecto al objetivo de este estudio.

2.1 Modelos de análisis multicriterio

El análisis multicriterio (AMC) es una herramienta empleada para apoyar la toma de decisiones de problemas complejos con diversidad de criterios a evaluar. El AMC permite combinar aspectos tanto cuantitativos como cualitativos en el proceso de la toma de decisiones. Esta herramienta implica la elaboración de modelos sistemáticos que se deben adaptar a las necesidades específicas del problema, donde el grupo de personas responsables de tomar las decisiones tienen que elegir una solución entre varias opciones, mismas que a menudo buscan objetivos contradictorios o con criterios de evaluación heterogéneos, como en este caso, un proyecto de electrificación que busca evaluar tanto el impacto en la calidad de vida de las personas o el impacto ambiental como la eficiencia y seguridad del sistema eólico-solar. La finalidad del AMC es evaluar diferentes escenarios y apoyar así a la toma de decisiones para encontrar la mejor alternativa entre las que se consideran o la elaboración de un orden de preferencia.

A continuación se describen brevemente algunos de los trabajos realizados, enfocados a evaluar alternativas con una diversidad de criterios a través de un análisis de decisión multicriterio.

Existen modelos aplicados a casos donde la necesidad primordial es incrementar las fuentes de generación existentes en zonas rurales, a través de sistemas de energías renovables. Georgopoulou (1997) aplica un modelo de análisis multicriterio (ELECTRE III) en un caso particular en una isla de Grecia. A partir de ciertas alternativas de solución e identificados los actores involucrados en la decisión hace una valoración de criterios técnicos (seguridad de cubrir la demanda pico, operacionalidad y estabilidad en la red eléctrica), económicos (coste de la inversión y costes de operación y mantenimiento), sociales (cohesión con las actividades económicas locales y generación de empleo local) y ambientales (calidad del aire, ruido, impacto visual, agotamiento de los recursos no renovables, riesgo al cambio climático, protección de ecosistemas, uso del suelo e implementación de políticas nacionales) para finalmente realizar un análisis de sensibilidad de los resultados de valoración de las alternativas.

Otro ejemplo es el aplicado en la isla de Salina en Sicilia, Italia, donde se emplea una serie de criterios para evaluar diversas opciones de generación eléctrica mediante energía eólica, en el cual Cavallaro (2005), utiliza un método multicriterio para evaluar la mejor alternativa a instalar después de haber generado diversas alternativas de turbinas eólicas, de acuerdo a un análisis de la energía eléctrica a producir y demandada. En este caso utilizó dos grupos de criterios: técnico-económicos (costes de inversión, costes de operación y mantenimiento, capacidad de producción energética, ahorro de energía de fuentes no renovables, madurez de la tecnología y tiempo de puesta en marcha) y medioambientales (emisiones de CO₂ ahorradas, impacto visual, ruido, impacto en los ecosistemas y aceptación de la sociedad).

En el área del asesoramiento energético existen algunas iniciativas para seleccionar las soluciones más sustentables dentro de un grupo de opciones tecnológicas renovables, por ejemplo, Afgan (2000) presenta una propuesta donde define cuatro grupos de criterios: utilización de recursos (uso de combustible, acero, madera y aluminio), ambientales (emisiones de CO₂, NO_x, SO_x y residuos sólidos), sociales (creación de empleos, capital generado y diversidad de entidades) y económicos (eficiencia, inversión inicial y ganancias de la comunidad). Toma en cuenta 4 alternativas basadas en diferentes tipos de tecnología renovable (solar, eólica, biomasa y térmica) para cubrir la demanda previamente definida en dos áreas por tipo de consumo (productivo o uso de viviendas). Finalmente hace una valoración de los criterios mediante el sistema DSS (Decision Support System, Hovanov 1996) para la posterior discusión de los resultados.

Una herramienta muy utilizada para dar soporte al diseño de sistemas de electrificación son los sistemas de información geográfica (SIG). Por ejemplo, Amador (2005) aplica SIG en Lorca (Murcia, España) para evaluar el "Leveling Electric Cost" (LEC) de diferentes opciones tecnológicas de electrificación rural y posteriormente elegir la mejor alternativa. Para determinar el LEC utiliza una serie de criterios técnicos y económicos solamente. Determina una serie de escenarios de demanda y de ahí calcula el tamaño de los sistemas de generación eléctrica. Una vez diseñadas las diferentes alternativas, estas son evaluadas económicamente mediante las siguientes variables: coste de reconstrucción de los equipos de generación (coste de vida), coste de los dispositivos de eficiencia, costes de conexión, coste del cableado y costes de operación y mantenimiento (O&M).

Otro caso es el de Yue (2006), el cual utiliza como herramienta principal un SIG para evaluar diferentes fuentes de energía renovable (eólica, solar y biomasa) en

una zona rural de Chigu en el suroeste de Taiwán, a través del análisis de diversos aspectos técnicos, económicos, ambientales y políticos con la finalidad de establecer un modelo de evaluación para el desarrollo local de las fuentes de energía renovable. Realiza una evaluación de los diversos recursos renovables y a partir de ello proyecta el potencial energético disponible. Finalmente las alternativas de solución las compara respecto a tres grupos de criterios: económicos (energía producida, costes de capital, incentivos en la inversión, comparativo de costes contra fuentes convencionales de generación y la financiación de subsidios), de impacto ambiental (reducción en las emisiones de CO₂, protección a la tierra agrícola, impacto en la flora y la fauna, ruido, reciclaje de materiales, impacto visual, crecimiento de granjas y posible reducción de la diversidad biológica) y criterios de implicación política (legislación de conexión a la red y precios preferentes, subvenciones de capital, incentivos financieros, incentivos de la integración de la energía fotovoltaica a edificios, entre otros).

Anteriormente ha habido proyectos donde se han utilizado métodos multicriterio para la evaluación de criterios tanto técnicos como sociales en comunidades en países en vías de desarrollo. Es el caso de Garfí (2009), la cual compara cuatro diferentes alternativas de manejo de residuos sólidos en campos de refugiados Saharawi (Algeria). Considera dos series de criterios, unos generales (aspectos de desarrollo humano, medioambientales, sociales y económicos) y otros específicos para el manejo de residuos sólidos (recolección de desperdicios, reciclaje, entre otros). Para el análisis de las alternativas utiliza el método multicriterio "Analytic Hierarchy Process" (AHP) buscando obtener un equilibrio entre los impactos sociales, ambientales y técnicos al momento de escoger la mejor alternativa de solución. Aunque este estudio no es aplicado en proyectos de electrificación, la metodología utilizada es la que mejor se ajusta a las necesidades de planificación presentadas en este trabajo, ya que la valoración de los distintos criterios la realiza de forma participativa con los agentes de la comunidad y además estipula una escala de valoración válida tanto para aspectos cuantitativos como cualitativos.

Existen diferentes herramientas de análisis multicriterio (AMC) aplicadas a proyectos de energía sustentable, Wang (2009) identifica cuatro etapas principales dentro de todo AMC: selección de criterios, asignación de los pesos de los criterios, evaluación y la suma total. Realiza un resumen de los métodos existentes utilizados dentro de cada etapa del proceso de decisión multicriterio. La clasificación que realiza dentro de la etapa de selección de criterios se basa en aspectos técnicos (eficiencia, energía primaria consumida, seguridad y madurez de la tecnología), económicos (coste de inversión, coste de O&M, coste de combustible, coste eléctrico, valor presente neto, período de "payback", vida útil y el coste equivalente anual), ambientales (emisiones de gases de efecto invernadero, emisión de partículas, uso de la tierra y ruido) y sociales (aceptación social, creación de empleos y beneficios sociales). Denota que los criterios más utilizados en la evaluación de este tipo de proyectos son en primer lugar los costes de inversión, seguido de las emisiones de CO₂.

2.2 Herramientas disponibles

A continuación se muestran algunos programas informáticos que evalúan diferentes alternativas de sistemas energéticos, cada uno con sus respectivos criterios de valoración y características.

2.2.1. HOMER¹

Homer es un modelo informático de optimización de sistemas micro energéticos desarrollado por NREL (National Renewable Energy Laboratory) que evalúa diferentes opciones tecnológicas de diseño de sistemas de generación de energía, tanto los conectados a la red como de sistemas aislados.

Homer optimiza desde el punto de vista económico y técnico la mejor opción de sistema de electrificación, necesario para satisfacer una carga demandada. Considera diversas opciones tecnológicas, tanto energías convencionales como renovables, como pueden ser: solar, eólica, mini-hidráulica, biomasa y generadores diesel. Permite a su vez hacer comparaciones con la extensión de la red y toma en cuenta la incertidumbre de algunas variables como: costes de la tecnología, disponibilidad del recurso y otras variables.

A nivel técnico es una herramienta que permite diseñar el número, tipo y tamaño de los componentes necesarios en el sistema requerido y a nivel económico permite hacer comparaciones entre las diferentes opciones tecnológicas. Genera un listado de alternativas a partir del cual el responsable de tomar las decisiones deberá escoger la mejor opción de acuerdo a su criterio. El programa estima el coste del ciclo de vida del sistema, contabilizando el coste de inversión, el coste de reemplazo, los costes de operación y mantenimiento, combustibles e intereses.

2.2.2. SURE²

El programa SURE es una herramienta informática que está orientada a apoyar la toma de decisiones para definir y elegir la opción más adecuada en proyectos de electrificación rural aplicados en países en vías de desarrollo. SURE parte de la obtención de un estudio socio económico de la población mediante una encuesta ya definida.

De acuerdo a las características de la población, el programa automáticamente calcula la energía demandada por la población en base al número de habitantes y al suministro energético de ciertos servicios (hospital, escuela, viviendas, entre otros). Posteriormente hace una valoración de los recursos energéticos disponibles y utilizables en la comunidad por sector y define diversas opciones tecnológicas a partir de dicha valoración.

En una segunda fase el programa permite evaluar y asignar un valor a cada una de las diversas opciones tecnológicas mediante la aplicación de 5 criterios, basados en el impacto que cada alternativa tendría sobre los recursos: natural, físico, humano, social y financiero. El usuario asigna un peso de importancia relativa a cada uno de los criterios o recursos y SURE calcula el puntaje total para cada alternativa, brindando el resultado de la mejor opción tecnológica o visto de otra manera, la alternativa que menor impacto tendría sobre los diferentes recursos de la comunidad, acercándose a una solución ideal.

¹ <http://www.homerenergy.com/>

² Cherni, J.A.; Dyner, I.; Henao, F.; Jaramillo, P.; et al. (2007) Energy supply for sustainable rural livelihoods. A multi-criteria decision-support system. Energy Policy, 35, 1493-1504.

2.2.3. RETScreen³

El centro de apoyo a la decisión de energía limpia RETScreen International ha desarrollado una herramienta informática de apoyo en la toma de decisiones entre diversas alternativas de generación de energía (eléctrica y térmica) con energías renovables. Está diseñado para el desarrollo de modelos para evaluar medidas de eficiencia energética para edificios residenciales, comerciales e institucionales, instalaciones industriales y comunidades. El programa permite obtener una estimación energética inicial a partir de una base de datos climatológica.

Se enfoca principalmente al detalle de la evaluación de la viabilidad técnica y financiera, además que realiza un análisis del costo del ciclo de vida del proyecto y de las emisiones de gases de efecto invernadero ocasionadas.

2.2.4. ViPOR⁴

ViPOR es un modelo de optimización para el diseño de sistemas de electrificación rural. A través de un mapa de la zona de estudio e información sobre el tamaño de las cargas y el coste de los equipos, el programa valora qué casas deberían ser energizadas por sistemas aislados y cuáles deberían ser incluidas en una red centralizada de distribución.

ViPOR define el coste de cada una de las posibles alternativas de sistemas como una *curva de coste de generación*. La información que se incluye en cada una de las curvas recoge las siguientes variables: demanda diaria, valor presente neto, coste de capital, gastos de operación y mantenimiento y gastos de combustibles. En la búsqueda de minimizar los costes de distribución de la energía, el programa toma en cuenta la complejidad del terreno, ya que asigna diferentes costes de transmisión a los diferentes tipos de terreno.

2.2.5. LAP⁵ (Low voltage electrification Analysis and Planning)

LAP es una herramienta informática para el diseño técnico y la evaluación económica de proyectos de electrificación de bajo voltaje. El programa considera 5 diferentes tipos de suministro de energía: subestaciones de bajo y medio voltaje, plantas diesel, generadores eólicos acoplados a generadores diesel, pequeñas plantas hidroeléctricas y sistemas solares.

El programa está soportado por una plataforma de un sistema de información geográfica (SIG), con el cual se importan las capas y mapas base del sitio a ser electrificado. Genera un listado de costes de los materiales necesarios. Considera tanto los costes de inversión, de operación y mantenimiento de la red, como los ingresos por los usuarios del servicio, presentando un balance económico optimizado del proyecto.

2.2.6. Solar-GIS⁶

SolarGIS es una herramienta informática que permite analizar diferentes opciones tecnológicas a utilizar en un proyecto de electrificación con el objetivo de

³ <http://www.retscreen.net/es/home.php>

⁴ <http://analysis.nrel.gov/vipor>

⁵ <http://www.systemseurope.be/products/lap.en.php>

⁶ <http://www-cenerg.cma.fr/~st/solargis/>

seleccionar el sistema más apropiado. El programa busca enlazar un conjunto de variables técnicas y económicas junto con información geográfica en una misma base de datos soportada en un sistema de información geográfica (GIS). El ámbito de la aplicación cubre dos principales tipos de sistemas de electrificación: sistemas autónomos para la electrificación de viviendas aisladas mediante energía solar o eólica y sistemas híbridos para la electrificación de pequeñas comunidades.

La base del estudio comparativo está en el coste de generación de la electricidad necesaria para cubrir una demanda dada, por lo tanto el programa realiza una comparación de los costes anualizados de generación de las diferentes opciones tecnológicas de producción de electricidad. Para definir el escenario de electrificación de cada zona se toman en cuenta como parámetros la demanda potencial para áreas aisladas, parámetros de economía global (precios del petróleo, tasas de descuento, etc.) y los parámetros técnicos y económicos de cada una de las diferentes opciones tecnológicas (coste de inversión, vida útil, gastos de operación y mantenimiento, eficiencias nominales, etc.).

2.2.7. Hybrid2⁷

Hybrid2 es un modelo de simulación dinámico que predice el comportamiento a largo plazo de sistemas energéticos híbridos que introduzca el usuario y realiza un estudio económico de dichos sistemas. Este programa busca ser una herramienta que de soporte en la evaluación y diseño de proyectos de electrificación rural no conectados a la red. Permite utilizar diversos tipos de sistemas utilizando diversas cargas, aerogeneradores, placas fotovoltaicas, generadores diesel, baterías, convertidores y otros componentes eléctricos.

Posteriormente el programa permite al usuario ejecutar las simulaciones de los sistemas diseñados y realiza un análisis económico mediante parámetros como costes de capital, gastos de operación y mantenimiento, costes de reemplazos con los cuales calcula los flujos de efectivo del proyecto y otros indicadores económicos como el período de "payback".

2.3 Análisis comparativo de las distintas herramientas

Después de haber descrito brevemente las características de cada una de las herramientas enfocadas a evaluar criterios de alternativas de sistemas de electrificación, se realiza el siguiente análisis comparativo:

⁷ http://www.ceere.org/rerl/rerl_hybridpower.html

Herramienta /Estudio	Ventajas	Desventajas
Georgopoulou (1997)	<ul style="list-style-type: none"> Realiza un análisis multicriterio combinando aspectos cuantitativos y cualitativos con una serie de criterios técnicos, económicos, sociales y ambientales. La serie de criterios ambientales están definidos en detalle y a profundidad. 	<ul style="list-style-type: none"> Los criterios a evaluar parten de un estudio en regiones de necesidades distintas a las de las comunidades en zonas de países en vías de desarrollo. Los criterios técnicos están enfocados a sistemas de conexión a la red eléctrica y no a sistemas aislados de generación. Los criterios sociales sólo se enfocan a aspectos con repercusión económica.
Afgan (2000)	<ul style="list-style-type: none"> Realiza un análisis multicriterio combinando aspectos cuantitativos y cualitativos con una serie de criterios técnicos, económicos, sociales y ambientales. Contempla diferentes tipos de demanda de consumo. 	<ul style="list-style-type: none"> Utiliza los mismos criterios para evaluar diferentes tipos de tecnologías renovables (solar, eólica, biomasa y térmica). Los criterios de recurso hacen referencia solo a la capacidad de disposición de los mismos y no a su utilidad técnica. Los criterios sociales sólo se enfocan a aspectos con repercusión económica. Los criterios económicos están definidos en cuanto a razones de ganancia/utilidad.
Cavallaro (2005)	<ul style="list-style-type: none"> Los criterios técnicos están enfocados solamente a sistemas eólicos de electrificación. Realiza un análisis multicriterio combinando aspectos cuantitativos y cualitativos con una serie de criterios técnicos, económicos, sociales y ambientales. 	<ul style="list-style-type: none"> Visión limitada del impacto social ya que en sus criterios sólo toma en cuenta un aspecto genérico de aceptación de la comunidad. Los criterios a evaluar parten de un estudio en regiones de necesidades distintas a las de las comunidades en zonas de países en vías de desarrollo. Los criterios técnicos están enfocados a sistemas de conexión a la red eléctrica y no a sistemas aislados de generación.
Amador (2005)	<ul style="list-style-type: none"> Los criterios económicos toman en cuenta todos los aspectos de la instalación del sistema, lo que permite realizar una valoración al detalle de los mismos. 	<ul style="list-style-type: none"> La evaluación de las alternativas se basa sólo en criterios técnicos y económicos.
Yue (2006)	<ul style="list-style-type: none"> Permite evaluar el recurso energético disponible mediante una herramienta informática. La serie de criterios ambientales están definidos en detalle y a profundidad. 	<ul style="list-style-type: none"> No evalúa criterios sociales. Los criterios técnicos solo evalúan el potencial energético disponible. Utiliza los mismos criterios para evaluar diferentes tipos de tecnologías renovables (solar, eólica, biomasa y térmica). Los criterios a evaluar parten de un estudio en regiones de necesidades distintas a las de las comunidades en zonas de países en vías de desarrollo. Los criterios técnicos están enfocados a sistemas de conexión a la red eléctrica y no a sistemas aislados de generación.
Garfi (2009)	<ul style="list-style-type: none"> Realiza un análisis multicriterio combinando aspectos cuantitativos y cualitativos con una serie de criterios técnicos, económicos, sociales y ambientales. La metodología utilizada para valorar los distintos criterios está aplicada de forma clara y participativa a una comunidad con características similares a las del estudio. 	<ul style="list-style-type: none"> Los criterios técnicos no están enfocados a la implementación de sistemas de electrificación.
Wang (2009)	<ul style="list-style-type: none"> Realiza un análisis multicriterio combinando aspectos cuantitativos y cualitativos con una serie de criterios técnicos, económicos, sociales y ambientales. 	<ul style="list-style-type: none"> Utiliza los mismos criterios para evaluar diferentes tipos de tecnologías renovables (solar, eólica, biomasa y térmica). Los criterios económicos están definidos en cuanto a razones de ganancia/utilidad. Visión limitada del impacto social ya que en sus criterios sólo toman en cuenta un aspecto genérico de aceptación de la comunidad y otros que están enfocados a aspectos con repercusión económica.

Herramienta / Estudio	Ventajas	Desventajas
HOMER	<ul style="list-style-type: none"> • Para la evaluación de los criterios técnicos y económicos toma en cuenta sistemas de generación de energía tanto conectados a la red eléctrica como de sistemas aislados. • Los criterios económicos toman en cuenta todos los aspectos de la instalación del sistema lo que permite realizar una valoración al detalle de los mismos. • Permite evaluar el recurso energético disponible mediante una herramienta informática. 	<ul style="list-style-type: none"> • La evaluación de las alternativas se basa sólo en criterios técnicos y económicos. • Utiliza los mismos criterios para evaluar diferentes tipos de tecnologías renovables (solar, eólica, biomasa y térmica).
SURE	<ul style="list-style-type: none"> • Realiza un análisis multicriterio combinando aspectos cuantitativos y cualitativos con una serie de criterios técnicos, económicos, sociales y ambientales. • Está enfocado a sistemas de electrificación rural en países en vías de desarrollo. • Contiene una herramienta de valoración de los recursos energéticos previo al cálculo de los costes. • En la valoración de los criterios sociales incluye el acceso a los servicios básicos. • Contiene una matriz energética que brinda información de utilidad para evaluar los criterios económicos. 	<ul style="list-style-type: none"> • La definición de cada uno de los criterios a ser evaluado no cuenta con un detalle claro. • El cálculo de la capacidad de cada sistema no muestra como lo realiza. • La valoración de las alternativas la hace mediante un software informático que no permite evaluar individualmente cada uno de los criterios. • Utiliza los mismos criterios para evaluar diferentes tipos de tecnologías renovables (solar, eólica, biomasa y térmica).
RETScreen	<ul style="list-style-type: none"> • Permite evaluar el recurso energético disponible mediante una herramienta informática. 	<ul style="list-style-type: none"> • Los criterios a evaluar parten de un estudio en regiones de necesidades distintas a las de las comunidades en zonas de países en vías de desarrollo. • La evaluación de las alternativas se basa sólo en criterios técnicos y económicos, aunque realiza un análisis de las emisiones de gases tipo invernadero.
VIPOR	<ul style="list-style-type: none"> • Permite evaluar el recurso energético disponible mediante una herramienta informática. • En la valoración de los criterios técnicos toma en cuenta como variable la complejidad del terreno y la distancia a la red de distribución. 	<ul style="list-style-type: none"> • La evaluación de las alternativas se basa sólo en criterios técnicos y económicos. • Los criterios a evaluar parten de un estudio en regiones de necesidades distintas a las de las comunidades en zonas de países en vías de desarrollo. • Los criterios económicos están definidos en cuanto a razones de ganancia/utilidad. • Los criterios técnicos están enfocados a sistemas de conexión a la red eléctrica y no a sistemas aislados de generación.
LAP	<ul style="list-style-type: none"> • Permite evaluar el recurso energético disponible mediante una herramienta informática. 	<ul style="list-style-type: none"> • La evaluación de las alternativas se basa sólo en criterios técnicos y económicos. • Los criterios técnicos están enfocados a sistemas de conexión a la red eléctrica y no a sistemas aislados de generación. • Los criterios a evaluar parten de un estudio en regiones de necesidades distintas a las de las comunidades en zonas de países en vías de desarrollo.
SOLAR GIS	<ul style="list-style-type: none"> • Permite evaluar el recurso energético disponible mediante una herramienta informática. • Contempla sistemas eólicos y solares. 	<ul style="list-style-type: none"> • La evaluación de las alternativas se basa sólo en criterios técnicos y económicos. • Los criterios a evaluar parten de un estudio en regiones de necesidades distintas a las de las comunidades en zonas de países en vías de desarrollo.
HYBRID2	<ul style="list-style-type: none"> • Permite evaluar el recurso energético disponible mediante una herramienta informática. 	<ul style="list-style-type: none"> • La evaluación de las alternativas se basa sólo en criterios técnicos y económicos. • Los criterios a evaluar parten de un estudio en regiones de necesidades distintas a las de las comunidades en zonas de países en vías de desarrollo. • Los criterios económicos están definidos en cuanto a razones de ganancia/utilidad.

Tabla 1. Análisis comparativo de las distintas herramientas.

A partir del análisis mostrado en la tabla 1, podemos denotar las siguientes observaciones:

- Algunos métodos utilizados (Georgopoulou, 1997; Afgan, 2000; Cavallaro, 2005; Garfí, 2009; SURE) permiten realizar un análisis multicriterio combinando aspectos cuantitativos y cualitativos con una serie de criterios técnicos, económicos, sociales y ambientales.
- Los estudios realizados por Georgopoulou (1997) y Yue (2006) contemplan una serie de criterios ambientales definidos en detalle y de manera muy completa. Afgan (2000) contempla diferentes tipos de demanda de consumo (para uso de viviendas y para uso industrial).
- En la definición de los criterios técnicos Cavallaro (2005) los enfoca específicamente a sistemas eólicos de electrificación rural.
- Los criterios económicos que toman en cuenta el HOMER y Amador (2005), contemplan todos los aspectos de la instalación del sistema, lo que permite realizar una valoración al detalle de los mismos.
- La mayoría de las herramientas informáticas (HOMER, RETScreen, VIPOR, LAP, SOLAR-GIS y HYBRID2) y algún estudio (Yue, 2006) utilizan una herramienta informática que les permite evaluar el recurso energético disponible, lo cual facilita la posterior valoración de los criterios técnicos y económicos.
- La metodología utilizada por Garfí (2009) para la valoración de los distintos criterios de evaluación de proyectos de residuos sólidos, está aplicada a una comunidad con características similares a la del presente estudio. Además el método participativo que utiliza con los agentes y beneficiarios del proyecto lo convierte en un proceso totalmente transparente.
- En la evaluación de criterios técnicos y económicos, el programa informático HOMER toma en cuenta tanto sistemas de generación conectados a la red eléctrica como de sistemas aislados.
- El programa informático SURE está enfocado a evaluar distintos criterios en proyectos de electrificación rural en países en vías de desarrollo y contiene una herramienta de valoración de los recursos energéticos. En la valoración de los criterios sociales incluye el acceso a los servicios básicos de salud, educación, usos de vivienda, entre otros. Además contiene una matriz energética que brinda información de utilidad para evaluar los criterios económicos.
- El VIPOR toma en cuenta como variable la complejidad del terreno y la distancia a la red de distribución en la valoración de los criterios técnicos. El SOLAR-GIS contempla en su valoración de criterios tanto sistemas eólicos como solares.
- La mayoría de las herramientas mencionadas (9/14) fueron aplicadas a estudios en regiones con características y necesidades distintas (incremento de las fuentes actuales de generación eléctrica, eficiencia energética de edificios residenciales, comerciales e industriales) a las de comunidades en zonas de países en vías de desarrollo. Esto es una limitante para evaluar alternativas de electrificación rural ya que de inicio las necesidades de la población son distintas, como por ejemplo, no toman en cuenta variables como la seguridad del suministro en las viviendas y los criterios técnicos están enfocados a sistemas de conexión a la red eléctrica y no a sistemas aislados de generación.
- En los criterios sociales, algunos autores (Georgopoulou, 1997; Afgan, 2000; Wang, 2009; Cavallaro, 2005) sólo se enfocan a aspectos que tienen una repercusión económica (como la creación de empleos, cohesión con

actividades económicas locales y generación de capital) o en algunos casos sólo incluyen un aspecto genérico de aceptación de la tecnología por parte de la comunidad. Esto limita la valoración del impacto social ya que no incluyen variables como la facilidad de gestión, la equidad en el suministro, el riesgo de conflictos, entre otros.

- Existen herramientas y autores (Afgan, 2000; Yue, 2006; Wang, 2009; HOMER y SURE) que utilizan los mismos criterios para evaluar diferentes tipos de tecnologías renovables (solar, eólica, biomasa y térmica), lo cual a nivel técnico se pierde detalle de aspectos característicos de cada tecnología.
- Hay casos (Afgan, 2000) donde no se toman en cuenta aspectos técnicos sino que se utiliza una serie de criterios de recurso, los cuales hacen referencia solo a la capacidad de disposición de los mismos y no a su utilidad técnica.
- Varios autores y herramientas (Afgan, 2000; Wang, 2009; VIPOR y HYBRID2) definen los criterios económicos en cuanto a razones de ganancia/utilidad, cuando en el caso de las comunidades de países en vías de desarrollo priman aspectos de minimización de gasto y no venta de la energía o recuperación de la inversión (payback).
- En la mayoría de los sistemas informáticos (HOMER, RETScreen, VIPOR, LAP, SOLAR-GIS y HYBRID2) y en algún estudio (Amador, 2005) la evaluación de las alternativas se basa sólo en criterios técnicos y económicos, aunque RETScreen realiza un análisis de las emisiones de gases tipo invernadero.
- Hay estudios como el de Yue (2006) que contemplan criterios técnicos, económicos y una serie de criterios ambientales bien definidos pero no evalúan criterios sociales. Asimismo, los criterios técnicos sólo evalúan el potencial energético disponible y no toman en cuenta otros aspectos importantes característicos de las comunidades de países en vías de desarrollo, como son la calidad y flexibilidad en el suministro, los riesgos del sistema, entre otros.
- Existen programas como el SURE que no muestran información detallada de los criterios a evaluar, no se sabe claramente que criterios evalúa y cómo los evalúa, además el cálculo de la capacidad de cada sistema propuesto no muestra como lo realiza, lo que provoca que la valoración de las alternativas de solución no permita evaluar individualmente cada uno de los criterios.

Con base en este análisis podemos denotar que no existe una herramienta aplicada que responda adecuadamente a la evaluación de criterios técnicos y sociales a utilizar en la elección de alternativas de generación eólica o eólico-solar para la electrificación rural en países en vías de desarrollo.

3. Propuesta de Metodología para la Evaluación de Criterios

Debido a la necesidad de utilizar una metodología que permita evaluar una serie de alternativas, a partir de una serie de criterios tanto sociales como técnico-económicos, es necesario usar una herramienta que permita combinar ambos aspectos. Después del análisis comparativo de los diferentes estudios realizados concluimos que el análisis multicriterio nos permite esta posibilidad.

La metodología utilizada en varios de los estudios analizados en el apartado 2.3 nos ayuda a tener una perspectiva más amplia del problema a solucionar y nos permite tomar en cuenta diversos aspectos que intervienen dentro de cada proyecto con un enfoque integral y multidisciplinario, ya que en el desarrollo de las diversas etapas del proceso intervienen personas especialistas en diferentes áreas (sociólogos, antropólogos, ingenieros, funcionarios, etc.) para definir y evaluar cada alternativa de manera conjunta.

Dentro del análisis multicriterio existen varias técnicas. Para el desarrollo del presente trabajo se tomaron en cuenta algunos aspectos de métodos utilizados en los trabajos descritos en el capítulo 2 y posteriormente se realizaron adaptaciones que se adecuaran mejor a las necesidades propias del caso de estudio.

La metodología propuesta en este trabajo considera los siguientes cuatro pasos principales:

1. Identificación y definición de los criterios.
2. Asignación de los pesos relativos de los criterios.
3. Normalización de la valoración de los criterios.
4. Comparación de las alternativas de decisión.

A través de esta propuesta se podrá establecer el peso relativo y la criticidad de cada uno de los criterios, así como la ponderación de los evaluadores.

En el caso de la asignación de pesos relativos se utiliza como base la técnica matemática "Analytic Hierarchy Process" (AHP) (Saaty, 1980, 1990, 1994). Al ser una herramienta de evaluación multicriterio permite a los usuarios tomar decisiones dentro de una amplia variedad de problemas, incluyendo estrategias de planificación, selección de alternativas, priorización de alternativas y la asignación de recursos. Además su proceso comparativo por parejas permite a los involucrados establecer una escala de valoración simple y sencilla de utilizar.

El paso número tres es la parte del proceso que diferencia en gran medida esta propuesta de otros métodos, ya que el proceso de normalización permitirá utilizar escalas distintas de puntuación en la valoración de cada variable. Esto brindará una mayor flexibilidad de criterio a los agentes participantes en la evaluación de las alternativas.

3.1 Identificación de criterios

Los criterios son los medios por los que las distintas alternativas de solución se comparan entre sí sobre el objetivo de la toma de decisiones. Según Hans Voogd, son los aspectos medibles del juicio al que se someten las alternativas (Voogd, 1983).

Inicialmente se debe identificar y definir el conjunto de criterios de evaluación para cada una de las etapas de decisión. Cada uno de los criterios a definir debe ser analizado como un objetivo a conseguir o a mejorar en cada una de las características del proyecto. En esta etapa se debe especificar el conjunto completo de criterios u objetivos, que deben reflejar todas las preocupaciones relacionadas con el problema de decisión y las medidas para alcanzar dichos objetivos. Existe un límite para establecer el número total de criterios, el cual está relacionado con la capacidad de la persona o grupo de personas que tomarán las decisiones. Dicho límite máximo está considerado entre 7 y 12 criterios (Nijkamp et al., 1990; Bouyssou, 1990). Cabe mencionar que estos criterios pueden dividirse en subcriterios para no superar este límite.

Para la etapa del proceso donde haya que escoger el tipo de tecnología a utilizar y evaluar la mejor alternativa entre varias configuraciones posibles se identificarán dos grupos de criterios. Un primer grupo donde se definirán los criterios sociales-ambientales y otro grupo donde se definirán los criterios técnico-económicos.

3.2 Asignación de los pesos relativos de los criterios

El peso relativo es el valor asignado a un criterio, el cual indica su importancia relativa con respecto a otros criterios bajo su consideración. Esto quiere decir que cada criterio general, se multiplica por el peso respectivo antes de ser sumado o agregado con los valores de otros criterios.

Existen diversas técnicas para determinar la ponderación de pesos. La técnica utilizada en este trabajo será la comparación por pares. En esta técnica se les presenta una hoja de trabajo a los participantes y se les pide que realicen una comparación de importancia entre dos criterios a la vez. ¿Cuál de estos dos criterios es más importante y qué tanto más importante? Luego se valora la importancia relativa de cada criterio. La escala que se utilizará será una con valores de 1 a 9 (Saaty, 1980). Los valores posibles se presentan en la tabla 2.

Posteriormente, los resultados son consolidados por la suma de las puntuaciones obtenidas por cada uno de los criterios, cuando tienen cierta preferencia sobre los demás. Este método de cálculo de pesos relativos brinda un marco para comparar cada uno de los criterios contra todos los demás.

Intensidad de importancia	Definición
1	<i>Igual importancia</i>
2	<i>Igual a moderada importancia</i>
3	<i>Moderada importancia</i>
4	<i>Moderada a fuerte importancia</i>
5	<i>Fuerte importancia</i>
6	<i>Fuerte a muy fuerte importancia</i>
7	<i>Muy fuerte importancia</i>
8	<i>Muy a extremadamente fuerte importancia</i>
9	<i>Extrema importancia</i>

Tabla 2. Escala numérica para juicios comparativos (Saaty, 1980)

Cabe mencionar, que el enfoque participativo por parte de los diferentes grupos de expertos, tanto para los criterios técnicos como para los sociales, es de suma importancia en esta etapa del proceso.

3.3 Normalización de la valoración de los criterios

El establecer una escala de valores homogénea al momento de evaluar criterios de índole cuantitativa y cualitativa, puede ser una tarea complicada. Para facilitar esta tarea se decidió procesar previamente los datos antes de obtener una puntuación final para cada criterio.

Para determinar la puntuación final de cada criterio se seguirán los siguientes pasos:

1. Se asignarán los valores absolutos a los criterios que por sus características, puedan ser calculados. (Ejemplo: el coste total de una alternativa estará expresado en una cantidad monetaria, calculada previamente).
2. Para los criterios de índole cualitativa se asignará una escala Likert del 1 al 5, siendo el valor mínimo de la escala un extremo de la posibilidad de la respuesta y el valor máximo el otro extremo. (En el capítulo 4 se especificará las características de la escala de cada criterio de este tipo).
3. Una vez obtenida la valoración inicial de cada criterio se procederá a normalizar los valores asignados a cada uno, transformando cada puntuación individual en una *puntuación típica* o *puntuación zeta*.

Una puntuación típica (z) expresa en cuantas desviaciones típicas se aparta una puntuación individual de la media de su grupo, por lo tanto son puntuaciones diferenciales (diferencias con respecto a la media) tomando como unidad la desviación típica (σ). Se calcula mediante la siguiente expresión:

$$z = \frac{X - \bar{X}}{\sigma}$$

Por lo que el dato individual lo expresamos en términos de desviaciones típicas por encima o por debajo de la media. Todos los valores que estén por encima de la media tendrán un valor positivo y los que estén por debajo tendrán un valor negativo. Los valores extremos tienden a estar entre -3 y +3 cualquiera que sea la magnitud de las puntuaciones originales.

Al traducir todas las puntuaciones directas a puntuaciones típicas (z), tenemos una única escala métrica, cualquiera que sea la magnitud de las puntuaciones originales, por lo que podemos comparar unos resultados con otros con más objetividad y realismo que las puntuaciones directas. Podremos comparar por ejemplo, coste (€) con energía producida (kWh) o con un valor de escala Likert.

3.4 Comparación de las alternativas de solución

Tras el análisis de las alternativas de solución y el procesamiento de los datos, se deben comparar los puntajes finales obtenidos para cada criterio y para cada alternativa, a fin de evaluar los resultados.

Para obtener el vector de los puntajes finales, primero se deberá multiplicar por cada una de las alternativas de solución el valor individual normalizado de cada criterio por el peso relativo del criterio respectivo, previamente calculado.

La puntuación final de cada alternativa está dada por la suma de los elementos del vector final. En el caso de haber dos grupos de criterios (sociales y técnico-económicos) se sumarán ambos grupos de igual forma para obtener una puntuación total final para cada alternativa.

La alternativa con la puntuación más alta será la más adecuada. En el caso de la priorización de proyectos, la secuencia descendente del valor más alto al más bajo indicará el orden de prioridad de las comunidades.

4. Propuesta de Definición de Criterios de Decisión

4.1 Proceso de planificación

El proceso de planificación inicia con un estudio socioeconómico de las comunidades, tomando en cuenta las principales necesidades (domésticas, servicios y/o usos productivos) de los posibles beneficiarios así como de las características socioeconómicas de los mismos. De forma paralela se procede a realizar un estudio de los recursos con que cuentan las diferentes comunidades, con la finalidad de evaluar su potencial energético, siendo los recursos hídrico, solar y eólico los principales con vistas a establecer alternativas de solución.

Posteriormente se procede a definir las opciones tecnológicas a considerar. Cabe mencionar que en esta etapa se generan y evalúan las posibles soluciones tecnológicas en base al análisis previo de los recursos disponibles y su respectivo coste económico, de acuerdo a las especificaciones de cada opción. Para detallar las opciones tecnológicas se toman en cuenta las necesidades de la comunidad en cuestión, la demanda energética cubierta, la variación de la potencia, los tipos de tecnología y la configuración del sistema de cada una de las alternativas. Una vez definido el listado de opciones de electrificación para cada comunidad se procede a seleccionar la tecnología más adecuada. En esta etapa del proceso no existe un procedimiento definido ni se utiliza herramienta alguna para apoyar el proceso de la toma de decisión.

Es importante mencionar que para el proceso de selección de la tecnología se deben analizar paralelamente otros aspectos externos que pueden afectar directamente a la viabilidad de la opción seleccionada.

Uno de los aspectos que se deben analizar previamente son las políticas públicas e institucionales que estarán directamente relacionadas con cada proyecto de electrificación, como pueden ser:

- Relaciones institucionales entre los diversos actores,
- Opciones de crédito a las cuales se tendrán acceso en cada proyecto,
- Los planes de desarrollo (energéticos-productivos) que existen en la región.

Otros aspectos a tomar en cuenta son aquellos relacionados directamente con el entorno tecnológico, como pueden ser:

- La existencia de proveedores que puedan ofrecer una asistencia técnica local,
- La presencia de proyectos de electrificación cercanos que utilicen una tecnología parecida, lo cual les permita aprender y compartir experiencias,
- La no dependencia de fabricantes foráneos o extranjeros para el suministro de repuestos y adquisición de nuevos equipos.

Una vez definida la mejor alternativa tecnológica para cada comunidad se procede a realizar un análisis de priorización de comunidades, básicamente definir qué comunidades serán las primeras que se electrificarán y establecer un orden lógico y planificado. Actualmente no se cuenta con ningún tipo de herramienta para realizar el análisis de dicha priorización de comunidades.

Una vez definido el listado de proyectos de comunidades ya priorizados se inicia el proceso de ejecución de los proyectos. En dicho proceso de ejecución se estudia en detalle la situación de cada una de las casas de cada comunidad y se definen los diferentes presupuestos a asignar, elaborando un proyecto técnico ejecutivo en detalle, el cual será la base para la ejecución final de cada proyecto.

Las tres decisiones multicriterio dentro de este proceso son la selección de alternativas tecnológicas para cada comunidad, la priorización de proyectos para definir el orden de ejecución en las comunidades a electrificar y la elección del sistema de electrificación detallado a instalar (eólico, solar o híbrido). Se pretende que dichos procesos de decisión se realicen de acuerdo a un análisis holístico en el cual se tomen en cuenta tanto los aspectos técnicos-económicos como los aspectos sociales que recojan la voluntad y opinión de los beneficiarios de las comunidades a electrificar.

En la siguiente figura se esquematiza el flujo del proceso de la toma de decisiones que se explicó anteriormente:

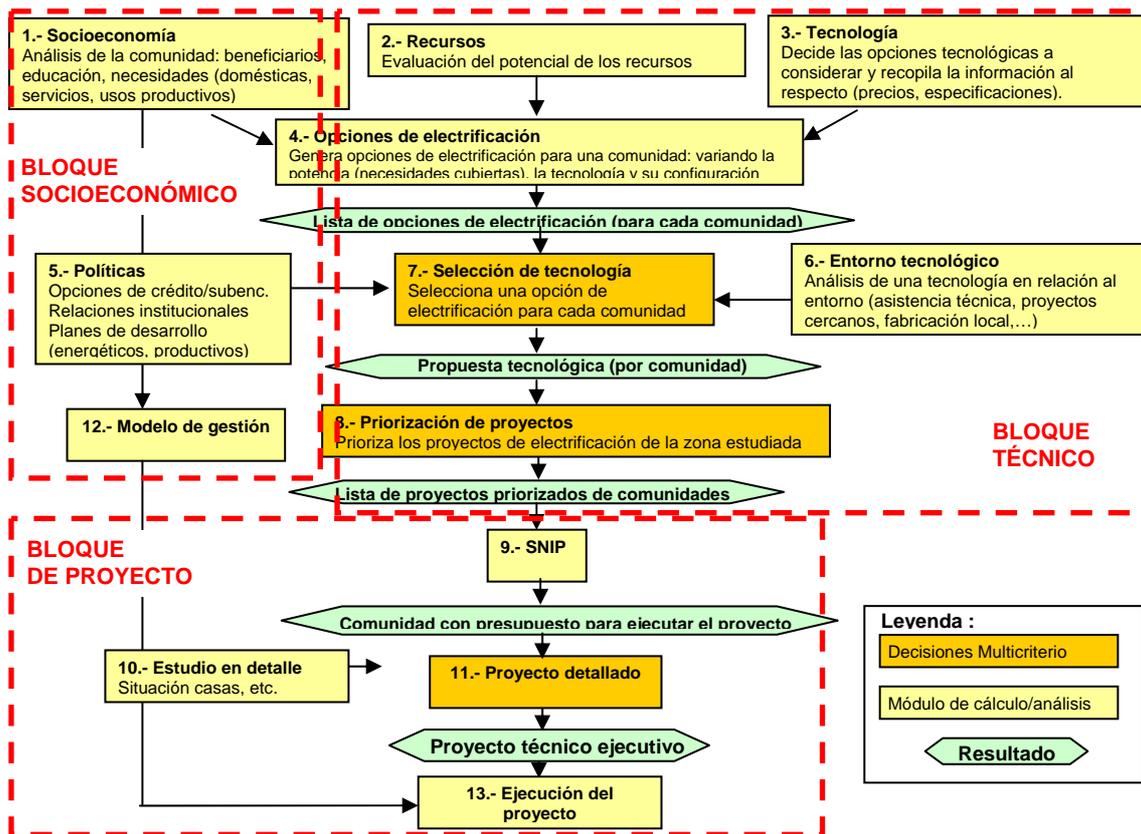


Figura 1. Flujo del proceso de toma de decisiones

Con vistas a mejorar el proceso de planificación para futuros planes se ha revisado el proceso anterior y se han propuesto mejoras. Dichas mejoras se basan en la generación de criterios definidos, para que éstos sean valuados mediante un instrumento de evaluación y así poder identificar la mejor alternativa posible entre el total de opciones generadas. Esto con la finalidad de sistematizar el proceso de la toma de decisiones.

Para esto se ha desarrollado el siguiente esquema, donde se ha identificado la necesidad de desarrollar diferentes grupos de criterios de evaluación que ayuden a mejorar las decisiones multicriterio. El esquema explica este proceso en tres niveles de detalle:

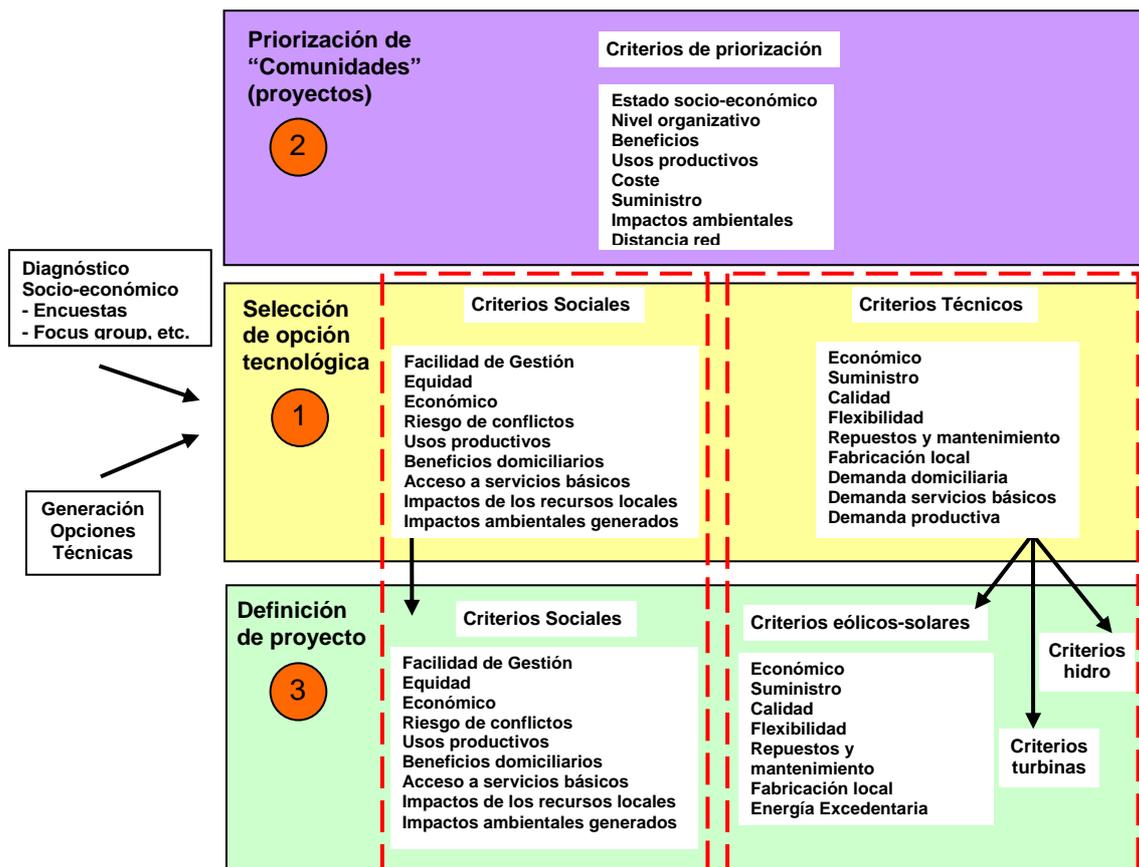


Figura 2. Niveles de detalle en la toma de decisiones

En el primer nivel de menor detalle se definirá un proceso de selección para priorizar los proyectos y enlistar el orden en que se electrificarán las comunidades. En este paso se definirá sólo una categoría de criterios especiales que ayudarán a evaluar las diferencias de iniciar la ejecución de los proyectos en una comunidad o en otra. Algunos criterios utilizados en el segundo nivel de detalle se incluirán en este proceso de decisión y otros, de carácter político e institucional, serán añadidos.

En un segundo nivel de detalle se deberá realizar la primera toma de decisión, la cual tendrá como resultado la selección de la mejor opción tecnológica para cada comunidad. Para facilitar la toma de decisión se elaborarán dos categorías de criterios de evaluación, por una parte unos criterios sociales (información que será recogida por especialistas sociólogos a través del diagnóstico socio-económico) y por otra los criterios técnicos, estos últimos serán la base para evaluar las diferentes alternativas técnicas generadas previamente con la finalidad de definir qué tipo de tecnología es la más adecuada para cada caso.

Una vez definido el mejor tipo de tecnología a utilizar en cada comunidad y habiendo priorizado las comunidades a electrificar se pasará al tercer nivel de mayor detalle en la toma de decisión. En esta etapa se evaluarán las diferentes configuraciones de sistemas, generados previamente, del tipo de tecnología que se escogió en el segundo nivel de detalle de este proceso. Como resultado se obtendrá la mejor alternativa técnica y socialmente aceptada.

Cabe mencionar que la asignación de los pesos relativos de los dos grupos de criterios estará a cargo de un grupo multidisciplinario. Los criterios técnicos serán definidos a partir de un grupo de expertos en el uso de las tecnologías. El peso de los criterios sociales será estipulado por un grupo de sociólogos y antropólogos, los cuales tendrán que rescatar la opinión de los beneficiarios.

4.2. Definición y cálculo de los criterios de evaluación

A continuación se definirá la propuesta de criterios técnicos objetivo y alcance de este trabajo, los cuales fueron el resultado del análisis de los trabajos realizados anteriormente en este tema, junto con el estudio de los diversos factores que pueden intervenir en la valoración técnica de un proyecto (eólico, solar y/o híbrido) en un sistema autónomo de electrificación y el apoyo bibliográfico. El listado de criterios resultante fue expuesto posteriormente al grupo multidisciplinario para su discusión durante varias sesiones de trabajo, donde participaron tanto expertos en las áreas de las ciencias sociales como expertos técnicos y del área de ingeniería.

La propuesta de criterios incluye una amplia explicación que permite aclarar los puntos a que hace referencia cada uno, además de establecer los modos de cálculo que facilitarán su respectiva valoración.

Posteriormente se mencionarán los criterios sociales, los cuales forman parte del proceso de análisis multicriterio para la toma de decisiones y que fueron trabajados más específicamente por los expertos en el área.

4.2.1. Criterios técnicos (eólico-solares)

Se proponen 8 criterios técnicos (CTA, CTB, etc.), los cuales fueron divididos en 21 subcriterios (CT1, CT2, etc.). Cabe mencionar que al tratarse de criterios de índole técnica, estos fueron detallados por el personal experto en el área, mismos que serán los responsables de realizar la valoración correspondiente. La propuesta de criterios técnicos se muestra en la siguiente tabla.

CRITERIOS TÉCNICOS (EÓLICO -SOLAR)			
Criterios		Subcriterios	
Económico	CTA	CT1	Inversión inicial/ beneficio
		CT2	Inversión inicial
		CT3	Costes de operación y mantenimiento/beneficio
Suministro	CTB	CT4	Vida útil
		CT5	Energía/familia (Wh/día familia)
		CT6	Potencia/familia (W/familia)
Calidad	CTC	CT7	Fiabilidad del recurso
		CT8	Autonomía de las baterías
Flexibilidad	CTD	CT9	Modularidad
		CT10	Flexibilidad de consumo entre usuarios
Repuestos y mantenimiento	CTE	CT11	Asistencia en pequeñas averías/repuestos
		CT12	Asistencia en grandes averías/repuestos
Fabricación local	CTF	CT13	Fabricación componentes generales
		CT14	Fabricación componentes específicos
		CT15	Instalación
Energía Excedentaria	CTG	CT16	% demanda energía cubierta domicilios
		CT17	% demanda energía cubierta servicios sociales
		CT18	% demanda energía cubierta usos productivos
Riesgos del Sistema	CTH	CT19	Riesgo de fallas en el equipo
		CT20	Disponibilidad de equipos
		CT21	Número de máquinas

Tabla 3. Criterios técnicos para tecnologías eólico-solares.

Estas divisiones se han hecho para tener en cuenta todos los posibles aspectos que reflejan las preocupaciones de los actores y, al mismo tiempo, para respetar el límite de la capacidad de toma de decisiones humanas de manejar un máximo de 12 criterios (Nijkamp et al., 1990; Bouyssou, 1990).

A continuación, en la tabla 4, se realiza una descripción detallada del significado y alcance de cada uno de los criterios a evaluar.

CRITERIOS TÉCNICOS (EÓLICO -SOLAR)		
Subcriterio		Descripción
CT1	Inversión inicial/ beneficio	La inversión inicial hace referencia al coste total del equipo y maquinaria necesaria para el arranque del proyecto, así como de los gastos generados para la instalación y funcionamiento del sistema de generación. Este criterio es la relación entre la inversión inicial total entre el beneficio generado, el cual está definido por el número total de familias beneficiadas con el proyecto. Es una relación coste/beneficio por lo que será medido en \$USD/familia. Nota: El beneficio también puede hacer referencia a la potencia total instalada. La potencia instalada es proporcional al número de familias beneficiadas, por lo que a manera comparativa tienen el mismo impacto.
CT2	Inversión inicial	El coste total de las máquinas (aerogeneradores), del equipo (baterías, conductores, inversores, reguladores) y de los gastos relacionados con la instalación y puesta en marcha (coste del cableado, accesorios, gastos de instalación, entre otros). Este criterio estará medido en \$USD.
CT3	Costes de operación y mantenimiento/ beneficio	El coste de operación y mantenimiento está dado por todos aquellos gastos relacionados al mantenimiento preventivo de los equipos (limpieza del equipo, cambio de accesorios, etc.) como a las reparaciones en caso de fallos de los mismos (equipos de repuesto, material utilizado, etc.). El coste de O&M también debe incluir todos los gastos relacionados a la mano de obra, en caso de haber contrato de servicios. El criterio estará definido por la razón entre el coste de O&M y el número total de familias beneficiadas con el proyecto. La unidad de medida está definida en \$USD/familia.
CT4	Vida útil	La vida útil es la duración estimada que el sistema, en este caso los aerogeneradores, puede tener realizando correctamente su función. La duración se estima en número de años.
CT5	Energía/familia	Es la razón entre la cantidad de energía entregada por los aerogeneradores al sistema por una unidad de tiempo (energía generada en un día) y el número de familias beneficiadas por el mismo. Es una relación entre producción/beneficio. Este criterio será medido en kWh-día/familia.
CT6	Potencia/familia	La potencia instalada es la suma total de las potencias nominales (Watts) de todos los aerogeneradores conectados al sistema y que alimentan el equipo de almacenamiento. Este criterio está definido como la relación entre la potencia instalada entre el número de beneficiarios, por lo que las unidades en que se mide es kW/familia.
CT7	Fiabilidad del recurso	Se refiere a la posibilidad de que el sistema pueda quedarse sin suministro por varios días seguidos debido a la presencia de calmas continuas y extensas. Esto se debe a la variabilidad del viento y por tanto es necesario definir una variable que mida esta posibilidad. Para este caso se calcula la posibilidad de que el sistema cubra solo el 50% de la demanda. El criterio puede ser valorado en una escala Likert o en el caso de un estudio más a profundidad en días consecutivos de calmas.

CT8	Autonomía de las baterías	La autonomía define el tiempo en el cual el sistema de almacenamiento de energía (baterías) puede mantenerse en operación sin descargarse en caso de que el sistema se quede sin suministro. La unidad de medida está dada en días.
CT9	Modularidad	Cada sistema de generación tiene ciertas limitaciones para poder crecer y alimentar a un mayor número de viviendas. Este criterio define la capacidad que cada sistema instalado tiene para crecer.
CT10	Flexibilidad de consumo entre usuarios	La capacidad individual de consumo de los usuarios está delimitada por la carga de las baterías disponible. Este criterio evalúa la posibilidad de que cada usuario pueda consumir más o menos energía y además que pueda decidir en qué utilizar la misma.
CT11	Asistencia en pequeñas averías/ repuestos	Cuando se presentan pequeñas averías en el sistema se requiere realizar un mantenimiento correctivo simple. Este criterio mide la dificultad de arreglar el problema inmediato, el cual está condicionado a la disponibilidad de los repuestos de piezas pequeñas necesarios para la solución.
CT12	Asistencia en grandes averías/ repuestos	Cuando se presentan averías fuertes en el sistema se requiere realizar un mantenimiento correctivo de mayor complejidad. Este criterio mide la dificultad de arreglar el problema, el cual está condicionado a la disponibilidad de los repuestos de grandes piezas necesarios para la solución.
CT13	Fabricación componentes generales	Es importante que los dispositivos generales (aerogeneradores, palas, etc.) sean fabricados en zonas locales, lo más cercanas a la comunidad, para no generar una dependencia de fabricantes extranjeros. Este criterio evalúa la probabilidad de contar con proveedores locales en la fabricación de componentes generales.
CT14	Fabricación componentes específicos	Es importante que los dispositivos específicos (baterías, convertidores, etc.) sean fabricados en zonas locales, lo más cercanas a la comunidad, para no generar una dependencia de fabricantes extranjeros. Este criterio evalúa la probabilidad de contar con proveedores locales en la fabricación de componentes específicos.
CT15	Instalación	Es importante contar con instaladores en zonas locales, lo más cercanas a la comunidad, para no generar una dependencia de proveedores foráneos o extranjeros. Este criterio evalúa la probabilidad de contar con proveedores locales para la instalación de los sistemas.
CT16	% demanda energía cubierta domicilios	Porcentaje de la energía cubierta o del exceso de energía generada (kWh-día) que se utiliza para cubrir la demanda mínima (kWh-día) de los domicilios.
CT17	% demanda energía cubierta servicios sociales	Porcentaje de la energía cubierta o del exceso de energía generada (kWh-día) que se utiliza para cubrir la demanda mínima (kWh-día) de los servicios sociales.
CT18	% demanda energía cubierta usos productivos	Porcentaje de la energía cubierta o del exceso de energía generada (kWh-día) que se utiliza para cubrir la demanda mínima (kWh-día) de los usos productivos.
CT19	Riesgo de fallas en el equipo	Evalúa el riesgo de fallos en el equipo que existe derivado de agentes externos al funcionamiento del sistema. En el caso de los sistemas eólicos sería el riesgo que existe de que se presenten vientos muy turbulentos que afecten el funcionamiento de los aerogeneradores.
CT20	Disponibilidad de equipos	Evalúa el riesgo de que los equipos no se encuentren disponibles por medidas de seguridad. En el caso de los sistemas eólicos sería la posibilidad de que se presenten vientos muy fuertes, con media igual o superior a la velocidad de paro de los aerogeneradores.
CT21	Número de máquinas	Al presentarse algún fallo en uno o más de los equipos, la posibilidad de que el sistema continúe en operación dependerá del número de dispositivos que puedan seguir en funcionamiento.

Tabla 4. Descripción de los criterios técnicos.

Cálculo de los criterios de evaluación

Ante la necesidad de evaluar cada uno de los criterios técnicos y dadas las características de los mismos, se presenta el riesgo de no contar con los recursos y/o equipos informáticos mínimos necesarios para realizar los cálculos oportunos. Para brindar una solución a esta posible problemática, se han planteado dos alternativas de cálculo o valoración de cada uno de los criterios, la cual está directamente relacionada con la capacidad técnica y del equipo informático con que se cuente.

Una primera opción de valoración de los criterios se define como "Simplificada", en caso de tener limitaciones en los recursos disponibles. Una segunda opción de valoración se define como "Detallada", en caso de contar con los recursos suficientes disponibles. Ambos tipos de valoración se explican a detalle en la tabla 5. La notación N/A (No Aplica) indica que solo existe una forma de valoración del criterio.

CRITERIOS TÉCNICOS (EÓLICO -SOLAR)		
Subcriterios	Valoración Simplificada	Valoración Detallada
CT1	Inversión inicial/ beneficio	N/A
CT2	Inversión inicial	N/A

CT3	Costes de operación y mantenimiento/beneficio	<p>Una opción simplificada de estimar el costo de O&M es dar un valor por unidad de energía producida, en este caso, la cantidad de \$ gastado en reparaciones y mantenimiento de los equipos por kWh producido. Los datos se han obtenido de razones comunes en proyectos de electrificación rural con las mismas características.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Micro hidráulica = 0,7 US¢ /kWh - Micro eólica = 1,0 US¢ /kWh - Solar PV = 0,3 US¢ /kWh <p>Para realizar el cálculo se multiplicará el coste estimado por kWh por la cantidad de energía generada por cada solución y se dividirá entre el número de familias beneficiadas por cada solución.</p> <p>El valor obtenido se obtendrá en \$USD / familia</p>	<p>Para calcular el coste de O&M se tomarán en cuenta los siguientes gastos:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Coste de los repuestos (baterías, inversores, conductores, accesorios) - Gastos del técnico que realiza el mantenimiento o reparación del sistema <p>Se sumarán estos dos conceptos y se estimará el número de mantenimientos que se realizarán por cada tipo de solución durante un año. Este costo anualizado se dividirá entre el número de familias beneficiadas.</p> <p>El coste de O&M vendrá dado en \$USD/familia.</p>
CT4	Vida útil	<p>La vida útil del sistema vendrá dada por el fabricante de los componentes principales de cada solución (aerogeneradores y placas fotovoltaicas). Valores generales:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Micro eólica = 10 años - Solar PV = 15 años 	N/A
CT5	Energía/familia	<p>El calculo simplificado se obtendrá de la siguiente manera:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Energía eólica = $1/2 * \rho * V^3 * A$ ρ = Densidad del aire. Como valor estándar y simplificado se tomará el valor de 1.2 kg/m³. V = Promedio de la velocidad del viento en el período de datos que se tenga disponible (m/s). (Preferentemente un año). A = Área barrida por el rotor del aerogenerador (m²). - Energía solar absorbida = $R * \eta * A$ R = Radiación solar global de la zona donde se instale las placas fotovoltaicas (MJ/m²). η = Eficiencia de la placa fotovoltaica (%). A = Área efectiva cubierta por las placas fotovoltaicas (m²). <p>En cualquiera de ambos casos el valor energético resultante se dividirá entre el número de familias beneficiadas.</p>	<p>La energía generada por cada sistema se obtiene de la siguiente manera:</p> <ul style="list-style-type: none"> - La energía eólica se obtiene mediante algún paquete informático especializado (WaSP, OpenWind). El cual mediante la orografía del terreno, las medidas de viento obtenidas mediante un anemómetro en una torre y la rugosidad (objetos que interfieran al viento en la zona a estudiar) se obtiene un campo modelizado del viento (un malla de recurso eólico), en otras palabras, muestra el comportamiento del viento en un área que se encuentre alrededor de las medidas registradas. A partir de este campo, con las coordenadas de los puntos de generación y la curva de potencia del aerogenerador, se obtiene la energía que generará el sistema eólico por la unidad de tiempo especificada. En este caso Wh/día. - En el caso de la energía solar, esta se obtendrá a partir de la irradiación solar y temperatura medida en la zona de estudio, así como el rendimiento, la potencia y el número de paneles solares a utilizar en la solución. Se utilizará software especializado como PVSYS o HOMER. <p>Una vez obtenida la energía generada por cada sistema, esta se dividirá por el número de familias beneficiadas.</p> <p>Este criterio estará cuantificado en Wh-día / familia.</p>

CT6	Potencia/ familia	La potencia instalada será la potencia nominal de la suma de cada una de los dispositivos generadores de energía por cada solución (W). Posteriormente la potencia total instalada por solución se dividirá entre el número de familias beneficiadas. Este criterio será valorado en W / familia .	N/A
CT7	Fiabilidad del recurso	Se utilizará una escala cualitativa en función de la respuesta de los habitantes con respecto a la variabilidad del recurso solar y eólico: - Mucha = 1 - Bastante = 2 - Media = 3 - Poca = 4 - Muy poca = 5	Para obtener un factor que nos ayude a medir la fiabilidad de cada sistema de solución se calculará la energía generada diaria por cada solución (de acuerdo a los datos disponibles) y se verificará en qué días consecutivos la energía generada no supera el 50% de la demanda total. El criterio vendrá en el número de días que la energía generada no supera el 50% de la demanda.
CT8	Autonomía de las baterías	N/A	La autonomía de las baterías vendrá dada por los días que se ingresaron al modelo de cálculo de las soluciones como días en que las baterías deberán de durar en caso de no ser recargadas. El criterio vendrá valorado en # días de autonomía.
CT9	Modularidad	Se utilizará una escala cualitativa con los siguientes valores: - Muy complicado (Solo individuales) = 1 - Complicado (Individuales y pocas microrredes) = 2 - Factible (Individuales y microrredes, Hidro) = 3 - Muy viable (Mayoritariamente microrredes) = 4	Para cuantificar la flexibilidad de consumo entre usuarios, para cada solución se calculará el costo que representaría incrementar la demanda en un 50% de la actual propuesta. El criterio vendrá dado en costo adicional \$USD .
CT10	Flexibilidad de consumo entre usuarios	Se utilizará una escala cualitativa con los siguientes valores: - Muy poca = 1 - Poca = 2 - Media = 3 - Bastante = 4 - Mucha = 5	N/A
CT11	Asistencia en pequeñas averías/ repuestos	Se utilizará una escala cualitativa con los siguientes valores: - No hay = 1 - Internacional = 2 - Nacional = 3 - Regional = 4 - Local = 5	N/A

CT12	Asistencia en grandes averías/ repuestos	Se utilizará una escala cualitativa con los siguientes valores: - No hay = 1 - Internacional = 2 - Nacional = 3 - Regional = 4 - Local = 5	N/A
CT13	Fabricación componentes generales	Se utilizará una escala cualitativa con los siguientes valores: - No hay = 1 - Internacional = 2 - Nacional = 3 - Regional = 4 - Local = 5	N/A
CT14	Fabricación componentes específicos	Se utilizará una escala cualitativa con los siguientes valores: - No hay = 1 - Internacional = 2 - Nacional = 3 - Regional = 4 - Local = 5	N/A
CT15	Instalación	Se utilizará una escala cualitativa con los siguientes valores: - No hay = 1 - Internacional = 2 - Nacional = 3 - Regional = 4 - Local = 5	N/A
CT16	% demanda energía cubierta domicilios	Se obtendrá mediante la razón entre la energía generada (cálculo simplificado), la cual está destinada al consumo doméstico de las familias (kWh-día), entre la demanda previamente planificada y calculada para el mismo fin (kWh-día). El factor resultante estará expresado en tanto % de demanda cubierta .	Se obtendrá mediante la razón entre la energía generada (cálculo detallado), la cual está destinada al consumo doméstico de las familias (kWh-día), entre la demanda previamente planificada y calculada para el mismo fin (kWh-día). El factor resultante estará expresado en tanto % de demanda cubierta .
CT17	% demanda energía cubierta servicios sociales	Se obtendrá mediante la razón entre la energía generada (cálculo simplificado), la cual está destinada a los servicios sociales de la comunidad (kWh-día), entre la demanda previamente planificada y calculada para el mismo fin (kWh-día). El factor resultante estará expresado en tanto % de demanda cubierta .	Se obtendrá mediante la razón entre la energía generada (cálculo detallado), la cual está destinada a los servicios sociales de la comunidad (kWh-día), entre la demanda previamente planificada y calculada para el mismo fin (kWh-día). El factor resultante estará expresado en tanto % de demanda cubierta .

CT18	% demanda energía cubierta usos productivos	Se obtendrá mediante la razón entre la energía generada (cálculo simplificado), la cual está destinada al uso productivo (kWh-día), entre la demanda previamente planificada y calculada para el mismo fin (kWh-día). El factor resultante estará expresado en tanto % de demanda cubierta .	Se obtendrá mediante la razón entre la energía generada (cálculo detallado), la cual está destinada al uso productivo (kWh-día), entre la demanda previamente planificada y calculada para el mismo fin (kWh-día). El factor resultante estará expresado en tanto % de demanda cubierta .
CT19	Riesgo de fallas en el equipo	Se valorará el viento mediante opinión de la comunidad en una escala cualitativa del 1-5 como: <ul style="list-style-type: none"> - Muy enrachaado = 5 - Enrrachado = 4 - Eventualmente Ráfagas = 3 - Con pocas ráfagas = 2 - Sin ráfagas = 1 	En eólica: El nivel de ráfagas de viento durante períodos muy cortos de tiempo. σ/V = Factor de Turbulencia. σ = desviación típica del período de medidas. V = velocidad media del período de medidas. En solar: No existe riesgo. En híbrido: la parte proporcional al sistema eólico.
CT20	Disponibilidad de equipos	Se valorará mediante opinión de la comunidad en una escala cualitativa del 1-5, la presencia donde el viento sopla demasiado fuerte y de manera constante: <ul style="list-style-type: none"> - Casi todo el tiempo = 5 - A menudo = 4 - Eventualmente = 3 - Muy pocas veces = 2 - Casi nunca = 1 	A partir de los datos de vientos disponibles, %de datos de vientos mayores a la velocidad máxima o de paro del aerogenerador. % datos. En solar: Promedio de horas sin luz solar. En híbrido: la parte proporcional y complementaria de ambos sistemas.
CT21	Número de máquinas /familia	N/A	# aerogeneradores/placas solares con que se alimenta cada familia.

Tabla 5. Valoración de Criterios.

4.2.2. Criterios sociales

Los criterios social-ambientales están conformados por un grupo de 9 criterios, los cuales han sido definidos por un grupo de expertos por parte de ITDG, Ingenieros Sin Fronteras y Green Empowerment, los cuales se muestran en la tabla 6.

CRITERIOS SOCIALES			
Criterios		Subcriterios	
Facilidad de Gestión	CSA	CS1	Facilidad de gestión domiciliaria (complejidad-educación)
		CS2	Facilidad gestión comunitaria - Donde hay proyectos similares
Equidad	CSB	CS3	Equidad en el suministro
		CS4	Acceso a la tecnología para todos - % beneficiarios de la solución
Económico	CSC	CS5	Esfuerzo de pago y influencia en el ingreso de la familia
Riesgo de conflictos	CSD	CS6	Discriminación y conflictos - hombres/mujeres - familia
		CS7	Conflictos entre diferentes grupos de la comunidad. Ej. Represas, tierra
Usos productivos	CSE	CS8	Generación de puesto de trabajo local
Beneficios domiciliarios	CSF	CS9	Aumento ingresos de las familias
		CS10	Mejora calidad de vida en el domicilio
Acceso a servicios básicos	CSG	CS11	Salud de la comunidad
		CS12	Educación
		CS13	Comunicación
Impactos sobre los recursos locales	CSH	CS14	Contaminación de agua
		CS15	Ocupación de suelo
		CS16	Consumo de agua
Impactos ambientales generados	CSI	CS17	Ruido
		CS18	Emisiones en la atmósfera
		CS19	Producción de residuos
		CS20	Impacto visual

Tabla 6. Criterios sociales.

5. Aplicación a un caso práctico.

El estudio práctico se desarrolla en la comunidad el Alumbre en el distrito de Bambamarca en la región de Cajamarca, Perú, una comunidad previamente electrificada mediante un sistema eólico individual. El motivo principal de seleccionar un caso de aplicación ya instalado es la de valorar la pertinencia de la solución y tomarlo como ejemplo de mejora para futuras comunidades a electrificar en la región.

El Alumbre es una comunidad que por su lejanía con los centros de población se encuentra aislada y no tiene posibilidades de acceder a tener energía eléctrica del interconectado (red nacional), ya que las viviendas están totalmente dispersas. El número de familias que viven permanentemente en la localidad es de 35, que hacen un total aproximado de 175 pobladores, con un promedio de integrantes por familia de 5 habitantes. Existen dos centros educativos y un puesto de salud.⁸

5.1. Alternativas de solución.

Las alternativas de solución dentro de los sistemas eólico-solares de generación eléctrica, y sus respectivas configuraciones, son propuestas y diseñadas por el Grupo de Investigación en Cooperación y Desarrollo Humano (GRECDH) de la Universidad Politécnica de Cataluña, quienes han desarrollado un modelo matemático de programación lineal entera mixta (Capó, 2009), el cual toma en cuenta diversos parámetros para establecer diferentes alternativas de solución que satisfagan la demanda requerida, especificando las características y cantidades de los equipos necesarios para cada configuración.

Como parte del proceso de planificación se generan algunas alternativas de solución para la electrificación del Alumbre. El objetivo de este apartado es evaluar dichas alternativas y definir cual de ellas es la mejor opción de acuerdo a los criterios descritos previamente. Las opciones tecnológicas a considerar son:

- Sistemas eólicos individuales.
- Sistemas eólicos conectados a una microrred.
- Sistemas solares individuales.
- Sistemas híbridos eólico-solares individuales.

Cada uno de estos sistemas será contemplado en cuatro escenarios distintos, dos de ellos que contemplen una variación en la demanda de la energía, alta y baja, y otros dos escenarios que contemplen un sistema con mayor o menor autonomía.

Cabe mencionar que para este estudio, no se tomaron en cuenta las soluciones híbridas eólico-solares conectadas a una microrred, debido a que solo se contemplaron soluciones que hayan sido desarrolladas previamente en las comunidades o que han sido anteriormente probadas por los actores involucrados.

Las características generales de cada opción se muestran en la tabla 7. A partir de las alternativas mostradas en esta tabla, se duplica el número de soluciones posibles de acuerdo a un escenario de mayor o menor autonomía, lo cual para efectos prácticos y del cálculo significa aumentar el número de baterías de cada sistema para incrementar los días de autonomía y su respectivo coste. Cada código tendrá dos variantes, una de autonomía alta (AA) y otra de autonomía baja (AB).

⁸ Soluciones Prácticas – ITDG. Diagnóstico Socioeconómico de el Alumbre. Programa de Energía, Infraestructura y Servicios Básicos. 2007. 5-7.

Esto conduce a que se generen 16 posibles opciones de solución para la implementación de un sistema de electrificación en el Alumbre.

Sol.	Descripción	Código	Características
1	Sistema eólico individual con baja demanda.	EOL-IND-DB	35 aerogeneradores individuales de 100W y 2 aerogeneradores de 2kW.
2	Sistema eólico individual con alta demanda.	EOL-IND-DA	46 aerogeneradores individuales de 100W, 9 aerogeneradores de 500W, 2 aerogeneradores de 1kW y 1 aerogenerador de 2kW.
3	Sistema eólico con microrred con baja demanda.	EOL-MR-DB	28 aerogeneradores de 100W conectados en una microrred junto con 1 aerogenerador de 2kW.
4	Sistema eólico con microrred con alta demanda.	EOL-MR-DA	10 aerogeneradores de 100W conectados en una microrred junto con 3 aerogeneradores de 500W, 2 aerogeneradores de 1kW y con 2 aerogeneradores de 2kW.
5	Sistema solar individual con baja demanda.	SOL-IND-DB	14 placas solares de 50W, 40 placas de 75W y 22 placas de 100W.
6	Sistema solar individual con alta demanda.	SOL-IND-DA	2 placas solares de 50W y 117 placas de 100W.
7	Sistema híbrido eólico-solar individual con baja demanda.	HIB-IND-DB	Una combinación entre las soluciones 1 y 5.
8	Sistema híbrido eólico-solar individual con alta demanda.	HIB-IND-DA	Una combinación entre las soluciones 2 y 6.

Tabla 7. Opciones de solución.

A manera de ejemplo, un código completo de una de las 16 alternativas de solución estaría definido de la siguiente manera: EOL-MR-DB-AA.

5.2. Cálculo de los pesos relativos.

Como resultado de la aplicación de la metodología descrita en el capítulo tres, en las figuras 3 y 4 se muestra la valoración de pesos relativos obtenida de los criterios definidos en las tablas 4 y 6 del capítulo cuatro.

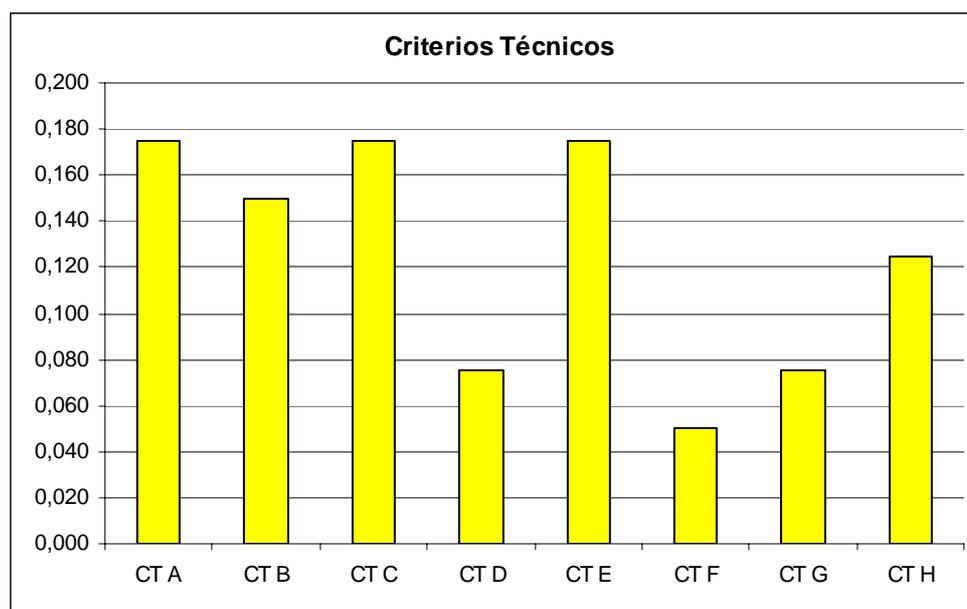


Figura 3. Pesos relativos de los criterios técnicos.

Para el cálculo de los pesos relativos, el valor asignado del 1-9 a cada uno de los criterios en la escala numérica de juicios comparativos (Saaty, 1980), se dividió entre la suma total de todas las valoraciones juntas, indicando el peso relativo con respecto al total de criterios. Posteriormente, el valor de cada subcriterio se definió como la parte proporcional con respecto a cada criterio, esto quiere decir que si un criterio contiene tres subcriterios, cada uno de estos obtuvo un peso relativo de la tercera parte del peso del criterio.

Este proceso se realizó en cada uno de los grupos de criterios por separado, para que al momento de realizar el cálculo del valor final de las alternativas, tanto los criterios técnicos como los criterios sociales representaran el 50% de la puntuación final.

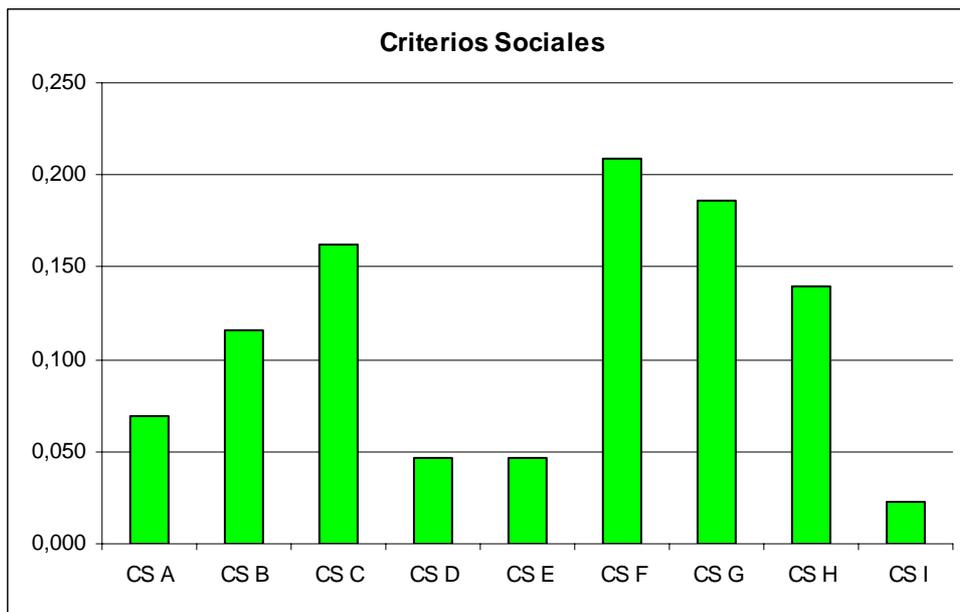


Figura 4. Pesos relativos de criterios sociales

Podemos observar que los criterios técnicos que tuvieron una mayor relevancia en la ponderación de pesos por parte de los expertos técnicos fueron CT-A (Económico), CT-C (Calidad), CT-E (Repuestos y mantenimiento) y CT-B (Suministro). En cuanto a los criterios sociales la ponderación realizada por el proceso participativo y los expertos sociólogos dio mayor peso a los criterios CS-F (Beneficios domiciliarios), CS-G (Acceso a servicios básicos), CS-C (Económico) y CS-H (Impactos sobre los recursos sociales).

5.3. Valoración y normalización de los criterios.

De acuerdo a la escala y/o método de valoración descrito en la tabla 7, se evaluaron cada una de las alternativas de solución a partir de ambos grupos de criterios técnico-económicos y social-ambientales. Cabe mencionar que dicha evaluación se realizó conjuntamente entre la forma simplificada y la detallada, de acuerdo a la disposición de la información necesaria para su cálculo. En la tabla 9 se muestran los valores asignados a cada criterio y a cada solución.

Posteriormente se procedió a normalizar las escalas de los valores. Se calculó la media aritmética y la desviación típica del grupo de valores de cada uno de los criterios y se calcularon los nuevos valores normalizados, los cuales se muestran en la tabla 10.

5.4. Comparación de alternativas y resultados.

Para realizar la comparación entre alternativas se calculó la tabla de puntajes finales ponderados (tabla 10), multiplicando los valores normalizados obtenidos por el peso relativo de cada criterio. Al final se sumaría cada uno de los valores de las columnas de cada solución, lo que da como resultado el valor final asignado a cada alternativa.

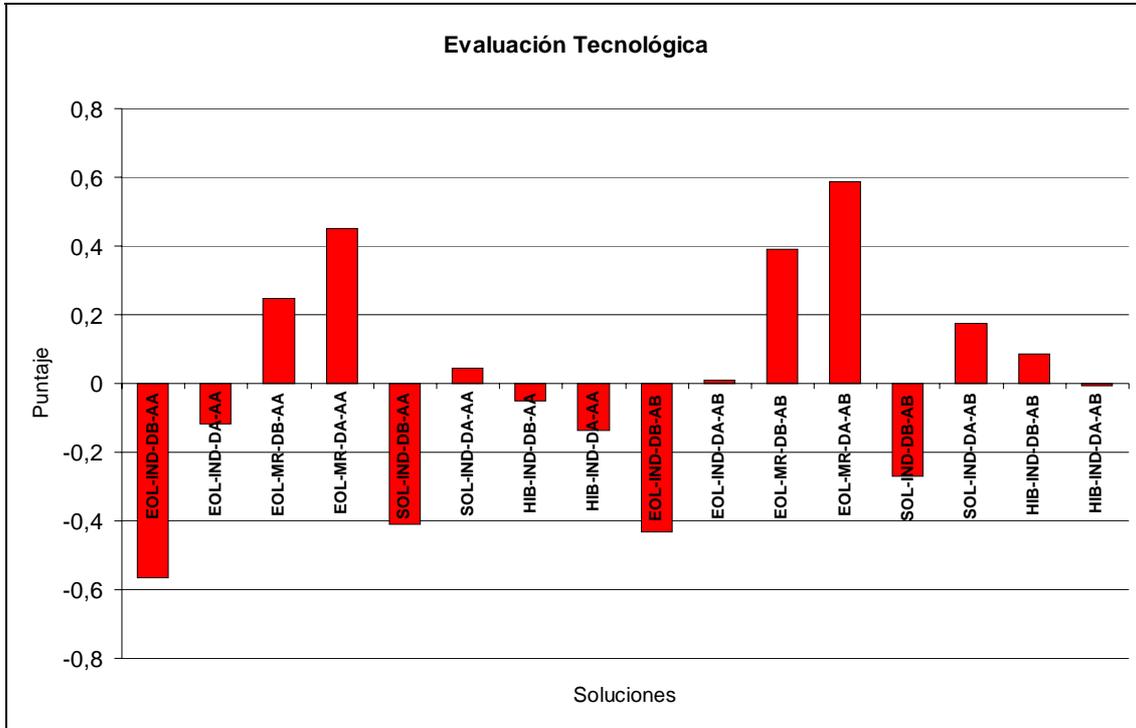


Figura 5. Puntajes finales de alternativas.

La figura 5 muestra los resultados y la comparación de todas las soluciones. Las alternativas con la puntuación más alta son "EOL-MR-DA-AB" y "EOL-MR-DB-AB" en un escenario de mayor autonomía y las alternativas "EOL-MR-DA-AA" y "EOL-MR-DB-AA" en un escenario de menor autonomía. Dichas soluciones corresponden a los sistemas eólicos conectados a una microrred, tanto en un escenario con una demanda baja como en uno con demanda alta, las cuales resultan ser las alternativas más adecuadas para la electrificación de la comunidad del Alumbre.

La figura 6 muestra que el grupo de criterios sociales tiene una mayor influencia en la discrepancia de la puntuación final de las soluciones.

Para poder analizar el carácter técnico de la comparación entre soluciones, podemos observar en la figura 7 que todas las soluciones referidas a tener una mayor autonomía (8 soluciones) tienen una mejor valoración sobre las que ofrecen una menor autonomía, donde las soluciones 11 y 12 (sistemas eólicos conectados a una microrred) obtienen la mejor puntuación. Esta cuestión se ve compensada y equilibrada por la valoración de los criterios sociales, los cuales hacen que las soluciones 3 y 4 (sistemas eólicos conectados a una microrred con menor autonomía) se ubiquen como la 3ª y 4ª mejor opción. En general podemos observar que los sistemas eólicos conectados a una microrred obtienen una mejor valoración que las otras 3 opciones tecnológicas (eólica individual, solar individual, híbrido individual).

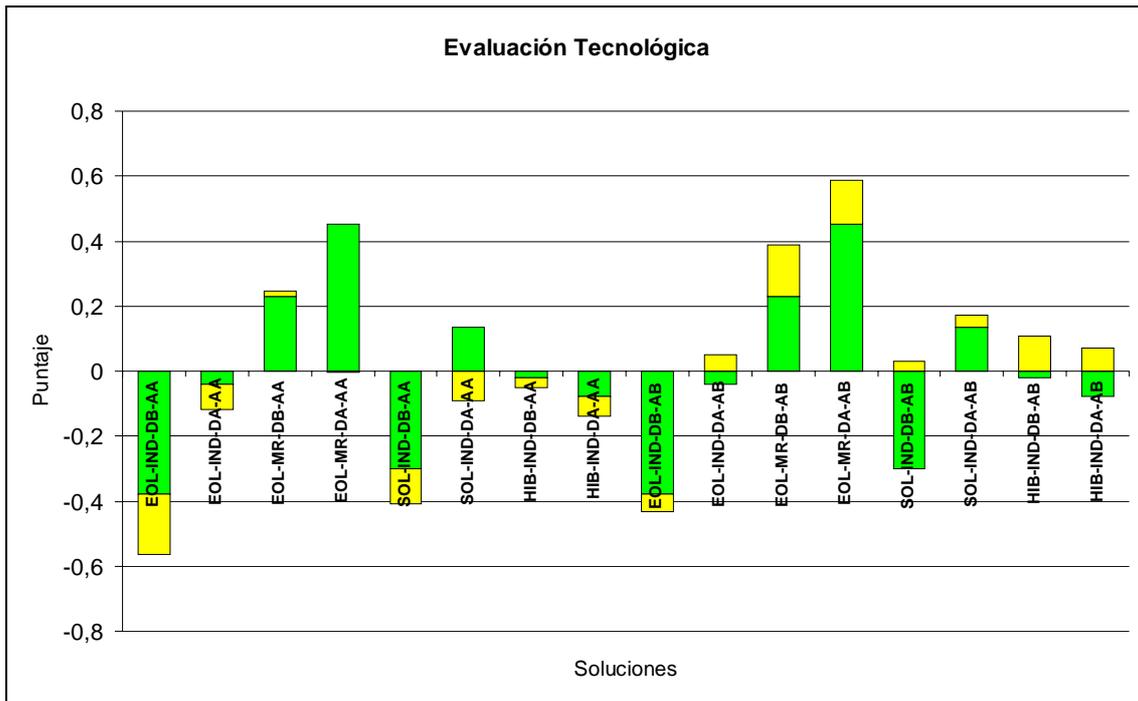


Figura 6. Puntajes finales con criterios sociales y técnicos.

Criterio	Sub criterio	Peso	Puntaje - MENOS AUTONOMIA								Puntaje - MAS AUTONOMIA									
			Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 4	Sol. 5	Sol. 6	Sol. 7	Sol. 8	Sol. 9	Sol. 10	Sol. 11	Sol. 12	Sol. 13	Sol. 14	Sol. 15	Sol. 16		
			Eólico Indiv.		Eólico Microrred		Solar Individual		Híbrido		Sist. Individuales		Microrred		Solar - Individual		Híbrido			
		DB	DA	DB	DA	DB	DA	DB	DA	DB	DA	DB	DA	DB	DA	DB	DA			
Criterios Sociales	CSA	CS1	0,035	2	2	6	6	4	6	8	8	2	2	6	6	4	6	8	8	
		CS2	0,035	6	6	2	2	6	2	2	2	2	6	6	2	2	6	2	2	2
	CSB	CS3	0,058	4	8	10	10	10	10	10	10	4	8	10	10	10	10	10	10	10
		CS4	0,058	10	10	6	6	10	6	10	6	10	10	6	6	10	6	10	6	6
	CSC	CS5	0,163	6	4	6	4	6	6	8	8	6	4	6	4	6	6	8	8	8
		CS6	0,023	4	4	6	6	4	6	6	6	4	4	6	6	4	6	6	6	6
	CSD	CS7	0,023	4	4	2	2	6	2	6	2	4	4	2	2	6	2	6	2	2
		CS8	0,047	6	6	8	8	6	8	8	8	6	6	8	8	6	8	8	8	8
	CSE	CS9	0,105	6	6	8	8	6	8	8	8	6	6	8	8	6	8	8	8	8
		CS10	0,105	6	6	8	8	6	8	8	8	6	6	8	8	6	8	8	8	8
	CSG	CS11	0,062	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
		CS12	0,062	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
		CS13	0,062	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
	CSH	CS14	0,047	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
		CS15	0,047	4	4	2	2	6	4	5	5	4	4	2	2	6	4	5	5	5
		CS16	0,047	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
	CSI	CS17	0,006	4	4	4	4	6	6	5	5	4	4	4	4	6	6	5	5	5
		CS18	0,006	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
		CS19	0,006	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
		CS20	0,006	4	4	4	4	6	6	5	5	4	4	4	4	6	6	5	5	5
Criterios Técnicos	CTA	CT1	0,058	\$2.323	\$3.997	\$1.949	\$3.111	\$2.406	\$4.487	\$2.364	\$4.242	\$2.626	\$4.342	\$2.178	\$3.386	\$2.662	\$4.832	\$2.644	\$4.587	
		CT2	0,058	\$76.651	\$131.893	\$64.327	\$102.678	\$79.384	\$148.078	\$78.018	\$139.986	\$86.660	\$143.279	\$71.869	\$111.727	\$87.843	\$159.464	\$87.252	\$151.372	
		CT3	0,058	0,817	1,664	0,804	1,591	0,211	0,422	0,494	0,998	0,817	1,664	0,804	1,591	0,211	0,422	0,494	0,998	
	CTB	CT4	0,050	10	10	10	10	15	15	10	10	10	10	10	10	15	15	10	10	
		CT5	0,050	817,2	1664,1	803,7	1591,3	702,8	1405,7	760,0	1534,9	817,2	1664,1	803,7	1591,3	702,8	1405,7	760,0	1534,9	
		CT6	0,050	227	518	145	258	179	358	203	252	227	518	145	258	179	358	203	252	
	CTC	CT7	0,088	3	3	2	2	4	4	2	2	3	3	2	2	4	4	2	2	
		CT8	0,088	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	
	CTD	CT9	0,038	1	2	4	4	1	1	3	3	1	2	4	4	1	1	3	3	
		CT10	0,038	1	2	3	4	1	2	2	3	1	2	3	4	1	2	2	3	
	CTE	CT11	0,088	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
		CT12	0,088	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
	CTF	CT13	0,017	3	3	3	3	2	2	2	2	3	3	3	3	2	2	2	2	
		CT14	0,017	3	3	3	3	2	2	2	2	3	3	3	3	2	2	2	2	
		CT15	0,017	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
	CTG	CT16	0,025	133%	133%	126%	130%	125%	115%	129%	124%	133%	133%	126%	130%	125%	115%	129%	124%	
		CT17	0,025	124%	139%	118%	126%	118%	128%	121%	134%	124%	139%	118%	126%	118%	128%	121%	134%	
		CT18	0,025	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
	CTH	CT19	0,042	3	3	3	3	1	1	2	2	3	3	3	3	1	1	2	2	
		CT20	0,042	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	1	1	2	2	
		CT21	0,042	1,12	1,76	0,88	0,58	0,77	1,95	0,94	1,85	1,12	1,76	0,88	0,58	0,77	1,95	0,94	1,85	

Tabla 8. Valoración de alternativas.

		NORMALIZACIÓN																		
		Media	SD	Puntaje - MENOS AUTONOMIA								Puntaje - MAS AUTONOMIA								
Criterio	Sub criterio			Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 4	Sol. 5	Sol. 6	Sol. 7	Sol. 8	Sol. 9	Sol. 10	Sol. 11	Sol. 12	Sol. 13	Sol. 14	Sol. 15	Sol. 16	
				Eólico Indiv.		Eólico Microrred		Solar Individual		Híbrido		Sist. Individuales		Microrred		Solar - Individual		Híbrido		
		DB	DA	DB	DA	DB	DA	DB	DA	DB	DA	DB	DA	DB	DA	DB	DA			
Criterios Sociales	CSA	CS1	5,3	2,3	-1,4	-1,4	0,3	0,3	-0,5	0,3	1,2	1,2	-1,4	-1,4	0,3	0,3	-0,5	0,3	1,2	1,2
		CS2	3,5	2,0	1,3	1,3	-0,8	-0,8	1,3	-0,8	-0,8	-0,8	1,3	1,3	-0,8	-0,8	1,3	-0,8	-0,8	-0,8
	CSB	CS3	9,0	2,1	-2,4	-0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	-2,4	-0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
		CS4	8,0	2,1	1,0	1,0	-1,0	-1,0	1,0	-1,0	1,0	-1,0	1,0	1,0	-1,0	-1,0	1,0	-1,0	1,0	-1,0
	CSC	CS5	6,0	1,5	0,0	1,4	0,0	1,4	0,0	0,0	-1,4	-1,4	0,0	1,4	0,0	1,4	0,0	0,0	-1,4	-1,4
		CS6	5,3	1,0	1,3	1,3	-0,8	-0,8	1,3	-0,8	-0,8	-0,8	1,3	1,3	-0,8	-0,8	1,3	-0,8	-0,8	-0,8
	CSD	CS7	3,5	1,7	-0,3	-0,3	0,9	0,9	-1,5	0,9	-1,5	0,9	-0,3	-0,3	0,9	0,9	-1,5	0,9	-1,5	0,9
		CS8	7,3	1,0	-1,3	-1,3	0,8	0,8	-1,3	0,8	0,8	0,8	-1,3	-1,3	0,8	0,8	-1,3	0,8	0,8	0,8
	CSE	CS9	7,3	1,0	-1,3	-1,3	0,8	0,8	-1,3	0,8	0,8	0,8	-1,3	-1,3	0,8	0,8	-1,3	0,8	0,8	0,8
		CS10	7,3	1,0	-1,3	-1,3	0,8	0,8	-1,3	0,8	0,8	0,8	-1,3	-1,3	0,8	0,8	-1,3	0,8	0,8	0,8
	CSF	CS11	8,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
		CS12	8,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
		CS13	8,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	CSG	CS14	6,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
		CS15	4,0	1,4	0,0	0,0	1,5	1,5	-1,5	0,0	-0,7	-0,7	0,0	0,0	1,5	1,5	-1,5	0,0	-0,7	-0,7
		CS16	6,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	CSI	CS17	4,8	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	-1,5	-1,5	-0,3	-0,3	0,9	0,9	0,9	0,9	-1,5	-1,5	-0,3	-0,3
		CS18	6,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
		CS19	4,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
		CS20	4,8	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	-1,5	-1,5	-0,3	-0,3	0,9	0,9	0,9	0,9	-1,5	-1,5	-0,3	-0,3
Criterios Técnicos	CTA	CT1	3258,5	996,4	0,9	-0,7	1,3	0,1	0,9	-1,2	0,9	-1,0	0,6	-1,1	1,1	-0,1	0,6	-1,6	0,6	-1,3
		CT2	107529,9	32882,3	0,9	-0,7	1,3	0,1	0,9	-1,2	0,9	-1,0	0,6	-1,1	1,1	-0,1	0,6	-1,6	0,6	-1,3
		CT3	0,9	0,5	0,1	-1,5	0,1	-1,4	1,3	0,9	0,7	-0,2	0,1	-1,5	0,1	-1,4	1,3	0,9	0,7	-0,2
	CTB	CT4	11,3	2,2	-0,6	-0,6	-0,6	-0,6	1,7	1,7	-0,6	-0,6	-0,6	-0,6	-0,6	-0,6	1,7	1,7	-0,6	-0,6
		CT5	1160,0	409,0	-0,8	1,2	-0,9	1,1	-1,1	0,6	-1,0	0,9	-0,8	1,2	-0,9	1,1	-1,1	0,6	-1,0	0,9
		CT6	267,4	115,4	-0,3	2,2	-1,1	-0,1	-0,8	0,8	-0,6	-0,1	-0,3	2,2	-1,1	-0,1	-0,8	0,8	-0,6	-0,1
	CTC	CT7	2,8	0,9	-0,3	-0,3	0,9	0,9	-1,5	-1,5	0,9	0,9	-0,3	-0,3	0,9	0,9	-1,5	-1,5	0,9	0,9
		CT8	2,5	0,5	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	CTD	CT9	2,4	1,3	-1,1	-0,3	1,3	1,3	-1,1	-1,1	0,5	0,5	-1,1	-0,3	1,3	1,3	-1,1	-1,1	0,5	0,5
		CT10	2,3	1,0	-1,3	-0,3	0,8	1,8	-1,3	-0,3	-0,3	0,8	-1,3	-0,3	0,8	1,8	-1,3	-0,3	-0,3	0,8
	CTE	CT11	4,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
		CT12	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	CTF	CT13	2,5	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0
		CT14	2,5	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0
		CT15	4,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	CTG	CT16	1,3	0,1	1,0	1,1	-0,2	0,6	-0,3	-2,1	0,4	-0,5	1,0	1,1	-0,2	0,6	-0,3	-2,1	0,4	-0,5
		CT17	1,3	0,1	-0,3	1,8	-1,1	0,0	-1,1	0,3	-0,7	1,1	-0,3	1,8	-1,1	0,0	-1,1	0,3	-0,7	1,1
		CT18	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	CTH	CT19	2,3	0,9	-0,9	-0,9	-0,9	-0,9	1,5	1,5	0,3	0,3	-0,9	-0,9	-0,9	-0,9	1,5	1,5	0,3	0,3
		CT20	1,8	0,4	-0,6	-0,6	-0,6	-0,6	1,7	1,7	-0,6	-0,6	-0,6	-0,6	-0,6	-0,6	1,7	1,7	-0,6	-0,6
		CT21	1,2	0,5	-0,2	1,0	-0,7	-1,3	-0,9	1,4	-0,5	1,2	-0,2	1,0	-0,7	-1,3	-0,9	1,4	-0,5	1,2

Tabla 9. Normalización de la valoración de alternativas.

		PUNTAJE PONDERADO																	
		Puntaje - MENOS AUTONOMIA								Puntaje - MAS AUTONOMIA									
Criterio	Sub criterio	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 4	Sol. 5	Sol. 6	Sol. 7	Sol. 8	Sol. 9	Sol. 10	Sol. 11	Sol. 12	Sol. 13	Sol. 14	Sol. 15	Sol. 16		
		Eólico				Solar Individual		Híbrido		Sist.		Microrred		Solar -		Híbrido			
		DB	DA	DB	DA	DB	DA	DB	DA	DB	DA	DB	DA	DB	DA	DB	DA		
Criterios Sociales	CSA	CS1	-0,049	-0,049	0,011	0,011	-0,019	0,011	0,042	0,042	-0,049	-0,049	0,011	0,011	-0,019	0,011	0,042	0,042	
		CS2	0,044	0,044	-0,026	-0,026	0,044	-0,026	-0,026	-0,026	0,044	0,044	-0,026	-0,026	0,044	-0,026	-0,026	-0,026	
	CSB	CS3	-0,141	-0,028	0,028	0,028	0,028	0,028	0,028	0,028	0,028	-0,141	-0,028	0,028	0,028	0,028	0,028	0,028	
			CS4	0,056	0,056	-0,056	-0,056	0,056	-0,056	0,056	-0,056	0,056	0,056	-0,056	-0,056	0,056	-0,056	0,056	-0,056
	CSC	CS5	0,000	0,223	0,000	0,223	0,000	0,000	-0,223	-0,223	0,000	0,223	0,000	0,223	0,000	0,000	-0,223	-0,223	
			CS6	0,029	0,029	-0,017	-0,017	0,029	-0,017	-0,017	-0,017	0,029	0,029	-0,017	-0,017	0,029	-0,017	-0,017	-0,017
	CSE	CS7	-0,007	-0,007	0,020	0,020	-0,034	0,020	-0,034	0,020	-0,007	-0,007	0,020	0,020	-0,034	0,020	-0,034	0,020	
			CS8	-0,058	-0,058	0,035	0,035	-0,058	0,035	0,035	0,035	-0,058	-0,058	0,035	0,035	-0,058	0,035	0,035	0,035
	CSF	CS9	-0,131	-0,131	0,078	0,078	-0,131	0,078	0,078	0,078	-0,131	-0,131	0,078	0,078	-0,131	0,078	0,078	0,078	
			CS10	-0,131	-0,131	0,078	0,078	-0,131	0,078	0,078	0,078	-0,131	-0,131	0,078	0,078	-0,131	0,078	0,078	0,078
	CSG	CS11	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
			CS12	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
			CS13	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	CSH	CS14	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
			CS15	0,000	0,000	0,068	0,068	-0,068	0,000	-0,034	-0,034	0,000	0,000	0,068	0,068	-0,068	0,000	-0,034	-0,034
	CSI	CS16	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
			CS17	0,005	0,005	0,005	0,005	-0,008	-0,008	-0,002	-0,002	0,005	0,005	0,005	0,005	-0,008	-0,008	-0,002	-0,002
	CTA	CT1	0,055	-0,043	0,077	0,009	0,050	-0,072	0,052	-0,058	0,037	-0,063	0,063	-0,007	0,035	-0,092	0,036	-0,078	
			CT2	0,055	-0,043	0,077	0,009	0,050	-0,072	0,052	-0,058	0,037	-0,063	0,063	-0,007	0,035	-0,092	0,036	-0,078
			CT3	0,007	-0,090	0,008	-0,082	0,076	0,052	0,044	-0,014	0,007	-0,090	0,008	-0,082	0,076	0,052	0,044	-0,014
CTB	CT4	-0,028	-0,028	-0,028	-0,028	0,084	0,084	-0,028	-0,028	-0,028	-0,028	-0,028	-0,028	0,084	0,084	-0,028	-0,028		
		CT5	-0,042	0,062	-0,044	0,053	-0,056	0,030	-0,049	0,046	-0,042	0,062	-0,044	0,053	-0,056	0,030	-0,049	0,046	
		CT6	-0,017	0,109	-0,053	-0,004	-0,038	0,039	-0,028	-0,007	-0,017	0,109	-0,053	-0,004	-0,038	0,039	-0,028	-0,007	
CTC	CT7	-0,026	-0,026	0,077	0,077	-0,128	-0,128	0,077	0,077	-0,026	-0,026	0,077	0,077	-0,128	-0,128	0,077	0,077		
		CT8	-0,085	-0,085	-0,085	-0,085	-0,085	-0,085	-0,085	-0,085	0,085	0,085	0,085	0,085	0,085	0,085	0,085	0,085	
CTD	CT9	-0,041	-0,011	0,048	0,048	-0,041	-0,041	0,019	0,019	-0,041	-0,011	0,048	0,048	-0,041	-0,041	0,019	0,019		
		CT10	-0,047	-0,009	0,028	0,066	-0,047	-0,009	-0,009	0,028	-0,047	-0,009	0,028	0,066	-0,047	-0,009	-0,009	0,028	
CTE	CT11	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		
		CT12	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
CTF	CT13	0,016	0,016	0,016	0,016	-0,016	-0,016	-0,016	-0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	-0,016	-0,016	-0,016	-0,016		
		CT14	0,016	0,016	0,016	0,016	-0,016	-0,016	-0,016	-0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	-0,016	-0,016	-0,016	-0,016	
		CT15	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
CTG	CT16	0,025	0,028	-0,006	0,015	-0,007	-0,052	0,009	-0,012	0,025	0,028	-0,006	0,015	-0,007	-0,052	0,009	-0,012		
		CT17	-0,007	0,045	-0,028	0,000	-0,027	0,007	-0,017	0,026	-0,007	0,045	-0,028	0,000	-0,027	0,007	-0,017	0,026	
		CT18	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
CTH	CT19	-0,036	-0,036	-0,036	-0,036	0,061	0,061	0,012	0,012	-0,036	-0,036	-0,036	-0,036	0,061	0,061	0,012	0,012		
		CT20	-0,023	-0,023	-0,023	-0,023	0,070	0,070	-0,023	-0,023	-0,023	-0,023	-0,023	-0,023	0,070	0,070	-0,023	-0,023	
		CT21	-0,009	0,042	-0,028	-0,052	-0,037	0,057	-0,023	0,050	-0,009	0,042	-0,028	-0,052	-0,037	0,057	-0,023	0,050	
PUNTAJE FINAL			-0,56	-0,12	0,25	0,45	-0,41	0,04	-0,05	-0,14	-0,43	0,01	0,39	0,59	-0,27	0,17	0,09	-0,01	

Tabla 10. Puntajes finales ponderados.

Asimismo se muestra que a nivel técnico las opciones que obtuvieron la valoración más baja, tanto en un escenario de menor como en uno de mayor autonomía, fueron los sistemas individuales tanto eólico como solar (soluciones 1, 5, 9 y 13 respectivamente). Junto con la valoración de criterios sociales, la puntuación se ve confirmada ya que las opciones con menor puntaje final son los sistemas eólicos individuales y los sistemas solares individuales.

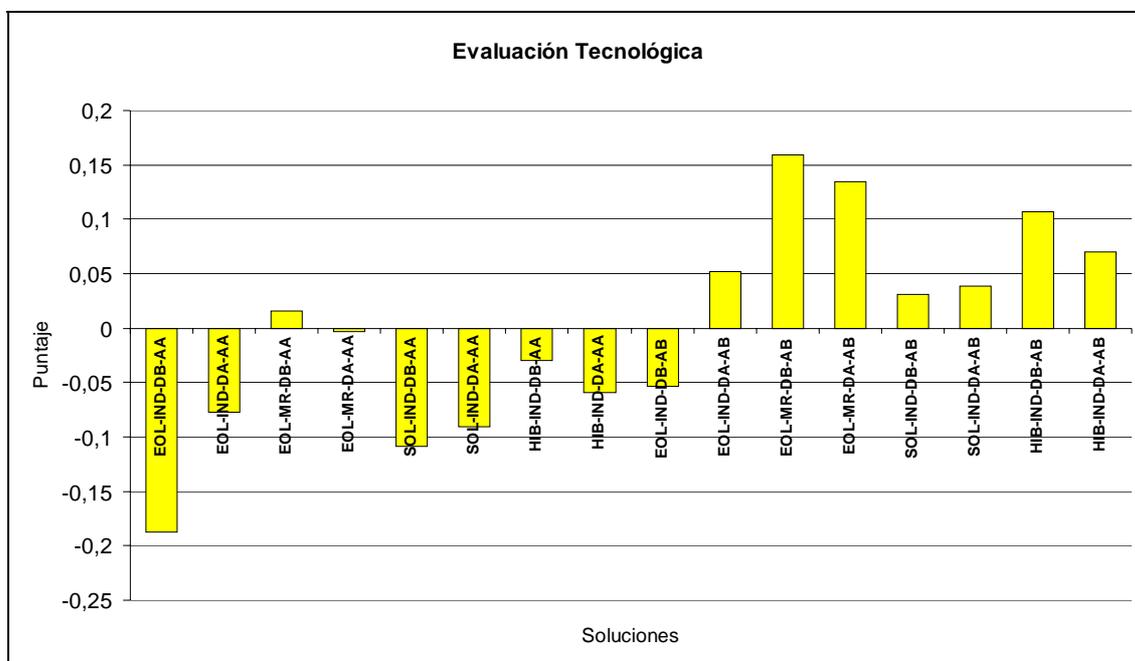


Figura 7. Puntajes finales con criterios técnicos.

Las figuras 8 y 9 muestran para cada solución la influencia de cada grupo de criterios, técnicos y sociales, en los resultados finales. En la primera imagen se puede observar que los criterios técnicos que hacen de las soluciones EOL-MR-DA-AB, EOL-MR-DB-AB, EOL-MR-DA-AA y EOL-MR-DB-AA sean las más apropiadas son los siguientes:

- CTA – Económico, este criterio tiene una valoración más alta en la solución SOL-IND-DB-AA (figura 10) ya que el coste de operación y mantenimiento de los sistemas solares es más económico que el de los sistemas eólicos (0,3 US¢ /kWh contra 1,0 US¢ /kWh). La opción EOL-MR-DB-AA ocupa el segundo sitio como mejor evaluada (y por poca diferencia) ya que el coste de la inversión inicial de los sistemas eólicos conectados a una microrred son los más bajos con respecto a las demás tecnologías. Aunado a que las opciones tecnológicas de microrredes eólicas en baja demanda y las solares individuales en baja demanda (tanto en menor o mayor autonomía) marcan una diferencia significativa con las opciones de menor valoración se encuentra el hecho que este criterio es uno de los de mayor peso relativo, lo cual lo define como un criterio crítico al momento de la valoración final.
- CTC - Calidad, en la figura 11 se puede denotar inicialmente que existe una diferencia significativa entre la valoración de las opciones con una mayor autonomía (3 días) que las opciones de menor autonomía (2 días), esto se debe a que es precisamente la autonomía de las baterías uno de los dos subcriterios a evaluar. Dentro de estas diferencias se puede distinguir además que las soluciones de sistemas eólicos conectados a una microrred y los sistemas híbridos obtienen una mejor puntuación sobre las demás

alternativas. Esto debido a que son más fiables los sistemas híbridos en cuanto a la combinación de la disponibilidad del recurso eólico por las noches (existe mayor viento durante la noche) y el recurso solar durante el día, así como los sistemas conectados a una microrred dan un mayor soporte que los sistemas individuales. El ser uno de los criterios con mayor peso relativo brinda una ventaja en la valoración final.

- CTD – Flexibilidad, aunque con un peso relativo menor, este criterio fue el tercer factor que influyó más a nivel técnico, para que los sistemas eólicos con microrredes obtuvieran el mayor puntaje ya que estas, por su diseño, tienen una mayor capacidad de crecimiento del sistema que las demás opciones tecnológicas. Además los sistemas conectados a una microrred ofrecen una mayor flexibilidad de consumo entre usuarios, ya que no tienen que depender de un centro de almacenamiento más pequeño de energía, como es el caso de los sistemas individuales, lo cual permite que los usuarios que demandan más energía puedan consumir la que otros no utilizan. Ver la figura 12.
- CTB – Suministro, es el cuarto criterio de mayor importancia. En él las opciones de sistemas individuales, tanto solar como eólica, obtuvieron la mejor puntuación (figura 13), esto debido a que los sistemas solares tienen una vida útil mayor (15 años sobre 10 de los eólicos) y los sistemas eólico individuales tienen una capacidad instalada significativamente mayor. Cabe mencionar que esta ventaja se ve disminuida debido a que a pesar de tener una potencia instalada menor, la diferencia entre las producciones energéticas con la de los sistemas eólicos con microrred no son proporcionales, incluso las de éstos últimos llegan a superar la eficiencia de los sistemas solares y a estar muy cerca de los eólicos individuales. Al final, la valoración de este criterio no influyó en la puntuación total.

En la imagen de criterios sociales se puede observar que los criterios que más influyeron en hacer más apropiadas las soluciones EOL-MR-DA-AB, EOL-MR-DB-AB, EOL-MR-DA-AA y EOL-MR-DB-AA fueron: CSC (Económico), CSF (Beneficios domiciliarios), CSE (usos productivos) y principalmente el CSH (Impactos sobre los recursos locales). Esto debido en parte al peso relativo preponderante de los dos primeros y a la alta valoración por parte de los agentes involucrados de los dos últimos.

El criterio CTE (repuestos y mantenimientos) a pesar de ser uno de los criterios con mayor peso relativo, en este caso resulta ser un factor que no influye en la diferenciación entre soluciones, ya que todas obtienen la misma valoración.

También podemos observar que si obtenemos la relación entre energía producida y potencia instalada, nos damos cuenta que los sistemas eólicos conectados a una microrred obtienen una razón mayor (Solución 4 y 12 en demanda alta = 6,2; solución 3 y 11 con demanda baja = 5,5) a todas las demás alternativas (razón de soluciones más cercanas, demanda alta = 6,1 y demanda baja = 3,9). Esto refuerza un punto anterior en referencia a ser la solución más eficiente, en cuanto a la relación energía producida/potencia instalada.

Las valoraciones obtenidas entre las diferentes opciones en un escenario con menor o mayor autonomía de consumo son proporcionales, esto debido a que las únicas variables donde existe una puntuación que las distingue son la inversión inicial (por el coste extra que involucra incrementar el número de baterías en el sistema de almacenamiento de energía) y el aumento en la autonomía de las baterías, ambos criterios crecen de manera proporcional en todas las opciones. Por lo que no existe necesidad de realizar la comparación entre dos escenarios con diferente grado de

autonomía, ya que tanto por las valoraciones técnicas como sociales, se concluirá que entre mayor autonomía mejor.

Al final de todo el proceso se valoraron los resultados obtenidos en este estudio con el equipo multidisciplinario y con los actores involucrados (ITDG, ESF, Green Empowerment), llegando a la conclusión de que, tanto el método de evaluación como el listado de criterios dieron la mejor puntuación a alternativas coherentes y que se ajustan a la realidad de la comunidad de la Alumbre.

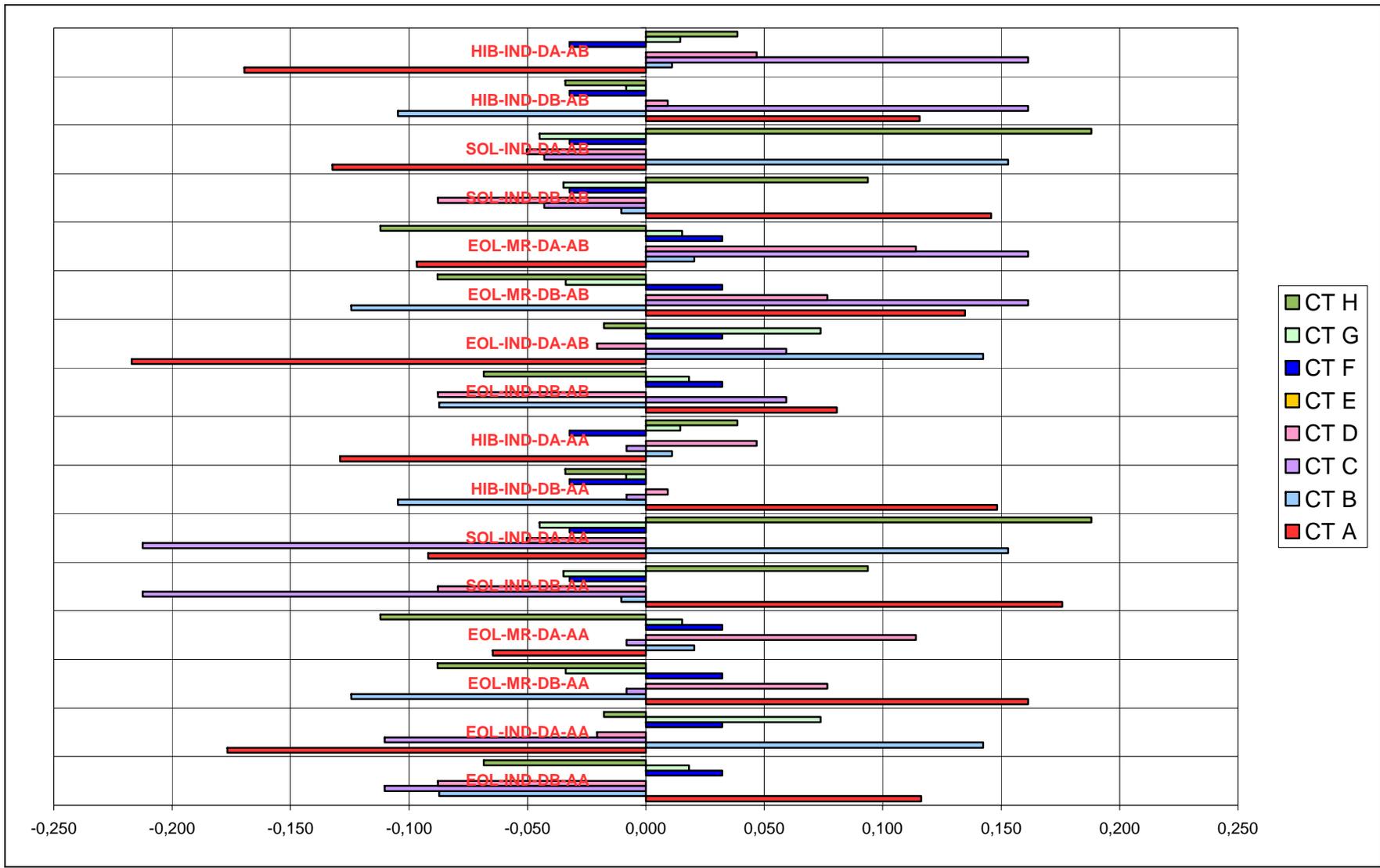


Figura 8. Puntajes parciales con criterios técnicos.

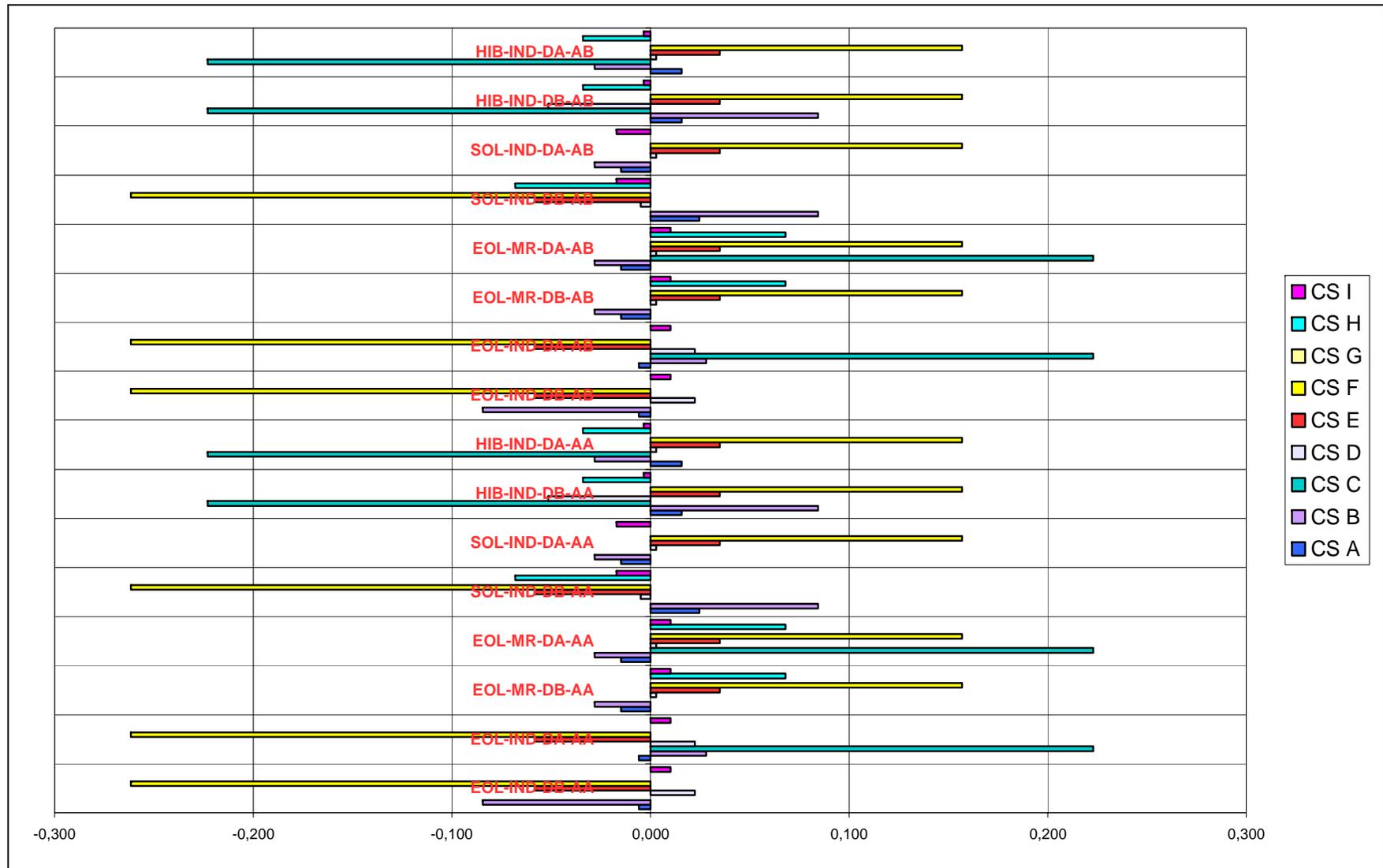


Figura 9. Puntajes parciales con criterios sociales.

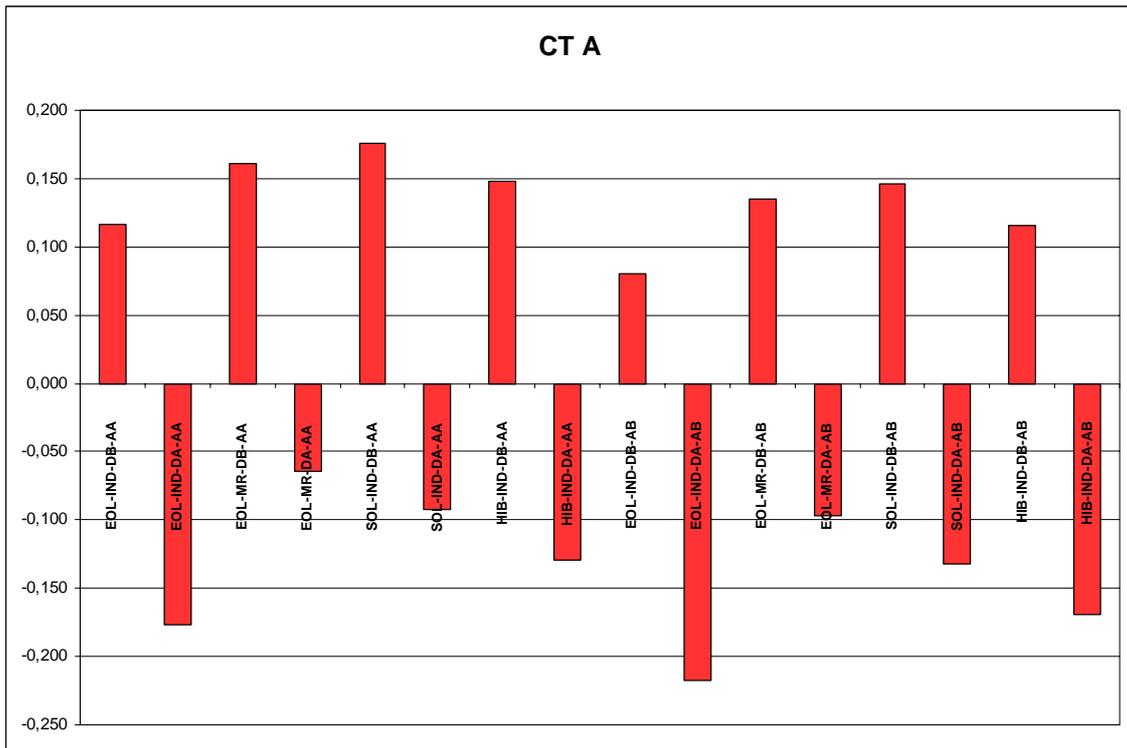


Figura 10. Puntajes del criterio CTA.

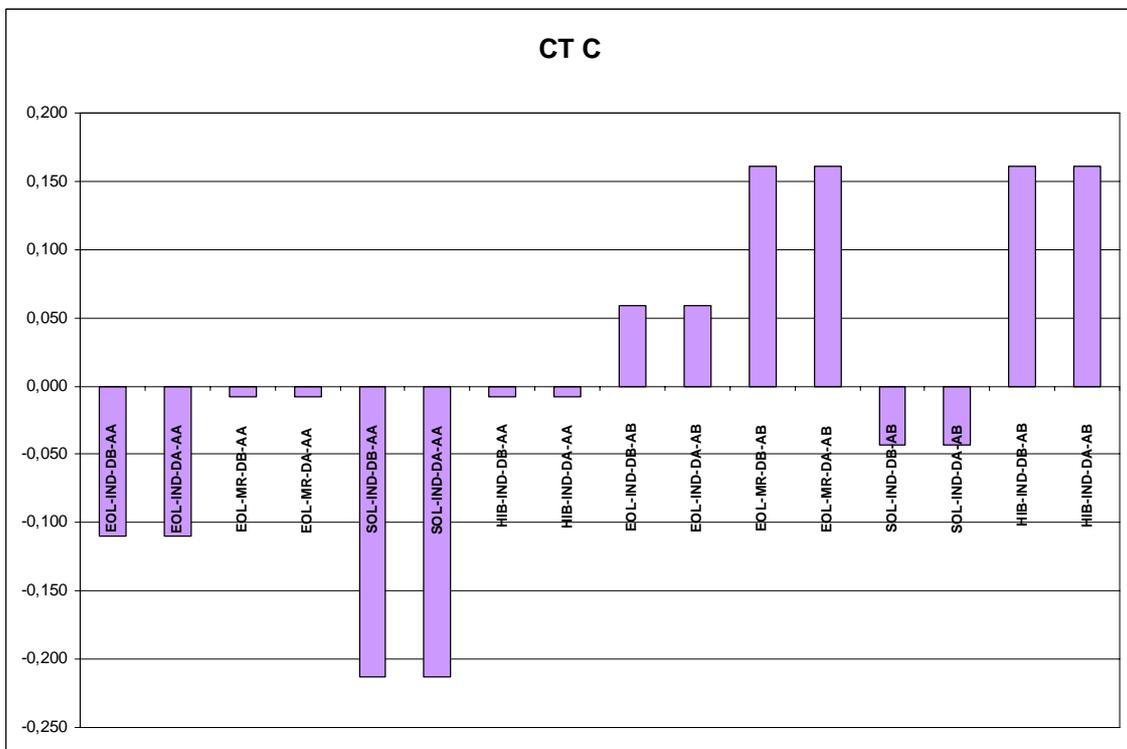


Figura 11. Puntajes del criterio CTC.

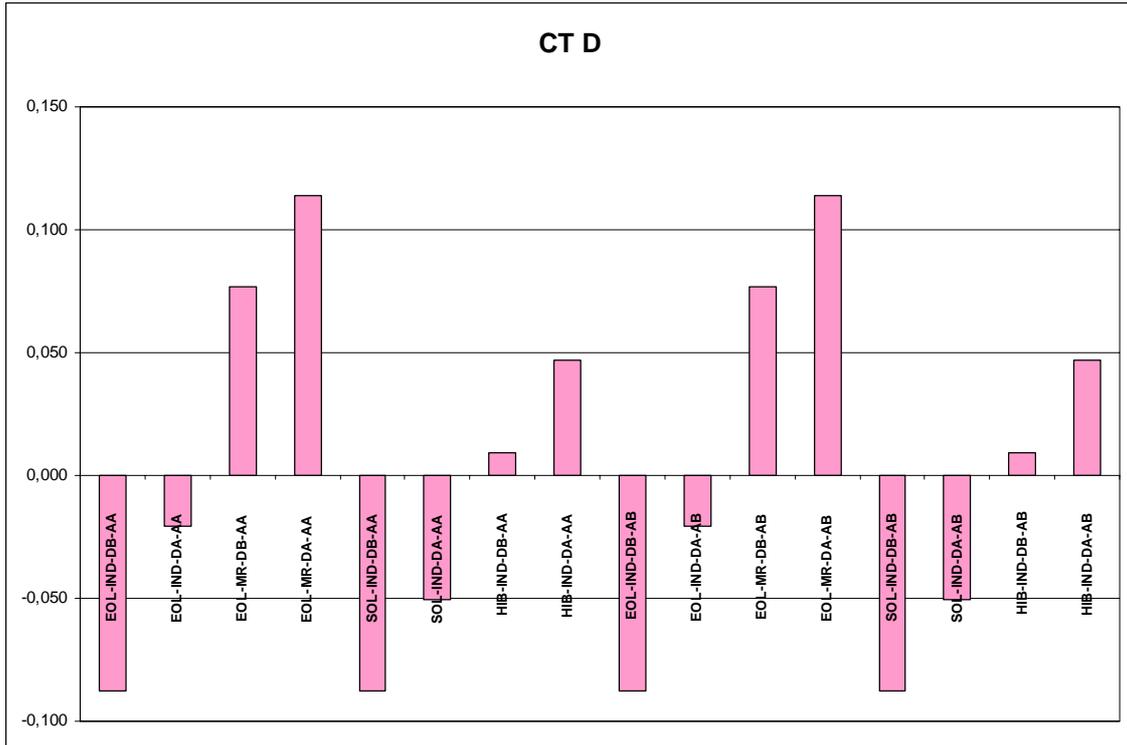


Figura 12. Puntajes del criterio CTD.

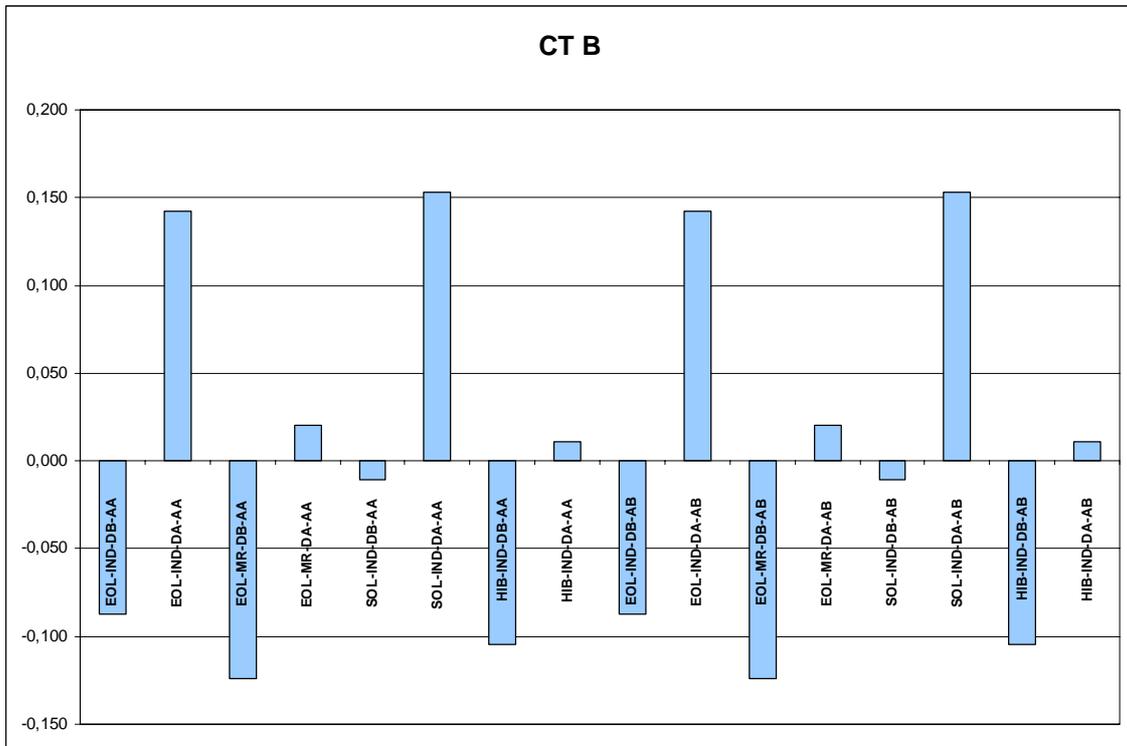


Figura 13. Puntajes del criterio CTB

6. Conclusiones

En este proyecto se han definido una serie de criterios técnicos para evaluar los diferentes tipos de sistemas autónomos de electrificación, mediante energía eólica-solar y posteriormente se ha propuesto una metodología de valoración multicriterio para comparar las diferentes alternativas de solución, permitiendo así la elección de la mejor opción. Esta propuesta se ha validado en el caso práctico aplicado en la comunidad El Alumbre. Las puntuaciones finales muestran que la mejor opción tecnológica son los sistemas eólicos conectados a una microrred. Después de la valoración y del análisis de resultados podemos llegar a las siguientes conclusiones:

- Un factor notable es la importancia de los grupos de criterios sobre la selección de alternativas. Los criterios sociales representan un factor muy importante en la definición de la mejor alternativa de electrificación en comunidades rurales de países en vías de desarrollo, por lo que el proceso participativo con que se realiza la ponderación y valoración de las alternativas juega un papel primordial de la elección final.
- Los criterios técnicos de mayor relevancia para la elección de la mejor alternativa son: CTA (Económico), CTC (Calidad), CTD (Flexibilidad) y CTB (Suministro). En cambio los criterios sociales de mayor relevancia fueron: CSC (Económico), CSF (Beneficios domiciliarios), CSE (usos productivos) y principalmente el CSH (Impactos sobre los recursos locales).
- A pesar de no ser la alternativa de menor coste de inversión inicial y de tener costes de operación y mantenimiento relativamente mayores que los sistemas solares, los sistemas eólicos conectados a una microrred producen mayor cantidad de energía. Esto los hace ser la opción más eficiente en relación coste/energía producida.
- Los sistemas híbridos y los eólicos conectados a una microrred serán mejor evaluados en cuanto a su fiabilidad, ya que los primeros tienen una ventaja al aprovechar dos fuentes de alimentación energética (el sol y el viento) y los segundos brindan un mayor soporte a los usuarios, ya que al ser colocados los aerogeneradores en un solo sitio con mejor recurso eólico que la ubicación de las casas (las personas tienden a no colocar sus viviendas en los sitios más expuestos al viento), logran concentrar mayor cantidad de energía que los sistemas individuales. Esto último junto con la flexibilidad de los sistemas eólicos en microrred les da una ventaja por encima de los sistemas híbridos.
- De acuerdo a los resultados de los criterios sociales, podemos observar que en proyectos desarrollados en comunidades como el Alumbre, la solución más apropiada está enfocada al impacto económico en las familias, a la mejora de sus condiciones de vida mediante el aumento de sus ingresos o la generación de trabajos. Sin embargo, la solución más adecuada no está orientada a la minimización de los impactos ambientales que esta genere, ya que este fue el criterio que menos importancia obtuvo, con diferencia, en la asignación de los pesos relativos.
- El método de puntuación se vuelve muy sensible debido a la valoración simplificada. Debido a que durante la normalización de la escala de valores, esta es muy pequeña y provoca que se obtengan valores medios y de desviación típica muy ajustados, ya que los valores oscilan entre 1 y 5 solamente. Esto da como resultado que no existan grados importantes de diferenciación de las variables evaluadas y que cualquier movimiento brusco en la valoración pueda significar una diferencia significativa al momento de

la suma total. Es por esto que se recomienda, en la medida de lo posible y en los criterios que lo permitan, utilizar una escala de valoración mediante el método detallado.

Se ha comprobado que el análisis multicriterio es una metodología que permite evaluar simultáneamente tanto criterios de carácter cuantitativo como cualitativo, lo cual es un aspecto crucial cuando la información no está disponible o la valoración de los datos no es exacta. Permite establecer un método y modificarlo de acuerdo a los diferentes grupos de criterios que se establezcan previamente. Además permite la participación directa tanto de los beneficiarios como de grupos de expertos multidisciplinarios, lo cual lo convierte en un proceso participativo y transparente.

El trabajo realizado en el presente proyecto facilitará la evaluación de alternativas de electrificación con energías renovables en zonas rurales, además que permite su aplicación en cualquier otro sitio con características similares a las necesidades presentadas en este caso.

El trabajo ha contado con la financiación, entre otras entidades, de la Agència Catalana de Cooperació al Desenvolupament y del Centre de Cooperació per al Desenvolupament de la UPC. Los autores agradecen muy especialmente toda la colaboración y el apoyo brindado por Soluciones Prácticas – ITDG, Ingeniería sin Fronteras-Cataluña y Green Empowerment proporcionado información y asesorando durante el desarrollo de este trabajo.

7. Referencias bibliográficas

- Afgan, N.H.; Carvalho, M.G.; Hovanov, N.V. (2000) Energy system assessment with sustainability indicators. *Energy Policy*, 28, 603-612.
- Amador, J.; Domínguez, J. (2005) Application of geographical information systems to rural electrification with renewable energy sources. *Renewable Energy*, 30, 1897-1912.
- Capó, G.M. (2009) Un modelo de ubicación de microaerogeneradores para el diseño de proyectos de electrificación rural con energía eólica y solar. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Cavallaro, F.; Ciralo, L. (2005) A multicriteria approach to evaluate wind energy plants on an Italian island. *Energy Policy*, 33, 235-244.
- Center for Energy and Processes (CEP) of the Mines Paris Tech en www.cenerg.cma.fr/~st/solargis/
- Center for Energy Efficiency and Renewable Energy (CEERE) of the University of Massachusetts Amherst, en www.ceere.org/rerl/rerl_hybridpower.html
- Cherni, J.A.; Dyer, I.; Henao, F.; Jaramillo, P.; et al. (2007) Energy supply for sustainable rural livelihoods. A multi-criteria decision-support system. *Energy Policy*, 35, 1493-1504.
- Escobar, R. (2006). Participación comunitaria y sostenibilidad de proyectos energéticos rurales. Programa de Energía y Servicios Básicos. Soluciones Practicas ITDG. www.cuademos.tpdh.org
- Garfi, M., et al. (2009) Multi-criteria decision analysis for waste management in Saharawi refugee camps. *Waste Management*, doi:10.1016/j.wasman.2009.05.019.
- Georgopoulou, E.; Lalas, D.; Papagiannakis, L. (1997) A multicriteria decision aid approach for energy planning problems: The case of renewable energy option. *European Journal of Operational Research*, 103, 38-54.
- Guardià, J.; Freixa, M.; Però, M.; Turbany, J. (2007) Análisis de datos en psicología. Madrid: Delta.
- National Renewable Energy Laboratory, NREL en www.homerenergy.com y <http://analysis.nrel.gov/vipor>
- Nijkamp, P.; Reitsveld, P.; Voogd, H. (1990). *Multicriteria Evaluation in Physical Planning*. North Holland, Amsterdam: Elsevier Science.
- Pohekar, S.D.; Ramachandran, M. (2004) Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 8, 365-381.
- RETSscreen International Clean Energy Decision Support Centre of Natural Resources Canada. www.retscreen.net
- Saaty, T.L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill, New York, USA.

Software Engineering for Electric Power S.A. en
<http://www.systemseurope.be/products/lap.en.php>

Soluciones Prácticas – ITDG. Diagnóstico Socioeconómico de el Alumbre. Programa de Energía, Infraestructura y Servicios Básicos. 2007. 5-7.

United Nations Development Program, World Energy Assessment. Energy and the Challenger of Sustainability. UNDP, 2000

United Nations Development Program, Energizing Millennium Development Goals. A Guide to Energy's Role in Reducing Poverty, 2005

Villarrubia M. (2006) Energía eólica, apuntes de la asignatura "Aprovechamiento de la energía eólica", Universidad de Barcelona.

Velo García E. (2006). Desafíos del sector de la energía como impulsor del desarrollo humano. www.cuademos.tpdh.org

Voogd, H. (1983). Multicriteria Evaluation for Urban and Regional Planning. London: Pion.

Wang J-J, et al. (2009) Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. Renew Sustain Energy Rev, doi:10.1016/j.rser.2009.06.021.

Yue, C.; Yang, G.G. (2007) Decision support system for exploiting local renewable energy sources: A case study of the Chigu area southwestern Taiwan. Energy Policy, 35, 383-394.

Màster Interuniversitari UB-UPC d'Enginyeria en Energia

Acta d'Avaluació de Projecte

Curs:
Codi UPC: **33563**

Data defensa:

Qualificació:

Alumne:

DNI:

Títol:

Director:

Director:

Ponent:

Tribunal

President:

Vocals:

Suplents:

Observacions

Signatura

Convocatòria Ordinària,	Convocatòria Extraordinària,
Cognoms, nom (President)	Cognoms, nom (President)
Cognoms, nom (Vocal)	Cognoms, nom (Vocal)
Cognoms, nom (Vocal)	Cognoms, nom (Vocal)