



UNIVERSITAT POLITÈCNICA  
DE CATALUNYA  
BARCELONATECH

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Programa de doctorado:

Administración y Dirección de Empresas

Tesis doctoral presentada para obtener el título de  
Doctor por la Universitat Politècnica de Catalunya

# Metodología para el diseño de sistemas de electrificación autónomos para comunidades rurales

Bruno Domenech Léga

Directores:

Laia Ferrer Martí  
Rafael Pastor Moreno

Departamento de Organización de Empresas

Abril 2013

*“Facilitar el acceso a la energía para todos en 2030 constituye un objetivo esencial, anunciado por el propio Secretario General de las Naciones Unidas. En la actualidad 1300 millones de personas carecen de electricidad y 2700 millones dependen aún de la biomasa para cocinar. La inversión requerida para proporcionar servicio de energía moderna a todos equivale aproximadamente al 3% de la inversión total en energía hasta 2030. Sin ella se prevé que el panorama mundial en 2030 difiera poco del actual y que empeore en el África Subsahariana.”*

*International Energy Agency, World Energy Outlook, 2011.*

*A Margarita (“Marggy”) por tus siempre buenos consejos y el apoyo en los momentos más difíciles. Y también por todas las horas que te he robado; este trabajo es tan mío como tuyo.*

*A mis padres, Carlos y Dominique, por vuestros esfuerzos para educarme y por inculcarme la cultura del estudio.*

*A mis directores de tesis, Laia Ferrer Martí y Rafael Pastor Moreno, por su rigurosidad y su método al trabajar que no sólo me han servido en esta tesis, sino que seguro serán una buena base para mi futuro.*

*A José Chiroque, Pau Lillo, Oliver Marcelo y Alberto García, porque su ayuda ha sido fundamental para esta investigación.*

*A Gilberto Villanueva, Benito Ramírez, Walter Mantilla, Rafael Escobar, Frank Medina, Javier Trigos, Axel del Águila, Gregorio Miguel Capó, Anna Garfí, Lorenzo Peronne, Milton Domínguez, Sara López y Matteo Ranaboldo, porque de una u otra forma esta investigación no habría sido posible sin su ayuda.*

*A las ONGs Soluciones Prácticas (Perú) e Ingeniería Sin Fronteras (Cataluña y Valencia, España), por toda la información y el asesoramiento brindado a lo largo de este trabajo.*

*A las ONGs Green Empowerment (EEUU), CINER (Bolivia), Mosoj Causay (Bolivia), AYNI Cooperación Solidaria para el Desarrollo (Perú).*

*Al Instituto de Organización y Control de Sistemas Industriales (IOC), al Departamento de Organización de Empresas (DOE) y al Departamento de Ingeniería Mecánica (DEM) de la Universitat Politècnica de Catalunya.*

*Este proyecto ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España, proyecto ENE2010-15509, cofinanciado por FEDER, por el Centro de Cooperación al Desarrollo de la Universitat Politècnica de Catalunya y por la Agència Catalana de Cooperació al Desenvolupament.*



# Resumen

Los sistemas de electrificación autónomos basados en el uso de energías renovables son adecuados para electrificar comunidades rurales aisladas. Para su diseño existen herramientas de apoyo a la toma de decisiones, pero no abarcan algunas consideraciones técnicas y sociales, y/o no entran en el detalle específico del proyecto. En este contexto, el objetivo de esta tesis doctoral es desarrollar una metodología para ayudar en el diseño de sistemas de electrificación autónomos basados en las energías eólica y solar, que sea adecuada a las características económicas, técnicas y sociales de comunidades rurales de países en desarrollo, y que considere la opinión de todos los actores involucrados en el proyecto.

La metodología de diseño propuesta se divide en 3 etapas principales:

- La primera etapa consiste en realizar evaluaciones iniciales (socioeconómica, energética y técnica) para recopilar la información característica de la comunidad a electrificar.
- La segunda etapa es el propio proceso de diseño en sí y se divide en 3 niveles de decisión, ordenados en función de la importancia de las decisiones a tomar. En concreto se estudia la influencia sobre el coste de modificaciones en la demanda (nivel 1), la gestión del sistema (nivel 2) y la seguridad del suministro (nivel 3). Cada nivel de decisión se estructura en 2 pasos: primero se generan diversas alternativas de electrificación con un modelo de programación lineal, incluyendo consideraciones técnicas y sociales; y segundo se selecciona la alternativa más adecuada en función de criterios económicos, técnicos y sociales, mediante la técnica multicriterio de la programación compromiso.
- La tercera etapa, opcional, permite intentar mejorar el coste de la solución obtenida, manteniendo las decisiones previamente tomadas.

Para la validación de este trabajo de investigación, dos expertos en el campo de la electrificación rural han actuado como hipotéticos usuarios de la metodología de diseño, y han realizado todo el proceso para las comunidades reales de El Alumbre y Alto Perú, ambas en Cajamarca (Perú). Se valida, de esta forma, que la metodología propuesta es adecuada para diseñar sistemas de electrificación autónomos. En concreto, permite personalizar la toma de decisiones de forma clara y estructurada, evaluando una gran cantidad de alternativas de electrificación y obteniendo unos resultados que concuerdan con las preferencias del usuario.



# Abstract

Autonomous electrification systems based on the use of renewable energies are suitable to electrify isolated rural communities. For its design there are decision-making support tools, but they do not cover some technical and social constraints and do not consider the specific detail of the project. In this context, the aim of this PhD is to develop a methodology for helping to the design of autonomous electrification systems based on wind and solar energies, which is appropriate to the economic, technical and social aspects of rural communities in developing countries, and which considers the views of all stakeholders involved in the project.

The proposed design methodology is divided into 3 principal stages:

- In the first stage characteristics from the community to electrify are gathered through some initial assessments (socio-economic, resource and technical).
- The second stage is the design process itself and is divided into 3 decision levels, ordered according to the importance of the decisions to take. Specifically the influence on the cost of modifications on the demand (level 1), the system management (level 2) and the security of supply (level 3) are studied. Each decision level is divided into 2 steps: first several electrification alternatives are generated through a linear programming model, including technical and social considerations; second the most appropriate alternative is selected based on economic, technical and social criteria, through compromise programming multicriteria technique.
- The third stage, optional, allows trying to improve the cost of the obtained solutions, maintaining previously taken decisions.

To validate this research work, two experts in the field of rural electrification have acted as hypothetical users of the design methodology, and have carried out all the process for the real communities of El Alumbre and Alto Peru, both in Cajamarca (Peru). Thus, it is validated that the proposed methodology is suitable to design autonomous electrification systems. Specifically, it allows personalizing decision-making in a clear and structured way, evaluating many electrification alternatives and obtaining results that match user's preferences up.





# Índice

<b>Resumen .....</b>	<b>v</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>vii</b>
<b>Índice .....</b>	<b>ix</b>
<b>Glosario .....</b>	<b>xiii</b>
<b>1. Introducción.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Introducción: acceso a la energía .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2. Contexto: planificación de la electrificación rural.....</b>	<b>3</b>
<b>1.3. Justificación .....</b>	<b>6</b>
<b>1.4. Validación .....</b>	<b>10</b>
<b>1.5. Contenido de la tesis .....</b>	<b>10</b>
<b>2. Descripción del problema .....</b>	<b>13</b>
<b>2.1. Definición del problema .....</b>	<b>13</b>
<b>2.2. Objetivos .....</b>	<b>14</b>
<b>3. Estado del arte .....</b>	<b>17</b>
<b>3.1. Sistemas de electrificación autónomos .....</b>	<b>17</b>
3.1.1. Tecnologías de electrificación.....	17
3.1.2. Esquema de un sistema de electrificación autónomo.....	19
3.1.3. Generación eólica.....	20
3.1.4. Generación solar.....	21
3.1.5. Acumulación y conversión.....	22
3.1.6. Distribución eléctrica .....	23
3.1.7. Análisis de comunidades ya electrificadas .....	25
3.1.7.1. Análisis de la gestión del sistema de electrificación.....	25
3.1.7.2. Análisis de la seguridad del suministro energético.....	27
<b>3.2. Diseño de sistemas de electrificación autónomos .....</b>	<b>28</b>
3.2.1. Generación de alternativas de electrificación.....	28
3.2.1.1. Combinación de fuentes de energía.....	29
3.2.1.2. Diseño de microrredes eléctricas .....	31
3.2.1.3. Diseño de sistemas de electrificación autónomos para comunidades rurales .....	32
3.2.2. Selección de alternativas de electrificación .....	33
3.2.2.1. Definición de criterios .....	34

3.2.2.2. Ponderación de criterios .....	35
3.2.2.3. Evaluación de alternativas .....	36
3.2.2.4. Agregación de resultados .....	38
3.2.2.5. Conclusión para la selección de alternativas .....	39
3.2.3. Procedimientos de diseño de sistemas de electrificación autónomos .....	40
3.2.4. Análisis de los procedimientos de diseño de sistemas de electrificación autónomos.....	42
<b>4. Metodología para el diseño de sistemas de electrificación autónomos .....</b>	<b>45</b>
<b>4.1. Estructura de la metodología de diseño .....</b>	<b>45</b>
<b>4.2. Niveles de decisión en la etapa de “Diseño del sistema”.....</b>	<b>48</b>
4.2.1. Limitaciones de considerar dos fases separadas para la generación y selección de alternativas .....	48
4.2.1.1. Generación de alternativas .....	48
4.2.1.2. Selección de alternativas .....	49
4.2.2. División de la generación y selección de alternativas.....	50
4.2.3. Nivel 1. Decisiones estratégicas. Coste vs Demanda.....	54
4.2.4. Nivel 2. Decisiones tácticas. Coste vs Gestión del sistema .....	55
4.2.5. Nivel 3. Decisiones operativas. Coste vs Seguridad del suministro .....	56
4.2.6. Cambio de nivel de decisión .....	56
4.2.6.1. Elementos a fijar del primer al segundo nivel de decisión .....	57
4.2.6.2. Elementos a fijar del segundo al tercer nivel de decisión.....	58
<b>4.3. Procesos iterativos de toma de decisiones.....</b>	<b>59</b>
4.3.1. Estudio del valor objetivo de los atributos .....	59
4.3.2. Análisis de la ponderación de criterios y subcriterios.....	61
<b>4.4. Ejemplo de aplicación de la metodología.....</b>	<b>62</b>
<b>4.5. Resumen del proceso de diseño.....</b>	<b>73</b>
<b>5. Evaluaciones iniciales.....</b>	<b>75</b>
<b>5.1. Evaluación socioeconómica .....</b>	<b>75</b>
5.1.1. Herramientas de recogida de información .....	76
5.1.2. Características de la comunidad .....	77
5.1.3. Características de la población.....	78
5.1.4. Suministro energético.....	79
<b>5.2. Evaluación energética.....</b>	<b>81</b>
5.2.1. Recurso eólico .....	81
5.2.2. Recurso solar .....	83
<b>5.3. Evaluación técnica .....</b>	<b>84</b>

<b>6. Generación de alternativas de electrificación.....</b>	<b>87</b>
<b>6.1. Consideraciones técnicas y sociales de diseño .....</b>	<b>88</b>
6.1.1. Generación eléctrica.....	88
6.1.2. Acumulación y conversión de la energía .....	89
6.1.3. Distribución eléctrica .....	90
<b>6.2. Modelización matemática y experimento preliminar .....</b>	<b>91</b>
6.2.1. Modelo con variables enteras .....	92
6.2.2. Modelo con variables binarias.....	97
6.2.3. Experimento computacional.....	98
<b>6.3. Modelo del primer nivel de decisión .....</b>	<b>101</b>
<b>6.4. Modelo del segundo nivel de decisión .....</b>	<b>102</b>
<b>6.5. Modelo del tercer nivel de decisión .....</b>	<b>105</b>
<b>6.6. Resolución del modelo matemático .....</b>	<b>108</b>
6.6.1. Modelo relajado.....	110
6.6.2. Modelo reducido .....	111
6.6.3. Modelo alternativo .....	112
6.6.4. Elementos fijados y cotas en cada nivel de decisión.....	114
6.6.4.1. Elementos fijados entre niveles de decisión .....	114
6.6.4.2. Cota superior en el modelo no reducido a partir de la solución del modelo reducido ....	115
<b>6.7. Validación del paso de generación de alternativas .....</b>	<b>116</b>
6.7.1. Datos para los experimentos computacionales.....	117
6.7.2. Experimento para evaluar el proceso de resolución heurístico .....	118
6.7.3. Experimento para cuantificar el error que se comete al resolver por niveles de decisión .....	121
<b>7. Selección de alternativas de electrificación.....</b>	<b>125</b>
<b>7.1. Definición y ponderación de criterios .....</b>	<b>126</b>
7.1.1. Experiencias previas en la definición de criterios .....	127
7.1.2. Experiencias previas en la ponderación de criterios .....	128
7.1.3. Definición de criterios.....	131
7.1.4. Ponderación de criterios .....	134
7.1.4.1. Encuesta normal .....	135
7.1.4.2. Encuesta tipo AHP .....	136
7.1.4.3. Análisis de los resultados .....	138
<b>7.2. Evaluación de alternativas y agregación de resultados .....</b>	<b>139</b>
7.2.1. Programación compromiso .....	140
7.2.2. Aplicación de la programación compromiso al problema .....	143

7.2.3. Proceso de evaluación de alternativas .....	144
7.2.3.1. Primer nivel de decisión .....	145
7.2.3.2. Segundo nivel de decisión .....	146
7.2.3.3. Tercer nivel de decisión.....	147
7.2.4. Proceso de clasificación de alternativas .....	148
<b>8. Validación de la metodología de diseño .....</b>	<b>151</b>
<b>8.1. Descripción de las comunidades .....</b>	<b>152</b>
8.1.1. El Alumbre .....	153
8.1.2. Alto Perú .....	155
<b>8.2. Experto 1. El Alumbre.....</b>	<b>157</b>
<b>8.3. Experto 1. Alto Perú .....</b>	<b>165</b>
<b>8.4. Experto 2. El Alumbre.....</b>	<b>173</b>
<b>8.5. Experto 2. Alto Perú .....</b>	<b>184</b>
<b>8.6 – Conclusiones de la validación .....</b>	<b>199</b>
<b>9. Conclusiones y extensiones futuras .....</b>	<b>203</b>
<b>9.1. Conclusiones .....</b>	<b>203</b>
<b>9.2. Extensiones futuras.....</b>	<b>205</b>
<b>9.3. Artículos y ponencias realizadas .....</b>	<b>206</b>
<b>10. Anexos.....</b>	<b>209</b>
<b>Anexo A. Datos técnicos utilizados .....</b>	<b>209</b>
Anexo A.1. Datos técnicos 1 .....	209
Anexo A.2. Datos técnicos 2.....	210
<b>Anexo B. Encuestas para la ponderación de criterios .....</b>	<b>211</b>
Anexo B.1. Encuesta normal.....	211
Anexo B.2. Encuesta tipo AHP .....	212
<b>11. Referencias .....</b>	<b>213</b>

# Glosario

**Alternativa:** Solución de electrificación que se obtiene con una combinación concreta de un valor objetivo para cada atributo en cada nivel de decisión.

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

**Criterio:** Aspecto general de las soluciones de electrificación que se analiza con la metodología de diseño de sistemas de electrificación autónomos. Hay 4 criterios: coste, demanda, gestión del sistema y seguridad del suministro.

**Decisor:** Persona o grupo de personas que utilizan la metodología de diseño de sistemas de electrificación autónomos. Son los beneficiarios directos de esta tesis doctoral. Se trata de los promotores de la electrificación rural en zonas rurales de países en desarrollo, generalmente ONGs, empresas o gobiernos regionales.

**Diseño de sistemas de electrificación autónomos:** Proceso por el que, partiendo de una comunidad sin electrificar, se diseña su sistema de electrificación detallado, es decir, qué equipos implementar y dónde, y qué sistemas de distribución utilizar. Este proceso se encuentra al final de la planificación energética.

**Etapas:** Parte de la metodología de diseño de sistemas de electrificación autónomos. Concretamente, en la metodología desarrollada existen 3 etapas: evaluaciones iniciales, diseño del sistema y mejora del resultado.

**Evaluación inicial:** Parte de la primera etapa de la metodología de diseño de sistemas de electrificación autónomos. Existen 3 evaluaciones iniciales (socioeconómica, energética y técnica), que permiten caracterizar a la comunidad a electrificar, sus habitantes y el entorno de la región.

**Fase natural:** Cada una de las divisiones que usualmente se utilizan en el proceso de diseño de sistemas de electrificación autónomos. En concreto, existen 3 fases naturales: recopilación de la información característica de la comunidad a electrificar, generación de alternativas de electrificación y selección de la alternativa más adecuada.

**Metodología de diseño de sistemas de electrificación autónomos:** Procedimiento desarrollado para el diseño de sistemas de electrificación autónomos, que incluye las 3 fases naturales del proceso y que supera las limitaciones que se han encontrado en los procedimientos de la literatura analizados.

**Nivel de decisión:** Parte de la segunda etapa de la metodología de diseño de sistemas de electrificación autónomos. Ésta se compone de 3 niveles de decisión ordenados en función de la importancia de las decisiones tomadas, en los que se estudian distintos atributos de las soluciones de electrificación.

**Paso:** Parte que compone cada nivel de decisión de la segunda etapa de la metodología de diseño de sistemas de electrificación autónomos. Existen 2 pasos en cada nivel: primero, generar diversas alternativas de electrificación; y segundo, seleccionar la más adecuada.

**Planificación energética:** Proceso mediante el que, partiendo de una región que no está electrificada al 100%, se decide qué comunidades de la región electrificar, en qué orden y de qué forma.

**Procedimientos de diseño de sistemas de electrificación autónomos:** Técnicas habitualmente utilizadas en el proceso de diseño de sistemas de electrificación autónomos. Los procedimientos encontrados en la literatura suelen centrarse en una o dos fases naturales del proceso de electrificación, y no consideran aspectos socioeconómicos específicos de las comunidades rurales de países en desarrollo.

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

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

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

- El criterio coste únicamente contiene al propio subcriterio coste.
- El criterio demanda contiene los subcriterios energía, potencia y autonomía.
- El criterio gestión del sistema contiene los subcriterios cantidad, tamaño y alcance de las microrredes, e instalación de medidores.
- El criterio seguridad del suministro contiene los subcriterios porcentaje de generación solar, cantidad de equipos de generación y energía en usuarios individuales.

**Usuario:** Habitante de las comunidades a electrificar. Es el beneficiario indirecto de este trabajo de investigación aunque, en ocasiones, puede formar parte como decisor.

**Valor objetivo del atributo:** Valor que se asigna a un atributo. La combinación de un valor objetivo para cada atributo permite generar soluciones de electrificación.

**Valor real del atributo:** Valor real de un atributo para una alternativa de electrificación. El valor real del atributo no tiene por qué coincidir con el valor objetivo. Así, por ejemplo, se puede imponer una cantidad mínima de energía (valor objetivo) pero, dada la discontinuidad en los equipos, obtener realmente una cantidad ligeramente superior (valor real).





# 1. Introducción

En este capítulo, primero se realiza una introducción a la problemática de estudio: la falta de acceso a la electricidad, sobre todo en zonas rurales de países en desarrollo. Seguidamente se sitúa el diseño de proyectos de electrificación dentro de la planificación energética, que es el proceso que se sigue cuando se desea electrificar una región. A continuación se justifica la necesidad del trabajo realizado en esta tesis: el desarrollo de una metodología para ayudar en el diseño de sistemas de electrificación autónomos para comunidades rurales, que se encuentra al final de la planificación energética. Posteriormente se presenta brevemente la validación de la tesis doctoral, lo que permite evaluar el alcance del estudio realizado. Finalmente, se presenta la estructura de este documento.

## 1.1. Introducción: acceso a la energía

El Grupo Asesor sobre Energía y Cambio Climático de las Naciones Unidas define el concepto de “acceso universal a la energía” como el acceso de todas las personas a unos servicios energéticos fiables, económicamente asequibles, sostenibles y con bajas emisiones de gases de efecto invernadero [AGECC, 2010]. En concreto, el Grupo propone que en el año 2030 cada ser humano del planeta disponga de entre 50 y 100 kWh de energía eléctrica al año.

Actualmente, 1300 millones de personas, es decir, cerca de un 20% de la población mundial carece de acceso a la energía eléctrica [IEA, 2011], realidad que afecta principalmente a zonas rurales de países en desarrollo [Kanagawa & Nakata, 2008]. En la Tabla 1.1, se pueden observar los ratios de electrificación rural y urbana en distintas regiones en desarrollo. Reflejo de la creciente preocupación internacional entorno al acceso a la energía eléctrica, las Naciones Unidas proclamaron 2012 el “Año Internacional de la Energía Sostenible para Todos”.

Tabla 1.1 – Acceso a la electricidad [adaptado de IEA, 2011]

	Población sin electricidad [millones]	Ratio de electrificación [%]	Ratio de electrificación urbana [%]	Ratio de electrificación rural [%]
África	587	41,8	68,8	25,0
Asia	675	81,0	94,0	73,2
América Latina	31	93,2	98,8	73,6
Oriente medio	21	89,0	98,5	71,8
<b>Países en desarrollo</b>	<b>1.314</b>	<b>74,7</b>	<b>90,6</b>	<b>63,2</b>
<b>Mundo</b>	<b>1.317</b>	<b>80,5</b>	<b>93,7</b>	<b>68,0</b>

A partir de este hecho, numerosas publicaciones han intentado relacionar el acceso a la energía, y específicamente la energía eléctrica, con el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM) del Programa de la Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). Se ha demostrado que si bien el acceso a la electricidad no es un objetivo en sí, es una buena herramienta que favorece que se cumplan muchos de los objetivos [DFID, 2002]. En concreto, se favorece:

- El desarrollo de actividades productivas, pudiendo acceder a nuevas herramientas para crear oportunidades empresariales novedosas.
- Un incremento de las horas de estudio, gracias a la iluminación nocturna y a la reducción del tiempo dedicado a otras actividades domésticas (por ejemplo, la recogida de leña).
- El acceso a las nuevas tecnologías con la posibilidad de instalar ordenadores en las escuelas o cargar teléfonos móviles.
- Se brindan nuevas oportunidades para la cocina o la calefacción en la vivienda, menos contaminantes y más eficientes.
- La atención nocturna en los centros de salud, el acceso a vacunas, que pueden ser refrigeradas, y el uso de otros equipos especiales.

En esta dirección, el Plan de Implementación de la Cumbre Mundial para el Desarrollo Sostenible hace hincapié en la necesidad de dedicar numerosos recursos a la electrificación rural, como mecanismo para luchar contra la pobreza [WSSD, 2002]. Por su parte, las Naciones Unidas y el Banco Mundial afirman que para alcanzar los ODM es necesario dotar de acceso a servicios energéticos modernos (potencia mecánica y electricidad) a todas las comunidades rurales [Modi *et al.*, 2005].

Con el objetivo de ilustrar esta realidad, en la Figura 1.1 se muestra el vínculo que existe entre el Índice de Desarrollo Humano (un índice que mide la salud, la educación y la riqueza de un país o un territorio), IDH, y el consumo energético (que incluye, entre otros, la electricidad).

Tal y como se puede observar, existe una relación directa entre el IDH y el consumo de energía per cápita. Así, a partir de un determinado nivel de consumo (entorno a los 3000 kg equivalentes de petróleo, kgep, por persona) no se observa una mejora significativa en el IDH. Sin embargo, para los países menos desarrollados, un pequeño incremento en el consumo energético se traduce en un gran aumento del IDH y, consecuentemente, una notable mejora en su calidad de vida.

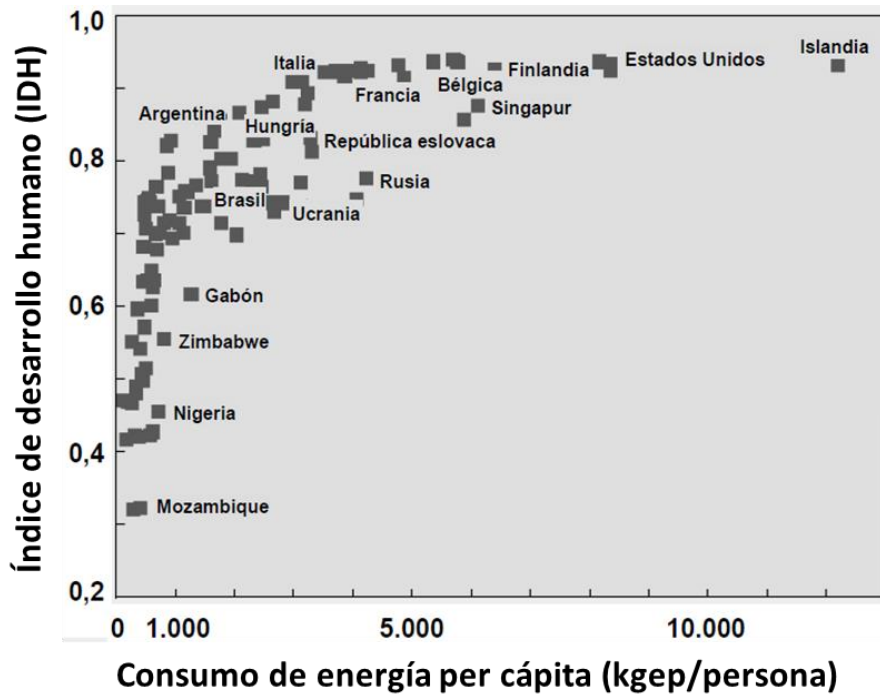


Figura 1.1 – Relación entre el Índice de Desarrollo Humano y el consumo de energía per cápita [Velo *et al.*, 2007]

## 1.2. Contexto: planificación de la electrificación rural

Las entidades promotoras de proyectos de electrificación en zonas rurales de países en desarrollo suelen ser ONGs, empresas y gobiernos regionales. Sus conocimientos en la materia no siempre son adecuados y, además, la falta de recursos impide a menudo buscar la mejor solución para cada región. Por ello se tiende a replicar soluciones estandarizadas que, difícilmente, se adaptan a las necesidades de cada zona. Distintas experiencias alrededor del mundo demuestran que proyectos no adecuados pueden ser más perjudiciales que beneficiosos [Schäfer *et al.*, 2011; Escobar *et al.*, 2012]:

- Usuarios que resultan insatisfechos con la energía suministrada al no ver cubiertas sus necesidades. En el otro extremo, sistemas sobredimensionados causan que los usuarios asuman unos costes desproporcionados para el uso que hacen de la electricidad.
- Sistemas que no consideran las características socioeconómicas de cada región pueden conducir a que usuarios con intereses enfrentados deban coordinarse entre sí. Por otra parte, algunos sistemas pueden conllevar notables diferencias en el suministro a cada usuario y, en consecuencia, en los posibles usos de la energía.

- Si la comunidad no genera los recursos económicos suficientes, no puede hacer frente a los costes de reposición y mantenimiento. Equipos como las baterías, tienen una vida útil corta y deben ser sustituidos cada cierto tiempo; equipos como los aerogeneradores, pueden no ser adecuados en las condiciones climáticas de la región y, así, averiarse con facilidad debido, por ejemplo, a la corrosión.

Como se observa, las posibles debilidades de estos sistemas pueden ser muy variadas y, como consecuencia, los usuarios quedan desencantados con los promotores de la electrificación, frustrados en sus perspectivas de desarrollo y decepcionados por tener que abandonar los beneficios de la electrificación y retornar a sistemas más tradicionales de abastecimiento energético (queroseno, velas, pilas, etc.). En estos casos, el proyecto es un fracaso y se condicionan futuros posibles proyectos, puesto que la población de la comunidad (o zonas cercanas) deja de confiar en la tecnología.

Por los motivos hasta aquí expuestos, recientemente están apareciendo entidades que promueven la electrificación rural aislada sobre la base de un mayor contacto con la población y su entorno socioeconómico. Para ello se combina en un mismo proyecto a técnicos y sociólogos, y el diseño técnico queda condicionado por los requerimientos sociales.

En la Figura 1.2 se esquematizan las fases recomendables en un proceso de planificación energética: cuando se parte de una región por electrificar y se desea promover el acceso a la electricidad en todas las comunidades de la zona. El esquema está adaptado de Ochoa [2009] y permite identificar dónde se sitúa el objetivo de esta tesis (la metodología de diseño) en todo este proceso.

Como se observa en la Figura 1.2 existen 3 bloques principales que conforman el proceso de planificación energética:

- Bloque socioeconómico. Relacionado con los actores del proceso para adecuar la electrificación a las características socioeconómicas de la región.
- Bloque técnico. Relacionado con las tecnologías disponibles, tanto por los recursos energéticos como por los equipos existentes en el mercado.
- Bloque de proyecto. Relacionado con el detalle concreto del proyecto en cuanto a las características específicas de cada comunidad.

El proceso de planificación energética tiene por objetivo proyectar la electrificación de una región. En primer lugar, se determinan las características socioeconómicas más destacables de cada comunidad (punto 1), los recursos energéticos disponibles (punto 2) y las posibles tecnologías a utilizar según la disponibilidad de los equipos en el mercado (punto 3). Con esta información se pueden concretar, en cada caso, distintas opciones tecnológicas factibles (punto 4).

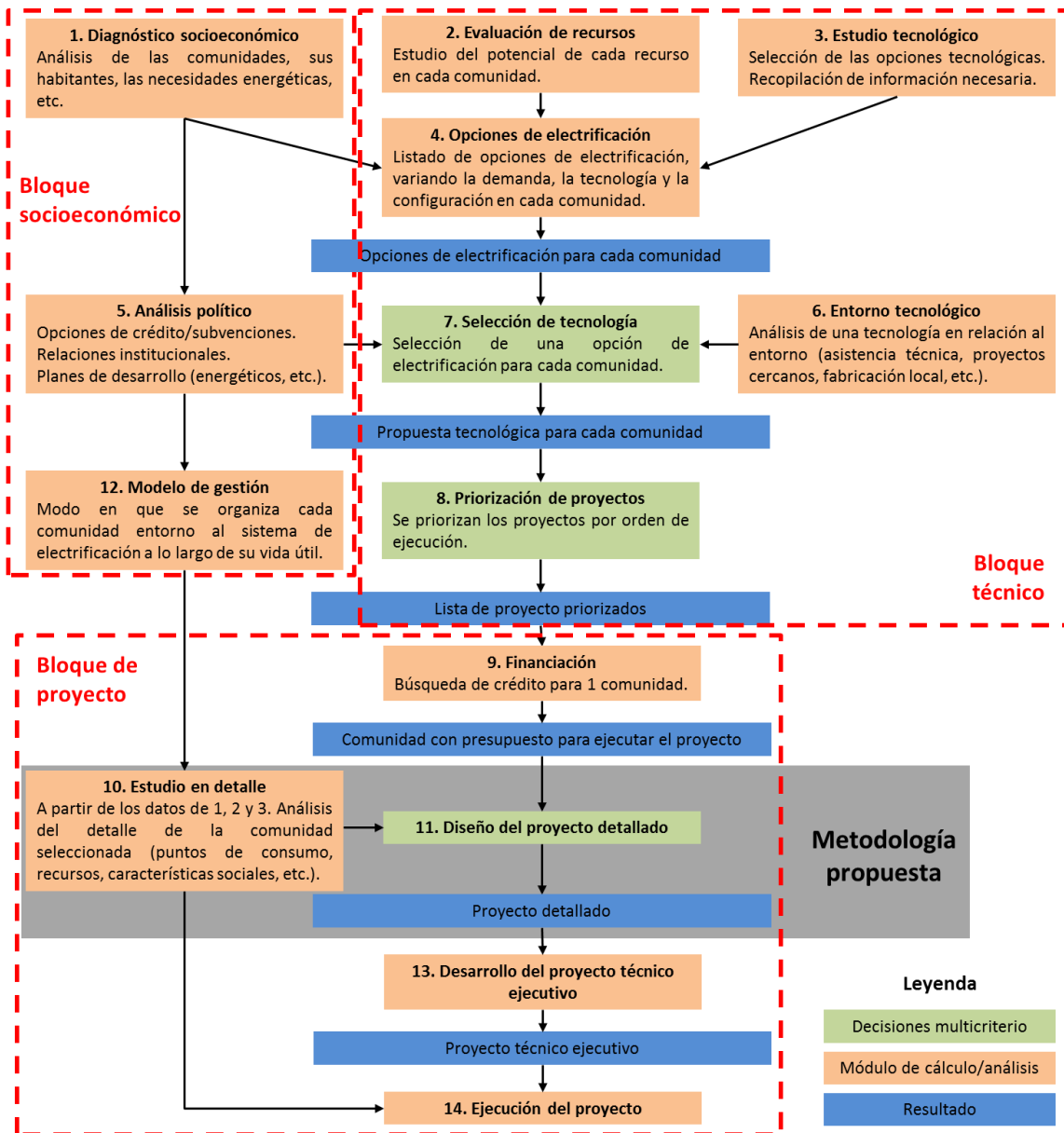


Figura 1.2 – Proceso de planificación energética [adaptado de Ochoa, 2009]

Para seleccionar la opción tecnológica más adecuada es necesario: realizar un análisis político (punto 5), para identificar las preferencias de las autoridades locales y de organizaciones representativas; y un estudio del entorno tecnológico (punto 6), para analizar la/s tecnología/s con mayor viabilidad. Dada la gran cantidad de información que se considera, esta selección (punto 7) se apoya en un proceso de toma de decisiones multicriterio, incluyendo, de esta forma, aspectos económicos, técnicos y sociales.

Posteriormente es adecuado priorizar las comunidades entre sí (punto 8). Para ello se usa un nuevo proceso de decisión multicriterio, en el que interviene toda la información recopilada hasta el momento. Los pasos posteriores de detalle del proyecto de electrificación de cada comunidad, se realizan siguiendo el orden de priorización que se obtiene en este punto.

A continuación, para desarrollar el proyecto de cada comunidad es recomendable: buscar financiación (punto 9) y estudiar el detalle socioeconómico de la comunidad a electrificar (punto 10) considerando el modelo de gestión más adecuado (punto 12). Además es importante profundizar en el estudio energético y técnico de cada caso. Se puede, así, analizar distintas alternativas de electrificación desde un punto de vista económico, técnico y social, mediante un proceso de decisión multicriterio (punto 11).

El proyecto técnico ejecutivo (punto 13) es un paso intermedio entre el diseño del proyecto detallado (punto 11) y la ejecución final del sistema de electrificación (punto 14). Se consideran características específicas de la comunidad como, por ejemplo, si un equipo se instala en un punto determinado o a unos pocos metros, cuántos sacos de arena son necesarios para el proyecto, etc.

El proceso de planificación energética aquí presentado no es, como se ha expuesto anteriormente, el que siguen muchas entidades promotoras de la electrificación rural. Frecuentemente se empieza directamente por el bloque de proyecto, puesto que únicamente se desea electrificar una comunidad concreta. Sin embargo, desde una perspectiva regional, diversas experiencias permiten afirmar que seguir el proceso presentado en la Figura 1.2 facilita el diseño de proyectos y permite adecuar en mayor medida la electrificación a los futuros usuarios [Escobar, 2009; Ochoa, 2009].

Como se ha expuesto, en el proceso de planificación energética son recomendables 3 tomas de decisión multicriterio (puntos 7, 8 y 11). En cada proceso de decisión se busca considerar simultáneamente criterios económicos, técnicos y sociales, y reflejar la opinión de todos los actores implicados. Esta tesis doctoral se centra en el tercer proceso (punto 11), es decir, el diseño de un sistema de electrificación autónomo para una comunidad rural aislada dada. Este es, posiblemente, el más complejo de los 3 procesos de decisión, puesto que involucra aspectos específicos y el detalle de la comunidad a electrificar.

### **1.3. Justificación**

Actualmente, la estrategia convencional de la mayoría de gobiernos nacionales y regionales para dar acceso a la energía eléctrica en comunidades rurales aisladas, consiste en extender la red eléctrica nacional [Velo, 2005]. Sin embargo, esta estrategia presenta importantes limitaciones cuando se trata de llegar a zonas rurales, montañosas o de difícil acceso. En estas regiones, fruto de la compleja orografía y de las grandes distancias entre núcleos de población, los costes se incrementan enormemente y los problemas técnicos se agudizan [Velo, 2005; Ferrer-Martí *et al.*, 2011]. Además, dada la dispersión de viviendas y el bajo consumo de los usuarios, la extensión del interconectado es una inversión poco rentable, y son necesarias fuertes inversiones económicas para una pequeña cantidad de usuarios beneficiados.

Como alternativa, cada vez es más común la implementación de sistemas de electrificación autónomos, basados en el uso de las energías renovables [El Bassam, 2001; Chaurey *et al.*, 2004]. El uso de estas tecnologías ayuda a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, y facilita la sostenibilidad de los proyectos, al aprovechar los recursos locales y, así, evitar dependencias externas [Akorede *et al.*, 2010]. En países en desarrollo estos sistemas son frecuentes al haber muchas regiones rurales aisladas sin electrificar [Kenfack *et al.*, 2009; Mendes *et al.*, 2011].

Existen varias opciones tecnológicas si se desea implementar sistemas de electrificación autónomos [De Juana *et al.*, 2003]. Por ejemplo, la tecnología hidráulica aprovecha el caudal y el salto de agua de un río para generar electricidad a través de una micro central hidroeléctrica. Ésta es una buena opción, barata y muy estudiada, pero inviable en ausencia de ríos cercanos. Otra tecnología extendida, en este caso no renovable, son los generadores eléctricos de combustión diésel. Aunque estos sistemas han sido muy utilizados tradicionalmente, en los últimos años su uso está disminuyendo debido a las dependencias externas que se crean. Se trata, además, de una tecnología costosa y poco sostenible, y que contribuye a generar gases de efecto invernadero [Velo *et al.*, 2007].

Entre las distintas opciones tecnológicas, este trabajo se centra en los sistemas híbridos eólico-solares. La energía solar fotovoltaica ha sido muy utilizada en las últimas décadas, sobre todo en forma de sistemas individuales [De Juana *et al.*, 2003]. Se han instalado miles de estos sistemas, tanto en países desarrollados como en desarrollo, y con finalidades domésticas y productivas [Zahedi, 2006]. Por ejemplo, un estudio del año 2000 analiza 104 proyectos fotovoltaicos en 10 países de África, Asia y América Latina [Nieuwenhout *et al.*, 2001]; por su parte, Díaz [2003] evalúa numerosos casos en Sudamérica y Huacuz [2006] hace lo propio en diferentes regiones de Méjico.

Los sistemas eólicos, menos utilizados, reciben una atención cada vez mayor [Lew, 2000]. En Mongolia Interior (China) se han instalado cerca de 130.000 sistemas mini-eólicos individuales para cubrir las necesidades energéticas de la población [Zhang *et al.*, 2001]. En Sri Lanka, se han ejecutado distintas experiencias con aerogeneradores [Dunnett *et al.*, 2001]. En Argentina, se ha hecho un esfuerzo para desarrollar proyectos eólicos en la provincia de Chubut [Seitz, 2006]. En Nicaragua, se han instalado aerogeneradores en 5 comunidades de la costa caribeña [Leary *et al.*, 2012]. Finalmente, en Perú se han implementado 3 proyectos eólicos de electrificación en 3 comunidades aisladas: Campo Alegre, El Alumbre y Alto Perú [Ferrer-Martí *et al.*, 2012].

El uso de sistemas híbridos eólico-solares es una opción tecnológica muy adecuada, puesto que ambas tecnologías se complementan, pudiendo disminuir el coste del proyecto [Zhou *et al.*, 2010; Notton *et al.*, 2011; Elma & Selamogullari, 2012]. Además de aprovechar recursos locales, con esta combinación de tecnologías se consigue un mayor equilibrio y seguridad que si sólo se utilizase una [Amador & Domínguez, 2005; Dufo-López *et al.*, 2011; Kaldellis & Zafirakis, 2012]. Este hecho está ocasionando un incremento en el uso estos sistemas híbridos [Deshmukh & Deshmukh, 2008].

Dada la dispersión entre viviendas en las comunidades rurales de países en desarrollo, la solución más frecuente en los proyectos de electrificación son los sistemas individuales: generación, acumulación y distribución independiente para cada punto de consumo (viviendas, centros de salud, escuelas o centros comunales) [Ferrer-Martí *et al.*, 2010]. Sin embargo, esta solución presenta varias limitaciones [Capó, 2009]:

- Se tiende a implementar proyectos con una única tecnología, limitando las ventajas de los sistemas híbridos.
- Puesto que los recursos energéticos no son constantes, algunos puntos de consumo pueden requerir equipos de mayor potencia y, por tanto, resultar más costosos.
- No se considera el suministro eléctrico a más de un usuario simultáneamente, lo que permitiría utilizar equipos de mayor tamaño.
- Son sistemas difícilmente adaptables a posibles incrementos del consumo.

Como alternativa, cada vez son más comunes los proyectos que combinan los sistemas individuales con la generación y distribución eléctrica mediante una o varias microrredes [Mitjà *et al.*, 2003; Alzola *et al.*, 2009]. Estas configuraciones consisten en un único punto de generación que abastece a varios puntos de consumo. Las ventajas de las microrredes son numerosas [Kirubi *et al.*, 2009]:

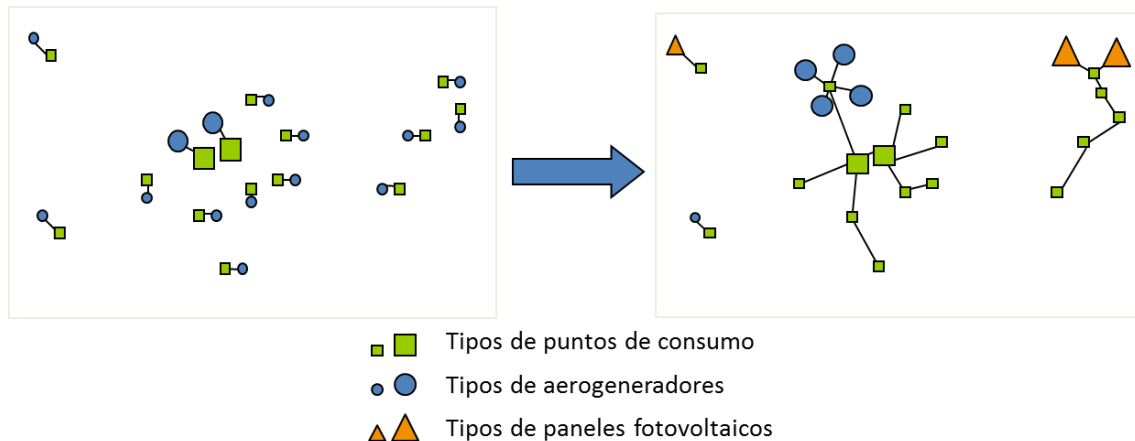
- No se condiciona el consumo de un punto al potencial energético disponible en su emplazamiento. Un punto con un bajo recurso energético, puede alimentarse con generadores instalados en otro punto de mejor potencial.
- Se favorece la igualdad en el consumo entre usuarios, puesto que varios puntos de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

El uso de microrredes ha demostrado ser beneficioso para electrificar comunidades aisladas de forma autónoma [Mendes *et al.*, 2011; Ferrer-Martí *et al.*, 2012; Yadoo & Cruickshank, 2012]. En esta dirección, la investigación está creciendo en los últimos años [Jiayi *et al.*, 2008; Chaurey & Kandpal, 2010; Kumar Basua *et al.*, 2011; Selim Ustun *et al.*, 2011].



Sin embargo, las microrredes implican un incremento en la dificultad de diseño de los sistemas: es necesario diseñar su estructura y sus conexiones, y hallar un buen compromiso entre su extensión (y la subsiguiente mejora en la calidad del servicio) y el posible aumento de coste al unir puntos de consumo [Ferrer-Martí *et al.*, 2012].

En la Figura 1.3, se compara un sistema eólico individual con otro híbrido eólico-solar que combina microrredes y puntos individuales.



**Figura 1.3 – Comparación de un sistema eólico individual con otro híbrido eólico-solar que combina microrredes y puntos individuales [adaptado de Ferrer-Martí *et al.*, 2011]**

Como se ha comentado en el apartado 1.2, el diseño de sistemas de electrificación autónomos para comunidades rurales suele ser realizado por ONGs, empresas o gobiernos locales, con una experiencia y unos conocimientos que pueden ser limitados. Para facilitar este proceso, existen unos pocos procedimientos de ayuda a la toma de decisiones que consideran las características propias de un sistema descentralizado (aquellos que se abastecen energéticamente de forma autónoma) [Hiremath *et al.*, 2007]. Sin embargo, éstos tienden a estar enfocados en la generación de un conjunto de alternativas entre las que, posteriormente, unos expertos deciden, o bien en la selección de uno entre varios escenarios predefinidos por unos expertos. Además, la mayoría de procedimientos son poco detallados, no definen el sistema concreto a implementar y no tienen en cuenta un análisis de las peculiaridades de la comunidad a electrificar y sus habitantes.

Este trabajo de investigación se centra específicamente en comunidades de zonas rurales de países en desarrollo, donde un análisis de las características socioeconómicas de cada zona es fundamental para asegurar la sostenibilidad de los proyectos. Al finalizar la tesis se espera disponer de una metodología que, dada una comunidad rural aislada, ayude a obtener la solución de electrificación más adecuada, tenga en cuenta consideraciones económicas, técnicas y sociales, y se adapte a las necesidades y preferencias de los promotores del proyecto.

## 1.4. Validación

La validación de la metodología propuesta se ha realizado con casos generados y casos reales. Para estos últimos se ha aprovechado la colaboración de dos expertos en el diseño de proyectos de electrificación rural aislada. A cada uno se le ha propuesto diseñar el sistema de electrificación de 2 comunidades reales de la sierra peruana.

Se trata de El Alumbre, constituida por 33 familias, una escuela y un centro de salud, y Alto Perú constituida por 65 familias, una escuela y un centro de salud. Ambas se encuentran en la región de Cajamarca, a una altura cercana a los 4000 m.s.n.m., y en unas condiciones climatológicas muy adversas. Su electrificación fue realizada entre los años 2007 y 2011 por las ONGs Soluciones Prácticas (Perú), en adelante SP, Ingeniería Sin Fronteras (Catalunya y Valencia, España), en adelante ISF, y Green Empowerment (EEUU), en adelante GE, con sistemas autónomos eólico-solares, y con distribución mediante microrredes y puntos individuales.

A través de este proceso de validación se puede determinar la adecuación de la metodología de diseño propuesta. Además, se puede analizar la toma de decisiones de los dos expertos, identificando si el proceso de diseño se adapta a sus necesidades y estudiando si los resultados se ajustan a sus preferencias. Complementariamente, puesto que ambas comunidades han sido electrificadas en la realidad, se pueden contrastar las soluciones reales con las obtenidas al utilizar la metodología de diseño.

## 1.5. Contenido de la tesis

A continuación se describe brevemente el contenido de cada capítulo:

- En el capítulo 2 se especifica el problema a tratar: el desarrollo de una metodología para el diseño de sistemas de electrificación autónomos para comunidades rurales. En concreto, se explica qué resultados se espera obtener mediante este trabajo de investigación y los objetivos de la tesis doctoral.
- En el capítulo 3 se presenta el estado del arte. Para ello, primero se esquematizan los sistemas de electrificación autónomos y se detallan sus componentes. A continuación, se analizan las publicaciones científicas relacionadas con esta investigación para justificar el vacío que pretende cubrir esta tesis.
- En el capítulo 4 se expone la metodología de diseño propuesta y los elementos que la componen: la estructura general y los procesos que permiten interactuar con el promotor del proyecto. Finalmente, se ilustra el proceso de diseño con un caso práctico.

- En el capítulo 5 se describen las evaluaciones iniciales necesarias para conocer las características de la comunidad a electrificar y que conforman la primera etapa a realizar en la metodología de diseño propuesta.
- En el capítulo 6 se detalla cómo generar alternativas de electrificación. Para ello se ha desarrollado un modelo matemático que optimiza el coste de la inversión inicial, teniendo en cuenta restricciones técnicas y sociales.
- En el capítulo 7 se presenta el proceso de selección de alternativas. Este proceso se divide en cuatro puntos: la selección de los criterios de evaluación, la ponderación de dichos criterios, la evaluación de alternativas según cada criterio y la clasificación/selección de la más adecuada.
- En el capítulo 8 se valida la metodología de diseño. Para ello, dos expertos diseñaron el sistema de electrificación de dos comunidades reales de la sierra andina norte de Perú, siguiendo la metodología propuesta en este trabajo de investigación.
- En el capítulo 9, se destacan las conclusiones y aportaciones de esta investigación, y se presentan posibles líneas de trabajo futuras. Por último, se enumeran las publicaciones generadas, hasta el momento, a partir de la elaboración de esta tesis.
- Finalmente, en los capítulos 10 y 11 se muestran los anexos y las referencias consultadas para la realización de este trabajo.



## 2. Descripción del problema

En este capítulo se especifica el problema a resolver: el desarrollo de una metodología de ayuda a la toma de decisiones para el diseño de sistemas de electrificación autónomos en comunidades rurales de países en desarrollo. El diseño incluye consideraciones de tipo socioeconómico para adecuar la electrificación a los futuros usuarios y asegurar una mayor sostenibilidad de los proyectos. En el primer apartado se define el problema a resolver y en el segundo se listan los objetivos de esta tesis doctoral.

### 2.1. Definición del problema

En el capítulo 1 se ha introducido que la falta de acceso a la energía eléctrica es un problema de alcance mundial, que afecta principalmente a zonas rurales de países en desarrollo. Además, se ha descrito el proceso de planificación energética que, partiendo de una región sin electrificar, persigue suministrar electricidad a todas las comunidades que la componen. En concreto, este trabajo se centra en el diseño de los sistemas de electrificación de las comunidades, el cual se encuentra al final del proceso de planificación energética.

En esta dirección, en un reciente trabajo de investigación, Rojas [2012] compara 3 opciones de electrificación para este tipo de comunidades: la extensión de la red eléctrica nacional, un sistema individual para cada vivienda o una única microrred que cubre a toda la comunidad. En efecto, hasta una cierta distancia la extensión de la red eléctrica nacional resulta la opción más barata. A partir de dicha distancia (que depende de factores diversos como la demanda eléctrica, la orografía o las condiciones climáticas) resultan más adecuados sistemas que aprovechan los recursos locales. En el caso de comunidades con gran dispersión de viviendas, los sistemas individuales domiciliarios resultan más baratos, en cambio, si las viviendas están muy concentradas, las microrredes suelen ser más adecuadas.

Esta tesis, sin embargo, se focaliza en otro tipo de zonas: comunidades alejadas de la red eléctrica nacional, pero con una dispersión media, en que para algunas viviendas resultan más baratos los sistemas individuales y para otras las microrredes. De hecho, Rojas [2012] propone, como investigación futura, la combinación de sistemas individuales y microrredes. En estos casos la complejidad de diseño se incrementa y es necesario no sólo estudiar el detalle de los equipos del sistema de generación, sino también la configuración de la distribución eléctrica y de las posibles microrredes [Ferrer-Martí *et al.*, 2012].

En paralelo, en zonas rurales de países en desarrollo resulta de especial importancia incluir en el diseño de los sistemas de electrificación aspectos socioeconómicos característicos de la población y su entorno, para asegurar la sostenibilidad de los proyectos [Escobar *et al.*, 2012]. En concreto, se ha identificado que algunos factores clave a tener en cuenta son: 1) los usos energéticos cubiertos; 2) la configuración del sistema de distribución; y 3) la tipología de los equipos de la instalación. Como se concreta en el estado del arte (capítulo 3), estos factores o bien no se tienen en cuenta en la literatura o bien su ámbito de aplicación es distinto al del objetivo de esta tesis.

El problema a resolver consiste en definir una metodología para guiar en la toma de decisiones del proceso de diseño de sistemas de electrificación rural, considerando un gran detalle de las soluciones así como aspectos económicos, técnicos y sociales específicos de la comunidad a electrificar.

Como datos de partida se dispone del resultado de 3 evaluaciones que permiten conocer: las características económicas y sociales de la comunidad a electrificar, el detalle de los recursos energéticos viento y sol en la región, y un análisis de los equipos disponibles en el mercado. Como resultado se obtiene la solución de electrificación más adecuada a las peculiaridades de la comunidad. Específicamente, se establece el tipo y la cantidad de equipos a instalar en cada punto, se determina qué puntos se electrifican individualmente, así como las microrredes y su estructura.

Para obtener las soluciones de electrificación, se minimiza el coste de la inversión inicial, puesto que el presupuesto es una limitante importante en zonas rurales de países en desarrollo. Además, se estudian diversas alternativas de diseño respecto a: los usos energéticos cubiertos, la configuración de la distribución eléctrica y la tipología de los equipos de la instalación. Todas estas características tienen una influencia relevante en las soluciones de electrificación y pueden conducir a sistemas que se adaptan en mayor o menor medida a las peculiaridades de cada comunidad.

## 2.2. Objetivos

El objetivo principal de esta tesis doctoral consiste en proponer y desarrollar una metodología de ayuda a la toma de decisiones para diseñar sistemas de electrificación autónomos para comunidades rurales, basados en la tecnología híbrida (eólica y solar), que sea adecuada a las características económicas, técnicas, y sociales de las comunidades a electrificar, y que considere las preferencias y prioridades de los actores involucrados en el proyecto (la entidad decisora o promotora de la electrificación y la propia comunidad).

Los objetivos específicos son:

- Elaborar un procedimiento de cálculo que diseñe proyectos de electrificación con energía eólica y solar, y que permita generar diferentes alternativas de electrificación adecuadas a las características y necesidades de los futuros usuarios de la electricidad.
- Proponer y desarrollar un procedimiento para seleccionar la más adecuada de entre las alternativas de electrificación generadas, desde un punto de vista económico, técnico y social, y que considere criterios cualitativos y cuantitativos, así como la participación e intervención de diferentes decisores con intereses diversos.
- Validar la metodología de diseño mediante la aplicación a casos generados aleatoriamente y mediante su uso por parte de expertos en electrificación rural de distintas ONGs y con conocimientos en diferentes realidades y contextos.

La metodología propuesta se estructura en 3 etapas. La primera consiste en recopilar la información característica de la comunidad realizando 3 evaluaciones: socioeconómica, para determinar los puntos de consumo y su demanda; energética, para estudiar los recursos energéticos disponibles y el potencial de cada punto; y técnica, para analizar el coste y las características técnicas de los equipos disponibles en el mercado.

La segunda etapa se divide en 3 niveles de decisión, ordenados según la trascendencia de las decisiones a adoptar. Cada nivel se estructura en 2 pasos. Primero se generan diversas alternativas de electrificación, minimizando el coste de la inversión inicial, y estudiando modificaciones respecto a los usos energéticos cubiertos, la configuración del sistema de distribución y la tipología de los equipos de la instalación. Segundo se clasifican las alternativas y se selecciona la más adecuada basándose en criterios económicos, técnicos y sociales. Hay que especificar que entre un nivel y el siguiente se fija parte de la solución, para que decisiones tomadas en niveles posteriores no perjudiquen decisiones previas (de mayor importancia).

Finalmente, debido a que fijar parte de la solución entre los niveles de decisión de la segunda etapa puede perjudicar el coste de la solución seleccionada, se propone una tercera etapa, opcional, que permite intentar mejorar dicho coste, manteniendo las decisiones previamente tomadas.

La metodología de diseño propuesta constituirá una herramienta adaptada a las necesidades de los promotores de la electrificación rural en países en desarrollo. Se permitirá generar numerosas alternativas de electrificación, teniendo en cuenta simultáneamente aspectos económicos, técnicos y sociales. Las decisiones se tomarán de forma estructurada, existiendo un acercamiento progresivo al problema, que se irá concretando y ajustando a medida que se profundice en el diseño. Así, se pretende mejorar los proyectos de electrificación autónoma, y asegurar una mayor sostenibilidad de los sistemas a medio y largo plazo.





## 3. Estado del arte

En este capítulo se expone el estado del arte del problema de estudio. Las publicaciones revisadas se han agrupado en dos temas generales que constituyen los dos apartados del capítulo: estudios que analizan los componentes de un sistema de electrificación autónomo y artículos que se enfocan en el diseño de dicho sistema. De esta forma, primero se introduce al lector en el detalle del problema y, a continuación, se identifica el vacío existente en la investigación respecto a su resolución.

### 3.1. Sistemas de electrificación autónomos

En este apartado, en primer lugar se presentan distintas tecnologías comúnmente usadas en la electrificación rural autónoma. A continuación se muestra un esquema general del sistema de electrificación que se acostumbra a implementar y se detalla su funcionamiento. Posteriormente, en los subapartados 3.1.3 a 3.1.6, se describen los equipos de la instalación, concretando sus características económicas y técnicas principales. Finalmente, se analizan proyectos ya implementados para identificar sus debilidades y los motivos que han ocasionado algún tipo de fallo en el sistema.

#### 3.1.1. Tecnologías de electrificación

En este subapartado se exponen las tecnologías hidráulica, diésel, solar y eólica, comúnmente usadas para sistemas de electrificación autónomos. Además, se justifica el motivo por el que esta tesis se centra exclusivamente en las tecnologías eólica y solar.

Los sistemas autónomos de electrificación rural son adecuados para proveer de energía eléctrica a comunidades rurales aisladas [De Juana *et al.*, 2003]. Hasta la fecha, las tecnologías más utilizadas alrededor del mundo para este tipo de sistemas son la hidráulica, la diésel, la solar y la eólica [De Juana *et al.*, 2003; Velo, 2005].

- Tecnología hidráulica. Ésta aprovecha el caudal y el salto de agua de un río para generar electricidad con una micro central hidroeléctrica. La energía se produce de forma continua, aunque, según la estación del año, el caudal y, por tanto, la potencia generada pueden variar. Dada la continuidad en la producción se asegura una mejor calidad del servicio y, generalmente, no son necesarios sistemas de acumulación, lo que abarata parte del proyecto. Los sistemas hidráulicos tienen una muy buena relación entre kW instalado y coste de la instalación. El problema radica en que la inversión inicial requerida suele ser mayor que con otro tipo de tecnologías, puesto que es necesaria una obra civil importante. Dadas sus numerosas ventajas, la tecnología hidráulica ha sido utilizada en numerosos proyectos de electrificación rural aislada alrededor del mundo y se dispone de un gran bagaje técnico al respecto.

- Tecnología diésel. Se trata de motores que mediante la combustión del diésel generan electricidad. Su mayor inconveniente es que no aprovecha recursos locales y, por tanto, los consumidores quedan sujetos a posibles fluctuaciones del precio del combustible. Además, en muchas ocasiones, se trata de comunidades muy alejadas, lo que encarece y dificulta el transporte del diésel. Así, aunque la inversión inicial no es muy elevada, los costes a lo largo de la vida útil del sistema son mucho más elevados que con otras tecnologías. Por último, ésta es una tecnología contaminante dada la generación de gases de efecto invernadero.
- Tecnología solar. Ésta aprovecha la radiación solar para producir electricidad. El recurso solar es variable a lo largo del día y nulo por las noches, de modo que son necesarios sistemas de acumulación que permitan almacenar la energía producida durante el día para que ésta sea consumida por las noches. La evaluación del recurso solar para el dimensionado de un proyecto de electrificación rural aislada es relativamente sencilla. Sin embargo, la tecnología solar tiene todavía una baja relación entre kW producido y coste de la instalación.
- Tecnología eólica. Ésta aprovecha el viento para producir electricidad a través de aerogeneradores. Su mayor inconveniente es la variabilidad del recurso eólico en el territorio y el tiempo, siendo necesarios sistemas de acumulación que compensen el posible desfase entre producción y consumo. Otro inconveniente es que la evaluación detallada del viento es compleja y requiere de mediciones a lo largo de, como mínimo, un año. Sólo así se pueden identificar los periodos de mayor y menor potencial, para un adecuado dimensionado de los equipos. Por otro lado, la tecnología eólica tiene una buena relación entre kW producido y coste de la instalación, sobre todo a medida que se incrementa el tamaño de los generadores utilizados. Aunque se trata de una tecnología cuyo uso va en aumento, el bagaje técnico es limitado y está aún en desarrollo.

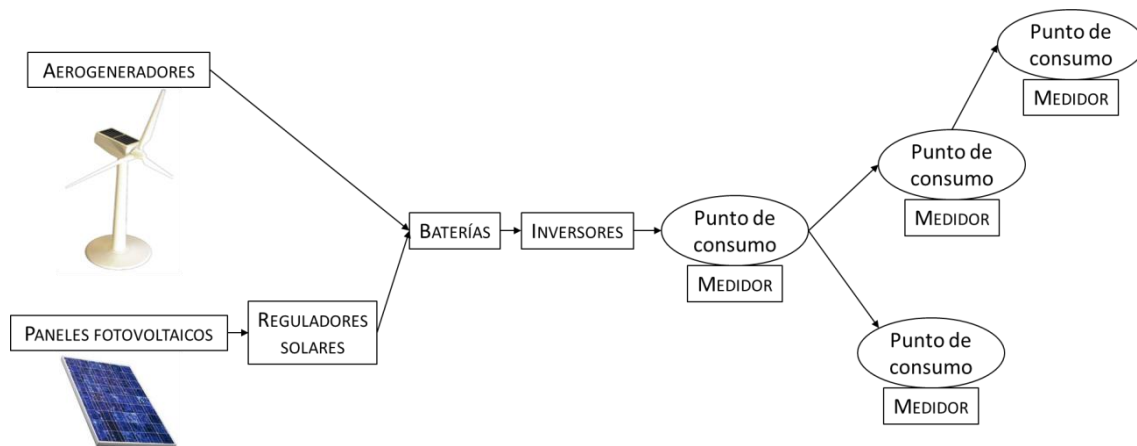
Existe también una posibilidad, cada vez más usada, que consiste en la utilización de sistemas híbridos que combinan 2 o más tecnologías [Deshmukh & Deshmukh, 2008]. Estos sistemas aprovechan las ventajas de cada una de las tecnologías, logrando así sistemas de electrificación mucho más fiables y menos sujetos a las variaciones de cada uno de los recursos energéticos: es mucho más probable que falte un único recurso frente a que falten todos los recursos energéticos implicados simultáneamente [Zhou *et al.*, 2010; Notton *et al.*, 2011; Elma & Selamogullari, 2012].

Se puede concluir que la tecnología diésel es una solución poco adecuada dada su menor sostenibilidad frente a las demás tecnologías. Por su parte, la hidráulica es una opción tecnológica económica, fiable y ampliamente estudiada, siendo muy adecuada en proyectos de electrificación rural aislada. Sin embargo, en ausencia de ríos cercanos a la comunidad a electrificar, esta opción queda descartada. En estos casos, las tecnologías eólica y solar son opciones adecuadas y son las que se consideran en esta tesis doctoral.

En concreto, se propone trabajar con sistemas híbridos eólico-solares que utilizan una proporción de cada tecnología en cada punto de generación. La fiabilidad de estos sistemas híbridos eólico-solares es mayor que si se utiliza únicamente una tecnología [Amador & Domínguez, 2005; Dufo-López *et al.*, 2011; Kaldellis & Zafirakis, 2012]: normalmente en días de poco sol el viento sopla con más fuerza y viceversa. Esto no evita que sigan siendo necesarios sistemas de acumulación que compensen las inevitables variaciones y desfases en la energía generada por el conjunto híbrido.

### 3.1.2. Esquema de un sistema de electrificación autónomo

El esquema de funcionamiento de un sistema híbrido eólico-solar autónomo, con almacenamiento en baterías y con distribución en microrredes o puntos individuales, se muestra en la Figura 3.1.



**Figura 3.1 – Esquema de un sistema de generación híbrida**

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

La energía se distribuye a los puntos de consumo (viviendas, escuelas, centros de salud o zonas comunitarias) a través de los conductores. Esta distribución se realiza de forma individual (en caso de haber un único punto conectado) o mediante una microrred (en caso de haber varios puntos conectados). Como se expone posteriormente, la configuración de las microrredes es radial, es decir, en forma de árbol. Finalmente, se instala un medidor en cada punto para controlar el consumo de energía y potencia.

En los subapartados siguientes se describen en detalle los equipos de la instalación, y sus características técnicas y económicas. Finalmente se expone la relación que existe entre los distintos componentes.

### **3.1.3. Generación eólica**

Los aerogeneradores son generadores eléctricos capaces de transformar la energía cinética del viento en energía mecánica y, posteriormente, en energía eléctrica [De Juana *et al.*, 2003]. A partir de una determinada fuerza del viento, las palas giran y con ello un eje unido a un generador de imanes permanentes. Esta rotación del eje enfrentada a una parte estática con unas bobinas, produce unos campos magnéticos que inducen la electricidad.

Las principales características de los aerogeneradores son:

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

Es interesante resaltar el hecho que los aerogeneradores suponen obstáculos para el paso del viento y, en consecuencia, se crean turbulencias a su alrededor [Ranaboldo, 2009]. Así, es importante mantener una distancia de seguridad entre aerogeneradores, para evitar que las turbulencias de un aerogenerador causen la disminución de la capacidad de generación de los demás. Por otro lado, en ocasiones, el espacio disponible en un punto para la instalación de estos equipos es limitado. A efectos prácticos, esta característica se traduce por un límite en el número de aerogeneradores que se pueden instalar en un mismo punto.

Adicionalmente, es necesaria la instalación de un regulador eólico [De Juana *et al.*, 2003]. Éste puede ser interno (incorporado en el aerogenerador) o externo, según el fabricante. Sin embargo, por diferencias entre la tensión y la frecuencia de generación, es técnicamente complejo que un mismo regulador sirva para más de un aerogenerador. Así, es preferible utilizar un regulador eólico de la potencia adecuada para cada tipo de aerogenerador, ya sea interno o externo.

Los reguladores eólicos cumplen una función doble. Por una parte protegen a las baterías de sobrecargas y descargas profundas que pueden dañar su vida útil. Por otra, rectifican la corriente alterna generada y la convierten en corriente continua, para almacenarla en las baterías.

Existen reguladores con tecnologías muy variadas. Los más simples consisten en un detector de voltaje entre bornes de la batería que, si supera un cierto límite, implica que la batería está llena y la energía sobrante se deriva a un banco de resistencias. Modelos más complejos revisan, además, que la batería no se descargue por completo, para alargar su vida útil. En todos los casos se trata de electrónica de potencia sencilla, con un rendimiento muy elevado, cercano al 100%.

### **3.1.4. Generación solar**

Los paneles fotovoltaicos son generadores eléctricos que transforman la radiación solar en energía eléctrica [Velo, 2005]. Estos dispositivos se componen de células fotovoltaicas: semiconductores que, con el debido tratamiento, son capaces de convertir la radiación incidente en energía eléctrica. Al incidir la luz solar sobre las células fotovoltaicas, los electrones tienden a agruparse sobre la cara iluminada, generando una cara positiva y una cara negativa. Al poner en contacto ambas caras mediante un conductor se crea una fuerza electromotriz que genera un potencial eléctrico para igualar las cargas; se produce así la electricidad [De Juana *et al.*, 2003].

Existen diferentes tipos de paneles. Los de tipo amorfo son muy baratos, pero su rendimiento es muy bajo, entorno al 5%. Los paneles cristalinos tienen un rendimiento que depende del tamaño del cristal de silicio utilizado; a mayor tamaño, mayor rendimiento pero también mayor coste. Los paneles monocristalinos tienen un rendimiento que puede superar el 15% pero su coste es muy elevado y no son, por tanto, adecuados para el tipo de proyectos aquí considerados. En cambio, los paneles policristalinos, con un rendimiento entorno al 10%, presentan un coste que permite su uso en zonas rurales de países en desarrollo [Velo, 2005].

Las principales características de los paneles fotovoltaicos son:

- Potencia máxima [W]. Es la potencia máxima que puede generar el panel en condiciones estándar: radiación de  $1000\text{W/m}^2$  y temperatura de  $25^\circ\text{C}$ .
- Tensión de trabajo [V]. Voltaje al que genera el panel.

Del mismo modo que en la generación eólica, es necesario complementar la instalación de paneles fotovoltaicos con reguladores solares que, en este caso, son externos [De Juana *et al.*, 2003]. Estos dispositivos controlan la sobrecarga y la descarga profunda de las baterías. Si en un momento dado el panel produce más energía de la que la batería puede absorber, el regulador disipa la energía sobrante a un banco de resistencias, y la energía se pierde en forma de calor. Cuando el panel no produce y la batería llega a un nivel mínimo de carga (la tensión en sus bornes es menor que un cierto valor), el regulador desconecta la carga y se interrumpe el suministro. Así se prolonga la vida útil de las baterías, al ser ésta muy sensible a pequeños cambios. A diferencia del caso eólico, los paneles fotovoltaicos producen en corriente continua y no es necesario transformar el tipo de corriente.

Las principales características de los reguladores solares son:

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

### **3.1.5. Acumulación y conversión**

Una vez generada la electricidad, y antes de poder distribuirla a los puntos de consumo, es necesario un sistema de acumulación y conversión [Velo, 2005].

Las baterías permiten almacenar la energía con un proceso electroquímico. Su necesidad es consecuencia del desfase entre la producción y el consumo, ambos variables durante el día. Existen varios tipos de baterías, pero las más utilizadas son las electroquímicas dado su menor coste [De Juana *et al.*, 2003]. Son dispositivos con una gran sensibilidad a alteraciones en la corriente y sus propiedades empeoran progresivamente si aumenta el porcentaje de descarga, de ahí la necesidad de reguladores.

Las baterías tienen una vida útil muy corta en relación con otros componentes, alrededor de 3 años para las más comunes [Henríquez, 2003]. Esto puede suponer un problema en la gestión del sistema de electrificación a medio y largo plazo. Además, contienen sustancias tóxicas, pudiendo llegar a ser un inconveniente en caso de que los usuarios las manejen indebidamente o bien cuando la vida útil de éstas finaliza (cuando su capacidad llega aproximadamente a un 80% de su capacidad inicial [Henríquez, 2003]) y deben sustituirse.

Las principales características de las baterías son:

- Tensión de trabajo [V]. Tensión nominal a la que funciona la batería.

- Capacidad [Ah]. El producto de la tensión de trabajo por la capacidad proporciona la cantidad de energía [Wh] que la batería puede almacenar.
- Rendimiento [%]. Cociente entre la energía que puede suministrar la batería y la energía útil que se puede almacenar.
- Factor de descarga. Cociente entre la energía que puede suministrar la batería y la capacidad total que se puede almacenar. Este parámetro es considerado ya que la descarga profunda de las baterías daña el dispositivo, que pierde sus propiedades.

Una vez almacenada la electricidad, y antes de distribuirla a los consumidores, es necesario que los inversores u onduladores transformen la corriente continua, con que se almacena la energía en las baterías, en corriente alterna, para la que están pensados la mayoría de aparatos eléctricos [De Juana *et al.*, 2003]. En caso de decidir suministrar la energía en corriente continua, estos dispositivos no son necesarios, pero se limita la variedad de aparatos eléctricos que se pueden conectar.

La principal característica de un inversor es la calidad de la señal de salida, que cuanto más se asemeja a una onda sinusoidal más variedad de equipos eléctricos permite conectar, pero mayor es su coste. Otros parámetros característicos de un inversor son:

- Potencia de trabajo [W]. Potencia óptima a la que el inversor minimiza sus pérdidas (este parámetro está relacionado con el rendimiento).
- Rendimiento [%]. En caso de trabajar a potencia de trabajo, este parámetro suele ser elevado (en torno al 85-90% [Henríquez, 2003]). En cambio, en caso de alejarse de dicha potencia, el rendimiento disminuye drásticamente.

### 3.1.6. Distribución eléctrica

Los cables o conductores eléctricos configuran las microrredes y son los encargados de llevar la electricidad desde los puntos de generación hasta los puntos de consumo [Henríquez, 2003]. Están hechos de materiales con buena conductividad, como el cobre o el aluminio. Al implementar un proyecto generalmente se opta por uno u otro según los requerimientos eléctricos (capacidad para transportar la electricidad), mecánicos (resistencia al desgaste y maleabilidad), el uso que se le desea dar o el coste. Los parámetros característicos de estos dispositivos son:

- Sección [ $\text{mm}^2$ ]. Área transversal del conductor.
- Resistividad [ $\Omega/\text{m}$ ]. Oposición al paso de la corriente eléctrica. Al pasar la electricidad a través de un conductor, se producen unas pérdidas de energía en forma de calor (efecto Joule), lo que genera una caída de tensión, expresada a través de la ecuación 3.1 [CEDECAP, 2006].

$$V_i - V_j = \frac{\rho \cdot L_{ij} \cdot I \cdot \cos \varphi}{S} \quad (3.1)$$

donde  $V_i$  y  $V_j$  son las tensiones [V] en los puntos  $i$  y  $j$ ,  $\rho$  es la resistividad [ $\text{W} \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ] del cable,  $L_{ij}$  es la longitud [m] del cable entre los puntos  $i$  y  $j$ ,  $S$  es la sección [ $\text{mm}^2$ ] del cable y  $\cos \varphi$  es el factor de potencia [CEDECAP, 2006].

El factor de potencia es el cociente entre la potencia activa y la aparente o, en otras palabras, la cantidad de energía convertida en trabajo. Su valor oscila entre 0 (la energía no se convierte en trabajo) y 1 (toda la energía se convierte en trabajo), y disminuye cuanto mayor es la cantidad de cargas reactivas conectadas (motores o transformadores que requieren de campos magnéticos para su funcionamiento).

Para distribuir la electricidad existen varias configuraciones posibles. Una forma habitual son los sistemas individuales, pero cada vez es más común la implementación de microrredes, que pueden ser de 2 tipos [CEDECAP, 2006]:

- En anillo o bucle cerrado (Figura 3.2). Es una microrred en la que existen varios puntos de generación interconectados y, por tanto, es muy segura puesto que queda asegurado el suministro aún en caso de averías en algunos de los generadores. Sin embargo, su coste es muy elevado [Ter-Gazarian & Kagan, 1992].
- Radial o en antena (Figura 3.2). Es una microrred en la que existe un único punto de generación del que parten los conductores en forma de árbol. Cada punto sólo tiene un conductor de entrada y uno o varios de salida, y no se pueden formar uniones entre ramas del árbol. La seguridad de esta configuración es relativamente baja, puesto que si hay un corte en una rama se interrumpe el paso eléctrico para todos los puntos que dependen de ella. En cambio, su coste y su complejidad técnica son relativamente más bajos, siendo más adecuado para proyectos de electrificación para comunidades rurales aisladas de países en desarrollo [Lambert & Hittle, 2000].

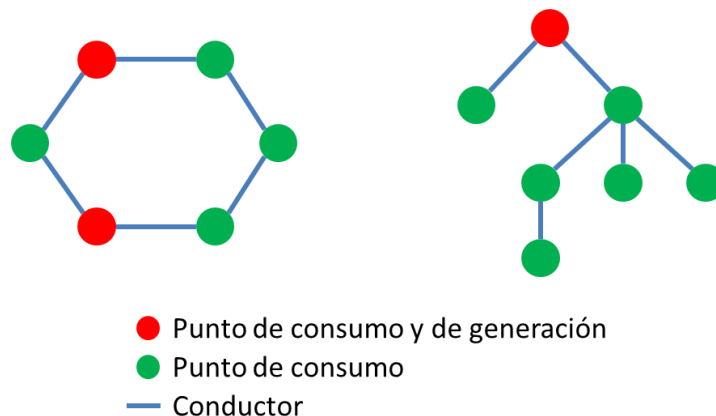


Figura 3.2 – Microrred en anillo o bucle cerrado (izquierda), y radial o en antena (derecha)

Decidida la configuración a utilizar (radial), se deben especificar otros parámetros que influyen en la distribución eléctrica.



Por una parte está la tensión de distribución. Se tiende a utilizar la media tensión para distancias elevadas, mientras que la baja tensión se utiliza para distancias reducidas. El límite entre una y otra tensión no es fijo, sino que depende de las características de cada región (la orografía, las condiciones climáticas, etc.) así como de los técnicos encargados de la instalación [CEDECAP, 2006].

Por otra parte, la distribución puede realizarse en monofásica o en trifásica. El uso de uno u otro tipo depende de los dispositivos que se prevé conectar. Comúnmente, en caso de que se prevea la conexión de equipos como motores eléctricos, es preferible distribuir en trifásica. En casos donde no se utilicen dichos equipos, el uso de monofásica permite reducir el coste y la complejidad técnica [CEDECAP, 2006].

Complementariamente, es frecuente la instalación de un medidor en cada punto de consumo [De Juana *et al.*, 2003]. Estos dispositivos cumplen una doble función: medir la energía consumida por cada punto de consumo y, en algunos casos, limitar esta cantidad. En el caso de puntos individuales estos dispositivos son recomendables porque la energía disponible es limitada y es conveniente administrarla. En el caso de puntos en microrred la energía también es limitada y, por tanto, es necesario evitar que alguien consuma más energía de la que le toca, dejando a los demás con menor cantidad. Además, el medidor permite comparar el consumo entre puntos y, así, establecer una tarifa de pago acorde al consumo (véase el apartado 3.2).

### **3.1.7. Análisis de comunidades ya electrificadas**

A partir del análisis de distintas comunidades rurales electrificadas, el autor de esta tesis ha identificado que la gestión de los sistemas de electrificación y la seguridad del suministro energético, son elementos clave para asegurar que los proyectos se adecuen a las características socioeconómicas de la población. A continuación se exponen varios problemas analizados y se extraen recomendaciones para futuros diseños de sistemas de electrificación.

#### **3.1.7.1. Análisis de la gestión del sistema de electrificación**

El modelo de gestión de un sistema de electrificación es el modo en que se organiza la comunidad a lo largo de toda la vida útil del proyecto.

La entidad promotora suele encargarse de gestionar la instalación y, en el mejor de los casos, de la gestión de los 2 o 3 primeros años. Sin embargo, finalizado ese periodo, es la propia comunidad quién asume el control y se encarga del mantenimiento y la reposición de los equipos. Éste es un hecho clave, puesto que en caso de fallar el modelo de gestión puede no asegurarse un buen funcionamiento del sistema y, en consecuencia, el proyecto puede fracasar a los pocos años [Anderson & Doig, 2000; Gupta, 2003; Schäfer *et al.*, 2011].

Una forma comúnmente utilizada para asegurar un modelo de gestión adecuado, consiste en dar un enfoque de servicio empresarial, ya sea con empresas privadas o tipo cooperativo [Ramírez & Mantilla, 2009]. De esta forma se crea una microempresa encargada de brindar el servicio eléctrico, y los habitantes se convierten en los clientes de dicha empresa. La microempresa consta de personal administrativo, encargado de asegurar el cumplimiento de las obligaciones de los usuarios (pago de la tarifa mensual), y personal técnico, encargado de la operación y el mantenimiento de los sistemas. La propiedad de los equipos puede pertenecer al gobierno local o se puede establecer una copropiedad entre usuarios y gobierno local [Ferrer-Martí *et al.*, 2011; Escobar *et al.*, 2012]. De esta forma, no existe una transferencia directa entre ONG y habitantes, sino que la ONG impulsa el proyecto, dentro de los planes de desarrollo del gobierno.

Para lograr que el modelo de gestión funcione adecuadamente, es necesario un proceso paralelo de formación [Anderson & Doig, 2000]. Escobar *et al.* [2012] proponen una división del proceso en 4 partes:

- Introducción al modelo. Explicación del modelo de gestión, de su funcionamiento, de los actores principales, y de las responsabilidades y los derechos de cada usuario.
- Introducción al sistema. Explicación del sistema de electrificación, de sus beneficios y limitaciones, así como de un mantenimiento domiciliar básico.
- Selección de operadores-administradores. Identificación, selección y formación de los operadores y administradores.
- Elaboración de la tarifa. Establecimiento de la cantidad periódica que deben pagar los usuarios por la electricidad y que el administrador se encargará de cobrar.

Distintos proyectos han permitido identificar que la tarifa de pago es una característica fundamental para lograr un funcionamiento adecuado del modelo de gestión [Gupta, 2003]. Esta cuantía se suele establecer sobre la base de lo que pagaban los beneficiarios en concepto de suministro energético (velas, pilas, etc.), previo a la electrificación. Además, se considera el coste de repuesto de los equipos, su mantenimiento (grasa, pintura, etc.) y el salario de los operadores y los administradores [CEDECAP, 2012].

En los proyectos estudiados se tiende a instalar medidores en todos los puntos de microrred, de forma que se controla el consumo de cada usuario y se adecua la tarifa al consumo real. Generalmente se establece una tarifa de costos crecientes (cuanto más se consume, más se paga proporcionalmente), debido a que la energía suele ser limitada, frenando los abusos de consumo de un usuario que podrían dejar sin electricidad a los demás. En cambio, en los puntos individuales habitualmente no se instalan medidores para ahorrar costes y porque la cantidad de energía a consumir queda limitada por los equipos instalados en el propio punto. En estos casos, la tarifa es única para cualquiera de ellos.

Se ha observado, sin embargo, que con esta situación puede suceder que usuarios con distintos consumos paguen una misma tarifa, o usuarios con el mismo consumo paguen tarifas muy diferentes. De esta forma, se pueden generar desigualdades o envidias que podrían conducir a conflictos en el seno de la comunidad. Por tanto es recomendable que todos los usuarios dispongan de medidores para concretar una tarifa de acuerdo al consumo real y, con ello, facilitar la gestión del sistema.

También cabe comentar que las microrredes ofrecen numerosas ventajas de tipo social frente a los sistemas individuales. Por ejemplo, ofrecen mayor equidad en el consumo entre usuarios, favorecen la extensión del alcance energético y permiten incrementos puntuales del consumo. En consecuencia, es aconsejable favorecer la electrificación en microrred con objeto de mejorar el entorno social de la comunidad.

Sin embargo, al favorecer la electrificación en microrred se debe actuar con cautela. Por una parte, una excesiva extensión de las microrredes puede encarecer el proyecto y provocar ciertos problemas técnicos. Por otra, implementar demasiadas microrredes de tamaños muy variados en una misma comunidad y, más aún si se combinan con puntos individuales, puede hacer que el sistema sea demasiado difícil de gestionar. Por tanto es recomendable evitar proyectos con muchas microrredes pequeñas.

### **3.1.7.2. Análisis de la seguridad del suministro energético**

La continuidad del suministro energético es fundamental cuando se desea conseguir instalaciones eléctricas fiables y de calidad. Se trata de un factor vital para lograr que los beneficiarios de un proyecto estén satisfechos con el mismo, lo integren en su cotidianeidad y se garantice la sostenibilidad del proyecto.

El presente trabajo sólo considera las tecnologías eólica y solar, cuyos recursos energéticos (sol y viento) son variables en el tiempo. Aunque existen las baterías como dispositivos de acumulación energética para abastecer en los períodos sin generación, si el período se extiende más de lo previsto puede interrumpirse el suministro. Sin embargo, según la región donde se diseñe la instalación, un recurso tendrá menor variabilidad que el otro. En general, el recurso solar es más uniforme en el tiempo y en el territorio que el recurso eólico. Por tanto, es interesante que los puntos se alimenten con sistemas híbridos y, en particular, que no se sustenten sólo en generadores eólicos.

Por otra parte, los medios de que se dispone en muchas comunidades rurales no son suficientes para poder reparar un equipo averiado. A pesar de que en todos los proyectos se forma a una persona que se encarga del mantenimiento de los equipos, las herramientas y la tecnología son escasas para realizar ciertas operaciones in situ. Además, las comunidades suelen quedar muy alejadas de las ciudades, ralentizando enormemente las reparaciones. En consecuencia, es interesante favorecer que un punto de consumo se abastezca de más de un equipo de generación, para que si uno falla al menos exista otro que suministre electricidad. Eso sí, en caso de avería la cantidad de energía producida se verá inevitablemente reducida.

Finalmente, como se ha comentado, las microrredes permiten cierta flexibilidad en el consumo. Así, por ejemplo, un usuario puede incrementar su consumo más de lo previsto (siempre y cuando el sistema lo permita) con fines productivos, para el desarrollo de alguna otra actividad o simplemente con motivo de algún día especial. En cambio, los sistemas individuales quedan sujetos a la producción de sus propios equipos, diseñados para una determinada demanda. Esta diferencia puede ocasionar desigualdades en cuanto a las oportunidades de desarrollo entre unos y otros usuarios. De esta forma, parece recomendable estudiar un incremento de energía adicional en usuarios individuales, que permita compensar sus desventajas frente a los usuarios conectados a alguna microrred.

## **3.2. Diseño de sistemas de electrificación autónomos**

Este apartado se divide en 4 subapartados. En primer lugar se analizan publicaciones relacionadas con la generación de alternativas de electrificación. De este modo se identifica la falta de una metodología para el diseño de sistemas de electrificación autónomos, que considere el detalle de las soluciones, y aspectos técnicos y sociales. En segundo lugar se examinan trabajos centrados en la selección de alternativas de electrificación. Con ello, se observa la necesidad de desarrollar modelos para la evaluación de alternativas de electrificación desde un enfoque multicriterio y considerando detalles del diseño y de la distribución eléctrica. En tercer lugar se estudian herramientas que integran las fases de generación y selección de alternativas, para el diseño de proyectos de electrificación a escala rural, y se confirma que ninguna de ellas cubre los vacíos identificados en los subapartados previos. Finalmente se exponen las conclusiones más relevantes para el desarrollo de la tesis doctoral.

### **3.2.1. Generación de alternativas de electrificación**

Alarcón-Rodríguez *et al.* [2010] alertan sobre el riesgo de simplificar excesivamente el problema, para asegurar encontrar una solución, cuando se trabaja en la planificación energética a escala local y, concretamente, en el diseño de sistemas de electrificación autónomos. Si el modelo energético es muy simplificado y el proceso de resolución muy detallado, se obtendrá “una solución real a un no-problema”. Si, en cambio, el modelo energético entra en un gran detalle y la resolución es poco ajustada, se obtendrá “una no-solución a un problema real”. Por este motivo, los autores aconsejan buscar “un buen compromiso entre la fiabilidad del modelo respecto a la realidad y la calidad del proceso de resolución”. En concreto, es recomendable avanzar en el desarrollo de modelos detallados y de técnicas de resolución exactas para resolver estos modelos.

En este sentido, Jebaraj & Iniyar [2006] afirman que los modelos energéticos son un buen soporte para tomar decisiones cercanas a la realidad, pero que aún es necesario trabajar en aspectos como la intermitencia del suministro, el emplazamiento de los equipos, la inversión y la aceptación social [Alvial-Palavicino *et al.*, 2011]. Además, es recomendable que los modelos incluyan una evaluación de la demanda y la generación, así como un estudio de los impactos sociales a nivel local, analizando una combinación óptima de tecnologías en un horizonte a corto y medio plazo [Hiremath *et al.*, 2007].

En paralelo, el desarrollo de algoritmos exactos para resolver diversos tipos de problemas es actualmente un área de investigación dinámica con mejoras en los tiempos de resolución [Fomin & Kratsch, 2010]. En concreto, Atamtürk & Savelsbergh [2005] afirman que (p. 69): “Integer programming is rapidly gaining acceptance as a powerful computational tool that can provide optimal or near-optimal solutions to real-life strategic and operational planning problems”. Como destaca Baños *et al.* [2011], en una reciente revisión sobre métodos de optimización aplicados a sistemas con energías renovables (p. 1754): “Nowadays, researchers can solve real-life problems that in the past were thought to be unsolvable thanks to new technological developments in algorithms and computer hardware”. En concreto, recientemente se han desarrollado modelos matemáticos de programación lineal para diseñar sistemas de electrificación [Casisi *et al.*, 2009; Ren & Gao, 2010; Gupta *et al.*, 2011; Quiggin *et al.*, 2012].

Este subapartado se centra en el diseño de sistemas de electrificación autónomos. Primero se listan los trabajos revisados que analizan una combinación de fuentes de energía. Segundo se detallan los estudios asociados al diseño de microrredes desde el punto de vista de especialistas eléctricos. Tercero se exponen publicaciones específicas para el diseño de sistemas de electrificación autónomos para comunidades rurales.

### **3.2.1.1. Combinación de fuentes de energía**

El primer paso de la descripción de la literatura se enfoca en publicaciones sobre el diseño de sistemas de electrificación autónomos para comunidades rurales. Actualmente, esta investigación se enfoca en el análisis de una combinación de fuentes de energía para cubrir la demanda, pero no entra en el detalle del sistema de distribución [Zhou *et al.*, 2010; Baños *et al.*, 2011; Mendes *et al.*, 2011; Bhattacharyya, 2012; Erdinc & Uzunoglu, 2012; Luna-Rubio *et al.*, 2012]. Generalmente se estudian los recursos energéticos y la demanda, pero la profundidad y el detalle de dicho estudio depende de cada publicación. Algunos trabajos interesantes se describen a continuación.

Ashok [2007] desarrolla un algoritmo iterativo para diseñar el sistema de electrificación de una comunidad rural de la India, incluyendo las tecnologías eólica, solar e hidráulica. Para ello se examinan todas las posibles combinaciones de tecnologías, minimizando el coste, y usando la tecnología diésel y la acumulación con baterías como soporte para asegurar la continuidad del suministro energético. También se estudia el funcionamiento del sistema para minimizar el uso de los equipos diésel, satisfaciendo la demanda.

Bala & Siddique [2009] analizan, mediante un algoritmo genético, el equilibrio entre el mínimo coste y el mínimo uso de generadores diésel, para un sistema fotovoltaico con baterías como soporte e inversores. En concreto, se considera la misma demanda para todos los puntos, se analiza el consumo a lo largo del año y se tienen en cuenta varios tipos de equipos de la instalación. El diseño se aplica a una isla de Bangladesh, y se obtiene el diseño óptimo del sistema y su estrategia de control, es decir, cuándo utilizar cada equipo y por cuánto tiempo.

Cai *et al.* [2009] presentan un modelo de optimización para planificar el aumento de la capacidad energética y el emplazamiento de los puntos de generación a lo largo del tiempo, con energías renovables y fósiles. El modelo considera unos niveles de incertidumbre asociados a escenarios de viabilidad de las energías eólica y solar en el futuro. Así, se generan distintas alternativas en función de las condiciones del entorno. El modelo, además, permite estudiar la opción que mejor combina el mínimo coste con la máxima seguridad del sistema para cubrir la demanda.

Ekren & Ekren [2009] desarrollan un modelo de simulación que optimiza el diseño de un sistema híbrido eólico-solar con almacenamiento en baterías, para cubrir la demanda de un campus universitario en Turquía. Se incluye un análisis detallado de los recursos energéticos viento y sol, así como de dos tipos distintos de demandas horarias; y se usa la tecnología diésel como soporte para asegurar la robustez del conjunto.

HOMER [Akella *et al.*, 2007], desarrollado por NREL (National Renewable Energy Laboratory) es, posiblemente, la herramienta de apoyo a la toma de decisiones más utilizada para diseñar sistemas de electrificación autónomos [Giatrakos *et al.*, 2009; Kenfack *et al.*, 2009; Kumar Lal *et al.*, 2011; Bekele & Tadesse, 2012; Dorji *et al.*, 2012]. HOMER permite considerar el detalle de la demanda y de los recursos para numerosas tecnologías (eólica, solar, hidráulica, diésel, etc.). También incluye el detalle del sistema de generación y acumulación, pudiendo decantarse entre varios tipos de equipos. Con estos datos compara el coste de todas las tecnologías posibles, para cubrir la demanda horaria a lo largo de un día. El programa informático analiza otros aspectos técnicos como la producción eléctrica anual, el exceso de energía, el porcentaje de demanda cubierto con renovables, etc. Existen otras herramientas similares a HOMER, como por ejemplo HOGA, que se describen en el apartado 3.2.3.

Como se puede observar, las publicaciones revisadas tienen en cuenta, generalmente, un estudio detallado de la demanda eléctrica (por horas) y una evaluación de los recursos energéticos en profundidad. Con estos datos se diseñan los sistemas de electrificación y la estrategia de control, minimizando el coste a lo largo de la vida útil del proyecto pero asegurando cubrir la demanda, y minimizando el uso de energías no renovables. Sin embargo, otros aspectos relevantes para el problema estudiado en esta tesis doctoral, como la configuración de la distribución eléctrica, no son calculados ni proporcionados.

En la Tabla 3.1 se resumen las características más destacables de las publicaciones revisadas en relación con la combinación de fuentes de energía.

Tabla 3.1 – Características de las publicaciones revisadas que combinan fuentes de energía

	Método	Tecnologías	Características
<b>Ashok [2007]</b>	Algoritmo iterativo	- Eólica - Solar - Hidráulica - Diésel	- Minimiza el coste. - Considera baterías. - Analiza la estrategia de control del sistema. - Minimiza el uso de equipos diésel.
<b>Bala &amp; Siddique [2009]</b>	Algoritmo genético	- Solar - Diésel	- Estudia un equilibrio: mínimo coste – mínimo uso diésel. - Considera varios tipos de baterías e inversores. - Estudia detalladamente la demanda. - Analiza la estrategia de control del sistema.
<b>Cai <i>et al.</i> [2009]</b>	Programación lineal	- Renovables - Fósiles	- Estudia un equilibrio: mínimo coste – seguridad suministro. - Incluye índices de incertidumbre para el análisis a largo plazo.
<b>Ekren &amp; Ekren [2009]</b>	Modelo de simulación	- Solar - Eólica - Diésel	- Minimiza el coste en función del precio de la tecnología diésel como energía complementaria. - Estudio detallado de la demanda y los recursos.
<b>Akella <i>et al.</i> [2007]</b>	Modelo de simulación	- Renovables - Fósiles	- Minimiza el coste anual a lo largo de la vida útil. - Considera varios tipos de baterías, inversores y reguladores. - Estudia detalladamente la demanda y los recursos. - Analiza la estrategia de control del sistema.

### 3.2.1.2. Diseño de microrredes eléctricas

El diseño de microrredes ha sido muy estudiado bajo diferentes puntos de vista e incluyendo distintas consideraciones, pero ha sido poco investigado en el contexto de países en desarrollo [Ponce de Leao & Matos, 1999]. La literatura revisada al respecto desde el área de especialistas eléctricos, entra muy en el detalle de aspectos eléctricos, poco significativos para la electrificación de zonas rurales de países en desarrollo, donde la prioridad es dar acceso a la electricidad [Cossi *et al.*, 2005]. Aun así, el diseño y localización de una o varias microrredes, ha sido modelizado por varios autores con modelos matemáticos.

Por ejemplo, Wall *et al.* [1979] consideran varias microrredes, Gonen & Foote [1981] seleccionan el conductor a utilizar considerando las pérdidas linealizadas, Aoki *et al.* [1990] incorporan las pérdidas como costes de operación y Turkey [1998], además, incluye el detalle de los costes fijos y variables. Finalmente, Paciornik *et al.* [2003] cambian del esquema radial al de anillo, para aumentar la seguridad.

Por su lado, Ponce de Leao & Matos [1999] presentan un método basado en el recocido simulado para diseñar microrredes, que permite considerar numerosas variables de decisión y hallar soluciones no dominadas. Se minimizan los costes de inversión, operación y mantenimiento, y la energía no suministrada, y se considera la robustez y la seguridad en el diseño. Sin embargo, no se contemplan aspectos sociales ni ambientales propios de la realidad de cada comunidad a electrificar, los cuales resultan de especial interés en zonas rurales de países en desarrollo.

En la Tabla 3.2 se resumen las principales características de las publicaciones revisadas en relación con el diseño de microrredes eléctricas.

**Tabla 3.2 – Características de las publicaciones revisadas para el diseño de microrredes eléctricas**

	Método	Características
<b>Wall <i>et al.</i> [1979]</b>	Programación lineal	Consideración de varias microrredes.
<b>Gonen &amp; Foote [1981]</b>	Programación lineal	Selección del tipo de conductor. Linealización de las pérdidas.
<b>Aoki <i>et al.</i> [1990]</b>	Programación lineal	Incorporación de las pérdidas como costes de operación.
<b>Turkay [1998]</b>	Programación lineal	Detalle de los costes fijos y variables.
<b>Paciornik <i>et al.</i> [2003]</b>	Programación lineal	Cambio del esquema radial al de anillo.
<b>Ponce de Leao &amp; Matos [1999]</b>	Recocido simulado	Mínimo coste de la vida útil. Gran robustez y seguridad. No considera aspectos sociales de la comunidad. No permite puntos individuales.

### 3.2.1.3. Diseño de sistemas de electrificación autónomos para comunidades rurales

Existe poca literatura respecto al diseño de sistemas de electrificación autónomos para comunidades rurales de países en desarrollo.

Ter-Gazarian & Kagan [1992] diseñan un modelo de programación lineal que tiene en cuenta el detalle de las demandas de energía y potencia simultáneamente, selecciona el tipo de cable en función de la caída de tensión y considera tecnologías convencionales, renovables y el sistema de almacenamiento. Como resultado se determina, a mínimo coste, el tamaño y el emplazamiento de los equipos de generación y almacenamiento, así como la microrred de distribución. Sin embargo, únicamente se considera una microrred y no se permite la existencia de sistemas individuales. Además, la configuración de la microrred es en anillo lo que, como se ha comentado anteriormente, no es adecuado para los proyectos objetivo de esta investigación.

VIPOR, desarrollado por NREL, es una herramienta que permite diseñar el sistema de distribución para una comunidad, combinando una microrred con puntos individuales [Lambert & Hittle, 2000]. Para ello tiene implementado un algoritmo de recocido simulado, que intenta minimizar el coste del sistema en 2 fases: en la primera se diseña el sistema de distribución en baja tensión y se definen los puntos de consumo a incorporar en la microrred o electrificar individualmente; en la segunda se decide el sistema de distribución en media tensión, definiendo el emplazamiento de los transformadores y del punto de generación. Sin embargo, esta herramienta limita la cantidad de microrredes y la cantidad de puntos de generación de la microrred. Además, el recurso de los puntos individuales se considera constante y se limita la extensión de microrredes por distancia, pero no por caída de tensión.

Finalmente, Ferrer-Martí *et al.* [2011] desarrollan un modelo de programación lineal para el diseño de sistemas eólicos autónomos, que considera el detalle del recurso eólico en toda la comunidad, la demanda de energía y potencia de cada punto de consumo y el almacenamiento con baterías. Por otro lado, a diferencia de VIPOR, en este artículo



[Ferrer-Martí *et al.*, 2011] no se limitan los puntos de generación de microrred y se distingue el potencial de todos los puntos. Como resultado, se obtiene la localización y la dimensión de los equipos de la instalación. El modelo se ha usado con éxito en el diseño del sistema de electrificación de la comunidad de Alto Perú (Cajamarca, Perú) [Ferrer-Martí *et al.*, 2012].

Como se observa, las publicaciones analizadas entran en el detalle de la instalación y de la red de distribución, e incluyen la demanda de energía y de potencia, y una evaluación de recursos. Sin embargo, presentan algunas limitaciones en cuanto a la configuración o las tecnologías consideradas. Además, en ninguno de los tres trabajos comentados se incluyen consideraciones de tipo social, de forma que aunque el diseño del sistema de electrificación pueda ser bueno y económico, no tiene por qué adecuarse a las características socioeconómicas de cada región y/o comunidad.

En la Tabla 3.3 se resumen las características más destacables de las publicaciones revisadas en relación al diseño de sistemas de electrificación autónomos.

**Tabla 3.3 – Características de las publicaciones revisadas que diseñan sistemas de electrificación autónomos para comunidades rurales**

	Método	Características	Limitaciones
<b>Ter-Gazarian &amp; Kagan [1992]</b>	MILP	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tipo de cable por caída de tensión.</li> <li>- Diseña por energía y potencia.</li> <li>- Considera almacenamiento en baterías.</li> <li>- Tamaño y emplazamiento de los equipos.</li> <li>- Limita la microrred por caída de tensión.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Una única microrred.</li> <li>- Esquema de microrred en anillo.</li> <li>- No considera sistemas individuales.</li> <li>- No incluye características sociales.</li> </ul>
<b>Lambert &amp; Hittle [2000]</b>	Recocido simulado	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Diseña por energía y potencia.</li> <li>- Considera 1 microrred y puntos individuales.</li> <li>- Tamaño y emplazamiento de la generación.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Limita los puntos de generación.</li> <li>- Recurso energético constante.</li> <li>- No limita por caída de tensión.</li> <li>- No incluye características sociales.</li> </ul>
<b>Ferrer-Martí <i>et al.</i> [2011]</b>	MILP	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Detalle del recurso eólico.</li> <li>- Detalle de los equipos y componentes.</li> <li>- Diseña por energía y potencia.</li> <li>- Tamaño y emplazamiento de los equipos.</li> <li>- No limita microrredes ni puntos individuales.</li> <li>- Diseño de microrredes radiales.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sólo considera el recurso eólico.</li> <li>- No incluye características sociales.</li> </ul>

### 3.2.2. Selección de alternativas de electrificación

La electrificación de zonas rurales de países en desarrollo es una tarea compleja que, recientemente, está demostrando la necesidad de requerir no sólo aspectos económicos y técnicos, sino también sociales. En este sentido, considerar un carácter multicriterio en el diseño de los sistemas energéticos es clave para lograr que la comunidad se apropie del proyecto y, así, favorecer su sostenibilidad [Pohekar & Ramachandran, 2004; Karger & Hennings, 2009]. Los métodos multicriterio de toma de decisiones permiten comparar múltiples alternativas sin requerir de una monetarización arbitraria de la evaluación de los criterios, lo que los hace adecuados para problemas de decisión complejos, como el diseño de sistemas de electrificación autónomos [Hobbs & Meier, 1994; Pohekar & Ramachandran, 2004; Alarcón-Rodríguez *et al.*, 2010].

Para el proceso de selección de alternativas, Wang *et al.* [2009] proponen una división en 4 puntos: definición de criterios, ponderación de criterios, evaluación de alternativas y agregación de resultados. Este subapartado se divide en 5 partes. Las 4 primeras siguen el esquema propuesto por Wang *et al.* [2009], mientras que en la última se resumen las principales conclusiones de este subapartado.

### **3.2.2.1. Definición de criterios**

La definición de criterios consiste en determinar un conjunto de criterios que, posteriormente, permitirán evaluar las alternativas [Wang *et al.*, 2009].

En la literatura revisada se ha encontrado que una forma bastante extendida para agrupar los criterios existentes consiste en dividirlos en 4 categorías: económicos, técnicos, sociales y ambientales [Wang *et al.*, 2009]. Otras publicaciones adaptan esta definición a las peculiaridades de su problema, pero siempre siguiendo este patrón.

Por ejemplo, Georgopoulou *et al.* [1997] proponen incluir los criterios sociales dentro de los económicos, y añaden una categoría de criterios políticos para la planificación energética de una isla griega. Cavallaro & Ciraolo [2005] distinguen únicamente entre criterios técnico-económicos y ambientales, para analizar el emplazamiento de aerogeneradores en una isla italiana. En una propuesta más genérica, Afgan *et al.* [2000] proponen sustituir el criterio técnico por el de recursos, para la evaluación de sistemas energéticos. Por último, Biswas *et al.* [2001] se enfocan en regiones rurales de países en desarrollo y proponen agrupar los criterios en tecnológicos, financieros, sociales e institucionales, para estudiar la aceptación de varias tecnologías en Bangladesh.

En general, las diferencias observadas entre publicaciones se deben a un cambio de contexto, región o escala. Así, en estudios de regiones a gran escala los criterios de tipo social tienden a tener una implicación económica como la creación de puestos de trabajo [Cavallaro & Ciraolo, 2005; Karger & Hennings, 2009]. En cambio, cuando el análisis se traslada a países en desarrollo, y más específicamente a zonas rurales, muchos de estos criterios deben ser reconsiderados o replanteados [Ostergaard, 2009].

Por ejemplo, en una zona ya electrificada cuyo suministro se trata de mejorar con la introducción de energías renovables, aspectos como el ruido, las emisiones de gases de efecto invernadero o la eficiencia energética son elementos clave. Sin embargo, en una región con escasos recursos económicos y sin electrificar, aunque sigue siendo recomendable considerar los criterios anteriormente enumerados, su importancia es menor, puesto que la prioridad es dar acceso a la electricidad a un coste adecuado. En estas zonas, criterios como la seguridad del suministro son adecuados y han sido utilizados en la literatura [Chatzimouratidis & Pilavachi, 2009; Wang *et al.*, 2009]. En cambio no se han encontrado criterios, como la gestión del suministro, que permitan comparar diferentes estructuras de la distribución eléctrica, que es un aspecto fundamental para asegurar la sostenibilidad de los proyectos.

En cualquier caso, al seleccionar los criterios de evaluación, es recomendable que éstos cumplan con los siguientes requisitos [Georgopoulou *et al.*, 1997; Afgan *et al.*, 2000]:

- Ser suficientes para incluir la opinión de todos los actores involucrados.
- No ser demasiados como para entorpecer el llegar a un consenso.
- Ser medibles y con unas diferencias bien marcadas entre sí para evitar redundancias y permitir un análisis claro y conciso.

Lógicamente, la definición de criterios es un proceso complejo en el que frecuentemente se ve enfrentada la opinión de los distintos actores involucrados en el proceso de toma de decisiones. Algunos trabajos hacen una revisión de los criterios de evaluación para diferentes contextos, pero estos listados pueden ser incompletos o no adecuados para regiones específicas [Karger & Hennings, 2009; Ostergaard, 2009].

Por este motivo existen métodos de ayuda a la toma de decisiones que facilitan el análisis [Wang *et al.*, 2009]. Algunas de estas herramientas tienen una base matemática y permiten mantener una cierta objetividad, pero han sido criticadas por su mayor complejidad. En contraposición, técnicas más subjetivas como el método Delphi, desarrollado por Scott [2001], han demostrado su utilidad, sobre todo en situaciones en que existen varios actores con intereses enfrentados que deben definir un listado común de criterios de evaluación.

### **3.2.2.2. Ponderación de criterios**

La ponderación de criterios consiste en asociar un valor a cada criterio, representativo de su importancia respecto a los demás [Wang *et al.*, 2009].

Con este propósito existen diversas técnicas y herramientas que facilitan este análisis. Una primera opción, pero que cada vez está más en desuso debido a sus limitaciones, consiste en asignar la misma importancia a todos los criterios [Wang *et al.*, 2009]. Sin embargo, esta forma de proceder no permite diferenciar que un criterio pueda ser más o menos importante que otro, desde el punto de vista de quien toma la decisión.

Si, en cambio, se quieren asignar importancias diferentes al trabajar, por ejemplo, con dos criterios, y uno es el doble de importante que el otro, se asignará un valor de 2 al primero y de 1 al segundo. Cuando se trabaja con varios criterios esta asignación puede no resultar evidente, siendo recomendable apoyar la toma de decisiones en herramientas que faciliten el análisis. En esta dirección, Wang *et al.* [2009] distinguen entre:

- Métodos de asignación directa. Tienen una carga subjetiva fuerte y se han utilizado tradicionalmente dada su gran facilidad de uso. Un ejemplo consiste en asignar un valor de 0 a 10 a cada criterio. Otros métodos parten del mismo principio, pero sistematizan en mayor medida la toma de decisiones, como puede ser el caso de SMART (Técnica de Clasificación Simple Multi-Atributo) [Edwards, 1977].

- Métodos de comparación por pares. Reducen la subjetividad o, cuanto menos, intentan evitar incongruencias que puedan aparecer con los métodos de asignación directa. Su fundamento consiste en comparar los criterios por parejas y, así, identificar que, si  $A$  es mayor que  $B$  y  $B$  es mayor que  $C$ ,  $A$  será mayor que  $C$ , lo que no siempre es fácil de discernir con los métodos de asignación directa [Hobbs *et al.*, 1992]. Posiblemente, el más conocido y estudiado es AHP (Proceso Analítico Jerárquico); este método permite obtener un índice de consistencia, indicativo de la coherencia de la ponderación de los criterios [Saaty, 1980].

Existen otros métodos más objetivos y con fundamento matemático. Sin embargo, no reflejan directamente la opinión de quién decide, sino que los pesos de los criterios se calculan a partir de la propia evaluación de alternativas y, por ello, han sido menos utilizados en el sector de la energía [Wang, *et al.*, 2009].

Por último, es interesante resaltar que, dada la subjetividad tanto de las decisiones como de los métodos propuestos, puede resultar interesante el uso de varias herramientas de ponderación y, posteriormente, agregar los resultados con técnicas matemáticas [Chatzimouratidis & Pilavachi, 2009]. Esto, sin embargo, puede complicar el proceso de selección de alternativas y no se han hallado demasiadas referencias al respecto en la literatura revisada y, concretamente, ninguna en la aplicación a países en desarrollo.

### 3.2.2.3. Evaluación de alternativas

La evaluación de alternativas consiste en valorar cada alternativa según cada criterio [Wang *et al.*, 2009].

Éste es posiblemente el punto más complejo de todo el proceso de selección de alternativas. Por este motivo, existen multitud de herramientas de ayuda a la toma de decisiones aplicadas a problemas de planificación energética [Zhou *et al.*, 2006; Loken, 2007; Wang *et al.*, 2009; Alarcón-Rodríguez, 2010]. Incluso se han localizado estudios que se centran en la propia selección de un método multicriterio, pues es en sí misma una decisión multicriterio [Polatidis *et al.*, 2006].

Las técnicas asociadas al proceso de evaluación de alternativas se pueden clasificar en métodos continuos y métodos discretos. Los primeros parten del supuesto que existen infinitas soluciones posibles, mientras que los segundos acotan el rango de posibles alternativas a un número determinado y suelen tener mayor aplicabilidad para problemas reales. Hay cierta divergencia de opiniones en cuanto a cuál de ellos es más adecuado. Los partidarios de la primera opción afirman que los métodos continuos tienen un buen fundamento matemático, mientras que los discretos se podrían asimilar a heurísticas [Romero, 1993]. Los partidarios de la segunda opción puntualizan que los métodos continuos, como inconveniente, pueden conducir a soluciones no factibles [Polatidis *et al.*, 2006].

Se han diseñado numerosas técnicas de evaluación de alternativas, y cada trabajo de revisión de la literatura propone su propia clasificación para facilitar el análisis y selección de un método para un problema específico. En concreto, a continuación se propone seguir la clasificación de Loken [2007] y Polatidis *et al.* [2006]:

- Modelos de medición del valor. Se asigna un valor a cada alternativa y con ello se ordenan las alternativas siguiendo la lógica:  $A$  es mayor que  $B$  si y sólo si el valor de  $A$  es mayor o igual que el de  $B$  para el global de los criterios [Loken, 2007]. Aquí destaca la teoría del valor multiatributo (MAVT), la teoría de la utilidad multiatributo (MAUT) [Keeney & Raiffa, 1976] y AHP [Saaty, 1980].

Estos métodos son sencillos, transparentes e interactivos, y su utilización está muy extendida en la literatura revisada. Sin embargo, su uso en la planificación energética es cada vez menor [Zhou *et al.*, 2006]. Esto se debe a que, por una parte, exigen muchos recursos para la obtención de resultados y, por otra, no permiten que haya vacilaciones al comparar alternativas entre sí o que algunas no se puedan comparar [Pohekar & Ramachandran, 2004; Polatidis *et al.*, 2006]. Este segundo motivo conduce a que en el caso concreto de zonas rurales de países en desarrollo, donde el acceso a la información no siempre es el más deseable, AHP resulte adecuado para la ponderación de criterios pero tanto para la evaluación de alternativas.

- Modelos de superación. Se asigna un valor a cada alternativa, se comparan las alternativas por pares respecto a cada criterio, admitiendo unos umbrales de incertidumbre, y se determina que una alternativa  $A$  supera a otra alternativa  $B$ , siempre que  $A$  sea al menos tan buena como  $B$  [Loken, 2007]. Entre estos métodos destacan ELECTRE [Roy & Vincke, 1981] y PROMETHEE [Brans *et al.*, 1986].

Estos modelos son cada vez más utilizados en el sector de la planificación energética ya que evitan la posibilidad de compensaciones entre criterios, es decir, que la sobrevaloración de un criterio compense la infravaloración de otro criterio [Polatidis *et al.*, 2006; Zhou *et al.*, 2006]. El uso de estas técnicas está enfocado sobre todo a un análisis de partida, que permite discernir entre alternativas válidas y no válidas [Greening & Bernow, 2004]. Sin embargo, una crítica común es que el concepto de umbrales no está claro en todos los problemas y conduce a una cierta subjetividad, de modo que no siempre son adecuados para zonas rurales de países en desarrollo. Además, en el caso de ELECTRE se ha criticado que éste resulta ser una caja negra y no se sabe qué procesos realiza en su interior [Loken, 2007].

- Modelos de meta, aspiración y nivel de referencia. Se asigna un valor a cada alternativa, se compara cada una con una solución ideal, que es la mejor en todos los criterios, y se clasifica según la distancia a dicho ideal [Loken, 2007]. Destacan la programación por metas y la programación compromiso [Romero, 1993].

Estos métodos son fáciles de utilizar y entender, son menos subjetivos que los de medición del valor y permiten interactuar con quien los utiliza [Loken, 2007]. En concreto, la programación compromiso obtiene resultados con relativa rapidez cuando el número de criterios es limitado [Romero, 1993]. Esta técnica ha sido usada en el sector de la energía. Por ejemplo, Linares [2005] evalúa diferentes escenarios energéticos para España, enfrentando el coste con las emisiones de CO<sub>2</sub>. Cherni *et al.* [2007] utilizan esta técnica para diseñar sistemas energéticos con 5 criterios. Otros estudios utilizan derivados de este modelo; por ejemplo, Romero [1993] propone transformar la programación compromiso de una técnica continua a discreta, para resolver problemas con un conjunto limitado de posibles soluciones. TOPSIS añade al concepto de solución ideal, el de solución anti-ideal, que sería mala en todos los criterios y se ha utilizado para la planificación de la expansión de la generación eléctrica [Yang & Chen, 1989]. VIKOR es una herramienta similar a la programación compromiso, pero que esquematiza el proceso de decisión y se ha usado para la selección de opciones tecnológicas renovables [San Cristóbal, 2011]. Por otra parte, la programación por metas ha demostrado ser útil en problemas con gran número de alternativas, pero por su mayor complejidad resulta poco adecuada si se intenta difundir en zonas rurales de países en desarrollo [Romero, 1993].

Para finalizar, cabe comentar que en la literatura se recomienda que la toma de decisiones se realice, si es posible, de un modo iterativo. Así se pueden conocer los resultados (aunque sean parciales) a medida que se profundiza en el problema y con ello consensuar las decisiones [Romero, 1993; Greening & Bernow, 2004]. Esto proporciona más robustez al proceso, sobre todo si se trabaja con actores con intereses enfrentados.

#### **3.2.2.4. Agregación de resultados**

Como se observado, no existe un único método de ayuda a la toma de decisiones que sea adecuado para cada tipo de problema ni viceversa. La agregación de resultados surge del hecho que un mismo método aplicado por diferentes decisores o distintos métodos aplicados por un mismo decisor, pueden conducir a resultados diferentes; hecho que está muy reflejado en la literatura revisada [Hobbs *et al.*, 1992; Hobbs & Meier, 1994; Greening & Bernow, 2004; Polatidis *et al.*, 2006; Loken, 2007; Browne *et al.*, 2010]. Así, es recomendable utilizar más de un método en los puntos previos (sobre todo en la evaluación de alternativas por su complejidad) para dar mayor robustez a las soluciones [Eppel, 1992]. Si los resultados obtenidos con cada técnica son diferentes, se usa la agregación de resultados para converger las diferencias [Wang *et al.*, 2009].

Existen varias técnicas para este proceso. Éstas pueden ser subjetivas y por votación (Borda o Copeland [Klamler, 2005]), u objetivas y con sustento matemático [Wang *et al.*, 2009]. Este punto, sin embargo, es más estudiado a nivel teórico y no tanto en la aplicación en casos reales. Otra posibilidad consiste en no concretar ningún resultado definitivo, sino en extraer una serie de conclusiones y recomendaciones a partir de las distintas clasificaciones obtenidas [Georgopoulou *et al.*, 1997].

### 3.2.2.5. Conclusión para la selección de alternativas

En la Tabla 3.4 se resumen y muestran las ideas más importantes extraídas de la literatura, siguiendo la estructura en 4 puntos propuesta por Wang *et al.* [2009].

Al combinar la aplicación de un método diferente en cada punto de la selección de alternativas, resulta interesante utilizar técnicas que se complementen entre sí, aprovechando las fortalezas respectivas y neutralizando sus desventajas. En esta dirección, el método AHP para la ponderación de criterios ha sido muy utilizado en combinación con otros métodos [Loken, 2007]. Por ejemplo, Yang & Chen [1989] lo combinan con TOPSIS para la planificación de la expansión de la generación eléctrica. Tzeng *et al.* [1992] lo combinan con PROMETHEE II para la evaluación de sistemas energéticos de una región. Finalmente, Ramanathan & Ganesh [1995] lo combinan con la programación por metas para estudiar qué recursos se adecúan más a diferentes usos domésticos en una comunidad de la India, según criterios cualitativos y cuantitativos.

Como conclusión del subapartado 3.2.2, se puede argumentar que existen métodos que facilitan el proceso de toma de decisiones incluyendo numerosos criterios y el punto de vista de distintos actores. Sin embargo, generalmente no se utilizan criterios que permitan diferenciar entre configuraciones de la distribución eléctrica y, además, se parte de unos escenarios predefinidos, sin entrar en el detalle de cómo generarlos.

**Tabla 3.4 – La selección de alternativas en la literatura**

Wang <i>et al.</i> [2009]	Características	
<b>Definición de criterios</b>	Wang <i>et al.</i> [2009]	Agrupación de los criterios en 4 temáticas: económicos, técnicos, sociales y ambientales.
	Scott [2001]	Una posible técnica para alcanzar el consenso entre varios actores es el Método Delphi.
<b>Asignación de pesos</b>	Wang <i>et al.</i> [2009]	Los métodos de asignación son subjetivos pero muy sencillos (ej: SMART [Edwards, 1977]). Los métodos de comparación por pares son menos subjetivos y ayudan a reducir las incongruencias (ej: AHP [Saaty, 1980]).
	Greening & Bernow [2004]	No existe un único método para cada problema.
<b>Evaluación de alternativas</b>	Polatidis <i>et al.</i> [2006]	El método seleccionado debe evitar compensaciones (que la sobrevaloración de un criterio compense la infravaloración de otro).
	Loken [2007]	Los modelos de meta, aspiración y nivel de referencia son sencillos, transparentes, poco subjetivo y permiten interactividad
	Romero [1993] Linares [2005] Cherni <i>et al.</i> [2007]	La programación compromiso es un método adecuado.
<b>Agregación de resultados</b>	Hobbs & Meier [1994]	Un mismo método aplicado por distintos decisores o distintos métodos aplicados por un mismo decisor pueden conducir a resultados diferentes.
	Eppel [1992]	Es interesante utilizar varios métodos en el proceso de selección y luego agregar los resultados.

### 3.2.3. Procedimientos de diseño de sistemas de electrificación autónomos

La bibliografía hasta aquí comentada se centra en la optimización del diseño de un sistema de electrificación o en la comparación multicriterio de escenarios predefinidos de partida. A continuación se describen herramientas que integran ambas fases, y que se han desarrollado para la electrificación de zonas rurales de países en desarrollo.

Alarcón-Rodríguez *et al.* [2010] afirman que en regiones donde recopilar la información no es evidente, es más adecuada una aproximación a posteriori: primero se busca el conjunto de soluciones eficientes, con un proceso de optimización, y luego se toman las decisiones necesarias para seleccionar la alternativa más apropiada, con un proceso multicriterio. Así se logra un buen realismo en la representación del problema, y la toma de decisiones se realiza de forma sistemática, práctica y poco sujeta a subjetividades (puesto que se conoce el problema antes de decidir) [Savic, 2007; Zitzler, 2007].

Para realizar este proceso de optimización y decisión, es recomendable mantener la transparencia, especialmente en zonas rurales de países en desarrollo [Karger & Hennings, 2009; Garfí *et al.*, 2011]. Además, la toma de decisiones debe ser lo más sencilla posible y sin tener que comparar demasiados aspectos simultáneamente [Nijkamp *et al.*, 1990]. En concreto, para simplificar el proceso de decisión They & Zarate [2009] proponen dividir el problema en tres niveles de decisión: decisiones estratégicas (a largo plazo y con gran impacto), decisiones tácticas (a medio plazo y con impacto moderado) y decisiones operativas (a corto plazo y con impacto limitado).

Por ejemplo, Keller *et al.* [2007] desarrollan una herramienta de simulación en la que primero se dimensionan los puntos de generación para cubrir una determinada demanda, con tecnología hidráulica, solar, eólica y biomasa. Salvo en el primer caso, en los demás se incluye el uso de baterías. A continuación, se generan distintos escenarios en que cada tecnología especificada permite cubrir distintos usos. Una vez generadas estas alternativas, se utiliza la técnica AHP para seleccionar la alternativa más adecuada desde el punto de vista de diferentes criterios que tienen en cuenta la opinión de todos los actores involucrados en el proceso. Los criterios considerados son tanto cuantitativos (coste de la energía, porcentaje de la demanda no cubierta, etc.) como cualitativos (aceptabilidad social, impacto visual, etc.). Sin embargo, con esta herramienta se limita a una las tecnologías que se pueden instalar en un mismo punto, y no se proporciona el detalle de la microrred a diseñar (únicamente se permite una microrred de la que, además, no se especifica la estructura).

Entre las herramientas desarrolladas para el diseño de sistemas autónomos en países en desarrollo, destaca SURE de RESURL, que utiliza la programación compromiso para estudiar diferentes alternativas de electrificación para una comunidad o región, y selecciona la más adecuada sobre la base de los criterios físico, financiero, natural, social y humano [Cherni *et al.*, 2007]. Así, la alternativa más adecuada es aquella que



más se acerca, en conjunto, a todos los objetivos. Esta herramienta selecciona la opción tecnológica, pero no entra en el detalle de los componentes de la instalación ni de la distribución eléctrica. Además, se trata de un sistema de soporte a la toma de decisiones que ofrece un buen análisis de los resultados pero que, aunque ordena las alternativas, limita la interacción con la herramienta y es poco transparente. Este hecho puede ser un inconveniente en zonas rurales de países en desarrollo, donde se requiere de mucha transparencia en la toma de decisiones para que todo el mundo se apropie de la solución y, posteriormente, del proyecto.

Como se ha introducido, NREL ha desarrollado dos programas informáticos: HOMER [Akella *et al.*, 2007] y VIPOR [Williams & Maher, 2008]. Éstos están pensados para ser utilizados conjuntamente. El primero diseña el sistema de generación, con gran detalle de los componentes y diversas tecnologías posibles. Como resultado se obtiene el sistema de generación y acumulación necesario para una demanda concreta, lo que permite dimensionar los puntos individuales, y una curva que relaciona el coste con la demanda, lo que facilita el estudio del alcance de la microrred y su configuración. Así se consigue una herramienta integral para diseñar sistemas de electrificación autónomos en su totalidad. Sin embargo, ambas herramientas realizan un análisis desde un punto de vista económico y técnico, pero no consideran las características socioeconómicas de la comunidad a electrificar, que son de gran importancia en zonas rurales de países en desarrollo como, por ejemplo, la gestión del sistema [Ostergaard, 2009].

HOGA es un modelo de simulación y optimización para el diseño de sistemas eléctricos con energías renovables, parecido a HOMER aunque menos utilizado [Dufo-López & Bernal-Agustín, 2011]. HOGA, además de minimizar el coste a lo largo de la vida útil del sistema, permite minimizar las emisiones de CO<sub>2</sub> y la energía no servida. Primero se obtienen los datos que definen el sistema de generación y acumulación, y en segundo lugar se minimizan los objetivos estudiados. Sin embargo, esta herramienta no considera características socioeconómicas específicas de las comunidades ni el sistema de distribución eléctrica.

HYBRID2, desarrollado por NREL, es un modelo de simulación dinámico que analiza el comportamiento de distintos sistemas energéticos a lo largo de toda su vida útil y en función de diferentes tipos de consumo [Manwell *et al.*, 2006]. El programa ofrece un análisis económico sobre la base de parámetros como el coste inicial, de operación y mantenimiento o de remplazo de equipos del sistema, y simula el funcionamiento del sistema para estudiar la estrategia de control. Sin embargo, los resultados no siempre son fáciles de interpretar y se suele requerir de un cierto tiempo para familiarizarse con la herramienta, antes de aprovechar al máximo todo su potencial. Esto puede ser una limitante en su difusión en las comunidades objetivo de esta investigación, donde se requiere claridad, transparencia y facilidad de uso.

En la Tabla 3.5, se resumen las características más relevantes de las herramientas de diseño revisadas.

**Tabla 3.5 – Principales herramientas de diseño de sistemas de electrificación autónomos revisadas**

	<b>Método</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Inconvenientes</b>
<b>Keller et al. [2007]</b>	Modelo de simulación + AHP	- Compara numerosas tecnologías. - Incluye criterios cualitativos y cuantitativos.	- No permite interactuar. - Presenta limitaciones en la distribución.
<b>SURE</b>	Programación compromiso	- Incluye criterios cualitativos y cuantitativos. - Evalúa los recursos energéticos disponibles. - Incluye aspectos sociales.	- No permite interactuar. - Es poco transparente. - No da detalle de la solución.
<b>HOMER + VIPOR</b>	Modelo de simulación + Recocido simulado	- Compara numerosas tecnologías. - Evalúa los recursos energéticos disponibles. - Analiza en detalle la demanda. - Obtiene un gran detalle de la solución.	- No permite interactuar. - No incluye aspectos sociales. - Presenta limitaciones en la distribución.
<b>HOGA</b>	Algoritmo genético	- Compara numerosas tecnologías. - Evalúa los recursos energéticos disponibles. - Analiza en detalle la demanda.	- No incluye aspectos sociales. - Cálculo interno complejo. - No detalla la distribución.
<b>HYBRID 2</b>	Modelo de simulación dinámico	- Analiza la estrategia de control del sistema. - Evalúa los recursos energéticos disponibles.	- No incluye aspectos sociales. - No detalla el sistema. - No es fácil de utilizar.

Para finalizar este subapartado, resulta interesante destacar que los procedimientos estudiados nunca llegan a una única conclusión, sino que permiten extraer unas recomendaciones de implementación que se muestran a un grupo de expertos y a la propia comunidad, para que tomen la decisión final sobre la base de características muy concretas de la comunidad [Georgopoulou *et al.*, 1997].

### 3.2.4. Análisis de los procedimientos de diseño de sistemas de electrificación autónomos

Después de analizar la bibliografía referenciada, se ha comprobado que no existe ningún procedimiento para el diseño de sistemas de electrificación rural para países en desarrollo, que considere la recogida de datos de las características de la comunidad y genere diversas alternativas de electrificación para, posteriormente, seleccionar la más adecuada. Al respecto, Loken [2007] afirma que la investigación bajo múltiples criterios entorno a sistemas energéticos a escala local parece olvidada.

En la fase de generación de alternativas se ha concluido que los modelos matemáticos son adecuados para el diseño de sistemas energéticos. Los trabajos analizados se enfocan en el estudio de una combinación de fuentes de energía según los recursos disponibles, pero sin entrar en el detalle del sistema de distribución. En el área de los especialistas eléctricos se han desarrollado trabajos sobre el diseño de redes eléctricas, pero que estudian aspectos poco significativos en zonas rurales de países en desarrollo. Además, no consideran el almacenamiento con baterías, ni el dimensionado por energía. Pocos estudios superan estas limitaciones y, cuando lo hacen, presentan restricciones en la distribución eléctrica, las tecnologías utilizadas o no incluyen aspectos sociales. Entre ellos, Ferrer-Martí *et al.* [2011] desarrolla un modelo matemático que considera el detalle de la comunidad pero sólo para sistemas eólicos. En esta tesis, se propone seguir dicha línea de investigación incluyendo la tecnología solar y consideraciones sociales.

Por su parte, la selección de alternativas se divide habitualmente en 4 puntos. Primero está la definición de criterios, para la que pocos estudios entran en detalle y, cuando lo hacen, se centran en una escala no adecuada para los proyectos en que esta tesis se enfoca. Segundo está la ponderación de criterios, para la que los modelos de asignación como AHP son una opción adecuada y de uso generalizado. Tercero está la evaluación de alternativas, para la que los métodos de meta, aspiración y nivel de referencia son adecuados, y han sido utilizados para la toma de decisiones en proyectos de electrificación; en concreto, la programación compromiso y sus derivados han demostrado ventajas en cuanto a transparencia, sencillez y facilidad de uso. En cuarto lugar está la agregación de resultados para evitar que la subjetividad de un método influya en las decisiones.

Los estudios hasta aquí revisados se centran en generar o seleccionar alternativas, pero no integran ambas fases. Al diseñar una herramienta de diseño de sistemas de electrificación autónomos, es recomendable dividir el problema a resolver en dos bloques: una optimización para encontrar diversas soluciones válidas y una toma de decisiones multicriterio para seleccionar la más adecuada. Entre los procedimientos revisados, se ha observado que difícilmente se consideran los aspectos socioeconómicos de las comunidades a electrificar. Éstos, sin embargo, son fundamentales en las regiones en que se enfoca esta tesis doctoral. Además, en algunos casos se incluye un gran detalle económico; información que no siempre resulta ser crítica en regiones donde la prioridad es dar acceso a la energía eléctrica. En otros casos se peca de falta de transparencia, creando la apariencia de una “caja negra” que dificulta la difusión entre los promotores de la electrificación rural en países en desarrollo.

Este análisis del estado del arte se ha complementado con la visita, por parte del autor de esta tesis, a 3 expertos en métodos de análisis multicriterio. Éstos son el Dr. Giuseppe Munda de la Universidad Autónoma de Barcelona, el Dr. Pedro Linares de la Universidad Pontificia Comillas y el Dr. Carlos Romero de la Universidad Politécnica de Madrid. A partir de estas entrevistas se concluye que:

- Es interesante dividir un problema de decisión complejo (como el diseño de sistemas de electrificación autónomos) en subproblemas que agrupen las decisiones en función de la importancia de las decisiones a tomar.
- Los procesos iterativos permiten ajustar las decisiones a medida que se profundiza en la resolución del problema. Este enfoque es de especial interés en problemas de aplicación a regiones donde el acceso a la información de partida no es evidente.
- El método AHP ha sido muy utilizado para la ponderación de criterios y es una herramienta que goza de mucha difusión pero que, en ocasiones, puede presentar ciertas limitaciones. De esta forma, es importante realizar el correspondiente análisis de la sensibilidad del método para determinar la robustez de las decisiones.

- Hay consenso en considerar la programación compromiso como una herramienta sencilla y transparente, con un principio matemático sólido, pero fácil de entender. Esta herramienta ha sido utilizada en proyectos de planificación energética.
- Es fundamental que el/los método/s seleccionado/s respondan a las necesidades específicas del problema a resolver.

A partir del análisis realizado del estado del arte, en esta investigación se propone una metodología de diseño de sistemas de electrificación autónomos que supere las limitaciones de los procedimientos estudiados.

Como se ha identificado, las fases naturales del proceso son: la recopilación de la información característica de la comunidad a electrificar (fase natural 1), la generación de alternativas de electrificación (fase natural 2) y la selección de la alternativa más adecuada (fase natural 3). En cambio, la metodología elaborada incluye dichas 3 fases naturales, pero propone una organización diferente en las siguientes 3 etapas:

- Etapa 1. Evaluaciones iniciales, que coincide con la fase natural 1 y para la que se realizan unas evaluaciones socioeconómica, energética y técnica (capítulo 5).
- Etapa 2. Diseño del sistema, que agrupa las fases naturales 2 y 3. Para la fase 2 se ha desarrollado un modelo matemático que considera el detalle de los proyectos y permite obtener soluciones eficientes de mínimo coste, que se adecúan a unas u otras características de la comunidad (capítulo 6). Para la fase 3 se propone un proceso de decisión multicriterio fundamentado en la técnica de la programación compromiso, incluyendo criterios económicos, técnicos y sociales (capítulo 7).
- Etapa 3. Mejora del resultado.

## **4. Metodología para el diseño de sistemas de electrificación autónomos**

Como se ha presentado en el estado del arte del capítulo 3, no se ha encontrado ningún procedimiento para el diseño de sistemas de electrificación autónomos en comunidades rurales de países en desarrollo, que guíe en la toma de decisiones e incluya consideraciones económicas, técnicas y sociales. En este capítulo se presenta una metodología que supera estas limitaciones.

En el primer apartado se muestra un esquema con la estructura de la metodología de diseño propuesta, que consta de 3 etapas: recopilación de información, generación y selección de alternativas, y mejora del resultado. Se introducen así, los conceptos clave que se detallan posteriormente. En el segundo apartado se justifica la necesidad de dividir la segunda etapa de la metodología (generación y selección de alternativas) en 3 niveles de decisión. En concreto, se explican las ventajas de dicha división, qué realizar en cada nivel y cómo pasar de un nivel al siguiente. En el tercer apartado se exponen los procesos iterativos de toma de decisiones, que permiten interactuar con el usuario de la metodología de diseño (en adelante decisor), para estudiar diversas alternativas de electrificación y ajustar la importancia de los criterios de evaluación. Para finalizar, en el cuarto apartado se aplica la metodología propuesta a un pequeño ejemplo, que ha sido preparado para ilustrar de forma clara todo el proceso de toma de decisiones.

### **4.1. Estructura de la metodología de diseño**

En la metodología de diseño propuesta en esta tesis doctoral, se parte del momento en que se dispone de una comunidad a electrificar, y se guía al decisor en el proceso de diseño del sistema de electrificación para obtener el detalle de qué equipos instalar y dónde, y qué configuración de distribución implementar y su estructura. Para ello se integra todo el proceso habitual de diseño, es decir, las 3 fases naturales identificadas en el estado del arte del capítulo 3: la recogida de información de la comunidad (fase 1), la generación de alternativas (fase 2) y la selección de alternativas (fase 3).

Para diferenciar el proceso propuesto respecto a las 3 fases naturales, se proponen 3 etapas, tal y como se observa en la Figura 4.1. La primera etapa (que incluye la fase natural 1) consta de 3 evaluaciones iniciales de la comunidad de estudio: una socioeconómica, otra energética y otra técnica. La segunda etapa (que agrupa las fases naturales 2 y 3) se divide en 3 niveles de decisión, cada uno compuesto por una generación de alternativas de electrificación y una selección de la más adecuada. La tercera etapa persigue, cuando es posible, disminuir el coste de la solución manteniendo las características técnicas y sociales seleccionadas en la etapa anterior.

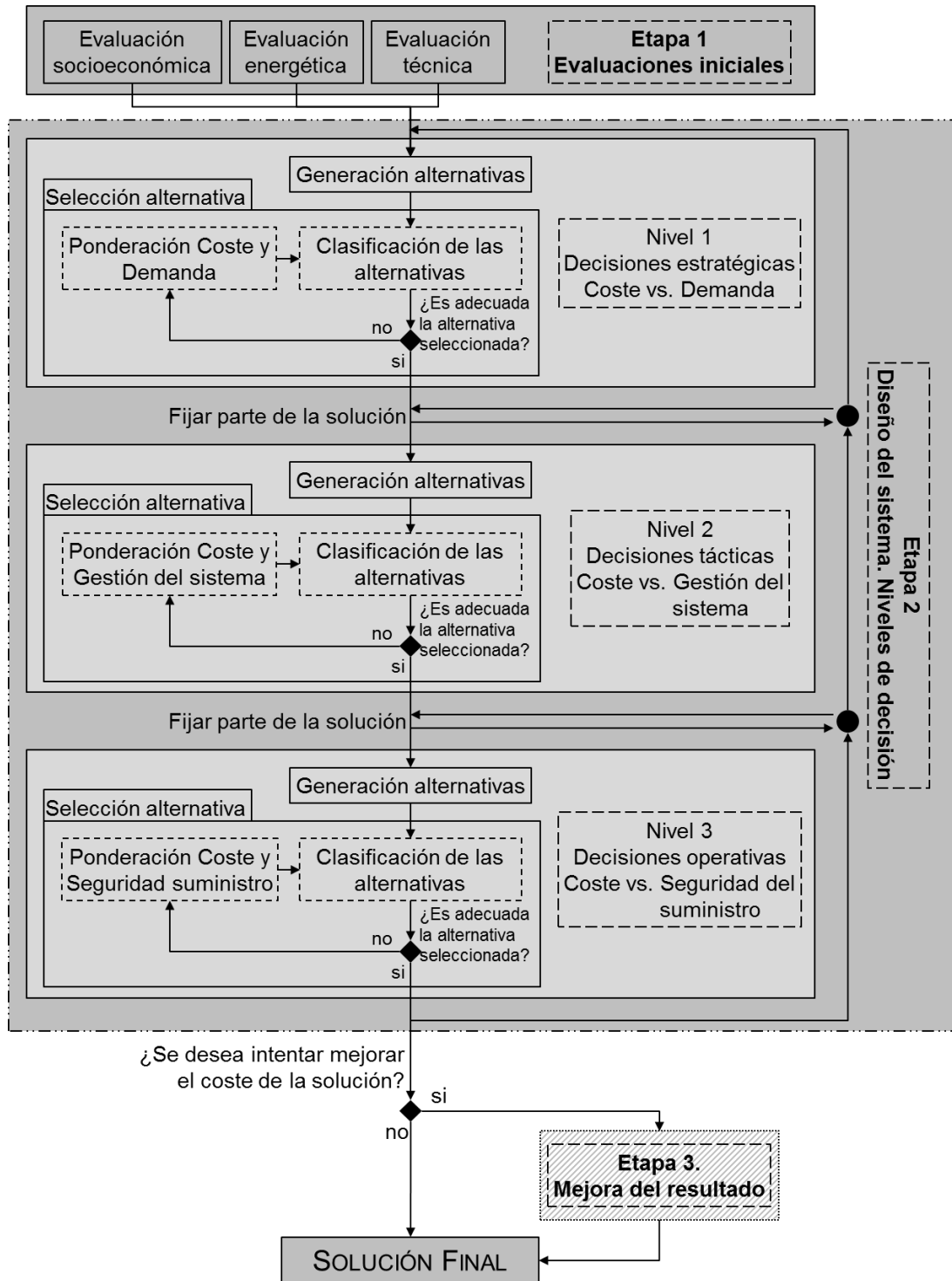


Figura 4.1 – Estructura de la metodología para el diseño de sistemas de electrificación autónomos

La primera etapa “Evaluaciones iniciales” consiste en 3 evaluaciones para obtener los datos característicos de la comunidad a estudiar (capítulo 5). La evaluación socioeconómica determina los puntos de consumo, su demanda y aspectos sociales propios de la población, como conflictos entre vecinos o los ingresos de cada familia (apartado 5.1). La evaluación energética estudia los recursos energéticos disponibles en cada punto de la comunidad (apartado 5.2). La evaluación técnica examina el coste y las características técnicas de los equipos disponibles en el mercado (apartado 5.3).

La segunda etapa “Diseño del sistema” es el proceso de diseño en sí y, para ello, se agrupa la generación y selección de alternativas, y se divide el conjunto en 3 niveles de decisión. Como se explica en el apartado 4.2, estos niveles se clasifican de acuerdo a la importancia de las decisiones tomadas, de modo que el decisor puede analizar y decidir sobre unas características, antes de considerar otras de menor relevancia.

En los 3 niveles se minimiza el coste de la inversión inicial como criterio principal, puesto que es un limitante importante en zonas rurales de países en desarrollo. Como criterios secundarios: en el primer nivel se trabaja con la demanda para cubrir las necesidades energéticas de la población (se estudia un conjunto de soluciones que se obtienen al minimizar el coste para un grupo de valores de la demanda); en el segundo se analiza la configuración de la distribución eléctrica para facilitar la gestión del sistema; y en el tercero se examina la tipología de los equipos de generación para mejorar la seguridad del suministro.

Por otro lado, cada nivel de decisión se compone de dos pasos. En el primer paso se generan diversas alternativas de electrificación con un modelo matemático (véase capítulo 6) que minimiza el coste y considera en detalle la generación, la acumulación y la distribución eléctrica. Las alternativas generadas son de por sí eficientes, pero cada una se adapta a unas u otras características de la comunidad, definidas a partir de las decisiones de cada nivel: coste vs. demanda, coste vs. gestión del sistema y coste vs. seguridad del suministro. A continuación, en el segundo paso se selecciona la alternativa más adecuada sobre la base de criterios económicos, técnicos y sociales, mediante la programación compromiso (véase el capítulo 7). Adicionalmente, como se detalla en el apartado 4.2, al pasar de un nivel al siguiente se fija parte de la solución para, así, garantizar que decisiones posteriores no modifiquen decisiones tomadas en niveles anteriores (de mayor importancia).

En esta segunda etapa se permite volver al principio de cada nivel, mediante un proceso iterativo que tiene como objetivo la interacción en el proceso de decisión (apartado 4.3). Así, al finalizar un nivel, el decisor puede estimar oportuno estudiar nuevos valores de los criterios del nivel en curso o de niveles previos. Por ejemplo, después de estudiar unos valores de demanda en el primer nivel, los resultados pueden posteriormente no ajustarse a las preferencias del decisor y éste puede desear analizar nuevos valores de demanda. Asimismo, un segundo proceso iterativo permite ajustar la importancia asociada a cada criterio de evaluación de alternativas (en el seno del segundo paso de selección de alternativas), asegurando una mayor robustez en la toma de decisiones.

La tercera etapa “Mejora del resultado”, opcional, se plantea con el objetivo de intentar mejorar el coste de la solución seleccionada en la segunda etapa, manteniendo las características decididas. Esta etapa nace del hecho que en la segunda etapa se fija parte de la solución entre niveles de decisión, lo que puede conducir a incrementos en el coste de las soluciones según las decisiones tomadas.

## **4.2. Niveles de decisión en la etapa de “Diseño del sistema”**

En este apartado se presenta la estructura de la segunda etapa de la metodología de diseño desarrollada en esta tesis doctoral. Inicialmente se propuso trabajar con un esquema usual que considera una fase natural de generación de alternativas y otra fase diferente de selección de alternativas. Sin embargo, al probar este esquema se identificaron un conjunto de carencias (subapartado 4.2.1). Para superar estas limitaciones, se propone agrupar ambas fases en una misma etapa, que es la segunda etapa propuesta “Diseño del sistema”. A su vez, esta etapa se divide en 3 niveles de decisión, lo que presenta ciertas ventajas (subapartado 4.2.2). En cada nivel se estudian unas alternativas de diseño determinadas, de forma que se profundiza progresivamente en el diseño del sistema (subapartados 4.2.3, 4.2.4 y 4.2.5). Además, para pasar de un nivel al siguiente se fija parte de la solución, de modo que decisiones posteriores no pueden modificar las decisiones ya tomadas (subapartado 4.2.6).

### **4.2.1. Limitaciones de considerar dos fases separadas para la generación y selección de alternativas**

Inicialmente se consideraron dos fases independientes y sucesivas para la generación y selección de alternativas, tal y como se hace habitualmente en la literatura. Este trabajo permitió identificar los inconvenientes y limitaciones que se exponen a continuación.

#### **4.2.1.1. Generación de alternativas**

En la fase de generación de alternativas se propusieron diferentes consideraciones técnicas y sociales que se incluían (o no) en cada alternativa generada, de forma que las soluciones se adaptaban (o no) a unas u otras características socioeconómicas de la comunidad a electrificar. Para determinar qué consideraciones estudiar, se consultó a varias ONGs especialistas en electrificación rural: SP, ISF, GE, CINER (Bolivia), Mosoj Causay (Bolivia) y Practical Action (Nepal). En resumen se identificó que, al diseñar un proyecto, los aspectos determinantes son:

- Los usos energéticos cubiertos. Cubrir una cantidad básica de electricidad y estudiar incrementar dicha cantidad para favorecer el desarrollo de actividades productivas.
- La configuración de los sistemas de electrificación. Analizar un equilibrio entre la cantidad, tamaño y alcance de las microrredes, y el posible incremento de coste.
- La cantidad y tipología de los equipos de generación. Buscar la máxima seguridad y fiabilidad en la generación frente a la falta de recursos energéticos o las averías.



Para cada una de estas consideraciones de diseño, el decisor podía proponer el estudio de distintos valores, por ejemplo, diferentes demandas de energía. Al combinar todos los posibles valores de cada aspecto a estudiar, la cantidad de alternativas generadas simultáneamente podía llegar a ser muy grande y, así, inabordable para su análisis. Si, por ejemplo, se proponía estudiar 10 demandas de electricidad, 10 configuraciones del sistema y 10 tipologías de los equipos de generación (valores realistas), se obtenían 1000 alternativas de electrificación diferentes a analizar de forma simultánea. Además de la gran cantidad de alternativas, se observaron otras limitaciones y problemas:

- Definir unos valores de estudio para cada una de las consideraciones de diseño, en unos casos resultaba sencillo, pero en otros la complejidad confundía al decisor. Por ejemplo, definir un valor de demanda eléctrica era factible con la evaluación socioeconómica, pero concretar una configuración del sistema sin tener orientación de una posible solución de electrificación (por ejemplo, un número máximo de microrredes), podía no resultar evidente.
- Al combinar entre sí todos los valores de todas las consideraciones de diseño propuestas, en ocasiones se generaban diseños de electrificación poco realistas, sobre todo debido a la existencia de ciertas limitaciones en el problema a resolver. Por ejemplo, una combinación concreta de valores para cada consideración podía conducir a una solución con un coste excesivamente elevado.
- Dado que todas las alternativas se generaban de forma simultánea, si el decisor observaba que las soluciones se alejaban de sus preferencias y, consecuentemente, quería proponer nuevos valores para las consideraciones estudiadas, era necesario reiniciar todo el proceso de diseño desde el principio.

#### **4.2.1.2. Selección de alternativas**

En cuanto a la fase de selección de alternativas, el autor de esta tesis determinó 14 criterios de evaluación, mediante la consulta a distintos expertos técnicos y sociólogos, de las ONGs SP e ISF. Estos criterios se agruparon en dos categorías, sociales y técnicos, tal y como se refleja en la Tabla 4.1.

En el momento de seleccionar una alternativa entre las generadas en la fase anterior, ésta debía ser la más adecuada respecto al conjunto de los 14 criterios. Para facilitar esta selección, existen métodos de ayuda a la toma de decisiones que se han presentado en el capítulo 3. Sin embargo, además de las limitaciones propias de cada técnica, en unas pruebas realizadas en varias comunidades reales se observó que:

- El decisor se enfrentaba a dos dilemas en el momento de ponderar entre sí los criterios: por una parte, los criterios evaluaban aspectos de importancia muy distinta y no siempre quedaba reflejada la opinión del decisor; por otra, unos criterios eran cualitativos y otros cuantitativos. En consecuencia, el decisor a menudo acababa confundido y la ponderación no era consistente.

- El hecho de comparar directamente un número tan elevado de alternativas propiciaba que se mezclaran alternativas muy diferentes entre sí. Esto complicaba el proceso de decisión y la solución seleccionada no siempre se ajustaba a las preferencias del decisor. Además, como se ha comentado, muchos métodos de ayuda a la toma de decisiones presentan ciertas limitaciones al trabajar con muchas alternativas y criterios simultáneamente [Romero, 1993].

**Tabla 4.1 – Criterios para la selección de alternativas al considerar dos fases separadas para la generación y selección de alternativas**

<b>Criterios sociales</b>	
<b>Facilidad de gestión</b>	Facilidad de gestión del sistema, tanto en el seno de las viviendas, como en la interacción entre usuarios.
<b>Equidad</b>	Igualdad en la cantidad de energía suministrada a cada usuario y cantidad de usuarios beneficiados.
<b>Económico</b>	Esfuerzo de pago que supone la tarifa en comparación con los ingresos y el monto anteriormente destinado a suministro energético (velas, pilas, etc.).
<b>Beneficios domiciliarios</b>	Mejoras en la calidad de vida de los domicilios gracias al acceso a la iluminación, las telecomunicaciones y la posibilidad de generar pequeños ingresos como la elaboración nocturna de artesanías.
<b>Servicios comunitarios</b>	Energía en la escuela, el centro de salud o los centros comunitarios.
<b>Usos productivos</b>	Generación de puestos de trabajo locales gracias al desarrollo de actividades productivas: restaurantes, procesado lechero, etc.
<b>Impactos sobre los recursos locales</b>	Ocupación del suelo por equipos como aerogeneradores, baterías, etc.
<b>Criterios técnicos</b>	
<b>Económico</b>	Coste de la inversión inicial del sistema.
<b>Cantidad de suministro</b>	Cantidad de energía y potencia suministradas a cada familia.
<b>Continuidad del recurso</b>	Fiabilidad del recurso energético utilizado (eólico, solar o una combinación de ambos) y días de autonomía cubiertos con las baterías.
<b>Flexibilidad</b>	Posibilidad de ampliar el sistema añadiendo nuevos usuarios e incrementando puntualmente el consumo por motivo de días especiales.
<b>Repuestos locales</b>	Asistencia en pequeñas y grandes averías en los equipos desde la propia comunidad o el centro poblado más cercano.
<b>Fabricación local</b>	Fabricación e instalación de equipos y componentes a nivel local.
<b>Seguridad</b>	Riesgo de fallos en los equipos por culpa de averías.

#### 4.2.2. División de la generación y selección de alternativas

Para superar las limitaciones antes expuestas, en esta tesis doctoral se propone unir en una misma etapa las fases naturales de generación y selección de alternativas, y, además, dividir ésta en 3 niveles de decisión según la importancia de las decisiones a adoptar. En cada nivel de la segunda etapa (véase Figura 4.1) hay un proceso de generación y selección de alternativas, y las características principales de la alternativa seleccionada en un nivel sirven como punto de partida para la generación de alternativas en el siguiente nivel. Con esta propuesta:

- En cada nivel de decisión se genera un número manejable de alternativas; se parte de la solución seleccionada en el nivel anterior, de modo que las alternativas ahora generadas reflejan más fidedignamente las preferencias del decisor; y los valores de demanda, gestión del sistema y seguridad del suministro que se propone estudiar son más ajustados, con lo que es más difícil generar soluciones poco realistas.

- En cada nivel se evalúan y comparan alternativas que proponen diferentes valores de estudio de los criterios, pero con una importancia similar. Además, se comparan entre sí únicamente 2 criterios de evaluación, lo que facilita su ponderación.

Con este propósito, se propone agrupar los 14 criterios de la Tabla 4.1 en 4 criterios genéricos que engloban, cada uno, varios subcriterios (el detalle de esta agrupación se explica en el capítulo 7). A su vez, cada uno de los subcriterios se asocia a un atributo, que define la característica de las soluciones que se estudia en cada caso. A los valores de los atributos (cuya combinación permite generar las alternativas) se les llama en adelante valores objetivo de los atributos. Por ejemplo, dentro del criterio “Coste” se encuentra el subcriterio “Energía” que tiene asociado el atributo “Energía demandada por cada punto de consumo”.

- El criterio “Coste” de la inversión inicial tiene como subcriterio él mismo, e indica el coste de cada alternativa generada.
- El criterio “Demanda” se divide en 3 subcriterios: energía, potencia y autonomía. Cada uno de ellos indica, respectivamente, la cantidad de energía, la cantidad de potencia y la autonomía con que se suministra la electricidad a los usuarios.
- El criterio “Gestión del sistema” indica el modo en que se organiza la comunidad entorno a la electrificación, a lo largo de la vida útil del proyecto. Este criterio depende de la configuración de la distribución eléctrica y de la tarifa de pago, y está subordinado a las características sociales de cada comunidad. Los subcriterios son la cantidad, tamaño y alcance de las microrredes, así como la instalación de medidores.
- El criterio “Seguridad del suministro” indica la continuidad del suministro eléctrico frente a la falta de recursos energéticos o las averías en los equipos. Para ello, el estudio se centra en los equipos de generación, tanto en su cantidad como en su tipología. Los subcriterios son el porcentaje de generación solar, la cantidad de equipos de generación y la energía suministrada a usuarios individuales.

Una vez agrupados los 14 criterios identificados en 4 criterios genéricos, cabe comentar que éstos no se consideran simultáneamente, sino por niveles de decisión. Para esta división en 3 niveles de decisión se ha tomado en cuenta la relevancia de cada criterio (y de sus respectivos subcriterios) sobre las soluciones de electrificación:

- De entre los 4 criterios genéricos, el coste es el único que se contrapone a los demás. Es decir, mientras que se desea minimizar el coste, se persigue maximizar la demanda, la gestión del sistema y la seguridad del suministro. Además, el coste es un elemento muy limitante en zonas rurales de países en desarrollo. En consecuencia, este criterio se tiene en cuenta en los 3 niveles de decisión y, para cada alternativa de cada nivel de decisión, se calcula la solución de mínimo coste.

- La demanda es un aspecto fundamental en el diseño de un sistema. Dos demandas diferentes pueden conducir a dos soluciones de electrificación muy distintas, y si en algún momento se desea modificar la demanda, puede ser necesario replantear el diseño por completo. En general, a mayor demanda y dadas las economías de escala, la extensión de las microrredes es rentable para mayores distancias entre puntos de consumo. Asimismo, satisfacer una cantidad u otra de demanda implica poder cubrir unas u otras necesidades energéticas, de modo que la gestión del sistema cambia considerablemente. Además, con distintas demandas las necesidades de los equipos de generación cambian completamente, de modo que también varía la seguridad del suministro. La demanda es, por tanto, un criterio con gran influencia sobre los demás y, por ello, se estudia en el primer nivel de decisión.
- La gestión del sistema de electrificación es un aspecto con una influencia que se puede considerar media sobre el diseño de las soluciones. Si se desea modificar la gestión, se puede cambiar la configuración del sistema dentro de su vida útil, aunque ello requiere de un considerable esfuerzo económico, técnico y social. Por otra parte, la gestión está directamente relacionada con la cantidad, tamaño y alcance de las microrredes. Estudiar estas características del sistema en el primer nivel de decisión puede tener poco sentido puesto que, sin una ligera idea de la posible solución, es difícil proponer diversos valores objetivo para los atributos correspondientes. Sin embargo, su estudio adquiere mayor sentido cuando se ha determinado la demanda a satisfacer y, por tanto, se tiene una primera aproximación de las posibles agrupaciones entre usuarios.
- La seguridad del suministro es un aspecto con una influencia limitada sobre las soluciones de electrificación. Este criterio se relaciona con los equipos de generación, y se trata de estudiar modificaciones factibles con pequeñas inversiones económicas adicionales. Proponer cambios en la tipología de los equipos de la instalación cobra sentido cuando ya se ha determinado la configuración del sistema; por ejemplo, añadir una pequeña placa fotovoltaica adicional como soporte a la generación en un punto. Así, concretadas las microrredes y los puntos individuales de distribución, se puede estudiar la cantidad y tipología de los equipos de generación a instalar.

La estructura de criterios y subcriterios resultante de la división de la segunda etapa de la metodología en 3 niveles se muestra en la Tabla 4.3. Nótese que la nomenclatura utilizada en esta tabla se usará en el resto del documento, para identificar con claridad cada criterio, subcriterio y atributo.

Para finalizar, gracias a la colaboración con distintas ONGs especialistas en electrificación rural, se ha podido validar y contrastar esta propuesta de división en niveles con distintos expertos. Éstos han considerado que el proceso propuesto es lógico y coherente y que, con esta división de la segunda etapa en 3 niveles de decisión, se consiguen las siguientes ventajas:

Tabla 4.3 – Estructura de criterios, subcriterios y atributos para cada nivel de decisión

Criterio		Subcriterio		Atributo	
<b>Primer nivel de decisión</b>					
CP <sub>1</sub>	Coste	-	-	-	-
CP <sub>2</sub>	Demanda	CP <sub>2-1</sub>	Energía	AP <sub>2</sub>	Consumo de energía de cada punto de consumo.
		CP <sub>2-2</sub>	Potencia	AP <sub>3</sub>	Consumo de potencia de cada punto de consumo.
		CP <sub>2-3</sub>	Autonomía	AP <sub>4</sub>	Autonomía requerida.
<b>Segundo nivel de decisión</b>					
CS <sub>1</sub>	Coste	-	-	-	-
CS <sub>2</sub>	Facilidad de gestión	CS <sub>2-1</sub>	Cantidad microrredes	AS <sub>2</sub>	Número máximo de microrredes.
		CS <sub>2-2</sub>	Tamaño microrredes	AS <sub>3</sub>	Número mínimo de usuarios por microrred.
		CS <sub>2-3</sub>	Alcance microrredes	AS <sub>4</sub>	Número máximo de usuarios individuales.
		CS <sub>2-4</sub>	Instalación medidores	AS <sub>5</sub>	Medidores en todos los puntos o sólo en usuarios en microrred.
<b>Tercer nivel de decisión</b>					
CT <sub>1</sub>	Coste	-	-	-	-
CT <sub>2</sub>	Seguridad del suministro	CT <sub>2-1</sub>	Porcentaje de generación solar	AT <sub>2</sub>	Mínimo porcentaje de la energía generada con paneles en cada punto de generación.
		CT <sub>2-2</sub>	Cantidad de equipos de generación	AT <sub>3</sub>	Número mínimo de equipos de generación en cada punto de generación.
		CT <sub>2-3</sub>	Energía en usuarios individuales	AT <sub>4</sub>	Mayor porcentaje de energía en usuarios individuales frente a usuarios en microrred.

- Las decisiones se toman progresivamente, estudiando en profundidad un nivel antes de pasar al siguiente, en el que se establecen decisiones menos importantes. Los atributos analizados en el primer nivel son relativamente sencillos, y se pueden concretar unos valores objetivo a partir de una evaluación socioeconómica. Por su parte, la propuesta de valores objetivo para los atributos del segundo y tercer nivel puede ser mucho más acertada desde un primer momento, puesto que el decisor dispone de la información de las evaluaciones iniciales y, además, conoce la solución seleccionada en el nivel previo.
- Puesto que en cada nivel se examinan los valores objetivo de cada atributo de forma independiente, y éstos están ligados con aspectos concretos de las soluciones de electrificación, resulta sencillo tener en cuenta la existencia de limitaciones al problema (por ejemplo, un presupuesto máximo). Así, el estudio tiende a ser ajustado desde el primer momento, y se evita generar alternativas que no se corresponden con la realidad del problema o con las preferencias del decisor.
- A la hora de proponer unos valores objetivo para cada atributo, el decisor se puede centrar en cada uno de ellos por separado. Por ejemplo, se propone una cantidad mínima de microrredes o un tamaño máximo de las microrred, pero no una combinación de ambos. En cambio, al generar las alternativas se combinan entre sí todos los valores objetivo de los atributos, de modo que se estudian numerosas opciones de diseño sin un análisis de los atributos excesivamente complejo.

- Como se detalla en el apartado 4.3, si el decisor observa que las soluciones obtenidas con los valores objetivo propuestos para los atributos no se ajustan a sus preferencias, puede reiniciar el nivel en el que se encuentra o incluso ir al inicio de un nivel anterior. Esta característica de la metodología permite que en mitad del proceso de decisión se pueda intentar mejorar las decisiones tomadas.
- En la ponderación de criterios (que forma parte del proceso de selección de alternativas), nunca se manejan más de 4 criterios o subcriterios al mismo tiempo; de esta forma resulta sencillo obtener una ponderación consistente en que los distintos pesos se corresponden con las preferencias del decisor.

### 4.2.3. Nivel 1. Decisiones estratégicas. Coste vs Demanda

En el primer nivel de decisión, se enfrentan los criterios coste y demanda. En concreto, se estudia la influencia sobre el coste de distintos valores objetivo de los atributos de consumo de energía ( $AP_2$ ), potencia ( $AP_3$ ), y autonomía ( $AP_4$ ), puesto que:

- Al trabajar con equipos de características técnicas y económicas escalonadas puede darse el caso que, para un determinado valor objetivo de demanda, el coste por unidad de energía generada sea proporcionalmente más o menos elevado. Si, por ejemplo, se dispone de dos paneles fotovoltaicos, uno que produce 100Wh/día y otro que produce 200Wh/día, para una demanda de 105Wh/día será necesario el segundo panel y el coste será mucho mayor que si la demanda únicamente fuese de 100Wh/día (lo cual debe poder analizar el decisor).
- La existencia de economías de escala puede permitir que incrementos porcentuales de demanda conduzcan a menores incrementos porcentuales del coste. El aumento de demanda podría, por ejemplo, favorecer el desarrollo de actividades productivas con el exceso de energía, beneficiosas para el desarrollo económico de la población.

En el primer nivel de decisión, el decisor propone una cantidad básica e incrementos porcentuales de energía, potencia y autonomía. Además, en el caso de la energía y la potencia, se puede personalizar el incremento para cada punto de consumo. Con ello se generan las alternativas, combinando entre sí los diferentes valores objetivo de estos tres atributos. Gracias al carácter iterativo de la metodología (que se describe en el apartado 4.3), si el decisor observa que algunas soluciones tienen un coste demasiado elevado, puede cambiar el valor objetivo de los atributos y el coste cambiará consecuentemente.

En el primer nivel de decisión se modifican notablemente las soluciones. Así, dos valores objetivo de los atributos de demanda suelen conducir a dos soluciones totalmente diferentes. En cierto modo, aquí se establecen las agrupaciones de usuarios que, por su distancia entre sí, se pueden unir mediante una microrred. En otras palabras, la demanda determina aproximadamente la distancia a partir de la cual resulta más barato extender las microrredes que electrificar individualmente.

#### 4.2.4. Nivel 2. Decisiones tácticas. Coste vs Gestión del sistema

En el segundo nivel de decisión, se enfrentan los criterios coste y gestión del sistema. En concreto, se estudia la influencia sobre el coste de modificar el valor objetivo de los atributos incluidos en el criterio gestión del sistema y, para ello, se considera:

- Las microrredes son configuraciones que requieren de coordinación y cooperación entre vecinos, que puede resultar compleja y requiere de numerosos esfuerzos por parte de la entidad promotora del proyecto y la propia comunidad. Si en una misma comunidad existen varias microrredes, se incrementa considerablemente el esfuerzo dedicado a la gestión del sistema. Para facilitar dicha gestión se desea controlar la cantidad de microrredes; en concreto, se propone limitar el número máximo de microrredes ( $AS_2$ ).
- Dedicar esfuerzos en la gestión de una microrred que, por su tamaño, no da servicio a un número suficiente de usuarios, puede encarecer, tanto social como económicamente, la gestión de los sistemas. Para optimizar los esfuerzos en gestión del sistema, se desea maximizar el tamaño de las microrredes. Específicamente, se propone estudiar acotar el número mínimo de usuarios por microrred ( $AS_3$ ).
- Las microrredes proporcionan ventajas sociales frente a los sistemas individuales. Para extender al máximo la electrificación mediante microrredes, se puede desear minimizar el número de usuarios individuales. Concretamente, se estudia establecer un número máximo de usuarios con electrificación individual ( $AS_4$ ).
- La instalación de medidores es un aspecto que afecta al modelo de gestión de los sistemas de electrificación. En esta tesis se propone estudiar el instalar un medidor en cada usuario, para controlar el consumo de todos ellos, o instalar un medidor sólo en usuarios de microrred (al ser los únicos que se deben coordinar entre sí), para ahorrar costes. En el primer caso se establece una tarifa de pago de acuerdo al consumo, y en el segundo caso la tarifa es única para usuarios sin medidor. Esta forma de proceder puede ocasionar conflictos entre usuarios, ya que puntos con diferente consumo pueden llegar a pagar la misma tarifa. Así, con objeto de facilitar la gestión del sistema, se desea maximizar la cantidad de medidores instalados para que todos los usuarios funcionen con una misma tarifa de pago ( $AS_5$ ).

En el segundo nivel de decisión se generan las alternativas de electrificación combinando entre sí todos los valores objetivo de los atributos aquí implicados. En este nivel se parte de la solución del primer nivel; y se pueden observar cambios considerables en la configuración de las soluciones como, por ejemplo, la extensión de un cable entre 2 microrredes (para formar una única microrred), la extensión de cables para incluir nuevos usuarios en microrredes existentes o la formación de nuevas microrredes.

### **4.2.5. Nivel 3. Decisiones operativas. Coste vs Seguridad del suministro**

En el tercer nivel de decisión, se enfrentan los criterios coste y seguridad del suministro. En concreto, se estudia la influencia sobre el coste de modificar el valor objetivo de los atributos incluidos en el criterio seguridad del suministro y, para ello, se considera:

- Para mejorar la seguridad del suministro frente a la variabilidad de los recursos energéticos, es necesario tener presente que el recurso solar es más regular que el eólico (capítulo 3). Por ello se desea maximizar el porcentaje de generación solar. En concreto, se propone imponer un porcentaje mínimo de energía generada con paneles fotovoltaicos en cada punto de generación ( $AT_2$ ). De esta forma, se asegura que, al menos, una parte de la energía se genere de forma relativamente regular y el resto con la combinación tecnológica más económica.
- Para mejorar la seguridad del suministro frente a averías en los equipos, se desea maximizar la cantidad de equipos de generación; para ello se estudia el imponer un número mínimo de equipos en cada punto de generación ( $AT_3$ ). De este modo, si un equipo se avería, los demás seguirán generando una proporción de la energía.
- Para compensar las ventajas de las microrredes frente a los sistemas individuales, se puede pensar en aumentar la energía suministrada a estos últimos. Concretamente, se analiza imponer un porcentaje de energía adicional en usuarios individuales ( $AT_4$ ). Así, estos usuarios podrán desarrollar actividades productivas que, con un sistema individual sin incremento energético puntual, no podrían realizar (mientras que los usuarios en microrred sí que pueden).

En el tercer nivel de decisión se generan las alternativas de electrificación combinando entre sí todos los valores objetivo de los atributos aquí implicados. En este nivel se parte de la solución del segundo nivel; y se pueden observar pequeños cambios en las soluciones, como la extensión de un cable para que un usuario se adhiera a una microrred o la instalación de un panel fotovoltaico adicional.

### **4.2.6. Cambio de nivel de decisión**

La estructura planteada en la segunda etapa de la metodología permite estudiar distintas alternativas de electrificación en paralelo. Es decir, al pasar de un nivel de decisión al siguiente, el decisor puede seleccionar y mantener una o varias alternativas. Si opta por más de una puede, posteriormente, tratarlas como si fueran problemas diferentes y acabar seleccionando únicamente una de ellas, o tratarlas como un mismo problema y, para ello, generar el conjunto global de alternativas uniendo los diferentes subconjuntos.



Por otro lado, para pasar de un nivel de decisión al siguiente se puede fijar parte de la solución seleccionada en el nivel precedente. En caso de mantener varias alternativas de un nivel, la propuesta de elementos a fijar puede ser la misma o no. Para decidir qué elementos fijar se tiene en cuenta que:

- Los elementos fijados deben impedir que decisiones de niveles anteriores (de mayor importancia) se vean alteradas por decisiones posteriores (de menor importancia).
- Fijar elementos de un nivel debe influir lo menos posible en las soluciones de niveles posteriores. En ocasiones, fijar ciertos elementos de la solución de un nivel puede conducir a que el estudio del valor objetivo de los atributos de niveles posteriores carezca de sentido.

En resumen, para pasar de un nivel de decisión al siguiente, el decisor determina los valores objetivo de los atributos que desea estudiar en el nivel posterior y, a partir de esta información, la metodología fija automáticamente parte de la solución del nivel previo. En concreto, primero se explica qué se fija al pasar del primer al segundo nivel y segundo se detalla qué se fija del segundo al tercer nivel.

Complementariamente, una vez fijada (de forma automática) parte de la solución, el decisor puede desfijar algunos de los elementos propuestos, o incluso fijar otros para encaminar los resultados hacia sus preferencias. Cabe resaltar que los elementos que el decisor propone fijar deben ser del mismo tipo que los fijados automáticamente; en otras palabras, si se trata, por ejemplo, con conductores sólo se podrá incidir sobre ellos. En caso contrario se perdería la coherencia en las decisiones, y ciertos elementos fijados podrían conducir a soluciones no factibles o condicionar excesivamente el coste de las soluciones obtenidas en los niveles posteriores.

#### **4.2.6.1. Elementos a fijar del primer al segundo nivel de decisión**

Al finalizar el primer nivel de decisión, el decisor propone unos valores objetivo de los atributos del segundo nivel. Seguidamente se fija de forma automática las agrupaciones de usuarios, es decir, la existencia de conductores entre puntos de consumo (al final del punto 4.2.6.1 se detalla qué agrupaciones de usuarios son fijadas). De esta forma:

- Las agrupaciones formadas en el primer nivel no se ven modificadas por las decisiones del segundo: dos puntos de consumo unidos seguirán unidos.
- Las decisiones que se toman en el segundo nivel no se ven condicionadas por los elementos fijados en el primero.
  - Si se impone un número máximo de microrredes ( $AS_2$ ), dos o más agrupaciones de usuarios ya fijadas se pueden unir entre sí formando una única microrred.

- Si se impone un número máximo de usuarios individuales ( $AS_4$ ), usuarios independientes pueden adherirse a microrredes existentes o incluso formar nuevas microrredes.
- Si se considera la instalación de medidores ( $AS_5$ ), el coste de electrificar individualmente frente a electrificar en microrred disminuye si estos dispositivos sólo se instalan en microrredes. Así, en función del coste, los usuarios individuales se adherirán (o no) a alguna microrred.
- Las decisiones que se toman en el tercer nivel no se ven condicionadas por los elementos fijados en el primero. Esto se debe a que las decisiones del tercer nivel actúan principalmente sobre los equipos de generación.

Puede presentarse un problema si se impone un número mínimo de usuarios por microrred ( $AS_3$ ). En este caso, una agrupación fijada en el primer nivel puede no tener un número suficiente de usuarios y, al extenderla para cumplir con la restricción  $AS_3$ , el coste puede aumentar de forma desproporcionada. En este caso, no se fija dicha agrupación.

En resumen, del primer al segundo nivel se fija automáticamente aquellas agrupaciones de usuarios con un tamaño suficiente, es decir, mayores o iguales al máximo tamaño mínimo que se estudia en el segundo nivel. A continuación, el decisor puede desfijar algunas de estas agrupaciones (o parte de ellas) o fijar nuevas agrupaciones.

#### **4.2.6.2. Elementos a fijar del segundo al tercer nivel de decisión**

En el segundo nivel de decisión se decide sobre la configuración del sistema. Al finalizar, el decisor propone unos valores objetivo para los atributos del tercer nivel. Seguidamente se fija de forma automática la configuración de todas las microrredes existentes, es decir, la existencia y dirección de los conductores existentes en las microrredes de la solución seleccionada. De esta forma:

- Las decisiones tomadas en el segundo nivel no se ven modificadas por las del tercero. Los cambios que se observan en el tercer nivel, relacionados con la configuración del sistema, se limitan a extender un cable de una microrred a un usuario individual. Esta situación puede suceder con cualquier valor de los atributos del tercer nivel, puesto que en todos los casos la electrificación individual tiende a verse perjudicada (el coste se incrementa) frente a las microrredes. En cualquier caso, la gestión del sistema puede verse favorecida (al aumentar el tamaño de alguna microrred) pero nunca perjudicada.
- Las decisiones que se toman en el tercer nivel no se ven condicionadas por los elementos fijados en el segundo.
  - Si se impone un mínimo porcentaje de la energía generada con paneles fotovoltaicos ( $AT_2$ ), algunos aerogeneradores se pueden sustituir por paneles.

- Si se impone un número mínimo de equipos de generación ( $AT_3$ ), los equipos existentes se pueden sustituir por otros de menor tamaño.
- Si se impone un mayor porcentaje de energía en usuarios individuales frente a usuarios en microrred ( $AT_4$ ), se puede aumentar la potencia de los equipos de generación de los puntos individuales o éstos se pueden unir a una microrred.

En resumen, del segundo al tercer nivel se fija automáticamente la configuración de las microrredes existentes. A continuación, el decisor puede desfijar algunas de estas microrredes (o parte de ellas) o fijar nuevas microrredes.

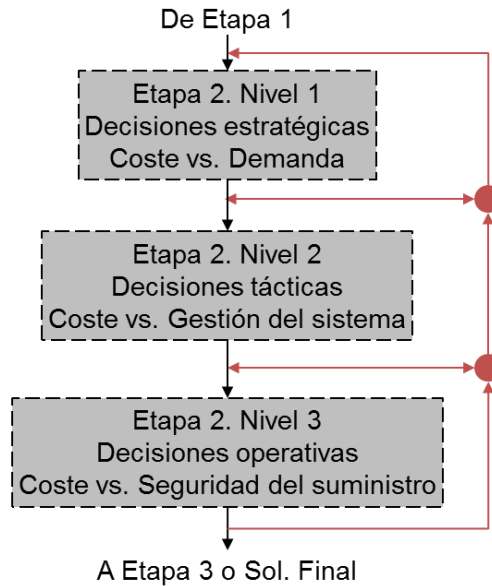
### **4.3. Procesos iterativos de toma de decisiones**

Tanto el análisis del valor objetivo de los atributos como la ponderación de criterios, son procesos complejos. Ambos se han simplificado con la división de la segunda etapa de la metodología en los 3 niveles de decisión que se han explicado anteriormente. Pese a ello, estos procedimientos de decisión siguen presentando cierta complejidad. Por este motivo la metodología propuesta cuenta con dos procesos iterativos que permiten ajustar las decisiones que se van tomando, a medida que se profundiza en el problema. En primer lugar se puede volver al principio de los diferentes niveles de decisión, para estudiar posibles cambios en los valores objetivo de los atributos (subapartado 4.3.1). En segundo lugar se permite ajustar el peso asociado a los criterios y subcriterios de cada nivel de decisión (subapartado 4.3.2).

#### **4.3.1. Estudio del valor objetivo de los atributos**

En ocasiones, el análisis del valor objetivo de los atributos no resulta evidente. Esto puede suceder cuando, tras analizar las soluciones obtenidas, el decisor determina que éstas no coinciden con sus preferencias. En otros casos, a partir de los resultados el decisor puede desear proponer nuevos valores. Así, por ejemplo, el decisor puede plantear unos valores iniciales de demanda y, al observar las soluciones del primer, segundo o tercer nivel, darse cuenta que el coste obtenido es mucho menor que el presupuesto disponible y, en consecuencia, decidir generar nuevas alternativas con mayores valores de demanda.

Para ello se ha desarrollado un proceso iterativo para el estudio del valor objetivo de los atributos (Figura 4.2), que engloba los 3 niveles de decisión. Este proceso permite ir del final de un nivel de decisión, al principio de cualquiera de los anteriores.



**Figura 4.2 – Proceso iterativo para el estudio del valor objetivo de los atributos**

Proponer unos valores objetivo genéricos para cada atributo de cada nivel, adaptados a cualquier zona rural de países en desarrollo, es una tarea prácticamente imposible. Los contextos y las características de cada comunidad son tan diferentes, que dichos valores podrían conducir a que ciertos decisores, con conocimientos limitados en el campo de la electrificación rural, fundamenten sus decisiones sobre ellos y realicen diseños poco adecuados o con graves errores. Para facilitar este análisis se propone estudiar el valor objetivo de los atributos en los 3 niveles de decisión, pero sin definir valores por defecto.

Cabe destacar que en el primer nivel de decisión, donde aún no se ha podido estudiar ninguna parte de la solución, es donde se pueden encontrar los mayores problemas. Sin embargo, se trata de establecer unas cantidades de demanda, valores que se pueden determinar a partir de las evaluaciones iniciales. En los niveles 2 y 3, se dispone de una idea de la solución y, por tanto, es más fácil intuir unos valores objetivo para los atributos de dichos niveles.

El proceso iterativo descrito permite volver en todo momento al principio de cualquiera de los niveles anteriores. Así, se puede dar el caso de un decisor que selecciona una alternativa del primer nivel y, al estudiar el segundo, observe que sus preferencias relacionadas con la configuración del sistema son incompatibles con las decisiones ya tomadas y fijadas en el primer nivel. En este caso el decisor tiene 2 opciones:

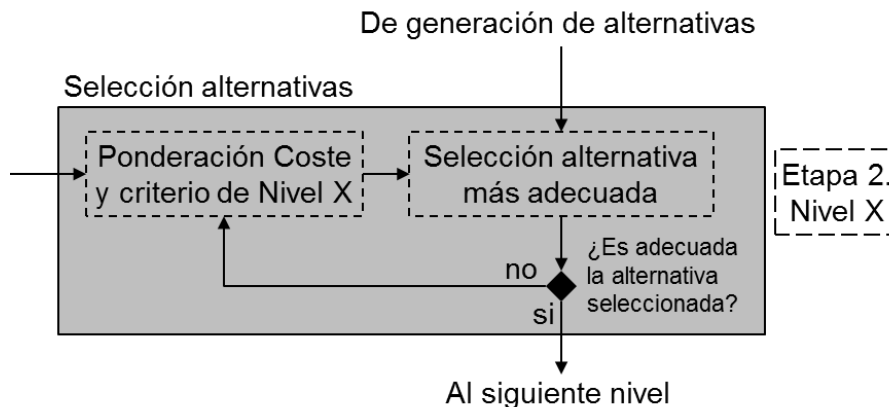
- Proponer nuevos valores objetivo de los atributos del segundo nivel, entendiendo que las decisiones del primer nivel son adecuadas y prioritarias.
- Proponer el estudio de nuevos valores objetivo de los atributos del primer nivel, mejor adaptados a las preferencias del decisor en el segundo nivel.

### 4.3.2. Análisis de la ponderación de criterios y subcriterios

Como se ha comentado anteriormente, en cada nivel de decisión de la segunda etapa de la metodología, se generan diversas alternativas de electrificación y después de clasificarlas se selecciona la más adecuada. Para realizar la clasificación es necesario ponderar los criterios y subcriterios de cada nivel.

Ponderar multitud de criterios puede resultar complejo, sobre todo si entre éstos hay, simultáneamente, criterios cuantitativos y cualitativos, y con distinto grado de importancia. Por este motivo se ha reducido la cantidad de criterios a utilizar, de forma que en cada nivel de decisión sólo se deben ponderar 2 criterios. De todas formas, para algunos criterios se deben ponderar entre sí diversos subcriterios, aunque en ningún caso se trabaja con más de 4 subcriterios al mismo tiempo.

Ponderar dos criterios entre sí implica asociar un valor a cada uno, representativo de su importancia respecto al otro. Así, si se considera que un criterio es el doble de importante que el otro, será lo mismo asignar un 2 al primero y un 1 al segundo, que  $2/3$  al primero y  $1/3$  al segundo. La pregunta realmente importante que el decisor debe responder es: ¿cuánto más importante es un criterio o subcriterio respecto a los demás?



**Figura 4.3 – Proceso iterativo de ponderación de criterios y subcriterios para el nivel de decisión X**

El proceso iterativo de ponderación de criterios (Figura 4.3) se inicia cuando se han generado las alternativas de electrificación. Unos pesos genéricos de los criterios y subcriterios a considerar (definidos en el capítulo 7) permiten establecer una primera clasificación de las alternativas. El decisor puede decidir cuántas alternativas desea visualizar y se le mostrarán las más adecuadas de la clasificación obtenida utilizando los pesos genéricos. Observando dichas alternativas, el decisor debe decidir entre:

- Aceptar alguna de las soluciones mostradas.
- Visualizar una mayor cantidad de alternativas de la clasificación, para identificar si alguna de las no mostradas puede resultarle interesante.

- Cambiar los pesos de los criterios y/o subcriterios porque las soluciones obtenidas no se adaptan a sus preferencias.

Si el decisor opta por la tercera opción, debe decidir qué nuevos pesos proponer tanto para los criterios como para los subcriterios entrando, de esta manera, en el proceso iterativo de ponderación de criterios y subcriterios.

Para tomar esta siempre difícil decisión, el decisor dispone de la siguiente información:

- Su propio conocimiento en proyectos similares anteriores.
- Una identificación de las características socioeconómicas, energéticas y técnicas de la comunidad, recopiladas a partir de las evaluaciones iniciales.
- En el caso de los niveles 2 y 3, la solución del nivel anterior y los elementos que de ella se han fijado.

Con esta información, se espera que decisores con amplia experiencia puedan determinar unos pesos para los criterios y subcriterios. Sin embargo, para decisores con una experiencia más limitada la interpretación de los pesos puede no ser evidente. Por ello se proponen unos pesos genéricos de partida (capítulo 7). Estos pesos permiten obtener una clasificación inicial que, posteriormente, el decisor analiza para concretar unos pesos que se ajusten más a sus preferencias. Así, por ejemplo, si identifica que las soluciones mejor clasificadas son muy costosas, deberá aumentar el peso del criterio coste y obtendrá una nueva clasificación donde las mejores alternativas tendrán un coste menor.

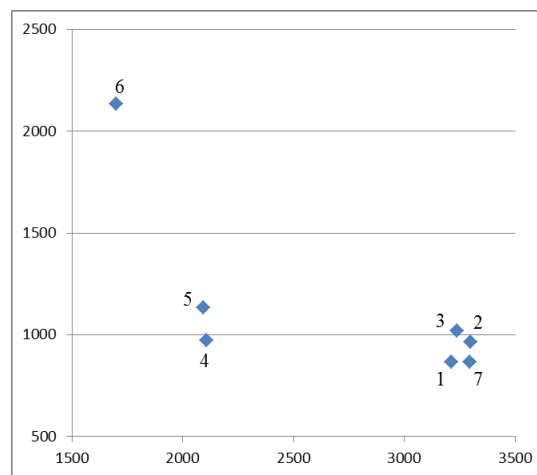
## 4.4. Ejemplo de aplicación de la metodología

Con objeto de ilustrar el funcionamiento de la metodología de diseño desarrollada en esta tesis, a continuación se expone un ejemplo de aplicación a una comunidad ficticia. Cabe recordar que falta presentar el detalle de cómo generar las alternativas de electrificación, y cómo evaluar cada una para clasificarlas y seleccionar la más adecuada. Ambos pasos se explican detalladamente en los capítulos siguientes, pero antes se desea que el lector entienda el proceso global de la metodología.

### *Etapa 1. Evaluaciones iniciales*

Al iniciar el proceso de diseño del sistema de electrificación autónomo para esta comunidad, el decisor empieza por realizar la etapa 1 de evaluaciones iniciales. Ésta consiste en 3 evaluaciones que permiten caracterizar la comunidad a electrificar. A continuación se resumen los datos más importantes del estudio, a sabiendas que aunque han sido generados por el autor de esta tesis, se fundamentan en casos reales.

- Evaluación socioeconómica:
  - La comunidad consta de 7 puntos de consumo.
  - Los puntos de consumo son 6 viviendas (puntos 2 a 7) y un centro comunal (punto 1).
  - El propietario de la vivienda situada en el punto 7 no desea ser electrificado (lo cual permite eliminarlo del problema a resolver).
  - Se concretan las coordenadas de los puntos (Figura 4.4).
  - Se determina un consumo de 300Wh/día de energía y 200W de potencia en las viviendas, y de 600Wh/día de energía y 500W de potencia en el centro comunal.
  - Se comprueba que no existen conflictos entre vecinos, de modo que la electrificación mediante microrredes es viable.



**Figura 4.4 – Coordenadas de los puntos de consumo**

- Evaluación energética:
  - Se observa que ambas tecnologías, eólica y solar, son factibles, tanto desde el punto de vista de los recursos energéticos como de la aceptación social por parte de los futuros usuarios.
  - Se determina que son necesarios 2 días de autonomía de las baterías. Para ello se considera la variabilidad de los recursos y el hecho que no se prevé el desarrollo de actividades para las que sea vital un suministro energético constante.
  - Se toman los datos de irradiación solar para el peor mes del año, en la base de datos <http://www.tiendaelektron.com/software/hwo.exe>.
  - Se mide el viento en un punto de la comunidad a lo largo de 1 año, con un anemómetro. Con el programa WASP (descrito en detalle en el capítulo 5), se calcula el potencial eólico de cada punto para el peor mes del año y se obtiene el mapa del recurso eólico (Figura 4.5). Asimismo, con las curvas de potencia de los aerogeneradores disponibles, se calcula la energía generada con cada uno en cada punto de consumo a electrificar.

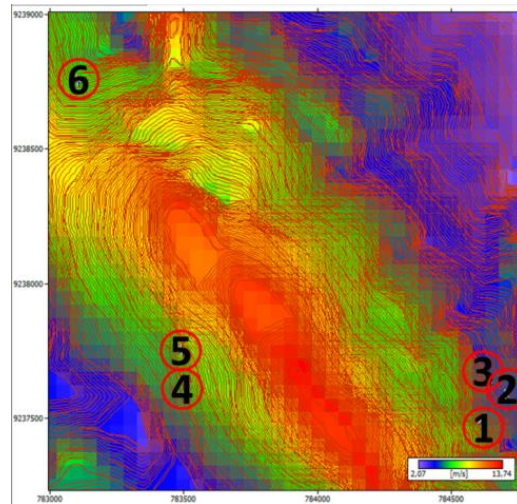


Figura 4.5 – Mapa del recurso eólico

- Evaluación técnica. Se analizan equipos reales disponibles en el mercado y se determinan sus principales características, que se resumen a continuación. En el anexo A.1 se puede encontrar un mayor detalle de estos datos.
  - Aerogeneradores (4 tipos). Potencia máx: 300 a 3500 W; coste: \$1139 a \$5645. Los reguladores eólicos se consideran integrados en los aerogeneradores.
  - Paneles (4 tipos). Potencia nominal: 50 a 150 W; coste: \$451 a \$1000.
  - Reguladores solares (4 tipos). Potencia máx: 50 a 200 W; coste: \$67 a \$125.
  - Baterías (4 tipos). Capacidad: 1500 a 3000 Wh/día; coste: \$225 a \$325; eficiencia: 85%; factor de descarga: 60%.
  - Inversores (5 tipos). Potencia máx: 300 a 3000 W; coste: \$377 a \$2300; eficiencia: 85%.
  - Conductores (3 tipos). Coste: \$4,94/m a \$5,79/m; resistencia: 2,60 a 0,16  $\Omega$ /km.

### ***Etapa 2. Diseño del sistema. Nivel 1. Decisiones estratégicas. Coste vs Demanda***

En el primer nivel de decisión de la etapa 2, se enfrentan los criterios coste y demanda. Para ello, en la evaluación socioeconómica se han determinado unos valores básicos de energía, potencia y autonomía. Además, a partir de los datos recopilados en la primera etapa y su propia experiencia, el decisor propone analizar:

- Incrementos del 25% simultáneamente en las demandas de energía y potencia ( $AP_2$  y  $AP_3$ ), hasta un 50%. De esta forma se estudian los siguientes tres escenarios: cubrir necesidades energéticas mínimas (demanda básica); favorecer actividades productivas domésticas (+25%); y favorecer actividades productivas comunitarias y ciertas comodidades domésticas (+50%).
- No variar los días de autonomía ( $AP_4$ ), al estimar que 2 días son suficientes.

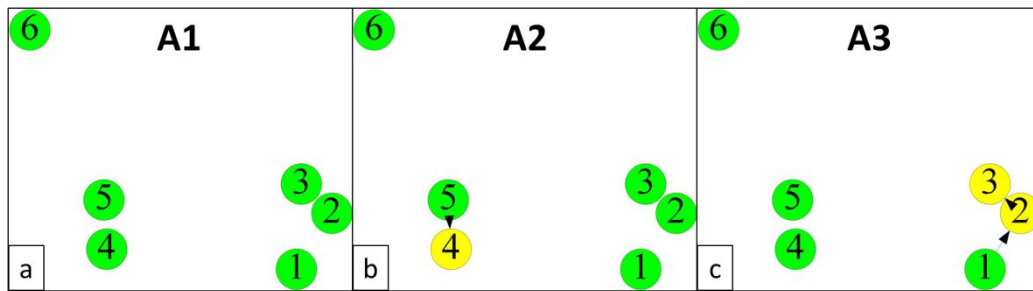


A partir de esta propuesta, se generan 3 alternativas de electrificación con los valores objetivo de los atributos indicados en la Tabla 4.4. También se expone el coste obtenido para cada alternativa con el modelo matemático que se describe en el capítulo 6.

**Tabla 4.4 – Especificaciones y coste de las alternativas A1, A2 y A3**

		A1		A2		A3	
		Punto 1	Otros puntos	Punto 1	Otros puntos	Punto 1	Otros puntos
Valor de los atributos	AP <sub>2</sub>	600	300	750	375	900	450
	AP <sub>3</sub>	500	200	625	250	750	300
	AP <sub>4</sub>	2		2		2	
Soluciones	Coste [\$]	10108		12033		12350	

La configuración de la distribución eléctrica de las alternativas se muestra en la Figura 4.6. Se indica en verde los puntos de generación y en amarillo los puntos abastecidos por alguna microrred. Se puede observar que en A1 se instalan sistemas individuales en todos los puntos de consumo, en A2 se forma una única microrred de 2 usuarios (los puntos 4 y 5) y 4 sistemas individuales, y en A3 se genera una microrred de 3 usuarios (los puntos 1, 2 y 3) y 3 sistemas individuales.



**Figura 4.6 – Configuración de las alternativas del primer nivel de decisión. En la imagen a, la alternativa A1; en la imagen b, A2; y en la imagen c, A3. Nótese que no se ha mantenido la escala.**

Una vez se han generado las alternativas, es necesario clasificarlas. Para ello se deben ponderar los criterios de evaluación: el coste ( $CP_1$ ) y la demanda ( $CP_2$ ). Además, dentro del criterio demanda, es necesario ponderar los subcriterios energía ( $CP_{2-1}$ ), potencia ( $CP_{2-2}$ ) y autonomía ( $CP_{2-3}$ ).

Supóngase que la metodología propone los pesos de los criterios y los subcriterios que se muestran en la Tabla 4.5. El decisor debe analizar si la clasificación obtenida coincide con sus preferencias y, en caso contrario, adaptar los pesos de acuerdo a ello.

**Tabla 4.5– Pesos genéricos para el primer nivel de decisión**

	Peso		Peso del subcriterio
CP <sub>1</sub>	0,67	-	-
CP <sub>2</sub>	0,33	CP <sub>2-1</sub>	0,34
		CP <sub>2-2</sub>	0,33
		CP <sub>2-3</sub>	0,33

Supóngase que la alternativa A1 es la mejor clasificada, seguida de A2 y A3; clasificación que se obtiene mediante un procedimiento de decisión multicriterio que utiliza la técnica de la programación compromiso y que se describe en el capítulo 7. Sin embargo, el decisor considera que esta clasificación no coincide con sus preferencias ni las de la comunidad. En concreto, determina que se favorece las alternativas más baratas, mientras que en las evaluaciones iniciales ha determinado que existe cierta flexibilidad en el presupuesto y la comunidad muestra gran interés en desarrollar actividades productivas. En consecuencia, resulta interesante favorecer alternativas con valores más elevados de demanda.

De esta forma el decisor opta por modificar los pesos: asignar la misma importancia a los criterios  $CP_1$  y  $CP_2$ ; y mantener el peso de los subcriterios (Tabla 4.6).

**Tabla 4.6– Pesos de la primera iteración (propuesta por el decisor) para el primer nivel de decisión**

	Peso		Peso del subcriterio
$CP_1$	0,5	-	-
$CP_2$	0,5	$CP_{2-1}$	0,34
		$CP_{2-2}$	0,33
		$CP_{2-3}$	0,33

Con los nuevos pesos supóngase que la alternativa más adecuada es A2, seguida de A1 y A3. En este momento el decisor selecciona A2 y pasa al siguiente nivel.

### ***Etapas 2. Diseño del sistema. Nivel 2. Decisiones tácticas. Coste vs Gestión del sistema***

En el segundo nivel de decisión de la segunda etapa, se enfrentan los criterios coste y gestión del sistema. Para ello, el decisor dispone de la información recogida en la primera etapa, sus propios conocimientos y la solución seleccionada en el primer nivel (Figura 4.6.b). Con toda esta información, el decisor propone analizar:

- Número máximo de microrredes ( $AS_2$ ). Al existir dos pequeñas agrupaciones de usuarios y un punto más aislado, parece interesante analizar el imponer un máximo de 2 microrredes. Por otra parte, trabajar con una única microrred puede facilitar los esfuerzos dedicados a la gestión del sistema, de modo que también resulta interesante estudiar un máximo de 1 microrred.
- Número mínimo de usuarios por microrred ( $AS_3$ ). Dado que existe una posible agrupación de 2 usuarios y otra de 3 usuarios, tiene sentido que el número mínimo de usuarios por microrred quede fijado en estos 2 valores.
- Número máximo de usuarios individuales ( $AS_4$ ). No se tienen preferencias en relación a este atributo.
- Medidores en todos los usuarios o sólo en microrredes ( $AS_5$ ). El decisor considera coherente estudiar este atributo en sus dos posibles valores objetivo para determinar su efecto sobre el coste de las soluciones.

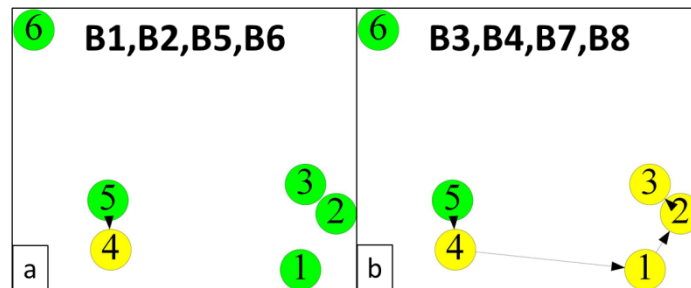
Como se ha comentado, al pasar del primer al segundo nivel se puede fijar de forma automática parte de la solución. En este caso, el decisor desea imponer un mínimo de 2 y otro de 3 usuarios por microrred. Así, se debería fijar los conductores de las microrredes con, al menos, 3 usuarios, pero ninguna iguala o supera dicho valor y, en consecuencia y para evitar incongruencias, no se fija de forma automática la existencia de ningún conductor. Sin embargo, el decisor considera que la buena relación entre los puntos 4 y 5 es muy interesante para fortalecer el posible desarrollo de actividades productivas y, por ello, decide fijar la existencia del conductor 4-5.

En la Tabla 4.7, se indican las especificaciones y el coste de las 8 alternativas que se generan al combinar los valores objetivo de los atributos propuestos por el decisor.

**Tabla 4.7 – Especificaciones y coste de las alternativas B1, B2, B3, B4, B5, B6, B7 y B8**

		B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8
Valor de los atributos	AS <sub>2</sub>	1	1	1	1	2	2	2	2
	AS <sub>3</sub>	2	2	3	3	2	2	3	3
	AS <sub>4</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-
	AS <sub>5</sub>	Todos	Mred	Todos	Mred	Todos	Mred	Todos	Mred
Soluciones	Coste [\$]	12033	11833	15518	15468	12033	11833	15518	15468

La configuración obtenida en las 8 alternativas generadas se muestra en la Figura 4.7. Para B1, B2, B5 y B6 se mantiene la misma configuración que en la alternativa A2 seleccionada en el primer nivel, con una microrred de 2 usuarios y el resto de puntos individuales. Para B3, B4, B7 y B8 se forma una microrred de 5 usuarios y 1 punto individual.



**Figura 4.7 – Configuración de las alternativas del segundo nivel de decisión**

Supóngase que la metodología propone los pesos de los criterios y subcriterios que se muestran en la Tabla 4.8, para el segundo nivel de decisión. Con estos valores se obtiene una clasificación de las alternativas.

**Tabla 4.8 – Pesos genéricos para el segundo nivel de decisión**

	Peso		Peso del subcriterio
CS <sub>1</sub>	0,33	-	-
CS <sub>2</sub>	0,67	CS <sub>2-1</sub>	0,3
		CS <sub>2-2</sub>	0,3
		CS <sub>2-3</sub>	0,3
		CS <sub>2-4</sub>	0,1

En este punto, cabe resaltar que las alternativas B5 a B8 no se muestran al decisor debido a que son repeticiones (en configuración y coste) de las alternativas B1 a B4, respectivamente.

Supóngase que la alternativa más adecuada es la B3, seguida de B4, a continuación B1 y por último B2. A partir de estos resultados, el decisor concluye que:

- La instalación de medidores no es una modificación significativa en relación con la configuración del sistema. Además, el incremento de coste que supone instalar medidores en todos los usuarios es perfectamente asumible. En consecuencia, se descartan las alternativas B2 y B4.
- Los pesos genéricos de los criterios y subcriterios se ajustan a las preferencias del decisor, de modo que no se modifican.
- Es interesante estudiar nuevas alternativas:
  - No fijar ningún conductor del primer al segundo nivel, puesto que éste podría condicionar el coste de las soluciones obtenidas.
  - El punto 6 no se electrifica en microrred en ningún caso. Sin embargo, puede ser interesante que todos los puntos se cubran con microrredes.
- Mantener la alternativa B3, la mejor clasificada previamente, para realizar la nueva clasificación.

De esta forma se mantiene la alternativa B3 y se generan 8 nuevas alternativas (B9 a B16). Las especificaciones y el coste de las 9 alternativas se muestran en la Tabla 4.9.

**Tabla 4.9 – Especificaciones y coste de las alternativas B3, B9, B10, B11, B12, B13, B14, B15 y B16**

		B3	B9	B10	B11	B12	B13	B14	B15	B16
<b>Valor de los atributos</b>	AS <sub>2</sub>	1	1	1	1	1	2	2	2	2
	AS <sub>3</sub>	3	2	2	3	3	2	2	3	3
	AS <sub>4</sub>	-	6	0	6	0	6	0	6	0
	AS <sub>5</sub>	Todos	Todos	Todos	Todos	Todos	Todos	Todos	Todos	Todos
<b>Soluciones</b>	<b>Coste [\$]</b>	15518	12033	19722	12320	19722	12033	16454	12320	16454

La configuración obtenida en las 9 alternativas se muestra en la Figura 4.8. La configuración de la alternativa B3 se ha comentado anteriormente. Para B9 y B13 se obtiene la misma configuración que para la alternativa A2. Para B10 y B12 se forma una única microrred con todos los puntos de consumo. Para B11 y B15 se crea un sistema individual para cada punto de consumo. Finalmente, para B14 y B16 se generan 2 microrredes de 3 usuarios cada una.

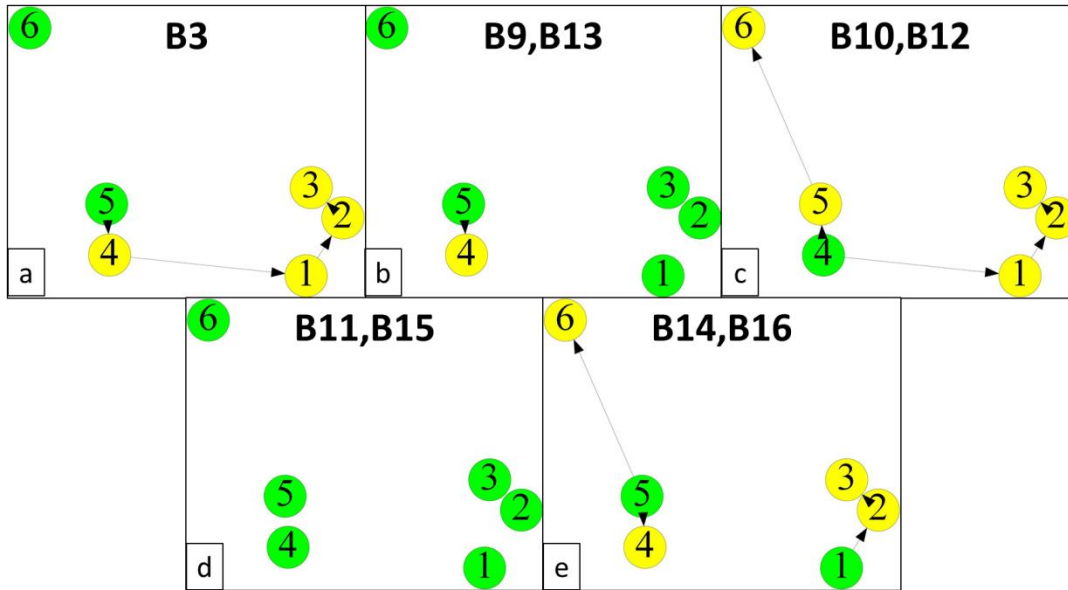


Figura 4.8 – Configuración de las nuevas alternativas del segundo nivel de decisión

Las alternativas B12, B13, B15 y B16 no se muestran al decisor debido a que son repeticiones (en configuración y coste) de las alternativas B9, B10, B11 y B14, respectivamente.

Con los pesos de la Tabla 4.8, se clasifican las alternativas de electrificación. Supóngase que la alternativa más adecuada es B3 seguida de B10. El decisor observa que B10 tiene un coste muy elevado, de modo que desea visualizar una alternativa adicional. Supóngase que ésta es B9 con un coste mucho menor. Puesto que B3 y B9 tienen una configuración muy diferente, el decisor opta por quedarse con ambas soluciones y pasar al siguiente nivel de decisión.

### ***Etapa 2. Diseño del sistema. Nivel 3. Decisiones operativas. Coste vs Seguridad del suministro***

En el tercer nivel de decisión de la etapa 2 se enfrentan los criterios coste y seguridad del suministro. A petición del decisor, este estudio se realiza por separado para las dos soluciones seleccionadas en el nivel anterior (B3 y B9), aunque se podría realizar conjuntamente, obteniendo así una única clasificación de alternativas en este nivel.

En primer lugar se trabaja a partir de la alternativa B3. En este caso, el decisor acepta la propuesta de fijar la existencia y dirección de todos los conductores de la solución, puesto que desea mantener la microrred formada y únicamente centrará el análisis sobre los equipos de generación. En lo que concierne al valor objetivo de los atributos, el decisor, a partir de la información de la primera etapa, sus conocimientos y la solución del nivel anterior, propone analizar:

- Mínimo porcentaje de la energía generada con paneles fotovoltaicos ( $AT_2$ ). Al haber poca variabilidad de recursos en la región, no le parece interesante su estudio.

- Número mínimo de equipos de generación por punto de generación ( $AT_3$ ). La comunidad está muy alejada de centros poblados mayores donde reparar los equipos. Por ello cobra sentido estudiar un mínimo de 2 equipos de generación y la opción sin mínimo.
- Mayor porcentaje de energía en usuarios individuales frente a usuarios en microrred ( $AT_4$ ). Puesto que hay un único punto individual, éste puede verse notablemente perjudicado en sus perspectivas de desarrollo frente al resto de usuarios. Por ello es interesante estudiar la posibilidad de imponer un 40% de energía adicional para este tipo de usuarios.

En la Tabla 4.10 se indican las especificaciones y el coste de las 4 alternativas que se generan al combinar los valores objetivo de los atributos propuestos por el decisor.

**Tabla 4.10 – Especificaciones y coste de las alternativas C1, C2, C3 y C4**

		C1	C2	C3	C4
Valor de los atributos	$AT_2$	-	-	-	-
	$AT_3$	0	0	2	2
	$AT_4$	0	40	0	40
Soluciones	Coste [\$]	15518	16048	16000	16443

La configuración obtenida en las 4 alternativas es igual a la configuración B3, seleccionada en el segundo nivel de decisión (Figura 4.8.a).

En este tercer nivel de decisión, las modificaciones afectan a los equipos de generación. En la Tabla 4.11 se detallan los equipos de generación utilizados en el punto 6, electrificado individualmente, y en el punto 4, punto de generación de la microrred que cubre los otros 5 puntos de consumo. Como se puede observar, imponer un 40% de energía adicional en el usuario individual 6, supone que al panel de 150W se le añade otro panel de 50W. En cambio, y sin incluir el 40% de energía adicional en el punto 6, al imponer un mínimo de 2 equipos de generación en vez de usar un panel de 150W se utiliza uno de 50W y otro de 75W; y en la microrred se pasa de un único aerogenerador de 1200W a 3 de 300W, encareciendo el coste de la solución.

**Tabla 4.11 – Equipos de generación de las alternativas C1, C2, C3 y C4**

		C1		C2		C3		C4	
		Pt. 6	Pt. 4	Pt. 6	Pt. 4	Pt. 6	Pt. 4	Pt. 6	Pt. 4
Aerogeneradores Potencia máx. [W]	300						3		3
	1200		1		1				
	1750								
	3500								
Paneles fotovoltaicos Potencia máx. [W]	50			1		1		1	
	75					1			
	100								
	150	1		1				1	

Supóngase que la metodología propone los pesos de los criterios y subcriterios que se muestran en la Tabla 4.12, para el tercer nivel de decisión. Con estos valores se obtiene una clasificación de las alternativas.

**Tabla 4.12 – Pesos genéricos para el tercer nivel de decisión**

	Peso		Peso del subcriterio
CT <sub>1</sub>	0,33	-	-
CT <sub>2</sub>	0,67	CT <sub>2-1</sub>	0,3
		CT <sub>2-2</sub>	0,2
		CT <sub>2-3</sub>	0,5

En este caso, el decisor únicamente desea quedarse con la alternativa mejor clasificada, puesto que está convencido de la pertinencia de los pesos y los valores objetivo de los atributos. Supóngase que ésta es la alternativa C2.

En segundo lugar se trabaja a partir de la alternativa B9. En este caso el decisor también acepta la propuesta de fijar la existencia y dirección del conductor 4-5. En cuanto al estudio alternativas de diseño, el decisor toma en cuenta las mismas consideraciones que en el caso anterior, salvo para el tercer atributo:

- Mayor porcentaje de energía en usuarios individuales frente a usuarios en microrred (AT<sub>4</sub>). Puesto que la mayoría de usuarios son individuales, existen pocas probabilidades de aparición de conflictos por motivo de diferencias en el consumo entre usuarios individuales y en microrred. En consecuencia no se estima oportuno estudiar variaciones en este atributo.

En la Tabla 4.13, se especifica el coste y las características de las 2 alternativas que se generan al combinar los valores objetivo de los atributos propuestos por el decisor.

**Tabla 4.13 – Especificaciones y coste de las alternativas C5 y C6**

		C5	C6
Valor de los atributos	AT <sub>2</sub>	-	-
	AT <sub>3</sub>	0	2
	AT <sub>4</sub>	-	-
Soluciones	Coste [\$]	12033	12812

La configuración obtenida en ambas alternativas es igual a la alternativa B9, seleccionada en el segundo nivel de decisión (Figura 4.8.b).

En la Tabla 4.14 se detallan los equipos de generación utilizados en el punto 1 (de mayor consumo), electrificado individualmente, los puntos 2, 3 y 6, electrificados individualmente, y el punto 5, de generación de la microrred. Como se puede observar, el atributo estudiado influye en los puntos 2, 3 y 6, en los que se sustituye el panel de 150W por uno de 50W y otro de 75W, y en el punto 5, en que se añade un panel de 50W al aerogenerador de 300W.

A partir de las soluciones obtenidas y con los pesos genéricos presentados en la Tabla 4.12, se obtiene una clasificación inicial. En este caso, el decisor únicamente desea quedarse con la alternativa mejor clasificada, al estar convencido de la pertinencia de los pesos y los valores objetivo de los atributos propuestos; supóngase que dicha alternativa es C6.

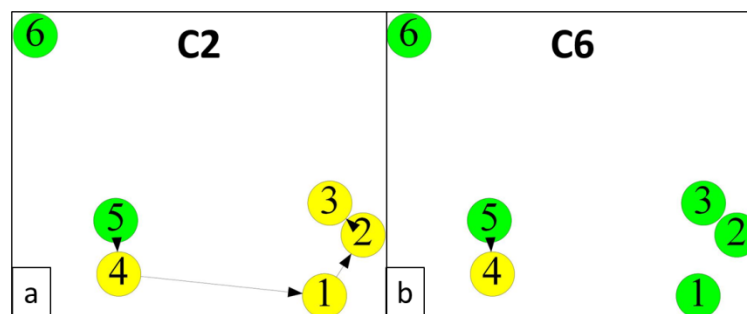
**Tabla 4.14 – Equipos de generación de las alternativas C5 y C6**

		C5			C6		
		Pt. 1	Pts. 2,3,6	Pt. 5	Pt. 1	Pts. 2,3,6	Pt. 5
<b>Aerogeneradores</b> Potencia máx. [W]	300	1		1	1		1
	1200						
	1750						
	3500						
<b>Paneles fotovoltaicos</b> Potencia máx. [W]	50	1			1	1	1
	75					1	
	100						
	150		1				

Llegados a este punto, el decisor ha seleccionado las alternativas C2 y C6, y debe decantarse por una sobre la base de características muy concretas de la comunidad. En la Tabla 4.15 se pueden observar las características de cada una de las dos alternativas y en la Figura 4.9 se observan sus configuraciones.

**Tabla 4.15 – Especificaciones y coste de las alternativas C2 y C6**

		C2		C6	
		Pt. 1	Otros	Pt. 1	Otros
<b>Primer nivel de decisión</b>	AP <sub>2</sub>	750	375	750	375
	AP <sub>3</sub>	625	250	625	250
	AP <sub>4</sub>	2		2	
<b>Segundo nivel de decisión</b>	AS <sub>2</sub>	1		1	
	AS <sub>3</sub>	3		2	
	AS <sub>4</sub>	-		6	
	AS <sub>5</sub>	Todos		Todos	
<b>Tercer nivel de decisión</b>	AT <sub>2</sub>	-		-	
	AT <sub>3</sub>	0		2	
	AT <sub>4</sub>	40		-	
<b>Solución</b>	<b>Coste [\$]</b>	16048		12812	



**Figura 4.9 – Configuración de las alternativas C2 y C6**

El decisor se decanta por C2, al considerar que la gran cantidad de usuarios conectados a alguna microrred puede conducir al desarrollo de actividades productivas a escala comunitaria, que fortalezcan el progreso económico de los futuros usuarios. Por otro lado, considera que el mayor coste de C2 se ve compensado por los beneficios que dicha alternativa conlleva.



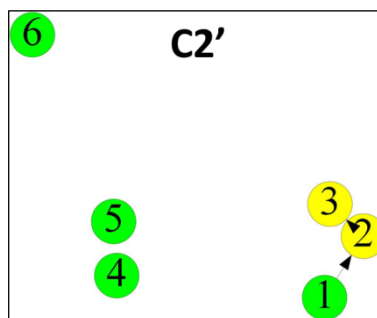
**Etapa 3. Mejora del resultado**

Para finalizar el proceso de diseño, se propone una tercera etapa para intentar mejorar el coste de la solución C2 seleccionada, manteniendo las decisiones tomadas (valores objetivo de los atributos) y fijando las partes de la solución que desee (en este caso el decisor no desea fijar ninguna parte de la solución C2 obtenida). Las especificaciones y el coste de la alternativa así generada, C2', se resumen en la Tabla 4.16.

**Tabla 4.16 – Especificaciones y coste de la alternativa C2' para la optimización del resultado**

		C2'	
		Pt. 1	Otros
Primer nivel de decisión	AP <sub>2</sub>	750	375
	AP <sub>3</sub>	625	250
	AP <sub>4</sub>	2	
Segundo nivel de decisión	AS <sub>2</sub>	1	
	AS <sub>3</sub>	3	
	AS <sub>4</sub>	-	
	AS <sub>5</sub>	Todos	
Tercer nivel de decisión	AT <sub>2</sub>	-	
	AT <sub>3</sub>	0	
	AT <sub>4</sub>	40	
Solución	Coste [\$]	12451	

La configuración de la nueva alternativa se muestra en la Figura 4.10. Se obtiene una microrred de 3 usuarios y 3 sistemas individuales, con un coste de \$12451, que contrasta con la solución anterior de 1 microrred de 5 usuarios y 1 punto individual, con un coste de \$16048. Se observa que hay una importante disminución del coste, del 22,4%, pero se ocasiona un cambio drástico en la configuración del sistema, que pasa de 1 microrred de 5 usuarios a 1 de 3 usuarios. Por este motivo, y a pesar del mayor coste, el decisor prefiere mantener la solución obtenida al finalizar la segunda etapa, C2, y descartar C2'.



**Figura 4.10 – Configuración de la alternativa C2'**

## 4.5. Resumen del proceso de diseño

En resumen, para diseñar el sistema de electrificación autónomo de una comunidad, el decisor debe seguir los pasos que se listan a continuación:

1. Evaluar la comunidad a nivel socioeconómico, energético y técnico, con objeto de determinar las características principales.
2. Realizar un estudio de la demanda y luego:
  - a. Proponer valores objetivo en los atributos: energía, potencia y autonomía.
  - b. Proponer unos pesos para los criterios coste y demanda, y para los subcriterios energía, demanda y autonomía.
  - c. Determinar si alguna/s de las alternativas generadas y clasificadas sobre la base de los pesos planteados, está de acuerdo con sus preferencias y, si es así, seleccionarla/s.
3. Efectuar un análisis de la gestión del sistema y luego:
  - a. Especificar si desea fijar alguna parte de la/s solución/es del nivel 1.
  - b. Proponer valores objetivo en los atributos: número máximo de microrredes, número mínimo de usuarios por microrred, número máximo de usuarios individuales e instalación de medidores en todos los usuarios o sólo en microrredes.
  - c. Proponer pesos para los criterios coste y gestión del sistema, y los subcriterios cantidad, tamaño y alcance de las microrredes, e instalación de medidores.
  - d. Determinar si alguna/s de las alternativas generadas y clasificadas sobre la base de los pesos planteados, está de acuerdo con sus preferencias y, si es así, seleccionarla/s.
4. Desarrollar un estudio de seguridad del suministro y luego:
  - a. Especificar si desea fijar alguna parte de la/s solución/es del nivel 2.
  - b. Proponer valores objetivo en los atributos: porcentaje mínimo de energía generada con paneles, el número mínimo de equipos de generación y el porcentaje de energía adicional en puntos individuales.
  - c. Proponer unos pesos para los criterios coste y seguridad del suministro, y para los subcriterios porcentaje de generación solar, cantidad de equipos de generación y energía en usuarios individuales.
  - d. Determinar si alguna/s de las alternativas generadas y clasificadas sobre la base de los pesos planteados, está de acuerdo con sus preferencias y, si es así, seleccionarla/s.
5. En caso de llegar al final de esta segunda etapa con varias alternativas, seleccionar la más adecuada a sus preferencias sobre la base de aspectos concretos y específicos de la comunidad.
6. Establecer si se desea que, manteniendo las características seleccionadas en la segunda etapa, se intente mejorar el coste de la solución seleccionada y si se desea fijar parte de la solución.

## 5. Evaluaciones iniciales

En este capítulo se presentan las evaluaciones iniciales de la comunidad a electrificar, que corresponden a la etapa 1 de la metodología desarrollada en esta tesis doctoral. En el primer apartado se presenta la evaluación socioeconómica y, para ello, se expone cómo evaluar una comunidad identificando las principales peculiaridades sociales y económicas, y cómo dimensionar la demanda eléctrica. En el segundo apartado se describe la evaluación de los recursos energéticos (viento y sol), a partir de los cuales se genera la electricidad. En concreto, se detallan sus características y se explica cómo realizar un estudio adecuado que, en el caso eólico, es mucho más complejo que en el caso solar. Finalmente se explica cómo realizar una evaluación técnica, que consiste en un estudio de mercado con el objetivo de determinar los equipos disponibles en la región de la comunidad a electrificar y sus características principales.

### 5.1. Evaluación socioeconómica

Con la evaluación socioeconómica se desea determinar las características sociales y económicas de la comunidad a electrificar, e identificar los aspectos que requieren más atención al realizar el diseño. Los elementos a estudiar son [VMEH, 2000; ESMAP, 2001; Ramírez & Mantilla, 2007; Copa & Vásquez, 2009; Ramírez & Mantilla, 2009]:

- Las características de la comunidad, como el emplazamiento, las vías de acceso, el clima, la orografía, la ubicación de las viviendas y sus principales características, y la posible existencia de servicios básicos (salud, educación, etc.).
- Las características de la población, como la cantidad de habitantes, la distribución por edades y por género, el grado de alfabetización, la riqueza de las familias y sus fuentes de ingresos, los puntos a electrificar, la aceptación de las tecnologías, los conflictos sociales y las organizaciones locales, así como las personas clave en dicha población.
- Las fuentes de energía previas a la electrificación (velas, pilas, queroseno, etc.). Asimismo, los posibles usos futuros de la electricidad, la compra de electrodomésticos, el desarrollo de actividades productivas, etc. Con esta información se puede determinar un valor de demanda de energía y de potencia.

Para poder conocer todas estas características, es necesario recopilar toda la información posible de la comunidad. Para ello existen herramientas y técnicas que facilitan un mayor contacto con los habitantes, buscando conocer las necesidades de todos ellos y evitando que la presión de unos pocos se sobreponga e inflencie a los demás.

Este apartado se divide en 4 subapartados. En el primero (subapartado 5.1.1) se explican las herramientas de recogida de información utilizadas usualmente. En los siguientes (subapartados 5.1.2, 5.1.3 y 5.1.4) se describe la información que se requiere recopilar y su utilidad: las características de la comunidad, de la población y el suministro energético.

### **5.1.1. Herramientas de recogida de información**

Identificar socioeconómicamente una comunidad es una tarea compleja que requiere del apoyo de sociólogos conocedores de la población. Cada comunidad es una realidad distinta y se recomienda adaptar la recogida de información a las características propias de cada caso, para obtener, así, información ajustada al contexto real [Gupta, 2003].

A continuación se presenta un ejemplo de procedimiento para la recogida de información [Ramírez & Mantilla, 2007; Ramírez & Mantilla, 2009]. Éste debe entenderse como un ejemplo y como un proceso que se deberá adaptar a cada comunidad a electrificar.

1. Recopilación de información secundaria. Revisión de documentos relacionados con la comunidad, pertenecientes a gobiernos centrales, regionales o locales, como por ejemplo los censos de población. Su disponibilidad y calidad depende, generalmente, de la región en la que se trabaja.
2. Preparación de instrumentos de recogida de información, como encuestas, entrevistas y grupos focales [Devadas, 2001; Camblong *et al.*, 2009].
  - a. Las encuestas permiten recoger información general de la comunidad y sus habitantes, de forma rápida y sencilla.
  - b. Las entrevistas, más personalizadas y preferiblemente realizadas a autoridades o representantes de organizaciones locales, permiten conocer detalles más específicos de la comunidad.
  - c. Los grupos focales a toda o a sectores de la comunidad, permiten identificar las personas clave, explicar en qué consiste el sistema a implementar e informar a las familias. Además, el ambiente grupal permite, muy a menudo, una mayor apertura que conduce a una mayor interacción con los futuros usuarios.
3. Trabajo de campo. Se aplican las herramientas de recogida de información y se organizan reuniones con autoridades para corroborar los datos obtenidos.
4. Trabajo de gabinete. Se analiza la información recogida y se extraen conclusiones necesarias para el posterior diseño del sistema, como la demanda de energía y potencia, los conflictos entre vecinos, etc.

## 5.1.2. Características de la comunidad

Cuando se propone electrificar una comunidad, es necesario identificar su emplazamiento. En el desarrollo del proyecto será necesario realizar numerosas visitas y, en consecuencia, el emplazamiento es un aspecto que influirá notablemente en los costes del transporte de personas y materiales. En particular es interesante estudiar las vías de acceso y su estado (asfalto, sendero transitable o no, etc.), así como los posibles medios de transporte y el tiempo y coste estimados con cada uno.

Un aspecto, a veces olvidado, consiste en analizar comunidades vecinas y sus posibles sistemas de electrificación. Si existen proyectos cercanos con energías renovables (en este caso eólica y solar) se puede facilitar que los habitantes a electrificar creen en dichas tecnologías e integren con mayor facilidad el sistema. Por el contrario, si dicho/s proyecto/s ha/n resultado un fracaso, los habitantes serán más reacios a la tecnología. Por otra parte, comunidades vecinas sin electrificar pueden suponer posibles futuras fuentes de ingresos, por ejemplo, cuando dichos habitantes acudan para recargar sus teléfonos a cambio de una pequeña cantidad económica [Camblong *et al.*, 2009].

Es también interesante estudiar el clima de la zona (precipitaciones, temperatura, etc.), puesto que es un elemento que puede jugar un papel fundamental en el deterioro de los equipos de la instalación eléctrica [Schäfer *et al.*, 2011]. Asimismo, la fauna y la flora son indicadores de la fertilidad de la región y pueden revelar la facilidad o dificultad para un posible desarrollo de actividades agropecuarias, con la introducción de la electricidad. Por su parte, la altura a la que se encuentra la comunidad y la orografía son elementos con influencia en los recursos energéticos viento y sol, así como el rendimiento de ciertos equipos (inversores, baterías, etc.).

Entrando en el detalle de la comunidad, es necesario determinar la cantidad y ubicación de viviendas, escuelas, centros médicos u otros puntos de consumo, e identificar sus características [Camblong *et al.*, 2009]. En las viviendas, por ejemplo, es importante conocer las habitaciones con que cuentan para dimensionar las instalaciones eléctricas internas. En las escuelas o centros de salud, es necesario analizar la población cubierta puesto que, en ocasiones, un mismo centro puede cubrir varias comunidades vecinas. Según la cantidad de personas cubiertas con dichos servicios, la demanda será una u otra. Si existen otros servicios básicos, también se deben tener presentes.

Esta identificación de la comunidad, también permite analizar posibles puntos de buen potencial eólico. En ocasiones existen puntos, como la cima de una montaña, que no son de consumo pero que pueden tener un buen potencial eólico. Éstos se deben ir listando para un posterior análisis energético. El estudio de los puntos de buen potencial eólico, como posibles puntos de generación, está relacionado con la posible existencia de robos de los equipos en la región. En caso de existir riesgo de robo, puede ser preferible descartar la opción de puntos alejados de generación, puesto que los equipos podrían ser robados con mayor facilidad al no haber una vivienda cercana desde la que vigilarlos.

### 5.1.3. Características de la población

Las encuestas, entrevistas personalizadas y grupos focales, deben permitir muestrear la población. Esto incluye una división por edades, género, grado de alfabetización, nivel de ingresos económicos, etc. De este modo se puede analizar la comunidad por sectores, estudiando las necesidades energéticas de cada sector, para que todos ellos queden satisfechos. Así es interesante, por ejemplo, realizar grupos focales con mujeres, con hombres, con niños, e identificar sus perspectivas con la electrificación.

Del mismo modo, también es necesario identificar las organizaciones locales, para no dificultar su funcionamiento y, en cambio, tratar de fortalecerlas con la electrificación. Un ejemplo puede ser promover la igualdad de género, prestando especial atención a las agrupaciones de mujeres. Este objetivo puede realizarse poniendo énfasis en responder a sus necesidades y dándoles oportunidad para participar en la gestión de los sistemas.

Complementariamente, los grupos focales permiten analizar posibles conflictos entre vecinos que pueden ser causantes de graves problemas en la comunidad. Éstos pueden ser manifiestos (ya aparecidos) o latentes (que pueden aparecer). Su naturaleza puede ser muy diversa, como herencias mal gestionadas, malas delimitaciones de los terrenos, etc. En cualquier caso es fundamental hacer un buen análisis para identificar todos los posibles conflictos, de modo que en el diseño del sistema se evite que usuarios enfrentados entre sí deban coordinarse para la electrificación.

Las entrevistas permiten identificar qué usuarios desean realmente la electricidad. Se puede dar el caso de usuarios no propietarios, es decir, arrendatarios de una vivienda por un periodo de tiempo a cambio de desarrollar las actividades agropecuarias de la propiedad. En estos casos, el propietario no puede asegurar que habrá alguien viviendo permanentemente en la vivienda y, entonces, puede no desear electrificarla al no poder cuidar los equipos adecuadamente. Esta situación también puede darse en el caso de usuarios que tienen una vivienda en la ciudad y otra en el campo, y sólo viven por temporadas. En cualquier caso, la comunidad debe decidir si estos usuarios se van a electrificar y, en caso afirmativo, si van a poder tener equipos de generación en su emplazamiento o sólo van a poder ser alimentados con microrredes. Este hecho es fundamental para el posterior mantenimiento de los equipos.

Por otra parte es interesante estudiar la predisposición de cada familia a colaborar en el proyecto. Frecuentemente, los presupuestos para este tipo de proyectos son limitados. Por ello se requiere de la participación de los futuros beneficiarios en las obras o en el transporte de materiales, así como su asistencia a las sesiones de formación. En caso de ser necesario, se puede establecer algún tipo de contrato para que cada familia aporte su parte proporcional de trabajo y, en caso contrario, imponer alguna sanción. Así se facilitará establecer las horas de trabajo que posibles nuevos usuarios deben a la comunidad para equiparse a los usuarios ya electrificados.

También es necesario determinar la procedencia de los ingresos de las familias. En zonas rurales de países en desarrollo, éstos tienden a ser de tipo agropecuario o comercio a pequeña escala. Es por tanto necesario identificar qué cultivos existen y de qué animales disponen, para estudiar la introducción de la energía en la cadena de valor de dichas actividades y, así, intentar favorecer el incremento de la productividad y los ingresos. Los pequeños negocios (comercios, restaurantes o actividades como el procesado lechero), gestionados comúnmente por agrupaciones de familias, pueden requerir de un mayor consumo eléctrico. De esta forma se deberá tener presente tanto los negocios existentes, como el posible futuro desarrollo de nuevas actividades.

A nivel doméstico, y según los ingresos, se pueden determinar las perspectivas futuras en cuanto a compra de electrodomésticos o desarrollo de microactividades productivas. Ambos factores son clave si se desea lograr que los usuarios queden satisfechos con la electricidad. El sistema debe responder a las necesidades reales y, además, es siempre necesaria una buena formación, que dé a conocer las posibilidades y limitaciones de los sistemas, para evitar posteriores insatisfacciones con el suministro energético [Anderson & Doig, 2000].

#### **5.1.4. Suministro energético**

Las fuentes energéticas utilizadas por los pobladores, previo a la electrificación, y el gasto que a ello le dedican, es un aspecto crucial para lograr que la electrificación suponga un beneficio y no una carga. Una infravaloración puede provocar el rechazo del sistema por parte de la población, al no disponer de la energía necesaria, mientras que una sobrevaloración puede encarecer innecesariamente dicho sistema. Así, es fundamental que la cantidad que los beneficiarios paguen por la electricidad (para repuestos, revisiones, etc.) esté de acuerdo con sus perspectivas y con lo que pagaban anteriormente por el suministro energético [Gupta, 2003; Schäfer *et al.*, 2011].

Los sistemas tradicionales de suministro energético suelen ser velas, pilas, baterías, lámparas a gas, etc. Es necesario determinar qué usuarios disponen de ellos y qué cantidad de dinero le dedican. Asimismo, es importante conocer los usos que le dan a esta energía: iluminación, telecomunicaciones (televisión, teléfonos móviles, etc.) y pequeñas actividades domésticas o productivas. El tiempo destinado a cada una de estas actividades es un aspecto que también influirá en la energía necesaria posteriormente.

Por otra parte es recomendable considerar las perspectivas de cada usuario con la electrificación [Schäfer *et al.*, 2011]. Por ejemplo, agrupaciones de pobladores pueden desear desarrollar actividades adicionales con la electrificación. La escuela puede desear ordenadores u otros equipos que acerquen las nuevas tecnologías a los más pequeños. Con esta información, se extraen conclusiones entorno a la demanda de energía y potencia para la que se va a diseñar el sistema [Camblong, *et al.*, 2009]. Esta demanda debe considerar el posible aumento del consumo a lo largo de la vida útil del proyecto, para asegurar que las perspectivas de futuro de los pobladores no se vean mermadas.

En la Tabla 5.1, se ilustra el modo en que se calcula la demanda diaria de energía y potencia para una vivienda tipo. En este ejemplo, se supone que la vivienda únicamente dispone de 3 bombillas, 1 radio, 2 teléfonos móviles, 1 televisor y 1 DVD.

**Tabla 5.1 – Ejemplo de cálculo de la demanda para una vivienda [adaptado de CEDECAP, 2006]**

Electrodoméstico	Cantidad	Potencia unitaria [W]	Potencia total [W]	Horas de uso diario [h/día]	Energía* [Wh/día]
Bombilla	3	15	45	4	180
Radio	1	20	20	5	100
Teléfono móvil	2	1	2	1	2
Televisor	1	50	50	1	50
DVD	1	40	40	0,1	4
<b>Total</b>		<b>126</b>	<b>157</b>		<b>336</b>

\*Energía [Wh/día] = Potencia [W] \* Horas de uso diario [h/día].

A partir de la Tabla 5.1 se puede observar que el consumo total de energía de esta supuesta vivienda tipo es de 336Wh/día, mientras que el de potencia es de 157W. Sin embargo, en lo que concierne a la potencia se debe destacar que, difícilmente, se utilizarán todos los electrodomésticos simultáneamente. En consecuencia, si por ejemplo se supone que en el seno de esta vivienda existe un factor de simultaneidad de 0,7 (es decir: nunca se utilizará simultáneamente más del 70% de la potencia), la potencia para la que se debe diseñar el sistema pasa a ser de 110W.

Cabe resaltar que es necesario realizar un análisis complementario para identificar los días de autonomía necesarios. Según si los usos finales son unos u otros, las necesidades de autonomía pueden variar. Por otra parte, el consumo de energía diario tiene una notable influencia en el tamaño de las baterías, que deberán asegurar dicho consumo por un periodo determinado de tiempo. Para poder determinar la capacidad de las baterías es necesario tener en cuenta la variabilidad de los recursos. Así, en regiones con gran variabilidad de los recursos energéticos, se debe prever una mayor capacidad de las baterías que compense los periodos sin generación. En cambio, en regiones de poca variabilidad, el tamaño de las baterías puede ser menor.

Para finalizar, cabe resaltar que la determinación de la demanda no es algo exacto. Lógicamente se trata de una estimación de toda la vida útil y, por tanto, su valor puede cambiar en función de muchos factores. Paralelamente, a causa de la discontinuidad del tamaño de los equipos y las economías de escala, puede suceder que por una mínima cantidad de demanda aumente el coste de los equipos de generación, o que un pequeño incremento de coste permita aumentar significativamente la energía disponible. Así, es recomendable estudiar el efecto sobre el coste de diferentes valores de demanda.



## 5.2. Evaluación energética

La evaluación de recursos energéticos permite determinar la cantidad de energía que se puede producir en cada punto con los equipos disponibles (eólicos y solares). A continuación se describe la evaluación del viento, muy compleja dada la variabilidad de este recurso en el tiempo y el territorio. Posteriormente se detalla la evaluación del sol, más sencilla para proyectos de electrificación en comunidades rurales aisladas.

### 5.2.1. Recurso eólico

El recurso eólico es la energía que proviene del viento que mueve las aspas del aerogenerador. Una de sus principales características es la variabilidad [Velo, 2005]:

- Variabilidad en el globo terrestre. Variabilidad en función de la región del planeta debido, entre otros factores, al desigual calentamiento de la Tierra.
- Variabilidad temporal. Variabilidad horaria, diaria o incluso estacional.
- Variabilidad superficial. Variabilidad debido a la orografía del territorio.
  - Variabilidad vertical. Variabilidad con la altura. Generalmente, a mayor altura más viento, debido al rozamiento con el suelo y la existencia de obstáculos.
  - Variabilidad horizontal. Variabilidad a lo largo de un territorio. Generalmente hay más viento en las cimas de las montañas que en los valles, incluso existe variabilidad en puntos cercanos entre sí como, por ejemplo, en una comunidad.

En consecuencia es necesario estudiar con detalle el recurso eólico, para poder determinar el potencial energético de cada punto de la comunidad a electrificar. Los anemómetros son unos dispositivos capaces de medir la velocidad y la dirección del viento. Aunque el coste de estos dispositivos no es excesivamente elevado, instalar un anemómetro en cada punto de la comunidad puede acabar resultando muy costoso. Como alternativa, existen técnicas que permiten medir el viento en un punto y, posteriormente, extrapolarlo a los de los alrededores [Landberg *et al.*, 2003].

En esta línea de trabajo, el primer paso consiste en medir el viento en un punto de la comunidad con un anemómetro. Mediante una tarjeta de adquisición de datos, se almacenan las mediciones de velocidad y dirección del viento. Distintos estudios han establecido que las medidas de viento se deben tomar cada 10 minutos, puesto que es el intervalo con el que se obtiene menor variabilidad [Velo, 2005]. Por otra parte, el anemómetro debe situarse a una altura similar a la de los aerogeneradores, puesto que la orografía del terreno provoca que el viento varíe con la altura. Estas variaciones pueden tener una influencia significativa, sobre todo en proyectos a pequeña escala [De Juana *et al.*, 2003]. La altura normalmente considerada en este tipo de proyectos, está entorno a los 10-15 m.

Por otra parte es recomendable que las mediciones se tomen en un periodo de un año. Aunque generalmente existe cierta variabilidad del viento entre años, se puede asumir que ésta es poco acentuada [Landberg *et al.*, 2003]. Una vez recogidos los datos de viento a lo largo de 1 año, se identifica el periodo temporal de menor potencial. Cuando se diseñe el sistema, se consideraran sólo los datos de dicho periodo; de esta forma, si se asegura cubrir la demanda en este periodo, también se cubrirá la del resto del año.

Cabe resaltar que, puesto que se trabaja con medias de periodos temporales (semanas, un mes, dos meses), no es posible garantizar el suministro en periodos más cortos que el considerado. Sin embargo, si el periodo de análisis es demasiado corto, el dimensionado de la instalación será muy costoso y el sistema puede quedar sobredimensionado gran parte del tiempo. De esta forma es necesario encontrar un buen compromiso entre el periodo de tiempo con que se trabaja y un dimensionado adecuado y no excesivamente costoso. En general, este periodo acostumbra a ser de un mes, aunque puede ampliarse o reducirse en función de las características de cada región y/o las necesidades de los expertos técnicos [Ranaboldo, 2009; Ferrer-Martí *et al.*, 2010].

Una vez se dispone del valor del periodo de menor potencial, los datos obtenidos en el punto de medición se pueden extrapolar al resto de la comunidad. Para ello existen programas informáticos especializados que extrapolan los datos de viento en el punto de medición a partir del mapa topográfico de la región. El programa permite encontrar, tanto el mapa de viento de toda la región, como la energía generada en cada punto que se especifique con los distintos tipos de aerogeneradores disponibles.

Entre los diferentes programas informáticos existentes para la extrapolación del viento, el autor de esta tesis propone utilizar WAsP (Wind Atlas Analysis and Application Program), debido a que es fácil de usar y presenta una buena fiabilidad en los resultados [Mortensen *et al.*, 1993]. En un estudio reciente, Ranaboldo [2009] ha identificado ciertas consideraciones a tener en cuenta para conseguir una mayor fiabilidad en los resultados obtenidos con WAsP, especialmente considerando las necesidades y características de los proyectos de electrificación rural en países en desarrollo:

- Extender el mapa topográfico un mínimo de 5 km desde el punto de medición, para considerar todos los obstáculos que pueden tener influencia.
- Definir con la mayor precisión posible el detalle topográfico, especialmente en las cercanías de los puntos a evaluar y muy en particular cerca del anemómetro.
- Interpolarse las curvas de nivel hasta obtener un detalle cada 2 m hasta 1 km del punto de medición y cada 10 m de 1 a 3 km del punto de medición.
- Ubicar el anemómetro en la parte alta de la comunidad y, preferiblemente, en zonas llanas y sin obstáculos (por ejemplo, campos de fútbol).

Para finalizar la evaluación del potencial energético con el recurso eólico, es necesario calcular la energía que produce un aerogenerador a partir del recurso disponible. De hecho, un aerogenerador produce energía a partir del viento, el cual provoca la rotación de las palas, transformando este movimiento giratorio en electricidad. La cantidad de energía transferida al rotor con el movimiento de las palas, depende de la densidad del aire, el área de barrido (diámetro de las palas) y la velocidad del viento. La ecuación 5.1 permite conocer la energía generada en función de las características de cada aerogenerador, y las condiciones de viento y densidad de aire [NYSERDA, 2010].

$$E = \int_0^t \frac{1}{2} \rho \cdot v_t^3 \cdot D^2 \cdot dt \quad (5.1)$$

donde  $E$  es la energía [Wh] generada,  $\rho$  es la densidad del aire [ $\text{kg/m}^3$ ] que varía en función de la altura según la ley barométrica,  $v_t$  es la velocidad del viento [m/s] a lo largo del tiempo,  $D$  es el diámetro [m] del círculo que forman las palas al rotar y  $t$  es el periodo [h] durante el que se realiza una medición.

Como se puede observar en la ecuación 5.1, el factor más importante al generar energía eléctrica es la velocidad del viento, puesto que su relación es cúbica. Además, es importante tener en cuenta que el potencial energético de un punto no sólo depende de la velocidad media del viento sino también de su distribución de velocidades: la energía producida por un aerogenerador se puede calcular a partir de su curva de potencia y la curva de velocidad del viento [Velo *et al.*, 2007]. Las curvas de potencia suelen venir dadas por el fabricante a 25°C y 0 m.s.n.m., y es necesaria su extrapolación para adecuarlas a las condiciones de trabajo.

## 5.2.2. Recurso solar

El recurso solar se define como la irradiación o insolación que incide en un punto o superficie a lo largo de un determinado periodo de tiempo. Este recurso se genera a partir del sol que es una fuente inagotable, que no genera residuos, distribuida por todo el planeta y que es especialmente intensa en regiones pobres. Además existe bastante literatura al respecto y, en consecuencia, se conoce con bastante precisión su variación en el tiempo y el territorio [Velo, 2005].

El recurso solar no es constante en el tiempo ni en el territorio, aunque su intermitencia entre días es, en general, mucho menor que en el caso eólico. El sol varía entre estaciones y según la región del globo terrestre. Además hay una variación a lo largo del día: durante la noche la radiación es nula, mientras que durante el día hay mayor radiación cuanto más cerca se está del mediodía. Por otro lado, en caso de tener un día nublado, la radiación disminuye. Por su parte, en el seno de una comunidad, el recurso solar no suele ser el mismo en todos los puntos. Así, por ejemplo, en la cima de la montaña o en el valle la irradiación no es la misma, pero estas variaciones siempre son mucho menores que los extremos a los que se puede llegar en el caso eólico.

Para conocer el recurso solar de una determinada zona existen numerosas bases de datos (RETscreen, mapas regionales, etc.), que compilan los datos de estaciones meteorológicas repartidas por el mundo y ponen al alcance de cualquier usuario los datos de sol [Velo, 2005]. Así, con los datos de radiación solar para cada punto de la comunidad, para cada mes del año, se selecciona el mes de menor recurso solar y se dimensiona el sistema para este mes, de modo que también se abastecerá el resto de meses. La energía solar se transforma en electricidad con los paneles fotovoltaicos, y la energía generada por un panel determinado depende de distintos datos meteorológicos:

- Irradiación [ $\text{kWh/m}^2$ ]. Energía solar que índice sobre un punto o una superficie.
- Hora Solar Pico (HSP) [h]. Horas diarias en que la irradiación es mayor que  $1000\text{W/m}^2$ .
- Temperatura [ $^{\circ}\text{C}$ ]. Temperatura media diaria de la zona de estudio.

Con estos datos, se puede calcular la energía generada por un panel fotovoltaico, según la ecuación 5.2 [CEDECAP, 2006].

$$E = P \cdot HSP \cdot \frac{\eta}{100} \quad (5.2)$$

donde  $E$  es la energía generada [Wh] por el panel,  $P$  es la potencia nominal [W] del panel y  $HSP$  son las horas solar pico [h]. Finalmente,  $\eta$  es el rendimiento [tanto por uno] del panel fotovoltaico y que depende de la temperatura ambiente y de la inclinación del panel [CEDECAP, 2006]. A menor temperatura ambiente y mayor perpendicularidad del panel respecto a los rayos solares, mayor es el rendimiento.

### 5.3. Evaluación técnica

La evaluación técnica consiste en recopilar información de los equipos y componentes disponibles en el mercado, así como sus características económicas y técnicas. La confección de este listado es el punto de partida de los decisores del proyecto, al enumerar los equipos que se podrán utilizar en el diseño.

Al decidir los equipos, es necesario tener presente que debe haber una coherencia entre los componentes por los que se ha optado. Por ejemplo, si se seleccionan paneles fotovoltaicos de 50 a 100 W, los reguladores solares deberán ser de una potencia máxima de un orden similar al de los paneles [CEDECAP, 2006]. De este modo se logrará un diseño más ajustado que permitirá optimizar los costes. En esta misma línea, también es interesante disponer de distintos tipos de cada componente: cuanto mayor sea la variedad, más combinaciones se podrán evaluar, y mejor y más ajustada será la solución.

Cuando se selecciona un equipo se deben tener en cuenta todas sus características. Por ejemplo, los inversores pueden ser de onda cuadrada, modificada o sinusoidal [De Juana *et al.*, 2003]. En función de ello, su calidad y su precio son muy diferentes. Este factor es por tanto muy influyente cuando se toma una decisión, y se recomienda consultar a un técnico especialista para optar por la opción más adecuada a las características del proyecto a diseñar. Así, por ejemplo, los inversores de onda cuadrada (más baratos) no suelen usarse para domicilios, los de onda modificada (coste medio) se utilizan para domicilios pero con limitaciones en las cargas a conectar y los de onda sinusoidal (más caros) se pueden instalar en cualquier situación. Con la evaluación socioeconómica se podrá conocer qué tipo de dispositivos instalar según el uso energético [CEDECAP, 2012].

También es importante tener en cuenta la fabricación de los equipos de la instalación. Es aconsejable que éstos estén fabricados con componentes que se puedan encontrar en la región cercana a la comunidad o, en su defecto, en el mismo país. De este modo se consigue reducir el coste de transporte y no se depende en tanta medida de posibles fluctuaciones del mercado mundial. Sin embargo, las tecnologías presentes en algunos países en desarrollo son limitadas y esto puede conllevar la compra de equipos defectuosos o que se averíen con facilidad. Por este motivo es imprescindible conocer al fabricante y asegurarse que se trata de alguien de confianza [CEDECAP, 2012].

Otro elemento clave al seleccionar los proveedores, es que éstos aseguren la disponibilidad y la reposición de piezas, así como un cierto mantenimiento de los equipos (o sustitución, llegado el caso), tanto en la instalación como en los primeros años [CEDECAP, 2006]. A menudo, en proyectos en zonas rurales de países en desarrollo el personal técnico cualificado es limitado y, por tanto, es necesario que el propio fabricante instale los equipos para asegurar un montaje adecuado. Simultáneamente, debe haber una garantía que no sólo permita reponerlos en caso de mal funcionamiento, sino que asegure su instalación en dichos casos.



## 6. Generación de alternativas de electrificación

En el capítulo 4 se ha presentado la estructura de la metodología de diseño. Como se ha expuesto, la segunda etapa se divide en 3 niveles de decisión, cada uno de los cuales tiene una misma estructura dividida en 2 pasos. Primero se generan diversas alternativas de electrificación, y posteriormente se selecciona la alternativa más adecuada. En este capítulo se entra en el detalle del paso de generación de alternativas (Figura 6.1), para la que se ha desarrollado un modelo matemático que permite resolver opciones de electrificación, con las siguientes tres consideraciones:

- En el primer nivel de decisión se enfrentan los criterios coste y demanda.
- En el segundo nivel de decisión se enfrentan los criterios coste y gestión del sistema.
- En el tercer nivel de decisión se enfrentan los criterios coste y seguridad del sistema.

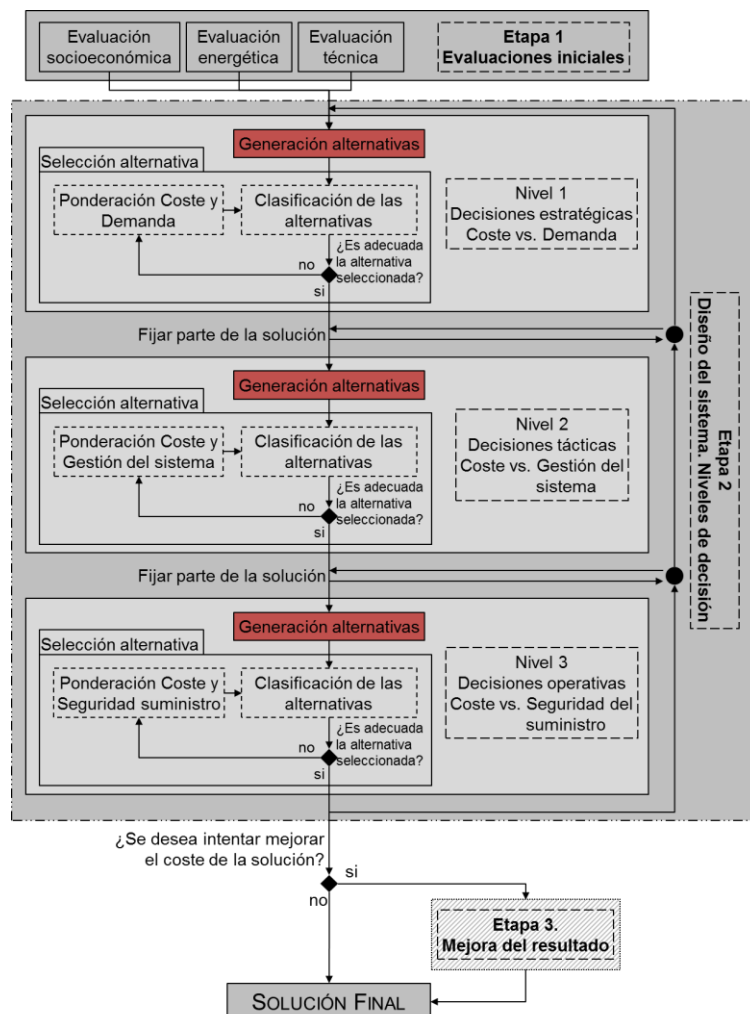


Figura 6.1 – La generación de alternativas en el esquema de la metodología

En el apartado 6.1 se presentan las consideraciones técnicas y sociales que caracterizan y condicionan la modelización del problema. En el apartado 6.2 se exponen 2 modelos matemáticos, basados en publicaciones encontradas en la literatura revisada, que permiten resolver las alternativas de electrificación. Mediante un experimento computacional, se determina cuál de los dos es el modelo más eficiente. En los siguientes apartados se desarrolla el modelo de programación lineal entera y mixta (PLEM) finalmente utilizado en esta tesis. Se trata de un modelo para el primer nivel de decisión (apartado 6.3), al que se añade un conjunto de restricciones según los atributos estudiados en el segundo (apartado 6.4) y en el tercer nivel (apartado 6.5). En el apartado 6.6 se propone un proceso de resolución del modelo, que permite obtener siempre una solución válida en un tiempo de cálculo razonable. Finalmente, en el apartado 6.7, se presenta un experimento computacional para validar el proceso de resolución.

## **6.1. Consideraciones técnicas y sociales de diseño**

Las consideraciones que se listan en este apartado son características de la realidad, tanto técnicas como sociales, a tener en cuenta cuando se diseña un sistema de electrificación. Estas consideraciones están relacionadas con: la generación eléctrica (subapartado 6.1.1), el sistema de acumulación y conversión de la energía (subapartado 6.1.2) y la distribución eléctrica (subapartado 6.1.3).

### **6.1.1. Generación eléctrica**

El primer aspecto a considerar al diseñar un sistema de electrificación autónomo, son las tecnologías a tener en cuenta. Esta tesis considera únicamente las tecnologías eólica y solar. Sin embargo, es posible que quien diseñe el proyecto estime oportuno utilizar solamente una de estas 2 tecnologías, así que debe especificar cuál de ellas utilizar.

Tanto la tecnología eólica como la solar son variables en el tiempo y el territorio. Así, como se ha explicado en el capítulo 5, distintos puntos de una misma comunidad pueden tener potenciales energéticos muy diferentes. En el caso eólico se puede medir el viento en un punto con un anemómetro y, mediante un programa informático, extrapolar el viento al resto de puntos de la comunidad. En el caso solar, un estudio reciente permite determinar que, en el seno de una comunidad, se puede aproximar la irradiación como constante en todos los puntos [Ramon-Marin *et al.*, 2010].

Por otra parte se debe establecer qué puntos pueden ser de generación. En ocasiones, es interesante que puntos alejados de la comunidad pero con un buen potencial eólico generen. Sin embargo, en las comunidades en que se ha trabajado existe el riesgo de que los equipos instalados en estos puntos sean robados y, por ello, no se consideran dichos puntos, y los equipos únicamente se pueden instalar en puntos de consumo.



El parámetro principal para dimensionar una instalación es la demanda de cada punto de consumo, determinada con la evaluación socioeconómica. Para ello es preciso que los equipos de generación instalados en un punto (eólicos, solares o una combinación de ambos) generen la energía suficiente para cubrir la demanda del propio punto, en el caso de sistemas individuales, o del propio punto y los que se abastecen, en el caso de microrredes. Además, por problemas de espacio, se debe tener en cuenta la posible limitación en el número de generadores instalados en un mismo punto [Velo, 2005].

Finalmente hay que tener presente que, puesto que sólo los puntos de consumo pueden ser de generación, se debe considerar en cada uno un pequeño espacio para resguardar los reguladores solares. Este mismo espacio sirve para las baterías e inversores, cuyas características técnicas se explican en el siguiente subapartado.

### **6.1.2. Acumulación y conversión de la energía**

La demanda de autonomía se considera idéntica para todos los puntos de la comunidad. Para cubrir esta demanda se utilizan las baterías, que se instalan únicamente en puntos de generación. Estos dispositivos deben tener capacidad suficiente como para cubrir la demanda de energía de los puntos que se abastecen, teniendo en cuenta los días de autonomía y el factor de descarga.

Sin embargo, puede ocurrir que algunos puntos especiales (por ejemplo, centros de salud) requieran de una mayor autonomía. Para estos casos se considera que un generador diésel complementa el abastecimiento energético. Así, cuando los equipos de generación funcionan, suministran directamente al punto; en cambio, cuando no funcionan, la demanda queda cubierta por las baterías y, sólo en caso que estos dispositivos estén vacíos, se pone en marcha el generador diésel. Esta peculiaridad, sin embargo, no condiciona el diseño del sistema al ser únicamente un complemento y no se tiene en cuenta [Henríquez, 2003].

Los inversores únicamente se instalan en los puntos de generación, de forma que la suma de las potencias de los inversores instalados en un punto debe ser mayor que la potencia demandada por el propio punto más los que se abastecen.

Es necesario tener en cuenta el factor de simultaneidad, según el cual no se conectan todas las cargas de un mismo punto de consumo simultáneamente. Su valor se determina a priori con el diagnóstico socioeconómico, como el cociente entre la suma de las potencias de todas las cargas que se pueden conectar simultáneamente y la suma de potencias de los equipos, y se incluye al calcular la demanda de potencia: en la potencia consumida por un punto se tiene en cuenta dicho factor que disminuye el valor total. El factor de simultaneidad también está relacionado con el hecho que no todos los usuarios utilizarán los mismos equipos al mismo tiempo. Sin embargo, al tratarse principalmente de sistemas domiciliarios (con unos hábitos de consumo similares), este factor no es considerado.

En las baterías y los inversores sólo se consideran pérdidas de energía [De Juana *et al.*, 2003]. Su efecto se traduce, a efectos prácticos, como un factor multiplicador de la demanda de energía de cada punto. Se consideran las mismas pérdidas independientemente del tipo de batería o de inversor y, para las baterías, también se considera el mismo factor de descarga en todos los tipos [CEDECAP, 2006].

### **6.1.3. Distribución eléctrica**

El tamaño (sección) del conductor instalado entre dos puntos se determina con la diferencia de tensión entre ambos puntos, que no puede superar la caída de tensión máxima definida por ley. También se debe considerar la intensidad máxima admisible que puede circular por el cable, para que éste no se queme, quedando inservible. Las pérdidas en estos dispositivos son de energía y de potencia, y se producen como consecuencia de la caída de tensión, únicamente en puntos de microrred [De Juana *et al.*, 2003]. De esta forma, se establece un valor máximo y mínimo para la tensión de cada punto, en función de la caída de tensión máxima admisible, limitando indirectamente las pérdidas.

Por otra parte, las conexiones domiciliarias no se tienen en cuenta. Esto se debe a que, de forma aproximada, se trata de un coste fijo que resulta casi idéntico para cualquier tipo de solución (microrred o no). En consecuencia, este coste se puede añadir al coste final de la solución obtenida, en caso que se estime oportuno.

La distribución eléctrica puede realizarse mediante sistemas individuales o microrredes radiales. Los primeros consisten en un único punto de consumo donde se instalan uno o varios equipos de generación, con sus correspondientes reguladores, para su propio suministro energético. Los segundos son similares, salvo que los equipos son de mayor tamaño puesto que no sólo se alimenta al propio punto sino que, mediante unos conductores, se extiende el suministro a varios puntos de consumo.

El modo en el que se extiende esta microrred es radial, es decir en forma de árbol, pudiendo tener cada punto varios conductores de salida pero un único de entrada y no pudiéndose unir ramas del árbol. Se instala un medidor en todos los puntos, encargado de la medición del consumo.

En comunidades rurales se tiende a distribuir en baja y/o media tensión. Sin embargo, la media tensión es más frecuente en proyectos con fuentes de generación muy alejadas como, por ejemplo, en el caso de sistemas hidroeléctricos, donde los saltos de agua desde donde generar se suelen encontrar alejados de la comunidad y, por tanto, las distancias a cubrir pueden ser considerables (hasta 10-15km). En el caso de sistemas híbridos eólico-solares, teniendo en cuenta la dispersión característica de las comunidades con que se trabaja y considerando la generación próxima al consumo, las distancias a cubrir con las microrredes de distribución son más bien cortas y, por tanto, no se considera incorporar la distribución a media tensión.

Entre las posibles cargas a conectar no se considera el uso de equipos como motores, que requieren la distribución en trifásica, de modo que únicamente se tiene en cuenta la distribución monofásica. Además, para el tipo de cargas consideradas, la potencia reactiva consumida es muy pequeña y, por ello, se aproxima a que ésta es nula y se considera un factor de potencia igual a 1 [CEDECAP, 2006]. Paralelamente, la mayoría de electrodomésticos necesitan corriente alterna para un adecuado funcionamiento y, por eso, se considera la distribución y alimentación a todos los puntos de consumo con corriente alterna, así como la necesidad de usar inversores. En resumen, en esta tesis se considera distribución eléctrica en baja tensión y en corriente alterna monofásica.

## 6.2. Modelización matemática y experimento preliminar

En el estado del arte del capítulo 3 se ha comentado que el desarrollo de algoritmos exactos es actualmente un área de investigación dinámica que permite resolver problemas clásicos de forma óptima cada vez más rápido [Fomin & Kratsch, 2010]. En concreto, la programación lineal entera ha ganado peso como una herramienta eficiente para llegar a soluciones óptimas o cercanas al óptimo [Atamtürk & Savelsbergh, 2005].

En esta dirección, esta tesis propone resolver las alternativas de electrificación utilizando un PLEM, que sigue el trabajo de Ferrer-Martí *et al.* [2011]. Esta publicación presenta un modelo de optimización que minimiza el coste de la inversión inicial, combina la distribución en microrred con sistemas individuales, considera el detalle del recurso eólico, y permite especificar la demanda de energía y potencia de cada punto de consumo, así como los días de autonomía.

El modelo de Ferrer-Martí *et al.* [2011] utiliza variables de asignación binarias para especificar la cantidad, localización y tamaño de los equipos de la instalación, y extiende un modelo previo [Capó, 2009] que usa variables enteras para el mismo propósito. A priori es difícil saber qué formulación es más eficiente (con variables binarias o enteras) y, por ello, se realiza un experimento computacional para identificar cuál obtiene mejores resultados.

En el primer subapartado (6.2.1) se expone el PLEM basado en el modelo de Capó [2009] que utiliza variables enteras. En el segundo (6.2.2) se presentan los cambios necesarios para sustituir las variables enteras por binarias, tal y como se propone en Ferrer-Martí *et al.* [2011]. Finalmente, en el subapartado (6.2.3) se comenta el experimento computacional realizado para determinar la formulación más eficiente, que se usará en la metodología desarrollada.

Ambos modelos únicamente consideran la tecnología eólica y, así, ha sido necesario ampliarlos y adaptarlos para incluir, también, la tecnología solar.

### 6.2.1. Modelo con variables enteras

A continuación se presenta un PLEM, basado en el modelo de Capó [2009], que utiliza variables enteras para definir la cantidad, la localización y el tamaño de los aerogeneradores, reguladores eólicos, paneles fotovoltaicos, reguladores solares, baterías e inversores.

#### Parámetros

- *Demanda*

- $P$  Número de puntos de consumo (viviendas, centros de salud, escuelas, etc.).
- $L_{pd}$  Distancia [m] entre los puntos  $p$  y  $d$ ;  $p=1, \dots, P$ ;  $d=1, \dots, P$ .
- $L_{max}$  Distancia máxima [m] para la que 2 puntos se pueden unir directamente con un conductor. Esta distancia viene determinada por el decisor de acuerdo con las peculiaridades de la comunidad a electrificar.
- $Q_p$  Conjunto de puntos  $d$  que pueden ser destino de un conductor con origen en el punto  $p$ ;  $p=1, \dots, P$ ;  $d=1, \dots, P$ ;  $p \neq d$ ;  $L_{pd} \leq L_{max}$ .
- $ED_p$  Demanda de energía [Wh/día] del punto  $p$ ;  $p=1, \dots, P$ .
- $PD_p$  Demanda de potencia [W] del punto  $p$  (considerando el factor de simultaneidad);  $p=1, \dots, P$ .
- $DA$  Tiempo de autonomía [días] que deben cubrir las baterías.

- *Generación*

- $A, NA$  Tipos de aerogeneradores ( $a=1, \dots, A$ ) y número máximo de aerogeneradores que se pueden instalar en un mismo punto.
- $EA_{pa}$  Energía generada [Wh/día] por un aerogenerador del tipo  $a$  situado en el punto  $p$ ;  $p=1, \dots, P$ ;  $a=1, \dots, A$ .
- $PA_a$  Potencia máxima [W] de un aerogenerador de tipo  $a$ ;  $a=1, \dots, A$ .
- $CA_a$  Coste [\$] de un aerogenerador de tipo  $a$ ;  $a=1, \dots, A$ .
- $R$  Tipos de reguladores eólicos ( $r=1, \dots, R$ ).
- $PR_r$  Potencia máxima [W] de un regulador eólico de tipo  $r$ ;  $r=1, \dots, R$ .
- $CR_r$  Coste [\$] de un regulador eólico de tipo  $r$ ;  $r=1, \dots, R$ .
- $S, NS$  Tipos de paneles fotovoltaicos ( $s=1, \dots, S$ ) y número máximo de paneles que se pueden instalar en un mismo punto.
- $ES_s$  Energía generada [Wh/día] por un panel tipo  $s$ ;  $s=1, \dots, S$ .
- $PS_s$  Potencia máxima [W] de un panel de tipo  $s$ ;  $s=1, \dots, S$ .
- $CS_s$  Coste [\$] de un panel de tipo  $s$ ;  $s=1, \dots, S$ .
- $Z$  Tipos de reguladores solares ( $z=1, \dots, Z$ ).
- $PZ_z$  Potencia máxima [W] de un regulador solar de tipo  $z$ ;  $z=1, \dots, Z$ .
- $CZ_z$  Coste [\$] de un regulador solar de tipo  $z$ ;  $z=1, \dots, Z$ .

- *Equipos de la instalación*

- $B$  Tipos de baterías ( $b=1, \dots, B$ ).
- $EB_b$  Capacidad equivalente [Wh] de una batería de tipo  $b$ ;  $b=1, \dots, B$ .
- $CB_b$  Coste [\$] de una batería de tipo  $b$ ;  $b=1, \dots, B$ .
- $\eta_b$  Rendimiento de las baterías [fracción unitaria].
- $DB$  Factor de descarga [fracción unitaria] de las baterías.
- $I, NI$  Tipos de inversores ( $i=1, \dots, I$ ) y número máximo de inversores que se pueden instalar en un mismo punto.
- $PI_i$  Potencia máxima [W] de un inversor de tipo  $i$ ;  $i=1, \dots, I$ .
- $CI_i$  Coste [\$] de un inversor de tipo  $i$ ;  $i=1, \dots, I$ .
- $\eta_i$  Rendimiento de los inversores [fracción unitaria].
- $CM$  Coste [\$] de un medidor.

- *Definición de la red*

- $C$  Tipos de conductores ( $c=1, \dots, C$ ).
- $RC_c$  Resistencia eléctrica [ $\Omega/m$ ] de un conductor de tipo  $c$ ;  $c=1, \dots, C$ .
- $IC_c$  Intensidad máxima admisible [A] de un conductor de tipo  $c$ ;  $c=1, \dots, C$ .
- $CC_c$  Coste [\$/\$m] de un conductor de tipo  $c$ , incluido el coste de infraestructura necesaria para sostener el cableado;  $c=1, \dots, C$ .
- $V_n$  Tensión nominal [V].
- $V_{min}$  Tensión mínima [V] por debajo de la que ningún punto puede estar. Esta tensión se define como un porcentaje de la tensión nominal y se regula por ley.
- $V_{max}$  Tensión máxima [V] por encima de la que ningún punto puede estar. Esta tensión se define como un porcentaje de la tensión nominal y se regula por ley.
- $cdt_{max}$  Máxima caída de tensión [fracción unitaria] que depende de las tensiones nominal, mínima y máxima, según la ecuación [Ferrer-Martí *et al.*, 2011]:

$$cdt_{max} = \frac{V_{max} - V_{min}}{V_n}$$

- $\eta_c$  Rendimiento [fracción unitaria] de la microrred, que depende de la máxima caída de tensión, según la ecuación [Ferrer-Martí *et al.*, 2011]:

$$\eta_c = 1 - cdt_{max}$$

### **Variables**

- *Variables enteras no negativas utilizadas para definir la localización y el tipo de los equipos de la instalación*

- $xa_{pa}$  Número de aerogeneradores de tipo  $a$  instalados en el punto  $p$ ;  $p=1, \dots, P$ ;  $a=1, \dots, A$ .
- $xr_{pr}$  Número de reguladores eólicos de tipo  $r$  instalados en el punto  $p$ ;  $p=1, \dots, P$ ;  $r=1, \dots, R$ .
- $xs_{ps}$  Número de paneles de tipo  $s$  instalados en el punto  $p$ ;  $p=1, \dots, P$ ;  $s=1, \dots, S$ .

$xz_{pz}$  Número de reguladores solares de tipo  $z$  instalados en el punto  $p$ ;  $p=1, \dots, P$ ;  $z=1, \dots, Z$ .

$xb_{pb}$  Número de baterías de tipo  $b$  instaladas en el punto  $p$ ;  $p=1, \dots, P$ ;  $b=1, \dots, B$ .

$xi_{pi}$  Número de inversores de tipo  $i$  instalados en el punto  $p$ ;  $p=1, \dots, P$ ;  $i=1, \dots, I$ .

- *Variables reales no negativas usadas para definir los flujos de energía y potencia y la tensión de cada punto*

$fe_{pd}$  Flujo de energía [Wh/día] entre los puntos  $p$  y  $d$ ;  $p=1, \dots, P$ ;  $d \in Q_p$ .

$fp_{pd}$  Flujo de potencia [W] entre los puntos  $p$  y  $d$ ;  $p=1, \dots, P$ ;  $d \in Q_p$ .

$v_p$  Tensión del punto  $p$ ;  $v_p = V_{min}, \dots, V_{max}$ ;  $p=1, \dots, P$ .

- *Variables binarias propuestas para definir los puntos de generación, la configuración de las microrredes y la instalación de medidores*

$xg_p \in \{0,1\}$  Vale 1 si y solo si se instala algún aerogenerador o algún panel en el punto  $p$ ;  $p=1, \dots, P$ .

$xc_{pdc} \in \{0,1\}$  Vale 1 si hay un conductor de tipo  $c$  entre los puntos  $p$  y  $d$ ;  $p=1, \dots, P$ ;  $d \in Q_p$ ;  $c=1, \dots, C$ .

$xm_p \in \{0,1\}$  Vale 1 si el punto  $p$  pertenece a alguna microrred y, por tanto, se instala un medidor;  $p=1, \dots, P$ .

### ***Función objetivo***

La función objetivo (1) minimiza el coste de la inversión inicial en aerogeneradores, reguladores eólicos, paneles fotovoltaicos, reguladores solares, baterías, inversores, medidores y conductores.

$$\begin{aligned}
 [MIN]Z = & \sum_{p=1}^P \sum_{a=1}^A CA_a \cdot xa_{pa} + \sum_{p=1}^P \sum_{r=1}^R CR_r \cdot xr_{pr} + \sum_{p=1}^P \sum_{s=1}^S CS_s \cdot xs_{ps} + \sum_{p=1}^P \sum_{z=1}^Z CZ_z \cdot xz_{pz} + \\
 & \sum_{p=1}^P \sum_{b=1}^B CB_b \cdot xb_{pb} + \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^I CI_i \cdot xi_{pi} + \sum_{p=1}^P CM \cdot xm_p + \sum_{p=1}^P \sum_{d \in Q_p} \sum_{c=1}^C L_{pd} \cdot CC_c \cdot xc_{pdc}
 \end{aligned} \quad (1)$$

### ***Restricciones***

- *Generación y acumulación de energía*

La restricción (2) define los puntos en los que se instalan aerogeneradores y limita el número máximo de generadores que se puede instalar en un mismo punto. La restricción (3) es análoga a la restricción (2) pero para los paneles fotovoltaicos. La restricción (4) obliga a que si en un punto  $p$  no se instalan aerogeneradores ni paneles fotovoltaicos, la variable  $xg_p$  valga 0, es decir que el punto  $p$  no sea de generación.

La restricción (5) impone las condiciones de conservación y satisfacción de la demanda de energía. Se trata de un balance de energía en el punto  $p$ ; la energía que entra en  $p$  más la que se genera en el propio  $p$  debe ser mayor o igual que la energía que consume  $p$  más la que sale de  $p$ . Puede ser mayor debido a que los aerogeneradores y los paneles fotovoltaicos pueden generar más energía que la estrictamente consumida por los puntos que se abastecen. Como se puede observar en la restricción (5), se tiene en cuenta el rendimiento de baterías, inversores y conductores.

La restricción (6) es análoga a la restricción (5), pero para la conservación y satisfacción de la demanda de potencia. Se determina aquí la ubicación, el tipo y la cantidad de inversores a instalar. Los inversores deben poder soportar la potencia demandada por los usuarios. Tal y como se ha explicado anteriormente, se consideran las pérdidas de potencia en los conductores.

La restricción (7) obliga a que las baterías almacenen la energía suficiente para cubrir la demanda de los usuarios conectados más la del propio punto, teniendo en cuenta la autonomía y el factor de descarga.

$$\sum_{a=1}^A xa_{pa} \leq NA \cdot xg_p \quad p = 1, \dots, P \quad (2)$$

$$\sum_{s=1}^S xs_{ps} \leq NS \cdot xg_p \quad p = 1, \dots, P \quad (3)$$

$$\sum_{a=1}^A xa_{pa} + \sum_{s=1}^S xs_{ps} \geq xg_p \quad p = 1, \dots, P \quad (4)$$

$$\sum_{q=1|p \in Q_q}^P fe_{qp} + \sum_{a=1}^A EA_{pa} \cdot xa_{pa} + \sum_{s=1}^S ES_s \cdot xs_{ps} \geq \frac{ED_p}{\eta b \cdot \eta i} \left( \frac{1}{\eta c} + \left( 1 - \frac{1}{\eta c} \right) xg_p \right) + \sum_{d \in Q_p} fe_{pd} \quad p = 1, \dots, P \quad (5)$$

$$\sum_{q=1|p \in Q_q}^P fp_{qp} + \sum_{i=1}^I PI_i \cdot xi_{pi} \geq PD_p \left( \frac{1}{\eta c} + \left( 1 - \frac{1}{\eta c} \right) xg_p \right) + \sum_{d \in Q_p} fp_{pd} \quad p = 1, \dots, P \quad (6)$$

$$\sum_{b=1}^B EB_b \cdot xb_{pb} + \left( \frac{DA}{DB} \sum_{j=1}^P \frac{ED_j}{\eta b \cdot \eta i \cdot \eta c} \right) (1 - xg_p) \geq \frac{DA}{DB} \left( \sum_{d \in Q_p} fe_{pd} + \frac{ED_p}{\eta b \cdot \eta i} \right) \quad p = 1, \dots, P \quad (7)$$

- *Definición de la red*

Las restricciones (8) y (9) relacionan, respectivamente, los flujos de energía y potencia con la existencia de algún conductor. La condición de radialidad se impone con la restricción (10). Ésta define la estructura de la microrred en forma de árbol. Así, todo punto  $p$  puede tener, como máximo, un conductor de entrada a excepción de los puntos de generación que no pueden tener ninguno.

La restricción (11) limita la caída de tensión entre dos puntos, considerando el tipo de conductor que los une [Sempértegui *et al*, 2002]. La diferencia de tensión entre dos puntos entre los que hay un conductor, viene definida por el producto de la potencia que circula, la resistividad del conductor y la distancia entre los puntos. La restricción (12) define que la intensidad que circula entre dos puntos unidos por un conductor, no puede ser mayor que la intensidad máxima admisible por el tipo de conductor.

$$fe_{pd} \leq \left( \sum_{j=1}^P \frac{ED_j}{\eta b \cdot \eta i \cdot \eta c} \right) \sum_{c=1}^C xc_{pdc} \quad p = 1, \dots, P; d \in Q_p \quad (8)$$

$$fp_{pd} \leq \left( \sum_{j=1}^P \frac{PD_j}{\eta c} \right) \sum_{c=1}^C xc_{pdc} \quad p = 1, \dots, P; d \in Q_p \quad (9)$$

$$\sum_{q=1|p \in Q_q}^P \sum_{c=1}^C xc_{qpc} + xg_p \leq 1 \quad p = 1, \dots, P \quad (10)$$

$$v_p - v_d \geq \frac{L_{pd} \cdot RC_c \cdot fp_{pd}}{V_n} - (V_{max} - V_{min})(1 - xc_{pdc}) \quad p = 1, \dots, P; d \in Q_p; c = 1, \dots, C \quad (11)$$

$$\frac{fp_{pd}}{V_n} - \left( \sum_{j=1}^P \frac{PD_j}{V_{min} \cdot \eta c} \right) (1 - xc_{pdc}) \leq IC_c \quad p = 1, \dots, P; d \in Q_p; c = 1, \dots, C \quad (12)$$

- *Equipos*

Los reguladores eólicos deben ser de la potencia adecuada (13), que viene fijada por la potencia máxima de los aerogeneradores instalados en el mismo punto. Los reguladores solares deben ser de la potencia adecuada (14), que viene fijada por la potencia máxima de los paneles fotovoltaicos instalados en el mismo punto. La restricción (15) obliga a que los inversores únicamente se instalen en puntos de generación.

Las restricciones (16) y (17) determinan los puntos para los que la variable  $xm_p$  vale 1; estos pertenecen a alguna microrred y, por tanto, tienen algún conductor de entrada (16) o de salida (17). Dada la configuración radial de las microrredes con que se trabaja, a un punto sólo puede llegar un conductor pero pueden salir hasta  $P-1$  conductores.

$$\sum_{r=1}^R PR_r \cdot xr_{pr} \geq \sum_{a=1}^A PA_a \cdot xa_{pa} \quad p = 1, \dots, P \quad (13)$$

$$\sum_{z=1}^Z PZ_z \cdot xz_{pz} \geq \sum_{s=1}^S PS_s \cdot xs_{ps} \quad p = 1, \dots, P \quad (14)$$

$$xi_{pi} \leq NI \cdot xg_p \quad p = 1, \dots, P; i = 1, \dots, I \quad (15)$$

$$\sum_{q=1|p \in Q_q}^P \sum_{c=1}^C xc_{qpc} \leq xm_p \quad p = 1, \dots, P \quad (16)$$

$$\sum_{d \in Q_q}^C \sum_{c=1}^C xc_{pdc} \leq (P-1) \cdot xm_p \quad p = 1, \dots, P \quad (17)$$



## 6.2.2. Modelo con variables binarias

A continuación se especifican los cambios necesarios para sustituir las variables enteras del PLEM presentado en el subapartado 6.2.1 por variables binarias y, de esta forma, obtener un nuevo PLEM basado en el propuesto en Ferrer-Martí *et al.* [2011]. La diferencia principal entre ambos modelos radica en la definición de las variables para definir la cantidad, la localización y el tamaño de los aerogeneradores, reguladores eólicos, paneles fotovoltaicos, reguladores solares, baterías e inversores.

### Parámetros

- NR* Cota superior del número de reguladores eólicos a instalar en un mismo punto.  
*NZ* Cota superior del número de reguladores solares a instalar en un mismo punto.  
*NB* Cota superior del número de baterías a instalar en un mismo punto.

### Variables

Se sustituyen las variables  $xa_{pa}$ ,  $xr_{pr}$ ,  $xs_{ps}$ ,  $xz_{pz}$ ,  $xb_{pb}$  y  $xi_{pi}$  por:

$xa_{pan} \in \{0,1\}$  Vale 1 si se instala el  $n$ -ésimo aerogenerador de tipo  $a$  en el punto  $p$ ;  
 $p=1, \dots, P$ ;  $a=1, \dots, A$ ;  $n=1, \dots, NA$ .

$xr_{prn} \in \{0,1\}$  Vale 1 si se instala el  $n$ -ésimo regulador eólico de tipo  $r$  en el punto  $p$ ;  
 $p=1, \dots, P$ ;  $r=1, \dots, R$ ;  $n=1, \dots, NR$ .

$xs_{psn} \in \{0,1\}$  Vale 1 si se instala el  $n$ -ésimo panel fotovoltaico de tipo  $s$  en el punto  $p$ ;  
 $p=1, \dots, P$ ;  $s=1, \dots, S$ ;  $n=1, \dots, NS$ .

$xz_{pzn} \in \{0,1\}$  Vale 1 si se instala el  $n$ -ésimo regulador solar de tipo  $z$  en el punto  $p$ ;  
 $p=1, \dots, P$ ;  $z=1, \dots, Z$ ;  $n=1, \dots, NZ$ .

$xb_{pbn} \in \{0,1\}$  Vale 1 si se instala la  $n$ -ésima batería de tipo  $b$  en el punto  $p$ ;  $p=1, \dots, P$ ;  
 $b=1, \dots, B$ ;  $n=1, \dots, NB$ .

$xi_{pin} \in \{0,1\}$  Vale 1 si se instala el  $n$ -ésimo inversor de tipo  $i$  en el punto  $p$ ;  $p=1, \dots, P$ ;  
 $i=1, \dots, I$ ;  $n=1, \dots, NI$ .

### Función objetivo y Restricciones

Se sustituye cada variable entera (por ejemplo,  $xa_{pa}$ ) por la suma de las variables binarias correspondientes (por ejemplo,  $\sum_{n=1}^{NA} xa_{pan}$ ). Así, por ejemplo, la restricción (2) se sustituye por la restricción (2')

$$\sum_{a=1}^A xa_{pa} \leq NA \cdot xg_p \quad p=1, \dots, P \quad (2)$$

$$\sum_{a=1}^A \sum_{n=1}^{NA} xa_{pan} \leq NA \cdot xg_p \quad p=1, \dots, P \quad (2')$$

Además, para evitar simetrías, se incluyen las restricciones (i) a (vi), tal y como se propone en Ferrer-Martí *et al.* [2011].

$$xa_{pan} \geq xa_{pa(n+1)} \quad p = 1, \dots, P; a = 1, \dots, A; n = 1, \dots, NA - 1 \quad (\text{i})$$

$$xr_{prn} \geq xr_{pr(n+1)} \quad p = 1, \dots, P; r = 1, \dots, R; n = 1, \dots, NR - 1 \quad (\text{ii})$$

$$xs_{psn} \geq xs_{ps(n+1)} \quad p = 1, \dots, P; s = 1, \dots, S; n = 1, \dots, NS - 1 \quad (\text{iii})$$

$$xz_{pzn} \geq xz_{pz(n+1)} \quad p = 1, \dots, P; z = 1, \dots, Z; n = 1, \dots, NZ - 1 \quad (\text{iv})$$

$$xb_{pbn} \geq xb_{pb(n+1)} \quad p = 1, \dots, P; b = 1, \dots, B; n = 1, \dots, NB - 1 \quad (\text{v})$$

$$xi_{pin} \geq xi_{pi(n+1)} \quad p = 1, \dots, P; i = 1, \dots, I; n = 1, \dots, NI - 1 \quad (\text{vi})$$

### 6.2.3. Experimento computacional

A priori es difícil saber cuál de las 2 formulaciones propuestas en los subapartados 6.2.1 y 6.2.2 es más eficiente. Para identificar la modelización que obtiene los mejores resultados, se realiza el experimento computacional que se expone a continuación, utilizando ejemplares generados aleatoriamente basados en las comunidades reales de El Alumbre y Alto Perú (que se describen con mayor detalle en el capítulo 8).

A continuación se resumen los datos utilizados para generar los ejemplares del experimento computacional:

- Comunidades [Ferrer-Martí *et al.*, 2012]:
  - El área (3,5x3,5km<sup>2</sup>) y el recurso eólico de El Alumbre.
  - El área (1,3x3,4km<sup>2</sup>) y el recurso eólico de Alto Perú.

El recurso eólico, variable, se calcula con el programa informático WAsP. El recurso solar, constante, tiene un valor de Horas Solar Pico (PSH) de 4,3.

- Número de puntos de consumo: 5, 10, 15, ..., 50.
- Concentración de los puntos de consumo:
  - Los puntos de consumo se distribuyen aleatoriamente.
  - El 25% de los puntos de consumo se concentra en un 30% del territorio.
  - El 50% de los puntos de consumo se concentra en un 30% del territorio.
- Demanda de energía y potencia en cada punto de consumo:
  - Baja: 280Wh/día de energía y 200W de potencia.
  - Alta: 420Wh/día de energía y 300W de potencia.

- Equipos de la instalación (para un mayor detalle de los equipos utilizados véase el anexo A.2):
  - Aerogeneradores (4 tipos). Potencia máx: 300 a 3500 W; coste: \$974 a \$5132.
  - Reguladores eólicos (4 tipos). Potencia máx: 420 a 3600 W; coste: \$165 a \$513.
  - Paneles (4 tipos). Potencia nominal: 50 a 150 W; coste: \$451 a \$1000.
  - Reguladores solares (4 tipos). Potencia máx: 50 a 200 W; coste: \$67 a \$125.
  - Baterías (4 tipos). Capacidad: 1500 a 3000 Wh/día; coste: \$225 a \$325; eficiencia: 85%; factor de descarga: 60%.
  - Inversores (4 tipos). Potencia máx: 300 a 3000 W; coste: \$377 a \$2700; eficiencia: 85%.
  - Conductores (2 tipos). Coste: \$4,9/m a \$5,1/m; resistencia: 2,71 a 2,1 $\Omega$ /km.

Para cada combinación de parámetros (comunidad, número de puntos de consumo, tipo de concentración y demandas) se generan 5 ejemplares, distribuyendo aleatoriamente los puntos de consumo, y se obtiene un total de 600 ejemplares (60 para cada cantidad de puntos de consumo, 200 para cada tipo de concentración y 300 para cada demanda).

La modelización y resolución se ha realizado utilizando el paquete informático ILOG. Concretamente se ha usado OPL 5.5 para modelizar y CPLEX 12.2 para resolver. Los cálculos se han realizado en un PC 3,16GHz Intel Core 2 Duo E8500 con 3,46GB de RAM. El tiempo máximo de cálculo se ha fijado en 18000 s, entendiendo que éste es un tiempo razonable de cada a futuros posibles usuarios de la metodología de diseño desarrollada en esta tesis.

En la Tabla 6.1 se resumen los resultados del experimento. En concreto, se muestra la siguiente información para cada tipo de formulación (variables binarias y enteras), en función de las características de los ejemplares:

- Número de soluciones óptimas garantizadas.
- Tiempo medio necesario para alcanzar las soluciones óptimas.
- Tiempo medio total para alcanzar la solución (óptima para algunos ejemplares y no óptima para otros).
- Diferencia media (en porcentaje) entre el coste y la cota mínima para los ejemplares para los que no se garantiza obtener una solución óptima.

Los resultados obtenidos muestran cierta superioridad del modelo con variables enteras frente al modelo con variables binarias: obtiene un 9,3% más de soluciones para las que se garantiza la optimalidad (469 vs. 429); el tiempo medio hasta garantizar la solución óptima es un 43,4% menor (433,64s vs. 766,33s); el tiempo medio total es un 24,8% menor (4268,96s vs. 5677,93s); y, cuando no se garantiza la optimalidad, obtiene soluciones más cercanas al óptimo (4,7% vs. 5,9%).

Tabla 6.1 – Resultados del experimento computacional

	Modelo de variables binarias				Modelo de variables enteras				
	Soluciones óptimas	Tiempo medio [s]	Tiempo total [s]	Diferencia coste-cota [%]	Soluciones óptimas	Tiempo medio [s]	Tiempo total [s]	Diferencia coste-cota [%]	
<b>Total</b>	429	766,33	5677,93	5,9	469	433,64	4268,96	4,7	
<b>Comunidad</b>	<b>1</b>	259	678,86	3046,08	3,9	273	346,65	1935,45	3,8
	<b>2</b>	170	899,59	8309,77	6,6	196	554,80	6602,47	4,9
<b>Número de viviendas</b>	<b>5</b>	60	0,39	0,39	0	60	0,02	0,02	0
	<b>10</b>	60	7,80	7,80	0	60	0,23	0,23	0
	<b>15</b>	60	37,44	37,44	0	60	1,28	1,28	0
	<b>20</b>	60	234,10	234,10	0	60	32,84	32,84	0
	<b>25</b>	55	1154,36	2558,16	0	60	174,81	174,81	0
	<b>30</b>	44	1410,93	5834,68	3,8	52	581,72	2904,16	2,4
	<b>35</b>	38	1818,00	7751,40	5,2	45	861,12	5145,84	3,4
	<b>40</b>	24	1508,05	11403,22	4,9	33	1589,46	8974,20	3,8
	<b>45</b>	18	1414,75	13024,43	6,9	23	1228,33	11570,86	5,2
	<b>50</b>	10	5565,87	15927,65	8,3	16	2570,06	13885,35	6,5
<b>Concentración</b>	<b>1</b>	151	621,94	4879,56	4,8	168	344,93	3169,74	3,6
	<b>2</b>	154	957,50	4877,28	6,1	165	414,37	3491,86	4,3
	<b>3</b>	124	704,74	7276,94	6,5	136	566,59	6145,28	5,5
<b>Demanda</b>	<b>1</b>	239	736,57	4246,80	4,7	251	420,06	3291,45	4,1
	<b>2</b>	190	638,98	7004,69	6,6	218	390,20	5203,55	5,1

Los resultados también permiten identificar que el tiempo de cálculo y el número de soluciones óptimas garantizadas varían en función de ciertas características de los ejemplares. Así, a mayor número de puntos de consumo, mayor tiempo de cálculo, puesto que la cantidad de variables y restricciones aumenta considerablemente. En relación con los tipos de concentración, los resultados tienden a empeorar cuando aumenta la concentración de puntos de consumo, pero las diferencias son poco acentuadas. Finalmente, a mayor demanda, mayor tiempo de cálculo.

Los resultados del modelo con variables enteras son satisfactorios. En comunidades de hasta 25 puntos de consumo siempre se garantiza una solución óptima. Además, para hallar estas soluciones óptimas únicamente se necesita, en promedio, 174,81s. Ejemplares de este tamaño son representativos de las comunidades con las que se trabaja en la realidad (por ejemplo, Alto Perú consta de 26 puntos). Para ejemplares de hasta 40 puntos de consumo, se puede garantizar la solución óptima en más de la mitad de los casos en menos de 1600s. Para el resto de ejemplares, la diferencia entre el coste y la cota mínima no supera el 3,8% de media. Incluso para comunidades de hasta 50 viviendas, la diferencia entre el coste y la cota, no es muy elevada, de media un 6,5%.

En resumen, a partir de los resultados del experimento computacional aquí presentado, se decide seleccionar el modelo que utiliza variables enteras para definir la cantidad, la localización y el tamaño de los equipos de la instalación. Este modelo sirve como base para desarrollar el PLEM finalmente utilizado para la generación de alternativas del primer nivel de decisión (apartado 6.3). Por su parte, en el segundo nivel se incluyen consideraciones respecto a la gestión del sistema (apartado 6.4) y en el tercer nivel se incorporan consideraciones respecto a la seguridad del suministro (apartado 6.5).

## 6.3. Modelo del primer nivel de decisión

En este apartado se presenta el PLEM usado en el primer nivel de decisión. Éste utiliza variables enteras para definir la cantidad, la localización y el tamaño de los equipos de la instalación, pero difiere ligeramente respecto al modelo expuesto en el subapartado 6.2.1, ya que se han incorporado las siguientes modificaciones técnicas identificadas en colaboración con diferentes ONGs:

- En el modelo del subapartado 6.1.2 se permite que un mismo regulador eólico controle varios aerogeneradores. De esta forma, por ejemplo, un único regulador eólico de 1000W puede controlar 2 aerogeneradores de 500W. Sin embargo, aunque esta situación es técnicamente posible, es preferible utilizar un regulador diferenciado para cada aerogenerador. En la práctica supone imaginar un sólo elemento aerogenerador-regulador, con el regulador eólico de la potencia adecuada.
- Aunque en el modelo del subapartado 6.1.2 se considera la instalación de medidores únicamente en puntos de microrred, se ha identificado que su instalación en todos los puntos de la comunidad habitualmente resulta un factor clave a la hora de conseguir un modelo de gestión sostenible a lo largo del tiempo. En consecuencia, en el primer nivel de decisión se impone que los medidores se instalen en todos los puntos de consumo y, en el segundo nivel, se plantea la posibilidad de estudiar su instalación únicamente en puntos de microrred, con objeto de reducir costes, si el decisor así lo estima oportuno.

A continuación se exponen las modificaciones a realizar en relación con el modelo presentado en el subapartado 6.2.1.

### *Parámetros*

Se eliminan los parámetros relacionados con los reguladores eólicos ( $R$ ,  $PR_r$  y  $CR_r$ ) y la potencia de los aerogeneradores ( $PA_a$ ). Además, se modifica la definición del parámetro correspondiente al coste de un aerogenerador:

$CA_a$  Coste [\$] de un aerogenerador de tipo  $a$ , incluyendo el coste asociado a un regulador eólico interno o correspondiente a dicho generador;  $a=1, \dots, A$ .

### *Variables*

Se eliminan las variables correspondientes al número de reguladores instalados ( $xr_{pr}$ ) y a la instalación o no de un medidor en un punto ( $xm_p$ ).

### *Función objetivo*

Se modifica la función objetivo (1) eliminando el componente asociado al coste de los reguladores eólicos y cambiando el componente asociado al coste de los medidores.

$$\begin{aligned}
 [MIN]Z = & \sum_{p=1}^P \sum_{a=1}^A CA_a \cdot xa_{pa} + \sum_{p=1}^P \sum_{s=1}^S CS_s \cdot xs_{ps} + \sum_{p=1}^P \sum_{z=1}^Z CZ_z \cdot xz_{pz} + \sum_{p=1}^P \sum_{b=1}^B CB_b \cdot xb_{pb} + \\
 & \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^I CI_i \cdot xi_{pi} + CM \cdot P + \sum_{p=1}^P \sum_{d \in Q_p} \sum_{c=1}^C L_{pd} \cdot CC_c \cdot xc_{pdc}
 \end{aligned} \tag{1'}$$

### **Restricciones**

Se elimina las restricciones (13), (16) y (17).

### **Estudio del valor objetivo de cada atributo del primer nivel de decisión**

En el primer nivel de decisión se enfrentan los criterios coste y demanda. El criterio demanda está formado por los subcriterios energía, potencia y autonomía, con sus respectivos atributos. Los datos a especificar para el valor objetivo de los atributos son:

- Para variar la demanda de energía ( $AP_2$ ) se modifica el parámetro  $ED_p$ .
- Para variar la demanda de potencia ( $AP_3$ ) se modifica el parámetro  $PD_p$ .
- Para variar los días de autonomía ( $AP_4$ ) se modifica el parámetro  $DA$ .

## **6.4. Modelo del segundo nivel de decisión**

El modelo a resolver en el segundo nivel de decisión se obtiene al incorporar al modelo del apartado 6.3 las restricciones relativas a la gestión del sistema. En concreto se propone incorporar los 4 siguientes atributos:

- Número máximo de microrredes ( $AS_2$ ), para evitar que en una misma comunidad haya demasiadas microrredes y que gestionar el sistema de electrificación resulte excesivamente complejo.
- Número mínimo de usuarios por microrred ( $AS_3$ ), para optimizar los esfuerzos en gestión y que éstos no se malgasten en microrredes muy pequeñas, dificultando la gestión del sistema.
- Número máximo de usuarios individuales ( $AS_4$ ), para extender al máximo posible la electrificación mediante microrredes y, con ello, proporcionar sus beneficios sociales a la mayor cantidad posible de usuarios.
- Instalación de un medidor únicamente en puntos de microrred, para ahorrar el coste de los medidores instalados en puntos individuales, que no son imprescindibles aunque facilitan la gestión de los sistemas ( $AS_5$ ).

Los grupos de restricciones definidos para modelizar los 4 atributos sólo se incorporan al modelo a resolver si se utilizan; así se dispone de un modelo con 16 variantes para el segundo nivel de decisión. A continuación se presentan los nuevos parámetros, variables y restricciones relacionados con los atributos utilizados en este nivel.

### Parámetros

- *Definición de la red*

$U_{indep}$  Número máximo de usuarios independientes.

$N_{max}$  Número máximo de microrredes.

$U_{min}$  Número mínimo de usuarios por microrred.

### Variables

- *Variables binarias utilizadas para definir los puntos de microrred, de generación de microrred y pertenecientes a alguna microrred en concreto*

$xm_p \in \{0,1\}$  Vale 1 si el punto  $p$  pertenece a alguna microrred y, por tanto, se instala un medidor;  $p=1, \dots, P$ .

$xmg_p \in \{0,1\}$  Vale 1 si el punto  $p$  pertenece a alguna microrred y, además, es un punto de generación;  $p=1, \dots, P$ .

$xf_{pdf} \in \{0,1\}$  Vale 1 si entre los punto  $p$  y  $d$  existe un flujo de energía con destino al punto  $f$ ;  $p=1, \dots, P$ ;  $d \in Q_p$ ;  $f=1, \dots, P$ .

### Función objetivo

La función objetivo (1') debe ser modificada de la siguiente forma, sólo en caso de instalar medidores únicamente en los usuarios de microrred.

$$[MIN]Z = \sum_{p=1}^P \sum_{a=1}^A CA_a \cdot xa_{pa} + \sum_{p=1}^P \sum_{s=1}^S CS_s \cdot xs_{ps} + \sum_{p=1}^P \sum_{z=1}^Z CZ_z \cdot xz_{pz} + \sum_{p=1}^P \sum_{b=1}^B CB_b \cdot xb_{pb} + \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^I CI_i \cdot xi_{pi} + \sum_{p=1}^P CM \cdot xm_p + \sum_{p=1}^P \sum_{d \in Q_p} \sum_{c=1}^C L_{pd} \cdot CC_c \cdot xc_{pdc} \quad (1'')$$

### Restricciones

- *Número máximo de usuarios independientes (AS<sub>4</sub>)*

Las restricciones (16) y (17) determinan los puntos para los que la variable  $xm_p$  vale 1; estos pertenecen a alguna microrred y, por tanto, tienen algún conductor de entrada (16) o de salida (17). La restricción (18) obliga a que si para un punto  $p$  no existen conductores ni de entrada ni de salida, la variable  $xm_p$  valga 0. La restricción (19) obliga a que como máximo haya el número de usuarios individuales especificado  $U_{indep}$ .

$$\sum_{q=1|p \in Q_q}^P \sum_{c=1}^C xc_{qpc} \leq xm_p \quad p=1, \dots, P \quad (16)$$

$$\sum_{d \in Q_p} \sum_{c=1}^C xc_{pdc} \leq (P-1) \cdot xm_p \quad p=1, \dots, P \quad (17)$$

$$\sum_{q=1|p \in Q_q}^P \sum_{c=1}^C xc_{qpc} + \sum_{d \in Q_p} \sum_{c=1}^C xc_{pdc} \geq xm_p \quad p=1, \dots, P \quad (18)$$

$$\sum_{p=1}^P xm_p \geq P - U_{indep} \quad (19)$$

- *Número máximo de microrredes (AS<sub>2</sub>)*

Se utilizan las restricciones (16), (17) y (18). Las restricciones (20) y (21) acotan y definen la variable  $xmg_p$ , que toma por valor 1 cuando el punto  $p$  es de generación ( $xg_p=1$ ) y, además, pertenece a alguna microrred ( $xm_p=1$ ). Puesto que por la configuración radial de las microrredes, en cada una sólo puede haber un punto de generación, la restricción (22) limita el número de microrredes.

$$xg_p + xm_p - 2 \geq \frac{P}{2} \cdot (xmg_p - 1) \quad p=1, \dots, P \quad (20)$$

$$xg_p + xm_p - 2 \leq xmg_p - 1 \quad p=1, \dots, P \quad (21)$$

$$\sum_{p=1}^P xmg_p \leq N_{max} \quad (22)$$

- *Número mínimo de usuarios por microrred (AS<sub>3</sub>)*

Se utilizan las restricciones (16), (17), (18), (20) y (21). La restricción (23) establece que entre dos usuarios, el flujo de energía es la suma de los flujos de energía con destino a los distintos usuarios que se abastecen.

La restricción (24) establece que para cada punto de consumo  $p$  debe de existir, al menos, un flujo energético que provenga de un punto  $q$  y que vaya con destino al propio  $p$ , a menos que  $p$  sea de generación. Las restricciones (25) y (26) añaden que si un flujo entra a un punto con destino a otro, debe salir del primer punto, salvo en los puntos de generación, de donde únicamente pueden salir conductores pero no entrar.

La restricción (27) limita los flujos energéticos que salen de un punto de generación de microrred: los usuarios que se abastecen de ese punto de generación, menos uno (el propio punto de generación).

$$fe_{pd} \geq \sum_{f=1}^P xf_{pdf} \cdot \frac{ED_f}{\eta_b \cdot \eta_i \cdot \eta_c} \quad p=1, \dots, P; d \in Q_p \quad (23)$$



$$\sum_{q=1|p \in Q_q}^P x_{qp}^f + x_{g_p} = 1 \quad p = 1, \dots, P \quad (24)$$

$$\sum_{q=1|p \in Q_q}^P x_{qp}^f + x_{g_p} \geq \sum_{d \in Q_p} x_{pd}^f \quad p = 1, \dots, P; f = 1, \dots, P; p \neq f \quad (25)$$

$$\sum_{q=1|p \in Q_q}^P x_{qp}^f \leq \sum_{d \in Q_p} x_{pd}^f \quad p = 1, \dots, P; f = 1, \dots, P; p \neq f \quad (26)$$

$$\sum_{d \in Q_p} \sum_{f=1}^P x_{pd}^f \geq x_{m_{g_p}} \cdot (U_{min} - 1) \quad p = 1, \dots, P \quad (27)$$

- *Medidores únicamente en microrred (AS<sub>5</sub>)*

Además de usar la función objetivo (1''), se añaden las restricciones (16), (17) y (18).

## 6.5. Modelo del tercer nivel de decisión

El modelo a resolver en el tercer nivel de decisión se obtiene al incorporar al modelo del segundo nivel las restricciones relativas a la seguridad del suministro. En concreto se propone incorporar los 3 siguientes atributos:

- Porcentaje mínimo de la energía generada con paneles fotovoltaicos en cada punto de generación ( $AT_2$ ), para asegurar que cada punto sea abastecido con, al menos, una cierta cantidad de recurso solar, menos variable que el recurso eólico.
- Número mínimo de equipos de generación por punto de generación ( $AT_3$ ), para que, en caso de que un equipo se averíe, al menos haya otro generando y, así, evitar que los puntos de consumo cubiertos se queden sin electricidad.
- Porcentaje de energía adicional para usuarios individuales ( $AT_4$ ), para compensar las notables ventajas de los usuarios electrificados en microrred frente a los usuarios individuales.

Los grupos de restricciones definidos para modelizar los 3 atributos sólo se incorporan al modelo a resolver si se utilizan; así se dispone de un modelo para el tercer nivel con 8 variantes. A continuación se presentan los nuevos parámetros, variables y restricciones relacionados con los atributos utilizados en el tercer nivel de decisión.

### Parámetros

- *Demanda*

$ED_{ind}$  Porcentaje [fracción unitaria] mínimo de energía adicional con que abastecer a los usuarios individuales respecto a los usuarios en microrred.

- *Generación*

$SOL$  Porcentaje [fracción unitaria] mínimo de energía generada con paneles fotovoltaicos en cada punto de generación.

$E_{min}$  Número mínimo de equipos de generación en cada punto de generación.

### Variables

- *Variable para definir la cantidad de energía en función de si un punto es individual o de microrred*

$ed_p$  Energía [Wh/día] que se suministra al punto  $p$ ;  $p=1, \dots, P$ .

### Función objetivo

No se modifica la función objetivo.

### Restricciones

- *Mínimo porcentaje de energía generada con paneles fotovoltaicos ( $AT_2$ )*

Se incorpora la restricción (28), que establece que la demanda energética de cada punto de consumo ha de ser cubierta con un cierto porcentaje  $SOL$  de paneles fotovoltaicos. Se trata de un balance de energía en el punto  $p$  que únicamente afecta a los paneles.

$$\sum_{q=1|p \in Q_q}^P fe_{qp} + \sum_{s=1}^S ES_s \cdot xs_{ps} \geq SOL \left( \frac{ED_p}{\eta b \cdot \eta i} \left( \frac{1}{\eta c} + \left( 1 - \frac{1}{\eta c} \right) xg_p \right) + \sum_{d \in Q_p} fe_{pd} \right) \quad p = 1, \dots, P \quad (28)$$

- *Número mínimo de equipos de generación por punto de generación ( $AT_3$ )*

La restricción (4') obliga a que cada punto de consumo sea abastecido por, al menos, un cierto número  $E_{min}$  de equipos de generación (eólicos o solares).

$$\sum_{a=1}^A xa_{pa} + \sum_{s=1}^S xs_{ps} \geq E_{min} \cdot xg_p \quad p = 1, \dots, P \quad (4')$$

- *Mayor porcentaje de energía suministrada a usuarios individuales frente a usuarios en microrred (AT<sub>4</sub>)*

Se incluye la variable  $xm_p$  y las restricciones (16), (17) y (18), en caso de que se incorpore este atributo a una variante del segundo nivel que no incluye dichas restricciones. Las restricciones (5'), (7') y (28') sustituyen a las restricciones (5), (7) y (28); en concreto, se reemplaza el componente asociado a la demanda de energía, por la nueva variable  $ed_p$ . En la restricción (29) se indica que si un punto es de microrred ( $xm_p=1$ ), la variable  $ed_p$  debe ser mayor que la demanda del punto. Si, en cambio, no se trata de un punto de microrred ( $xm_p=0$ ), la variable  $ed_p$  debe ser mayor que la demanda del punto más el incremento de demanda de los puntos individuales.

$$\sum_{q=1|p \in Q_q}^P fe_{qp} + \sum_{a=1}^A EA_{pa} \cdot xa_{pa} + \sum_{s=1}^S ES_s \cdot xs_{ps} \geq ed_p + \sum_{d \in Q_p} fe_{pd} \quad p = 1, \dots, P \quad (5')$$

$$\sum_{b=1}^B EB_b \cdot xb_{pb} + \left( \frac{DA}{DB} \sum_{j=1}^P \frac{ED_j}{\eta b \cdot \eta i \cdot \eta c} \right) (1 - xg_p) \geq \frac{DA}{DB} \left( \sum_{d \in Q_p} fe_{pd} + ed_p \right) \quad p = 1, \dots, P \quad (7')$$

$$\sum_{q=1|p \in Q_q}^P fe_{qp} + \sum_{s=1}^S ES_s \cdot xs_{ps} \geq SOL \left( ed_p + \sum_{d \in Q_p} fe_{pd} \right) \quad p = 1, \dots, P \quad (28')$$

$$ed_p \geq \frac{ED_p}{\eta b \cdot \eta i} \left( \frac{1}{\eta c} + \left( 1 - \frac{1}{\eta c} \right) xg_p + ED_{ind} \cdot xg_p (1 - xm_p) \right) \quad p = 1, \dots, P \quad (29)$$

Nótese que en la restricción (7') la variable  $ed_p$  sustituye a  $\frac{ED_p}{\eta b \cdot \eta i}$  y, en cambio, en las

restricciones (5') y (28') sustituye a  $\frac{ED_p}{\eta b \cdot \eta i} \left( \frac{1}{\eta c} + \left( 1 - \frac{1}{\eta c} \right) xg_p \right)$ . La clave de esta

diferencia está en la restricción (29). Si  $xg_p$  vale 0, el punto no es de generación y la restricción (7') no actúa, puesto que define la instalación de baterías que sólo se instalan

en puntos de generación. Si  $xg_p$  vale 1, la variable  $ed_p$  se sustituye por  $\frac{ED_p}{\eta b \cdot \eta i}$  más un

componente asociado al porcentaje adicional de energía según si se trata de un punto individual o no. Este valor es el que se requiere para las 3 restricciones (5'), (7') y (28').

Por otra parte, la restricción (29) es no-lineal pero el término  $xg_p \cdot (1 - xm_p)$  puede ser linealizado definiendo una variable binaria auxiliar que sustituye al producto. Se añaden las restricciones (30), (31) y (32).

$$xg_p + (1 - xm_p) \leq 1 + aux_p \quad p = 1, \dots, P \quad (30)$$

$$xg_p \geq aux_p \quad p = 1, \dots, P \quad (31)$$

$$(1 - xm_p) \geq aux_p \quad p = 1, \dots, P \quad (32)$$

## 6.6. Resolución del modelo matemático

En el experimento computacional presentado en el apartado 6.2, se ha identificado que el modelo con variables enteras obtiene soluciones satisfactorias. Sin embargo, aunque el tiempo de cálculo para una solución es aceptable, al generar diversas alternativas en cada nivel, el tiempo total puede aumentar considerablemente. Para disminuir el tiempo de cálculo total, se propone un procedimiento heurístico de resolución basado en modificar el modelo de los apartados 6.3, 6.4 y 6.5.

Primero se propone relajar ciertas variables en los modelos de los niveles de decisión 1 y 2, en cuyo caso se habla de “modelo relajado” (subapartado 6.6.1). Las variables relajadas son aquellas que no afectan significativamente a las decisiones de dichos niveles. En cambio, en el nivel 3 no se relajan variables puesto que su resultado es la solución completa final.

Segundo se propone reducir la cantidad de variables y restricciones a considerar y, así, reducir la dimensión del modelo, en cuyo caso se habla de “modelo reducido” (subapartado 6.6.2). Se trata de reducir la distancia máxima entre 2 puntos que se pueden unir directamente  $L_{max}$  (establecida por el decisor para toda pareja de puntos), definiendo una menor distancia  $L_{max\_reducida\_p}$ , que depende del coste de electrificar individualmente dicho punto  $p$ .

El proceso heurístico de resolución consiste en resolver el modelo reducido en un tiempo breve y, posteriormente, intentar mejorar el resultado obtenido resolviendo el modelo original (es decir, no reducido) al que se le añade el valor de la solución encontrada como una cota superior. Este proceso se realiza con o sin variables relajadas, según si se trata del primer/segundo nivel o del tercero, respectivamente.

Por otra parte, en el segundo nivel de decisión puede ocurrir que, al combinar valores objetivo de los atributos y fijar parte de la solución del primer nivel, aparezcan incompatibilidades. Éstas pueden conducir a que los modelos no tengan solución. Para resolver esta situación se ha desarrollado un “modelo alternativo” (subapartado 6.6.3), que permite hallar una distancia máxima de unión entre puntos ( $L_{max\_alternativa}$ ) y una configuración (es decir, las uniones entre puntos) compatibles. De este modo, primero se intenta resolver el modelo reducido con la distancia máxima  $L_{max\_reducida\_p}$  y:

- Si no aparecen incompatibilidades en el segundo nivel, se resuelve el modelo no reducido con la distancia máxima  $L_{max}$  igual al valor especificado por el decisor.
- Si aparecen incompatibilidades, se resuelve el modelo alternativo y se obtiene un valor de la distancia máxima  $L_{max\_alternativa}$  y una configuración compatibles. Posteriormente, se resuelve el modelo reducido fijando dicha configuración y con el valor  $L_{max\_reducida\_p} = L_{max\_alternativa}$ . Finalmente, se resuelve el modelo no reducido con  $L_{max} = L_{max\_alternativa}$ .

Para finalizar, cabe comentar que, según si aparecen incompatibilidades (o no) en el segundo nivel, el proceso de resolución del tercer nivel de decisión es diferente:

- Si no hay incompatibilidades, se resuelve el modelo reducido con  $L_{max\_reducida\_p}$  y, a continuación, el modelo no reducido con  $L_{max}$  igual al valor dado por el decisor.
- Si aparecen incompatibilidades, se resuelve directamente el modelo no reducido con  $L_{max} = L_{max\_alternativa}$ . Esto se debe a que los modelos reducido y no reducido son idénticos si las distancias máximas son iguales.

En la Figura 6.2 se esquematiza el proceso heurístico de resolución expuesto.

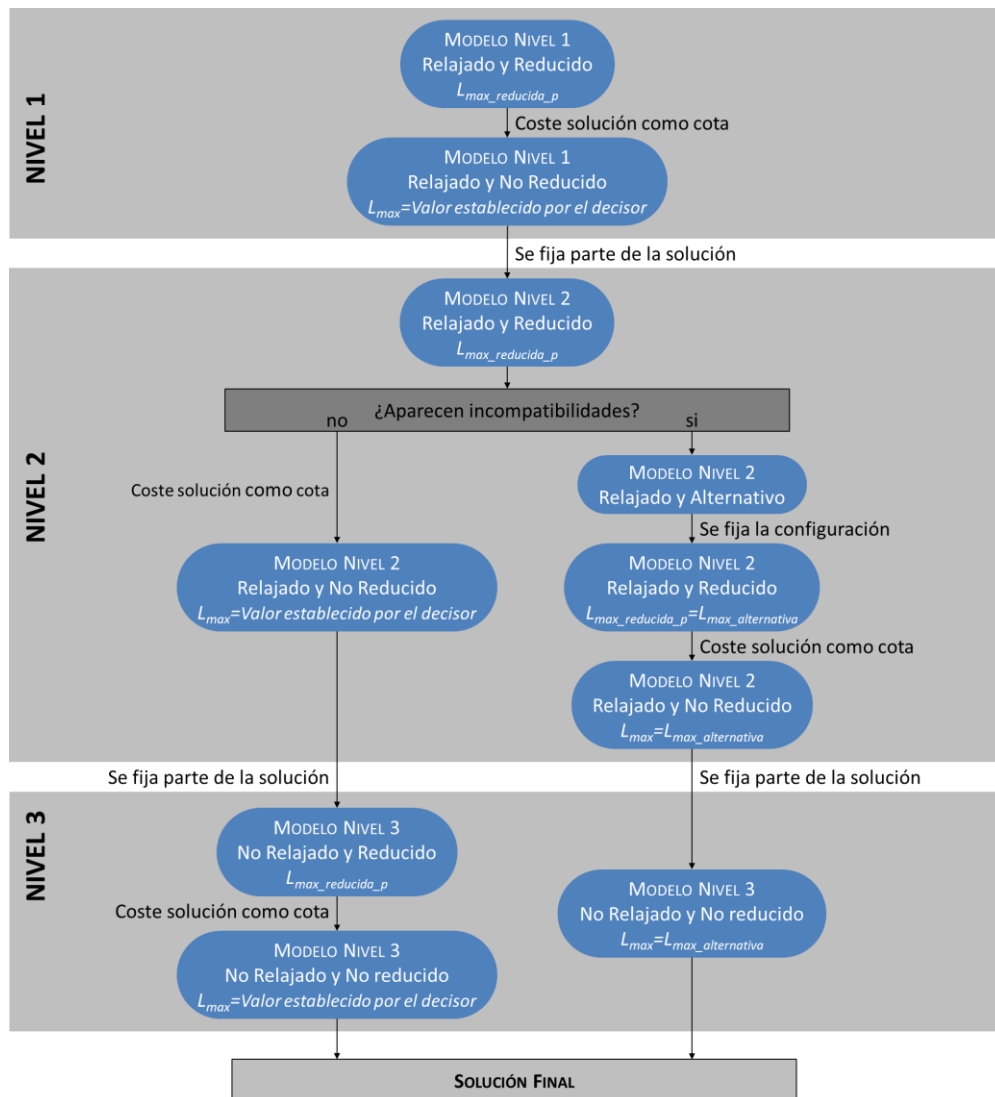


Figura 6.2 – Esquema del proceso de resolución para los 3 niveles de decisión

Este apartado se divide en 4 subapartados. En el primero se explica el modelo relajado. En el segundo se expone el modelo reducido. En el tercero se detalla el modelo alternativo, necesario para solucionar posibles incompatibilidades en el segundo nivel. Finalmente, en el cuarto se concretan los elementos a fijar entre niveles y cómo imponer una cota superior al pasar del modelo reducido al no reducido dentro de un mismo nivel.

### 6.6.1. Modelo relajado

Una forma de simplificar la resolución de un PLEM consiste en relajar variables, es decir, utilizar variables reales en vez de enteras o binarias. A continuación se expone qué variables se propone relajar y cuales no [Triadó *et al.*, 2012]:

- Equipos de generación. Relajar las variables enteras asociadas con los equipos de generación ( $xa_{pa}$  y  $xs_{ps}$ ) conduce a soluciones individuales. En concreto, instalar en cada punto un porcentaje del equipo de generación con menor ratio entre coste y energía generada. De esta forma no se relajan estas variables, ni tampoco la variable binaria asociada con la instalación de equipos de generación ( $xg_p$ ).
- Conductores. Relajar la variable binaria asociada con la existencia de un conductor de un tipo concreto entre 2 puntos ( $xc_{pdc}$ ) conduce a obtener soluciones donde todos los puntos se unen a una microrred, instalando, entre cada 2 puntos, un porcentaje de conductor suficiente para cumplir con la máxima caída de tensión. Se decide no relajar esta variable.

Sin embargo, una simplificación que tiene poca influencia sobre las soluciones obtenidas consiste en trabajar con un único tipo de conductor, lo que reduce de forma significativa la cantidad de variables y restricciones de los modelos. De todos modos esta relajación debe realizarse con precaución. Cuando se definen las características de este único tipo de conductor, se debe tener presente que un coste demasiado bajo conduce a una mayor extensión de las microrredes y un coste demasiado alto limita dicha extensión; por este motivo se propone utilizar un conductor con un coste medio de entre los disponibles. Por su parte, una resistencia demasiado alta puede impedir (por motivos técnicos) la extensión de las microrredes y esto podría ser incompatible con algunos valores objetivo de ciertos atributos del segundo nivel; en consecuencia se propone que el conductor utilizado tenga la mínima resistencia de entre los conductores disponibles.

- Baterías. Las baterías son dispositivos con unas economías de escala ligeramente acentuadas. Así, se pueden dar casos en que la solución se ve muy modificada según si se relaja o no la variable asociada con estos componentes. Este comportamiento es más acentuado contra más días de autonomía se requieren. Además, la dimensión de las baterías está relacionada con el cumplimiento de la demanda de energía y, por tanto, con las variables asociadas a los equipos de generación (que no se relajan). Por consiguiente, se decide no relajar la variable asociada con las baterías ( $xb_{pb}$ ).
- Inversores. Los inversores son dispositivos con unas economías de escala poco acentuadas, de modo que su influencia sobre las soluciones es limitada. Además, en caso de relajar la variable asociada con los conductores (utilizando un único tipo de conductor), cobra especial sentido relajar la variable asociada con los inversores ( $xi_{pi}$ ). Esto se debe a que el grosor del cable depende del flujo de potencia que

circula por éste, tal y como se indica en el apartado 6.3 con las restricciones (6), (11) y (12), y el flujo de potencia viene dado por el tamaño de los inversores. Se decide, por tanto, relajar esta variable.

- **Reguladores solares.** Los reguladores solares son dispositivos con un bajo coste y su influencia sobre las soluciones es muy limitada. Además, únicamente están relacionados con la potencia de los paneles fotovoltaicos. De esta forma se decide relajar la variable asociada con los reguladores solares ( $xz_{pz}$ ).

En conclusión, en cada nivel de decisión se relajan las variables asociadas a los elementos no críticos. Además, se ha de tener presente que al finalizar los 3 niveles de decisión (la segunda etapa) el resultado es la solución final y, por tanto, no puede haber elementos relajados. En concreto, en el primer y segundo nivel se relajan las variables asociadas con inversores y reguladores solares, y sólo se considera un tipo de conductor, mientras que en el tercer nivel no se relaja ninguna variable.

## 6.6.2. Modelo reducido

En el subapartado anterior se propone relajar algunas variables para acelerar la resolución de los modelos. Sin embargo, la cantidad de variables que se puede relajar sin influenciar significativamente en las soluciones es limitada, de modo que su influencia sobre el tiempo de cálculo de los modelos también será limitada. Por ello se propone un “modelo reducido” en el que se reduce el número de variables y restricciones.

Se trata de limitar, en cada nivel, la distancia con que se pueden unir 2 puntos; de esta forma se reduce significativamente el número de variables asociadas a la existencia de conductores ( $xc_{pdc}$ ). Se debe distinguir entre 2 tipos de distancia máxima para unir 2 puntos directamente:

- $L_{max}$ . Se utiliza la misma distancia máxima para todos los puntos de consumo y su valor es especificado por el decisor. Ésta es la distancia que se ha definido para el modelo de los apartados 6.3, 6.4 y 6.5.
- $L_{max\_reducida\_p}$ . Se define una distancia máxima individualizada para cada punto de consumo  $p$ , que se obtiene calculando los metros de conductor que tendrían un coste equivalente a electrificar el usuario individualmente. Supóngase:
  - $p$  punto de consumo de la comunidad.
  - $C_{indiv\_p}$  coste de electrificar individualmente el punto  $p$ .
  - $CC_{barato}$  coste del conductor más barato de entre los disponibles.
  - La distancia máxima reducida individualizada para el punto  $p$  se define como:

$$L_{max\_reducida\_p} = \frac{C_{indiv\_p}}{CC_{barato}}$$

La distancia  $L_{max\_reducida\_p}$  disminuye si se usa un conductor más caro y, por ello, se opta por el conductor más barato.

Un punto  $p$  se podrá unir con otro punto  $q$ , y así definir la variable asociada a la existencia de conductores, si y sólo si la distancia entre ambos puntos es menor que los metros de conductor que se podrían cubrir con el coste de electrificar individualmente cualquiera de los 2 puntos:  $L_{pd} \leq \max(L_{max\_reducida\_p}; L_{max\_reducida\_d})$ .

Para ilustrar la gran diferencia en el número de variables y restricciones al trabajar con las distancias máximas  $L_{max}$  y  $L_{max\_reducida\_p}$ , en la Tabla 6.2 se detalla la cantidad de variables y restricciones para 5 comunidades ejemplo, de tamaños diferentes. Estas comunidades se han seleccionado aleatoriamente de entre los 600 ejemplares generados para el experimento computacional del apartado 6.2.

**Tabla 6.2 – Variables y restricciones para 5 comunidades ejemplo, con  $L_{max}$  y  $L_{max\_reducida\_p}$**

Puntos de consumo	$L_{max}$		$L_{max\_reducida\_p}$	
	Variables	Restricciones	Variables	Restricciones
10	942	684	254	168
20	6553	2704	646	520
30	19597	5712	965	768
40	25815	7308	1248	976
50	63211	12820	1913	1688

Para adaptar el modelo de los apartados 6.3, 6.4 y 6.5 a la reducción de variables y restricciones propuesta en este subapartado, es necesario sustituir el parámetro  $L_{max}$  por el vector de parámetros  $L_{max\_reducida\_p}$  y modificar la definición del conjunto  $Q_p$ :

$L_{max\_reducida\_p}$  Distancia máxima [m] a la que el punto  $p$  puede ser destino de un conductor con origen en cualquier otro punto de la comunidad. Esta distancia es igual a la ratio entre el coste de electrificar individualmente  $p$  y el coste del cable disponible más barato.

$Q_p$  Conjunto de puntos  $d$  que pueden ser destino de un conductor con origen en el punto  $p$ ;  $p=1, \dots, P$ ;  $d=1, \dots, P$ ;  $p \neq d$ ;  
 $L_{pd} \leq \max(L_{max\_reducida\_p}; L_{max\_reducida\_d})$ .

### 6.6.3. Modelo alternativo

Como se ha introducido anteriormente, puede suceder que aparezcan incompatibilidades, fruto de combinar algunos valores objetivo de los atributos del segundo nivel de decisión (referentes a la configuración) y el hecho de fijar parte de la solución del primer al segundo nivel.

Por ejemplo, puede ocurrir que en una comunidad se desee estudiar el imponer un máximo de 1 microrred y un máximo de 0 usuarios individuales. Al combinar ambos valores objetivo de los atributos, se debe diseñar una única microrred que cubra todos los puntos de consumo. Sin embargo, puede suceder que un punto esté muy alejado y



que su distancia respecto a los demás sea mayor que las distancias  $L_{max}$  y  $L_{max\_reducida\_p}$ . En este caso el modelo del segundo nivel no tendría solución.

Si existe incompatibilidad, se propone un “modelo alternativo” con una doble finalidad:

- Encontrar una configuración de las microrredes de distribución compatible con la combinación de valores objetivo de los atributos del segundo nivel, sin considerar ninguna distancia máxima de posible unión entre puntos y minimizando la suma de la longitud de los conductores de las microrredes.
- Definir la distancia máxima entre 2 puntos unidos por un conductor en dicha configuración, en adelante  $L_{max\_alternativa}$ , para usarla en la resolución de los modelos reducido y no reducido.

A continuación, se exponen los parámetros, variables, función objetivo y restricciones del modelo alternativo.

### **Parámetros**

- $P$  Número de puntos de consumo (viviendas, centros de salud, escuelas, etc.).
- $L_{pd}$  Distancia [m] entre los puntos de consumo  $p$  y  $d$ ;  $p=1, \dots, P$ ;  $d=1, \dots, P$ .
- $Q_p$  Conjunto de puntos de consumo  $d$  que pueden ser destino de un conductor con origen en el punto  $p$ ;  $p=1, \dots, P$ ;  $d=1, \dots, P$ ;  $p \neq d$ .

Como se puede observar, en la definición de  $Q_p$  no se impone ninguna distancia máxima para unir 2 puntos, de forma que desaparece toda posible incompatibilidad con la combinación de valores objetivo de los atributos del segundo nivel de decisión. Puesto que  $Q_p$  está formado por todos los puntos excepto  $p$ , podría ser eliminado. Sin embargo, se ha mantenido para seguir con la estructura de la modelización anterior.

### **Variables**

- $fe_{pd}$  Flujo de energía [Wh/día] entre los puntos  $p$  y  $d$ ;  $p=1, \dots, P$ ;  $d \in Q_p$ .
- $xg_p \in \{0,1\}$  Vale 1 si y sólo si se instala algún equipo de generación en el punto  $p$ ;  $p=1, \dots, P$ .
- $xcc_{pd} \in \{0,1\}$  Vale 1 si y sólo si hay un conductor de cualquier tipo entre los puntos  $p$  y  $d$ ;  $p=1, \dots, P$ ;  $d \in Q_p$ .

### **Función objetivo**

La función objetivo (A) minimiza la longitud total de las microrredes.

$$[MIN]Z = \sum_{p=1}^P \sum_{d \in Q_p} L_{pd} \cdot xcc_{pd} \quad (A)$$

### Restricciones

La restricción (B) impone que para cada punto de microrred, el flujo de energía que entra debe ser mayor que la demanda del punto más el flujo de energía que sale. A diferencia de la restricción (5) del modelo del apartado 6.3, donde se trabaja con la demanda de cada punto, aquí se utiliza el valor 1 como simplificación, de forma que cada punto sea considerado. La restricción (C) determina que si existe un flujo de energía entre dos puntos, es necesario colocar un conductor entre ellos. La condición de radialidad se impone en la restricción (D): todo punto  $p$  puede tener, como máximo, un conductor de entrada, salvo los puntos de generación que no pueden tener ninguno.

$$\sum_{q=1|p \in Q_q}^P fe_{qp} + P \cdot xg_p \geq 1 + \sum_{d \in Q_p} fe_{pd} \quad p = 1, \dots, P \quad (B)$$

$$fe_{pd} \leq P \cdot xcc_{pd} \quad p = 1, \dots, P; d \in Q_p \quad (C)$$

$$\sum_{q=1|p \in Q_q}^P xcc_{qp} + xg_p \leq 1 \quad p = 1, \dots, P \quad (C)$$

Adicionalmente, se deben incluir los parámetros, variables y restricciones de los atributos del segundo nivel: número máximo de microrredes ( $AS_2$ ), número mínimo de usuarios por microrred ( $AS_3$ ) y número máximo de usuarios independientes ( $AS_4$ ). El atributo asociado a la instalación de medidores ( $AS_5$ ) no se incluye puesto que no conduce a la aparición de incompatibilidades. En todas las restricciones incluidas se sustituye el sumatorio  $\sum_{c=1}^C xc_{pdc}$  por la variable  $xcc_{pd}$ .

Se define una restricción adicional en caso que la incompatibilidad sea fruto del atributo número mínimo de usuarios por microrred. Así, la restricción (E) complementa la restricción (D) para la condición de radialidad.

$$1 - \sum_{d \in Q_p} xf_{pdf} \geq xcc_{fp} \quad p = 1, \dots, P; f = 1, \dots, P | p \neq f \quad (E)$$

## 6.6.4. Elementos fijados y cotas en cada nivel de decisión

En este subapartado, en primer lugar se explica cómo se fijan elementos para pasar de un nivel de decisión al siguiente, y en segundo lugar se presenta cómo imponer una cota superior del valor de la función objetivo en el modelo no reducido de cada nivel a partir de la solución del modelo reducido (independientemente de que éste se relaje o no).

### 6.6.4.1. Elementos fijados entre niveles de decisión

Tal y como se ha expuesto en el capítulo 4, del primer al segundo nivel y del segundo al tercer nivel, se fija parte de la solución, para evitar que decisiones de niveles posteriores (menos importantes) perjudiquen decisiones de niveles previos (más importantes):

- Del primer al segundo nivel se fijan las agrupaciones de usuarios con un tamaño suficiente (mayor o igual al máximo tamaño mínimo estudiado en el segundo nivel); para ello se fija la existencia de los conductores de dichas agrupaciones.
- Del segundo al tercer nivel se imponen las microrredes existentes; para ello se fija la existencia y dirección de los conductores que definen dichas microrredes.

A continuación se detallan los cambios necesarios en el modelo de los apartados 6.4 y 6.5, para fijar los elementos en el segundo y tercer nivel de decisión. Estos cambios son tanto para el modelo reducido como para el no reducido.

### **Parámetros**

$CONDMNR_{pd}$  Igual a 1 si la solución del nivel anterior presenta un conductor entre los puntos  $p$  y  $d$  ( $p=1, \dots, P, d \in Q_p$ ) y 0 en caso contrario.

### **Variables y Función objetivo**

No se modifican.

### **Restricciones**

La restricción (33) modeliza que si entre 2 puntos existe un conductor en la solución del primer nivel, entre ambos puntos habrá un conductor en uno de los dos sentidos en la solución del segundo nivel.

$$\sum_{c=1}^C xc_{pdc} + \sum_{c=1}^C xc_{dpc} \geq CONDMNR_{pd} \quad p=1, \dots, P; d \in Q_p \quad (33)$$

La restricción (34) modeliza que si entre 2 puntos existe un conductor en la solución del segundo nivel, entre ambos puntos habrá un conductor en el mismo sentido en la solución del tercer nivel.

$$\sum_{c=1}^C xc_{pdc} \geq CONDMNR_{pd} \quad p=1, \dots, P; d \in Q_p \quad (34)$$

Las restricciones (33) y (34) únicamente se añaden en los modelos respectivos cuando el parámetro  $CONDMNR_{pd}$  es igual a 1.

#### **6.6.4.2. Cota superior en el modelo no reducido a partir de la solución del modelo reducido**

Como se ha introducido, una vez se dispone de la solución del modelo reducido, es posible imponer una cota superior del valor de la función objetivo en el modelo no reducido del mismo nivel. A continuación, se presentan los cambios en el modelo de los apartados 6.3, 6.4 y 6.5, únicamente para las versiones no reducidas.

### Parámetros

$CSMR$  Coste de la solución del modelo reducido del mismo nivel de decisión.

### Variables y Función objetivo

No se modifican.

### Restricciones

Las restricciones (35') y (35'') corresponden a utilizar las funciones objetivo (1') y (1'') del primer y segundo nivel de decisión, respectivamente.

$$\begin{aligned} & \sum_{p=1}^P \sum_{a=1}^A CA_a \cdot xa_{pa} + \sum_{p=1}^P \sum_{s=1}^S CS_s \cdot xs_{ps} + \sum_{p=1}^P \sum_{z=1}^Z CZ_z \cdot xz_{pz} + \sum_{p=1}^P \sum_{b=1}^B CB_b \cdot xb_{pb} + \\ & \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^I CI_i \cdot xi_{pi} + CM \cdot P + \sum_{p=1}^P \sum_{d \in Q_p} \sum_{c=1}^C L_{pd} \cdot CC_c \cdot xc_{pdc} \leq CSMS + \varepsilon \end{aligned} \quad (35')$$

$$\begin{aligned} & \sum_{p=1}^P \sum_{a=1}^A CA_a \cdot xa_{pa} + \sum_{p=1}^P \sum_{s=1}^S CS_s \cdot xs_{ps} + \sum_{p=1}^P \sum_{z=1}^Z CZ_z \cdot xz_{pz} + \sum_{p=1}^P \sum_{b=1}^B CB_b \cdot xb_{pb} + \\ & \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^I CI_i \cdot xi_{pi} + \sum_{p=1}^P CM \cdot xm_p + \sum_{p=1}^P \sum_{d \in Q_p} \sum_{c=1}^C L_{pd} \cdot CC_c \cdot xc_{pdc} \leq CSMS + \varepsilon \end{aligned} \quad (35'')$$

## 6.7. Validación del paso de generación de alternativas

Dado el proceso de resolución heurístico propuesto en el apartado anterior, a continuación se presentan dos experimentos computacionales realizados para:

- Evaluar el rendimiento del procedimiento de resolución heurístico. Para ello se compara la resolución utilizando la heurística presentada en el apartado 6.6 en cada nivel de decisión, con la resolución sin utilizar la heurística.
- Cuantificar el error que se comete al resolver los modelos matemáticos por niveles. Para ello se compara la resolución directa (sin considerar niveles de decisión) con la resolución por niveles de decisión.

En primer lugar se introducen los datos de partida con que se trabaja en ambos experimentos (subapartado 6.7.1). En segundo lugar se expone el experimento para evaluar el rendimiento del procedimiento de resolución heurístico (subapartado 6.7.2). En tercer lugar se presenta el experimento para cuantificar el error que se comete al resolver los modelos matemáticos por niveles (subapartado 6.7.3).

### 6.7.1. Datos para los experimentos computacionales

Para realizar los dos experimentos computacionales propuestos, se han seleccionado 20 de los 600 ejemplares utilizados en el experimento del apartado 6.2, tratando de que exista variedad en cuanto a la cantidad y la concentración de los puntos de consumo, así como en el potencial eólico. En la Tabla 6.3 se muestran las características principales de dichos ejemplares.

**Tabla 6.3 – Características principales de los 20 ejemplares**

	<b>Comunidad</b>	<b>Nº viviendas</b>	<b>% viviendas concentradas en 30% territorio</b>	<b>Potencial eólico</b>
<b>E1</b>	El Alumbre	10	0,25	Real
<b>E2</b>	El Alumbre	10	0,50	+50%
<b>E3</b>	El Alumbre	20	0,25	+50%
<b>E4</b>	El Alumbre	20	0,50	Real
<b>E5</b>	El Alumbre	30	0,25	Real
<b>E6</b>	El Alumbre	30	0,50	+50%
<b>E7</b>	El Alumbre	40	0,25	+50%
<b>E8</b>	El Alumbre	40	0,50	Real
<b>E9</b>	El Alumbre	50	0,25	Real
<b>E10</b>	El Alumbre	50	0,50	+50%
<b>E11</b>	Alto Perú	10	0,25	+50%
<b>E12</b>	Alto Perú	10	0,50	Real
<b>E13</b>	Alto Perú	20	0,25	+50%
<b>E14</b>	Alto Perú	20	0,50	Real
<b>E15</b>	Alto Perú	30	0,25	+50%
<b>E16</b>	Alto Perú	30	0,50	Real
<b>E17</b>	Alto Perú	40	0,25	Real
<b>E18</b>	Alto Perú	40	0,50	+50%
<b>E19</b>	Alto Perú	50	0,25	+50%
<b>E20</b>	Alto Perú	50	0,50	+50%

Hecho esto, a continuación se propone resolver cada ejemplar trabajando con unos valores objetivo determinados para cada atributo de cada nivel de decisión. Dichos valores objetivo se han establecido a partir de los conocimientos adquiridos en la colaboración con las ONGs SP e ISF, y se presentan seguidamente:

- Nivel 1. Escenarios de demanda.
  - Demanda Alta: 280 Wh/día, 200 W y autonomía de 1 día.
  - Demanda Baja: 420 Wh/día, 300 W y autonomía de 2 días.

- Nivel 2. Escenarios de gestión del sistema.
  - Número máximo de microrredes: 1 o sin límite.
  - Número mínimo de usuarios por microrred: 25% de la comunidad o sin límite.
  - Número máximo de usuarios individuales: 25% de la comunidad o sin límite.
  - Medidores en todos los usuarios o únicamente en microrredes.
  
- Nivel 3. Escenarios de seguridad del suministro.
  - Porcentaje mínimo de energía generada con paneles: 25% o sin límite.
  - Número mínimo de equipos de generación: 2 o sin límite.
  - Porcentaje adicional de energía en usuarios individuales: 20% o sin límite.

De esta forma, en el primer nivel de decisión se resuelven 2 modelos, asociados a los escenarios de demanda alta y baja. En el segundo nivel se deberían resolver 16 modelos para cada alternativa del primer nivel, fruto de combinar entre sí los 2 valores objetivo de cada uno de los cuatro atributos ( $2^4=16$ ); sin embargo, 2 de estos modelos se descartan por ser repeticiones: si se impone un máximo de 1 microrred y un 25% de usuarios individuales, la solución es la misma independientemente de si se impone (o no) un mínimo del 25% de usuarios por microrred. Finalmente, en el tercer nivel se resuelven 8 modelos para cada alternativa del segundo nivel, correspondientes a combinar entre sí los 3 valores objetivo de los tres atributos ( $2^3=8$ ).

En resumen, para cada ejemplar, se resuelven 2 modelos en el primer nivel, 28 modelos en el segundo ( $(16-2)*2$ ) y 224 modelos en el tercero ( $2*14*8$ ); es decir, un total de 254 modelos de programación matemática. Los datos técnicos de los equipos usados en los experimentos computacionales se muestran en el anexo A.1.

### **6.7.2. Experimento para evaluar el proceso de resolución heurístico**

Para evaluar el rendimiento del procedimiento de resolución heurístico, se proponen dos procesos de resolución diferentes. En ambos casos se resuelve cada ejemplar con la metodología por niveles propuesta en esta tesis doctoral, es decir se resuelven los 254 modelos matemáticos. Además:

- Resolución sin heurística (RSH). No se utiliza el proceso heurístico propuesto en el apartado 6.6; se usa, en su lugar, el modelo no relajado y no reducido introducido en los apartados 6.3, 6.4 y 6.5.
  
- Resolución con heurística (RCH). Se utiliza el proceso heurístico propuesto en el apartado 6.6 y que se detalla en la Figura 6.2.

Con la comparación de la RSH y la RCH se podrá comprobar el rendimiento del procedimiento de resolución heurístico.

Al resolver los modelos de cada nivel de decisión se toma en cuenta que la resolución del primer nivel es más lenta que la del segundo y, a su vez, ésta es más lenta que la del tercero, debido a que se van fijando elementos de la solución entre niveles. Así, se impone como máximo: 1800s para cada modelo del primer nivel de decisión, 1200s para cada modelo del segundo y 600s para cada modelo del tercero (lo que corresponde a un tiempo máximo de 3600s para resolver los 3 modelos, uno en cada uno de los tres niveles de decisión, que permitirían obtener una de entre las soluciones finales del ejemplar). El tiempo máximo resultante para cada ejemplar es de prácticamente 2 días.

La Tabla 6.4 muestra los resultados obtenidos para cada ejemplar y cada nivel, y para el global de todos ellos (última fila). El significado de cada columna es el siguiente:

- RSH no resuelto. Casos en que la resolución sin heurística no obtiene solución factible (recuérdese que, sin embargo, RCH siempre obtiene alguna solución factible).
- Media (RCH–RSH). Porcentaje promedio de la diferencia de coste obtenida con la resolución con heurística frente a sin heurística. Los valores negativos indican una mejora en el coste con la heurística y los valores positivos un empeoramiento.
- RCH mejora RSH. Porcentaje de alternativas en que la resolución con heurística obtiene mejor resultado que la resolución sin heurística.
- Mejora >5%. Porcentaje de alternativas en que la resolución con heurística obtiene un resultado más de un 5% mejor que la resolución sin heurística.
- RCH igual RSH. Porcentaje de alternativas en que la resolución con heurística obtiene el mismo resultado que la resolución sin heurística.
- RCH empeora RSH. Porcentaje de alternativas en que la resolución con heurística obtiene peor resultado que la resolución sin heurística.
- Empeora >5%. Porcentaje de alternativas en que la resolución con heurística obtiene un resultado más de un 5% peor que la resolución sin heurística.

A partir de los resultados de la Tabla 6.4 se observa que para el global de todos los ejemplares, el coste obtenido mediante las resoluciones con y sin heurística son prácticamente idénticos: RCH y RSH difieren un 0,0% en el primer nivel de decisión, RCH mejora en un 0,9% a RSH en el segundo nivel, y RCH empeora en un 0,7% a RSH en el tercer nivel. Además, en un 72,5% de los casos del primer nivel, en un 79,3% del segundo y en un 67,4% del tercero, la RCH mejora o iguala los resultados obtenidos con la RSH. Tan sólo en un 1,8% de los casos del segundo nivel y en un 7,1% del tercero, la solución de la RCH empeora en más de un 5% la solución de la RSH. Estos resultados permiten afirmar que la heurística obtiene soluciones muy válidas de alto rendimiento.

Cabe resaltar que mientras la RSH no siempre encuentra solución, sobre todo para el tercer nivel que debe proporcionar una solución final factible del ejemplar (14,8% de los casos) y a medida que aumenta la cantidad de puntos de consumo, la RCH siempre encuentra alguna solución factible. Esto es fundamental, puesto que es imprescindible encontrar siempre una solución válida para que la metodología pueda ser utilizada.

Tabla 6.4 – Experimento para evaluar el rendimiento del procedimiento de resolución heurística

		RSH no resuelto	Media (RCH-RSH)	RCH mejora RSH	Mejora > 5%	RCH iguala RSH	RCH empeora RSH	Empeora > 5%
C1	Nivel 1	0	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%	0,0%	0,0%
	Nivel 2	0	0,0%	3,6%	0,0%	92,8%	3,6%	0,0%
	Nivel 3	0	0,2%	8,5%	3,6%	81,7%	9,8%	5,4%
C2	Nivel 1	0	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%	0,0%	0,0%
	Nivel 2	0	0,0%	0,0%	0,0%	96,4%	3,6%	0,0%
	Nivel 3	0	0,0%	23,2%	0,0%	71,9%	4,9%	0,9%
C3	Nivel 1	0	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%	0,0%	0,0%
	Nivel 2	0	0,4%	10,7%	3,6%	60,7%	28,6%	3,6%
	Nivel 3	0	0,4%	10,3%	0,4%	77,7%	12,0%	3,6%
C4	Nivel 1	0	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%	0,0%	0,0%
	Nivel 2	0	0,1%	7,1%	0,0%	78,6%	14,3%	0,0%
	Nivel 3	0	0,2%	0,9%	0,0%	78,6%	20,5%	0,0%
C5	Nivel 1	0	-0,2%	50,0%	0,0%	50,0%	0,0%	0,0%
	Nivel 2	0	-1,9%	39,3%	14,3%	46,4%	14,3%	0,0%
	Nivel 3	39	-0,9%	47,3%	32,6%	12,1%	40,6%	7,6%
C6	Nivel 1	0	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%	0,0%	0,0%
	Nivel 2	0	-2,8%	60,7%	32,1%	39,3%	0,0%	0,0%
	Nivel 3	8	-0,9%	42,0%	13,4%	13,4%	44,6%	0,9%
C7	Nivel 1	0	-0,1%	50,0%	0,0%	0,0%	50,0%	0,0%
	Nivel 2	0	-3,6%	50,0%	14,3%	42,9%	7,1%	0,0%
	Nivel 3	28	-1,6%	42,4%	22,3%	22,8%	34,8%	1,3%
C8	Nivel 1	0	0,9%	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%	0,0%
	Nivel 2	0	0,5%	14,3%	0,0%	39,3%	46,4%	3,6%
	Nivel 3	15	2,2%	17,9%	6,7%	29,0%	53,1%	12,5%
C9	Nivel 1	0	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%	0,0%
	Nivel 2	0	1,3%	39,3%	7,1%	10,7%	50,0%	28,6%
	Nivel 3	125	3,1%	66,5%	58,0%	0,0%	33,5%	10,7%
C10	Nivel 1	0	0,4%	50,0%	0,0%	0,0%	50,0%	0,0%
	Nivel 2	0	0,0%	39,3%	0,0%	32,1%	28,6%	0,0%
	Nivel 3	69	2,6%	37,5%	31,7%	2,7%	59,8%	12,1%
C11	Nivel 1	0	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%	0,0%	0,0%
	Nivel 2	0	0,0%	7,2%	0,0%	82,1%	10,7%	0,0%
	Nivel 3	0	0,2%	4,0%	0,0%	80,8%	15,2%	1,8%
C12	Nivel 1	0	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%	0,0%	0,0%
	Nivel 2	0	0,0%	7,1%	0,0%	92,9%	0,0%	0,0%
	Nivel 3	0	0,2%	1,8%	0,0%	87,5%	10,7%	0,9%
C13	Nivel 1	0	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%	0,0%	0,0%
	Nivel 2	0	-2,0%	25,0%	21,4%	71,4%	3,6%	0,0%
	Nivel 3	4	-0,4%	25,4%	9,4%	43,8%	30,8%	1,3%
C14	Nivel 1	0	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%	0,0%	0,0%
	Nivel 2	0	-2,1%	42,9%	14,3%	50,0%	7,1%	0,0%
	Nivel 3	4	0,7%	35,7%	10,7%	9,8%	54,5%	18,8%
C15	Nivel 1	0	0,1%	0,0%	0,0%	50,0%	50,0%	0,0%
	Nivel 2	0	-3,0%	42,9%	17,9%	50,0%	7,1%	0,0%
	Nivel 3	3	-0,8%	34,8%	17,0%	29,5%	35,7%	8,0%
C16	Nivel 1	0	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%	0,0%
	Nivel 2	0	-3,1%	35,7%	14,3%	21,4%	42,9%	0,0%
	Nivel 3	4	-0,7%	39,3%	22,3%	16,1%	44,6%	17,0%
C17	Nivel 1	0	0,1%	0,0%	0,0%	50,0%	50,0%	0,0%
	Nivel 2	0	-1,4%	32,1%	7,1%	53,6%	14,3%	0,0%
	Nivel 3	69	2,4%	43,8%	30,8%	16,5%	39,7%	14,3%
C18	Nivel 1	0	-0,3%	100,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	Nivel 2	0	-0,4%	50,0%	0,0%	21,4%	28,6%	0,0%
	Nivel 3	36	1,3%	37,0%	21,0%	15,2%	47,8%	9,8%
C19	Nivel 1	0	0,2%	50,0%	0,0%	0,0%	50,0%	0,0%
	Nivel 2	0	-0,6%	32,2%	3,6%	35,7%	32,1%	0,0%
	Nivel 3	118	3,2%	63,4%	53,6%	1,3%	35,3%	12,1%
C20	Nivel 1	0	-0,2%	100,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	Nivel 2	0	0,1%	21,4%	0,0%	7,2%	71,4%	0,0%
	Nivel 3	141	1,5%	75,9%	62,9%	0,0%	24,1%	3,6%
Total	Nivel 1	0	0,0%	20,0%	0,0%	52,5%	27,5%	0,0%
	Nivel 2	0	-0,9%	28,0%	7,5%	51,3%	20,7%	1,8%
	Nivel 3	33	0,7%	32,9%	19,8%	34,5%	32,6%	7,1%



### 6.7.3. Experimento para cuantificar el error que se comete al resolver por niveles de decisión

Para cuantificar el error que se comete al resolver los modelos matemáticos por niveles, frente a suponer que no existen niveles (y que, así, una vez dados los valores objetivo de los atributos de todos los criterios, se generen los modelos finales a resolver, 224 en nuestro ejemplo), se propone 3 procesos de resolución diferentes:

- Resolución directa (RD). Se resuelve cada ejemplar sin niveles de decisión, imponiendo un tiempo máximo de cálculo igual a 3600s para cada uno de los 224 modelos, es decir un tiempo máximo total de 9 días y 8 horas.
- Resolución por niveles larga (RNL). Se resuelve cada ejemplar con niveles de decisión, imponiendo un tiempo máximo de cálculo igual a 8481s para cada modelo del primer nivel de decisión, 5654s para cada modelo del segundo y 2827s para cada modelo del tercero (lo que corresponde a un tiempo máximo de 16962s para resolver los 3 modelos matemáticos que permitirían obtener una de entre las soluciones finales del ejemplar). Estos valores también corresponden a un tiempo máximo total de 9 días y 8 horas.
- Resolución por niveles corta (RNC). Se resuelve cada ejemplar con niveles de decisión, imponiendo un tiempo máximo de cálculo igual a 1800s para cada modelo del primer nivel de decisión, 1200s para cada modelo del segundo y 600s para cada modelo del tercero. Esta RNC es la RCH del subapartado anterior.

La Tabla 6.5 muestra los resultados obtenidos para cada ejemplar y para el global de todos ellos (última fila). El significado de cada columna es el siguiente:

- $\text{Mínimo}_{224}$  (RN–RD). Porcentaje máximo de reducción del coste entre las 224 soluciones finales de los 20 ejemplares, que se obtiene mediante la resolución por niveles frente a la directa.
- $\text{Máximo}_{224}$  (RN–RD). Porcentaje máximo de aumento del coste entre las 224 soluciones finales de los 20 ejemplares, que se obtiene mediante la resolución por niveles frente a la directa.
- $\text{Media}_{224}$  (RN–RD). Porcentaje promedio de las diferencias de coste obtenidas con la resolución por niveles frente a la resolución directa. Los valores negativos indican una mejora en el coste con la resolución por niveles, mientras que los valores positivos indican un empeoramiento.
- RN mejora RD. Porcentaje de soluciones finales en que la resolución por niveles obtiene mejor resultado que la resolución directa.
- Mejora >5%. Porcentaje de soluciones finales en que la resolución por niveles obtiene un resultado más de un 5% mejor que la resolución directa.

- RN igual RD. Porcentaje de soluciones finales en que la resolución por niveles obtiene el mismo resultado que la resolución directa.
- RN empeora RD. Porcentaje de soluciones finales en que la resolución por niveles obtiene peor resultado que la resolución directa.
- Empeora >5%. Porcentaje de soluciones finales en que la resolución por niveles obtiene un resultado más de un 5% peor que la resolución directa.

**Tabla 6.5 – Experimento computacional para cuantificar el error que se comete al resolver los modelos matemáticos por niveles**

		Mínimo <sub>224</sub> (RN–RD)	Máximo <sub>224</sub> (RN–RD)	Media <sub>224</sub> (RN–RD)	RN mejora RD	Mejora > 5%	RN igual RD	RN empeora RD	Empeora > 5%
C1	RNL	16,8%	10,4%	-0,9%	18,8%	14,3%	47,7%	33,5%	5,4%
	RNC	16,8%	10,4%	-0,9%	18,8%	14,3%	47,7%	33,5%	5,4%
C2	RNL	18,1%	61,1%	5,4%	15,2%	14,3%	50,4%	34,4%	14,3%
	RNC	18,1%	61,1%	5,4%	15,2%	14,3%	50,4%	34,4%	14,3%
C3	RNL	15,1%	7,2%	-1,2%	14,3%	14,3%	68,3%	17,4%	4,0%
	RNC	13,4%	7,2%	-0,8%	10,7%	10,7%	71,9%	17,4%	4,0%
C4	RNL	4,5%	7,3%	0,1%	18,3%	0,0%	36,2%	45,5%	1,8%
	RNC	4,5%	7,3%	0,1%	18,3%	0,0%	36,2%	45,5%	1,8%
C5	RNL	7,5%	6,2%	1,0%	14,3%	2,7%	18,3%	67,4%	2,2%
	RNC	1,8%	6,2%	1,3%	7,2%	0,0%	20,5%	72,3%	2,2%
C6	RNL	1,2%	6,9%	1,0%	0,9%	0,0%	42,9%	56,2%	4,0%
	RNC	1,2%	6,9%	1,1%	0,9%	0,0%	41,1%	58,0%	5,4%
C7	RNL	1,0%	7,5%	1,2%	7,1%	0,0%	29,5%	63,4%	5,4%
	RNC	1,0%	7,5%	1,2%	7,1%	0,0%	29,0%	63,9%	3,6%
C8	RNL	2,2%	12,4%	1,8%	16,5%	0,0%	19,2%	64,3%	9,8%
	RNC	2,2%	32,0%	2,5%	12,5%	0,0%	20,5%	67,0%	16,1%
C9	RNL	11,4%	7,2%	-1,2%	33,5%	23,2%	33,9%	32,6%	4,5%
	RNC	11,4%	9,7%	-0,8%	31,7%	21,4%	33,5%	34,8%	7,6%
C10	RNL	2,5%	15,7%	1,8%	12,9%	0,0%	33,5%	53,6%	13,4%
	RNC	2,5%	15,7%	2,0%	11,1%	0,0%	33,5%	55,4%	17,0%
C11	RNL	15,1%	6,8%	-1,5%	21,9%	14,3%	62,1%	16,0%	1,8%
	RNC	15,1%	6,8%	-1,4%	21,9%	14,3%	58,5%	19,6%	1,8%
C12	RNL	11,6%	5,8%	-0,8%	20,5%	10,7%	63,4%	16,1%	0,9%
	RNC	11,6%	5,8%	-0,7%	19,6%	10,7%	59,9%	20,5%	0,9%
C13	RNL	2,1%	5,4%	0,6%	3,6%	0,0%	54,0%	42,4%	0,9%
	RNC	2,1%	5,4%	0,6%	3,6%	0,0%	51,8%	44,6%	0,9%
C14	RNL	12,1%	15,7%	1,1%	20,5%	8,0%	31,3%	48,2%	14,3%
	RNC	11,8%	15,7%	1,8%	12,0%	4,0%	31,3%	56,7%	16,1%
C15	RNL	0,8%	13,4%	1,6%	3,5%	0,0%	42,0%	54,5%	8,9%
	RNC	0,8%	13,4%	1,7%	2,2%	0,0%	41,5%	56,3%	8,9%
C16	RNL	5,7%	18,1%	1,9%	29,9%	0,4%	21,9%	48,2%	18,3%
	RNC	4,6%	18,1%	2,5%	18,8%	0,0%	23,2%	58,0%	21,4%
C17	RNL	1,8%	21,0%	2,3%	5,4%	0,0%	13,8%	80,8%	16,1%
	RNC	1,8%	21,0%	2,3%	4,9%	0,0%	13,8%	81,3%	16,1%
C18	RNL	9,0%	12,1%	1,3%	27,7%	4,5%	25,0%	47,3%	15,6%
	RNC	9,0%	15,5%	1,3%	28,1%	4,5%	25,0%	46,9%	13,8%
C19	RNL	9,5%	12,6%	1,2%	26,3%	6,7%	20,5%	53,2%	18,3%
	RNC	8,8%	17,6%	1,4%	25,9%	4,9%	17,9%	56,2%	19,2%
C20	RNL	18,3%	8,5%	-2,8%	62,5%	32,1%	0,0%	37,5%	6,3%
	RNC	18,4%	8,4%	-2,8%	66,1%	31,3%	0,4%	33,5%	6,7%
Total	RNL	18,3%	61,1%	0,7%	18,7%	7,3%	35,7%	45,6%	8,3%
	RNC	18,4%	61,1%	0,9%	18,8%	6,5%	35,4%	47,8%	9,2%

Como se puede observar, para el global de todos los ejemplares, el empeoramiento obtenido al resolverlos por niveles frente a resolverlos directamente es del 0,7% para RNL y del 0,9% para RNC. En un 45,6% de los casos para RNL (y en un 47,8% para RNC) el coste empeora al resolver por niveles, pero tan sólo en un 8,3% de los casos para RNL (y en un 9,2% para RNC) este empeoramiento es mayor que un 5%.

Además, aunque para alguna solución final de algún ejemplar la RNL y la RNC obtienen resultados notablemente peores que la RD (pudiendo llegaren un único caso al 61,1%), éstos son casos muy puntuales. Por ejemplo, para el ejemplar C2 existen dos zonas alejadas entre sí, donde se concentran 3 y 4 puntos de consumo, respectivamente. En el primer nivel se genera una microrred en cada una de las dos regiones, que se fijan al pasar al segundo nivel. Así, cuando se impone un máximo de una microrred en el segundo nivel, ambas agrupaciones se deben unir encareciendo considerablemente la solución final obtenida.

En conclusión: por un lado, permitir un mayor tiempo de cálculo en la resolución por niveles no aporta una mejora notable en los resultados obtenidos; y, por otro, la resolución por niveles obtiene, en promedio, resultados muy similares a los que se obtendrían si se resolviesen los modelos finales directamente (pero, en el caso de la RNC, con mucho menos tiempo de cálculo). Esto refuerza, si cabe, la decisión previa de trabajar con niveles de decisión, que permiten interactuar al decisor y estructurar la toma de decisiones para ajustar el diseño a las necesidades reales de la población.



## 7. Selección de alternativas de electrificación

Cada nivel de decisión de la segunda etapa de la metodología se divide en 2 pasos: primero se generan diversas alternativas de electrificación y luego se selecciona la más adecuada. Este capítulo se centra en el segundo paso (Figura 7.1), que incluye la clasificación de las alternativas, la ponderación de criterios y subcriterios, y el proceso iterativo para ajustar dicha ponderación (descrito en el capítulo 4).

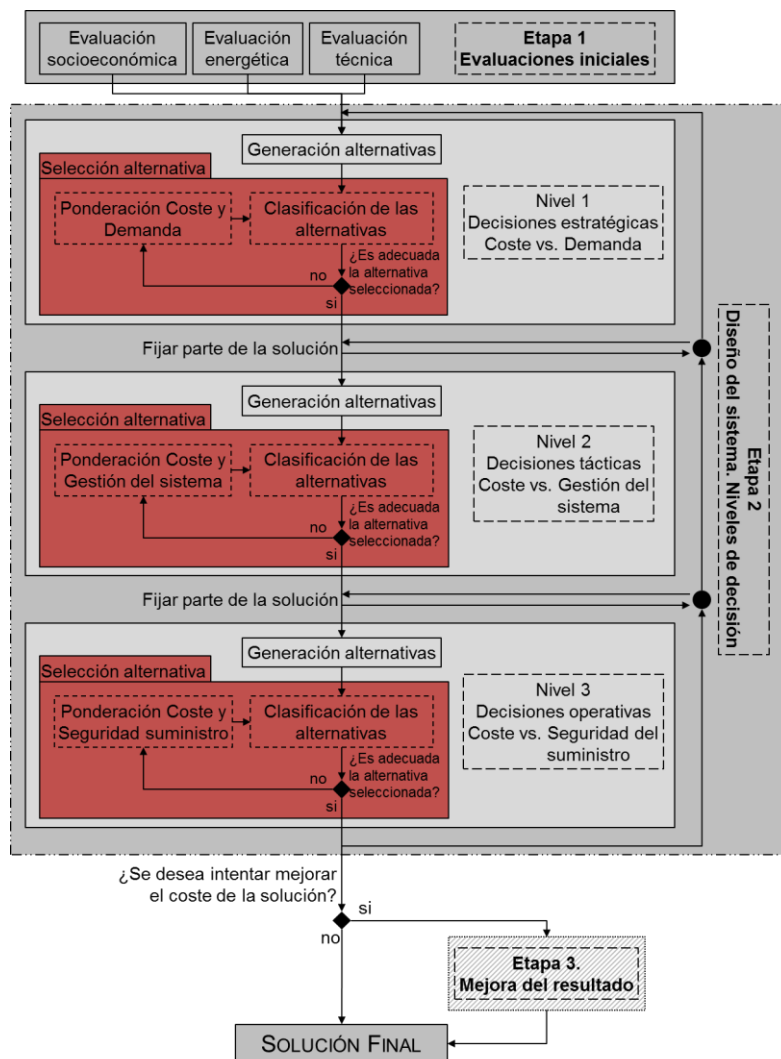


Figura 7.1 – Selección de alternativas resaltada en rojo para cada nivel de decisión, dentro del esquema de la metodología de diseño

Al iniciar el paso de selección de alternativas, en cada nivel se dispone de las alternativas de electrificación previamente generadas, y se propone ordenarlas de más a menos adecuada en función de los pesos asignados a los criterios y subcriterios del propio nivel de decisión. Para ello se utiliza un proceso de decisión multicriterio que, como se ha introducido en el estado del arte, se divide en 4 puntos [Wang *et al.*, 2009]:

- Selección de criterios. Se determinan unos criterios de evaluación, a partir de la opinión de todos los actores involucrados en el proceso de decisión.
- Ponderación de criterios. Se asigna un valor a cada criterio, representativo de su importancia respecto a los demás.
- Evaluación de alternativas. Se evalúa cada alternativa en función de cada criterio, ya sea de forma cualitativa o cuantitativa.
- Agregación de resultados. Se hace converger las diferencias que pueden aparecer con distintos métodos o variantes de un mismo método aplicados por el mismo decisor, o el mismo método aplicado por distintos decisores.

Basándose en estos 4 puntos, la selección de alternativas tiene una estructura transparente y se facilita la toma de decisiones a lo largo de todo el proceso de diseño. Ambas características son clave para que la metodología desarrollada se adecúe a las necesidades de promotores de la electrificación rural en países en desarrollo.

Si bien la estructura presentada para la decisión multicriterio es, en rasgos generales, común en la mayoría de publicaciones revisadas, cada estudio adapta los 4 puntos a las características propias del problema a resolver. En concreto, en este trabajo se han agrupado: por una parte, la selección y la ponderación de criterios; y, por otra, la evaluación de alternativas y la agregación de resultados. De esta forma se puede identificar claramente los momentos en los que el decisor entra en juego: para asignar unos pesos a los criterios de evaluación; y para analizar la clasificación de alternativas y seleccionar la/s más cercana/s a sus preferencias.

En el primer apartado se presenta cómo se han definido los criterios de evaluación, adaptados al contexto de zonas rurales de países en desarrollo. Asimismo se explica cómo se han determinado unos pesos generalizados para dichos criterios. En el segundo apartado se expone la evaluación de alternativas en función de cada criterio y, a partir de dicha evaluación, cómo ordenar las alternativas hasta obtener una clasificación final, mediante la técnica de la programación compromiso.

## **7.1. Definición y ponderación de criterios**

En este apartado se presenta la definición y ponderación de criterios. En los 2 primeros subapartados se explica la definición inicial de los criterios y su ponderación. En los 2 siguientes subapartados se expone la definición de los criterios finalmente utilizados y el modo en que se ponderan, así como unos pesos generales para dichos criterios y subcriterios adaptados a zonas rurales de países en desarrollo.

### 7.1.1. Experiencias previas en la definición de criterios

Para definir los criterios de evaluación se analizó la bibliografía recogida en el capítulo 3 y las herramientas relacionadas con el diseño de proyectos de electrificación rural. Además se realizaron varias entrevistas de trabajo con expertos en electrificación rural de las ONGs SP, ISF y GE.

El conocimiento de estos expertos era variado y se extendía a distintos contextos, principalmente en regiones de costa, sierra y selva de Perú, Ecuador y Bolivia. A través de ellos, se deseaba determinar un conjunto de criterios que permitiesen evaluar un proyecto de electrificación en zonas rurales de países en desarrollo. Estos criterios debían considerar las preferencias de todos los actores involucrados en el proceso: la entidad promotora, las autoridades locales y regionales, y los futuros beneficiarios.

Fruto del estudio bibliográfico y de las entrevistas, se obtuvo un listado de 28 criterios de evaluación. Sin embargo, Nijkamp *et al.* [1990] afirman que un decisor racional no es capaz de considerar más de 7 a 12 criterios simultáneamente. En consecuencia, se decidió agrupar criterios relacionados entre sí. De esta forma un decisor podría centrarse en temáticas y subtemáticas, facilitando la ponderación y la evaluación de criterios y subcriterios. En concreto, los 28 (sub)criterios de partida se agruparon en 14 criterios que, a su vez, se englobaron en 2 grandes categorías: sociales (Tabla 7.1) y técnicos (Tabla 7.2).

**Tabla 7.1 – Categoría 1: Criterios y subcriterios sociales**

Criterio		Subcriterio		Definición
CS <sub>1</sub>	Facilidad de gestión	CS <sub>1-1</sub>	Gestión domiciliaria	Gestión del sistema en el seno de los domicilios.
		CS <sub>1-2</sub>	Gestión comunitaria	Gestión del sistema en la interacción entre familias.
		CS <sub>1-3</sub>	Resolución de conflictos	Modo en que el sistema puede conllevar la aparición de conflictos entre vecinos.
CS <sub>2</sub>	Equidad	CS <sub>2-1</sub>	Equidad en el suministro	Cantidad de energía suministrada a un usuario, respecto a la suministrada a los demás.
		CS <sub>2-2</sub>	Acceso a la tecnología	Usuarios beneficiados, sobre el total de usuarios de la comunidad que desean la electricidad.
CS <sub>3</sub>	Económico	CS <sub>3-1</sub>	Esfuerzo de pago	Cantidad a pagar por la electricidad respecto a lo pagado anteriormente en concepto de iluminación.
CS <sub>4</sub>	Beneficios domiciliarios	CS <sub>4-1</sub>	Ingreso de las familias	Posibilidad de desarrollo de actividades productivas en el seno de los domicilios.
		CS <sub>4-2</sub>	Calidad de vida en los domicilios	Comodidades domiciliarias que puede aportar la electrificación.
CS <sub>5</sub>	Servicios comunitarios	CS <sub>5-1</sub>	Salud	Beneficios de la electrificación en los centros de salud.
		CS <sub>5-2</sub>	Educación	Beneficios de la electrificación en las escuelas.
CS <sub>6</sub>	Usos productivos	CS <sub>6-1</sub>	Puestos de trabajo	Posibilidad de desarrollo de actividades productivas a escala comunitaria.
CS <sub>7</sub>	Impacto sobre los recursos locales	CS <sub>7-1</sub>	Ocupación del suelo	Espacio ocupado por los equipos de generación.

Tabla 7.2 – Categoría 2: Criterios y subcriterios técnicos

Criterio		Subcriterio		Definición
CT <sub>1</sub>	Económico	CT <sub>1-1</sub>	Inversión inicial / familia	Coste de la inversión inicial del sistema por familia beneficiada.
		CT <sub>1-2</sub>	Inversión inicial	Coste de la inversión inicial del sistema.
		CT <sub>1-3</sub>	Operación y mantenimiento	Costes anuales de operación y mantenimiento del sistema (limpieza, repuestos, etc.).
CT <sub>2</sub>	Cantidad de suministro	CT <sub>2-1</sub>	Energía suministrada / familia	Cantidad de energía suministrada por familia beneficiada.
		CT <sub>2-2</sub>	Potencia suministrada / familia	Cantidad de potencia suministrada por familia beneficiada.
CT <sub>3</sub>	Continuidad del recurso	CT <sub>3-1</sub>	Fiabilidad del recurso	Continuidad de los recursos energéticos a lo largo del tiempo en cada punto de la comunidad.
		CT <sub>3-2</sub>	Autonomía de las baterías	Días que la comunidad puede disponer de electricidad cuando no hay recursos energéticos.
CT <sub>4</sub>	Flexibilidad	CT <sub>4-1</sub>	Modularidad	Facilidad del sistema para adherir nuevos usuarios.
		CT <sub>4-2</sub>	Flexibilidad de consumo entre usuarios	Facilidad del sistema para que un usuario pueda incrementar puntualmente su consumo.
CT <sub>5</sub>	Repuestos locales	CT <sub>5-1</sub>	Asistencia en pequeñas averías/repuestos	Disponibilidad de asistencia técnica o repuestos lo más cerca posible a la comunidad.
		CT <sub>5-2</sub>	Asistencia en grandes averías/repuestos	Disponibilidad de asistencia técnica o repuestos lo más cerca posible a la comunidad.
CT <sub>6</sub>	Fabricación local	CT <sub>6-1</sub>	Componentes generales	Disponibilidad de proveedores lo más cercanos posible a la comunidad.
		CT <sub>6-2</sub>	Componentes específicos	Disponibilidad de proveedores lo más cercanos posible a la comunidad.
		CT <sub>6-3</sub>	Instalación	Disponibilidad de personal cualificado para la instalación de los sistemas.
CT <sub>7</sub>	Seguridad	CT <sub>7-1</sub>	Fallos en los equipos	Resistencia de los equipos frente a averías.
		CT <sub>7-2</sub>	Pocos equipos	Cantidad de equipos de generación en cada punto de generación.

### 7.1.2. Experiencias previas en la ponderación de criterios

Una vez definidos los criterios de evaluación, se realizaron unas pruebas para determinar si era sencillo ponderar los criterios utilizando un ejemplo ilustrativo. Estas pruebas se realizaron con 7 sociólogos y 7 técnicos expertos de las ONGs SP e ISF.

La comunidad seleccionada fue Alto Perú (Figura 7.2) puesto que todos los expertos consultados conocían sus características. Esta comunidad consta de 62 viviendas, una iglesia, una escuela y un centro de salud, y ha sido electrificada por ambas ONGs:

- Zona 1. Microrred solar. Por electrificar en el momento de las entrevistas.
- Zona 2. Dos microrredes eólicas. Electrificado en el momento de las entrevistas.
- Zonas 3 y 5. Sistemas solares individuales. Por electrificar en el momento de las entrevistas.
- Zona 4. Pico-central hidroeléctrica. Por electrificar en el momento de las entrevistas.

En cuanto a las características de la comunidad y su población, se puede encontrar un gran detalle en el diagnóstico socioeconómico presentado en Ramírez & Mantilla [2009].



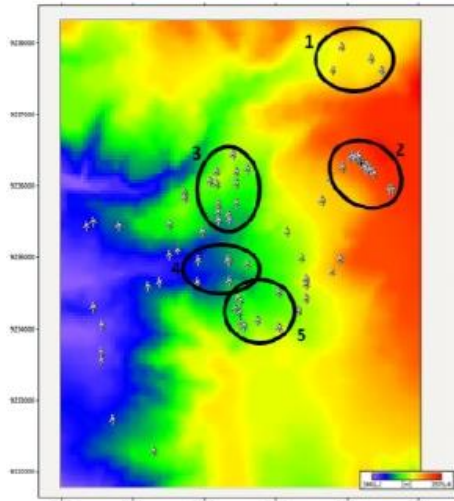


Figura 7.2 – Mapa de elevación de la comunidad de Alto Perú

La ponderación de criterios se basó en el método Delphi [Scott, 2001]. Éste es un proceso iterativo con el objetivo de converger las opiniones de los expertos y lograr un consenso. Para ello, cada experto emite su opinión de forma anónima y, posteriormente, se analizan y discuten conjuntamente los resultados obtenidos. Este proceso se repite iterativamente hasta alcanzar un acuerdo.

El trabajo inicial se centró en ponderar los criterios de las Tablas 7.1 y 7.2. Inicialmente se indicó a los expertos que asignaran unos pesos de 1 a 10, según si el criterio tenía poca o mucha relevancia, respectivamente, respecto a los demás, pero se observó que:

- Resultaba difícil para los expertos saber si un incremento o disminución en el peso de un criterio en una unidad era muy significativo o no.
- Algunos expertos tendían a asignar todos los pesos muy altos, mientras que otros tendían a una asignación a la baja.
- Fruto de la complejidad de esta ponderación, y tras analizar los resultados junto con los expertos, se concluyó que los pesos no siempre reflejaban sus preferencias.

De esta forma, y con objeto de facilitar la ponderación, se decidió no preguntar respecto al peso de los siete criterios, sino respecto a una clasificación de los mismos según su importancia. De hecho, el objetivo no fue concretar los pesos, sino determinar si era posible que un grupo de expertos priorizara unos criterios sobre otros. En concreto, se pidió asignar un 7 al criterio más importante, un 6 al siguiente y así sucesivamente hasta asociar un 1 al criterio de menor importancia.

Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 7.3. Éstos han sido agrupados en función de si se trata de expertos sociólogos o técnicos, y en función de si se valoran criterios sociales o técnicos. Los cuadrados azules indican la opinión de cada experto, mientras que los puntos rojos muestran la media de las ponderaciones.

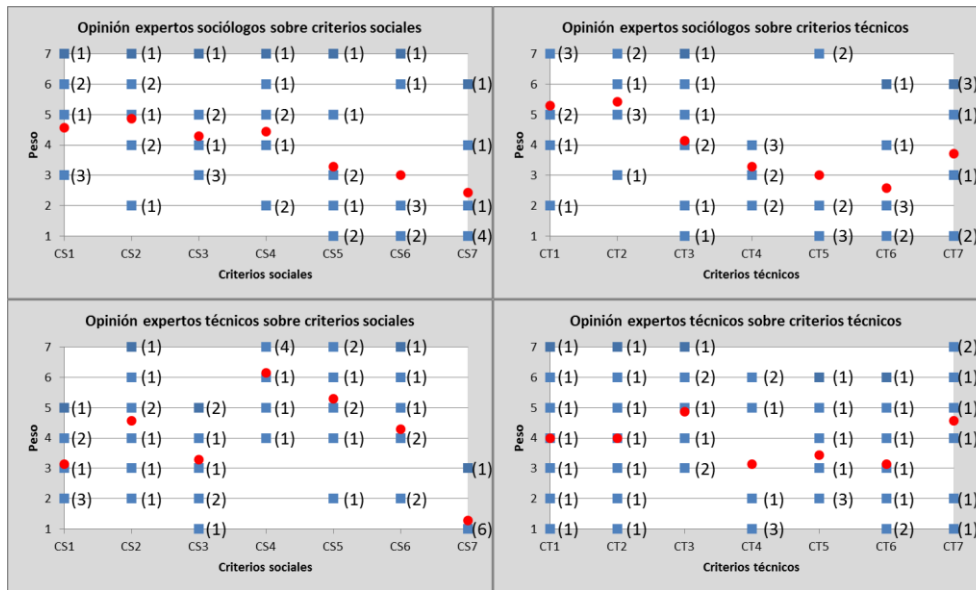


Figura 7.3 – Opinión de expertos sociólogos y técnicos sobre los criterios sociales y técnicos

Como se puede observar en la Figura 7.3, las respuestas fueron muy variadas. En algunos casos, como por ejemplo la opinión de los técnicos respecto a los criterios técnicos 1 y 2, cada experto asignó un valor de importancia diferente al mismo criterio.

Este hecho llevó al autor a preguntarse sobre la validez de las valoraciones realizadas por cada experto. Mientras que algunos contaban con más de 10 años de experiencia en el campo de la electrificación rural, otros apenas contaban con unos pocos meses; así, mientras que los primeros podían dar una opinión con fundamento, los segundos podían opinar con una base de conocimiento más limitada. Por este motivo, se propuso realizar el mismo análisis con los expertos de mayor experiencia: 3 expertos sociólogos y 3 expertos técnicos, con varios años de experiencia en distintos contextos. En la Figura 7.4 se exponen los resultados obtenidos.

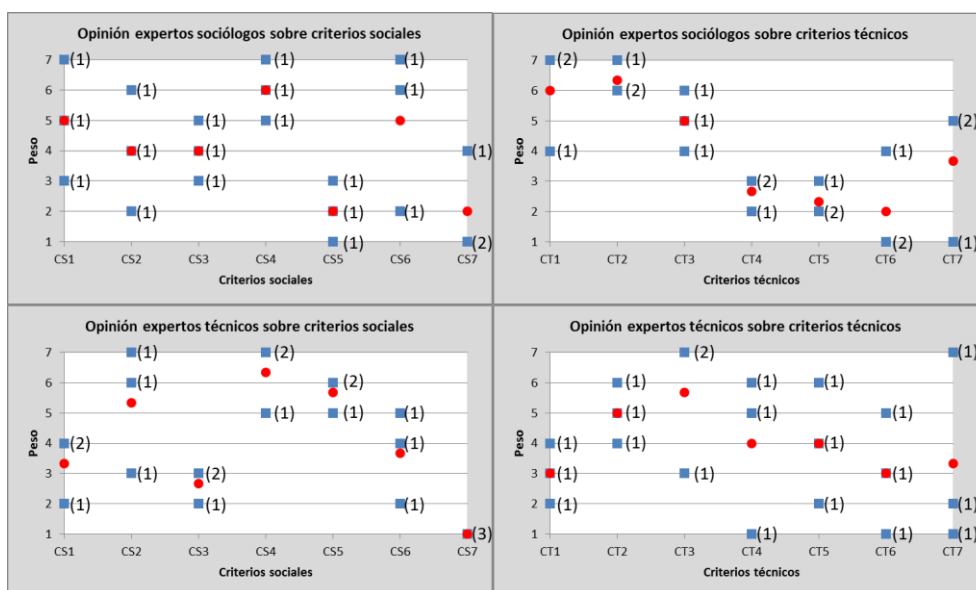


Figura 7.4 – Opinión de los 3 expertos sociólogos y los 3 expertos técnicos de mayor experiencia sobre los criterios sociales y técnicos

Analizando los resultados obtenidos se concluye:

- Comparando las Figuras 7.3 y 7.4 se observa que en el segundo caso existe menor dispersión de opiniones. Sin embargo, sigue existiendo una cierta dispersión que, en algunos casos, se puede considerar elevada. En concreto, la mayor dispersión se presenta cuando un decisor opina respecto a su propia temática: los sociólogos tenían unas opiniones muy parecidas en los criterios técnicos, pero muy diferentes en los criterios sociales; y los técnicos tenían unas opiniones muy parecidas en los criterios sociales, pero muy distintas en los criterios técnicos.
- Teóricamente, si se analizasen los resultados con los expertos y se les volviese a preguntar respecto a la priorización de los criterios, se llegaría a un mayor consenso que podría converger al cabo de unas iteraciones. Sin embargo, se observó que los expertos difícilmente iban a cambiar de opinión; en caso de hacerlo, sería porque el autor de esta tesis (moderador de la dinámica) forzaría el llegar a un consenso, pero no por convicción propia. Como conclusión se dedujo que considerar todos los criterios simultáneamente resultaba confuso, incluso para decisores con experiencia y, en consecuencia, las decisiones tomadas resultaban demasiado subjetivas.

### 7.1.3. Definición de criterios

Como alternativa, se propone reagrupar los 28 (sub)criterios de partida en 4 criterios genéricos y sus respectivos subcriterios (Tabla 7.3).

**Tabla 7.3 – Criterios genéricos de evaluación con sus respectivos subcriterios**

<b>Criterio</b>	<b>Subcriterio</b>
Coste	-
Demanda	Energía
	Potencia
	Autonomía
Gestión del sistema	Cantidad de microrredes
	Tamaño de las microrredes
	Alcance de las microrredes
	Instalación de medidores
Seguridad del suministro	Porcentaje de generación solar
	Cantidad de equipos de generación
	Energía en usuarios individuales

La agrupación propuesta (Tabla 7.4) puede no resultar evidente y fue realizada a partir de la experiencia adquirida en colaboración con las ONGs SP e ISF, en el contexto de la sierra andina norte del Perú. Posteriormente, esta agrupación fue presentada a expertos de dichas ONGs, que mostraron su aprobación y su conformidad. En la Tabla 7.4 se muestra la relación entre los 28 (sub)criterios de partida y la nueva agrupación. En algunos casos existe una relación directa (indicada con una “X”) entre un (sub)criterio de partida y un nuevo subcriterio. En otros casos, un subcriterio de partida está relacionado con más de un subcriterio genérico. Sin embargo, éstos siempre pertenecen a un mismo criterio genérico.

**Tabla 7.4 – Agrupación de los 28 (sub)criterios de partida en 4 criterios genéricos y sus respectivos subcriterios**

		Coste		Demanda			Gestión del sistema				Seguridad del suministro		
		Energía	Potencia	Autonomía	Capacidad microrredes	Tamaño microrredes	Alcance microrredes	Instalación medidores	Porcentaje generación solar	Porcentaje generación equipos	Cantidad individuales	Energía usuarios	
Criterios sociales	CS <sub>1-1</sub>	Gestión domiciliaria						X					
	CS <sub>1-2</sub>	Gestión comunitaria					X						
	CS <sub>1-3</sub>	Resolución de conflictos					X						
	CS <sub>2-1</sub>	Equidad en el suministro						X					
	CS <sub>2-2</sub>	Acceso a la tecnología					X						
	CS <sub>3-1</sub>	Esfuerzo de pago						X					
	CS <sub>4-1</sub>	Ingreso de las familias		X									
	CS <sub>4-2</sub>	Calidad de vida en los domicilios		X									
	CS <sub>5-1</sub>	Salud		X									
	CS <sub>5-2</sub>	Educación		X									
	CS <sub>6-1</sub>	Puestos de trabajo		X									
	CS <sub>7-1</sub>	Ocupación del suelo									X		
Criterios técnicos	CT <sub>1-1</sub>	Inversión inicial / familia	X										
	CT <sub>1-2</sub>	Inversión inicial	X										
	CT <sub>1-3</sub>	Operación y mantenimiento	X										
	CT <sub>2-1</sub>	Energía suministrada / familia		X									
	CT <sub>2-2</sub>	Potencia suministrada / familia		X									
	CT <sub>3-1</sub>	Fiabilidad del recurso							X				
	CT <sub>3-2</sub>	Autonomía de las baterías			X								
	CT <sub>4-1</sub>	Modularidad					X						
	CT <sub>4-2</sub>	Flexibilidad de consumo entre usuarios										X	
	CT <sub>5-1</sub>	Asistencia en pequeñas averías/repuestos									X		
	CT <sub>5-2</sub>	Asistencia en grandes averías/repuestos									X		
	CT <sub>6-1</sub>	Componentes generales	X										
	CT <sub>6-2</sub>	Componentes específicos	X										
	CT <sub>6-3</sub>	Instalación	X										
	CT <sub>7-1</sub>	Fallos en los equipos									X		
CT <sub>7-2</sub>	Pocos equipos									X			

La agrupación de criterios presentada en las Tabla 7.3 y 7.4 es coherente con la definición de los niveles de decisión propuesta en el capítulo 4, para la segunda etapa de la metodología desarrollada. En concreto, en dicho capítulo se ha comentado que:

- El coste es el único criterio que se contrapone a los demás y, por tanto, se tiene en cuenta en los 3 niveles de decisión.
- La demanda es un criterio con gran influencia sobre las soluciones y sobre los criterios gestión del sistema y seguridad del suministro. Su modificación implica replantear el sistema y, por tanto, se considera en el primer nivel de decisión.
- La gestión del sistema es un criterio con influencia media sobre las soluciones y el criterio seguridad del suministro. Su modificación implica un esfuerzo técnico, económico y social considerable. Se considera en el segundo nivel de decisión.
- La seguridad del suministro es un criterio con una influencia limitada sobre las soluciones. Su modificación implica cambios factibles con pequeñas inversiones económicas y, así, se considera en el tercer nivel de decisión.

En la Tabla 7.5 se presentan los criterios, subcriterios y pesos para cada uno de los 3 niveles de decisión. Los pesos que se indican en la tabla son comentados en detalle en el siguiente subapartado.

**Tabla 7.5 – Criterios, subcriterios y pesos para los 3 niveles de decisión**

Nivel de decisión	Criterio		Peso	Subcriterio		Peso
Primero	CP <sub>1</sub>	Coste	W <sub>CP1</sub>	-		
	CP <sub>2</sub>	Demanda	W <sub>CP2</sub>	CP <sub>2-1</sub>	Energía	W <sub>CP2-1</sub>
				CP <sub>2-2</sub>	Potencia	W <sub>CP2-2</sub>
				CP <sub>2-3</sub>	Autonomía	W <sub>CP2-3</sub>
Segundo	CS <sub>1</sub>	Coste	W <sub>CS1</sub>	-		
	CS <sub>2</sub>	Gestión del sistema	W <sub>CS2</sub>	CS <sub>2-1</sub>	Cantidad microrredes	W <sub>CS2-1</sub>
				CS <sub>2-2</sub>	Tamaño microrredes	W <sub>CS2-2</sub>
				CS <sub>2-3</sub>	Alcance microrredes	W <sub>CS2-3</sub>
				CS <sub>2-4</sub>	Instalación medidores	W <sub>CS2-4</sub>
Tercero	CT <sub>1</sub>	Coste	W <sub>CT1</sub>	-		
	CT <sub>2</sub>	Seguridad del suministro	W <sub>CT2</sub>	CT <sub>2-1</sub>	Porcentaje generación solar	W <sub>CT2-1</sub>
				CT <sub>2-2</sub>	Cantidad equipos de generación	W <sub>CT2-2</sub>
				CT <sub>2-3</sub>	Energía usuarios individuales	W <sub>CT2-3</sub>

De la tabla anterior cabe destacar que, si bien el criterio coste aparece en los 3 niveles de decisión, el peso asociado en uno u otro nivel no tiene por qué ser el mismo. Es más, no por tratarse de un nivel inferior o superior, se le debe asignar menor o mayor peso; se trata de analizar, en cada nivel, la importancia del criterio coste respecto a aquel otro criterio con el que se esté realizando la comparación.

### 7.1.4. Ponderación de criterios

Una vez determinados los criterios y subcriterios de evaluación a utilizar, es necesario ponderarlos entre sí; es decir, asociar un valor a cada uno de ellos representativo de su importancia respecto a los demás.

En el capítulo 4 se ha expuesto que existe un proceso iterativo para la ponderación de criterios en cada nivel de decisión. Así el decisor puede ajustar iterativamente los pesos, hasta que la clasificación de alternativas se adecúe a sus preferencias. Por ejemplo, si en una iteración el decisor observa que el coste de las alternativas mejor clasificadas es muy elevado, puede aumentar el peso del criterio coste y, en la siguiente iteración, las alternativas mejor clasificadas tendrían menor coste.

Sin embargo, como se ha comentado en el capítulo 4, la primera iteración puede no resultar evidente. Proponer unos pesos iniciales sin ninguna orientación de los resultados es una tarea que puede resultar confusa, sobre todo para decisores con limitada experiencia [Romero, 1993]. En cambio, si se dispone de unos pesos de partida, se puede realizar una primera clasificación que permita al decisor un primer análisis y, si lo cree necesario, comenzar a iterar. Por ejemplo, resulta más sencillo determinar si las alternativas mejor clasificadas son muy caras o muy baratas, antes que asociar un peso al coste representativo de su importancia frente a otro criterio.

Una primera opción para establecer los pesos de partida, consiste en asignar el mismo peso a cada criterio. Sin embargo, esta opción ha sido muy criticada en la literatura por no aclarar la importancia entre criterios [Wang *et al.*, 2009]. En este trabajo se propone encuestar a distintos expertos en electrificación rural, para determinar unos pesos iniciales de acuerdo con su conocimiento y su experiencia. El objetivo sería encontrar unos pesos adaptados a cualquier zona rural de países en desarrollo; sin embargo, esto es imposible dadas las diferencias entre unas y otras regiones. En consecuencia, se desea encontrar unos pesos que, inicialmente, sean aceptables.

En primer lugar es necesario definir el grupo de expertos a encuestar. Éstos deben tener amplia experiencia en electrificación rural, y preferiblemente en distintos contextos, para que su opinión sea válida en diversos escenarios. Aprovechando la colaboración con las ONGs SP e ISF, se ha encuestado a 8 técnicos y sociólogos, los cuales han trabajado en contextos de costa, sierra y selva. En segundo lugar es adecuado establecer cómo encuestar a dichos expertos, para lo cual se propone 2 tipos de encuestas:

- Encuesta normal. La metodología de diseño propuesta tiene como público objetivo instituciones regionales de zonas rurales de países en desarrollo. Frecuentemente, el personal de estas instituciones carece de conocimientos en técnicas multicriterio, por lo que la ponderación de criterios se limita a realizar una encuesta sencilla: se pregunta por una asignación de 0 a 10 a cada criterio y subcriterio. La encuesta realizada se encuentra en el anexo B.1.

- Encuesta tipo AHP. También se utiliza una herramienta multicriterio que facilite la ponderación de criterios; concretamente una técnica sencilla, transparente, que permita medir criterios cualitativos y cuantitativos, y que facilite la participación de distintas personas para alcanzar un consenso: el método AHP (Analytic Hierarchy Process) que reúne todas estas características [Saaty, 1980]. Este método ha sido muy utilizado en problemas de planificación energética y se ha demostrado que su uso es adecuado para zonas rurales de países en desarrollo [Pohekar & Ramachandran, 2004; Garfí *et al.*, 2011]. Adicionalmente, esta herramienta permite medir la consistencia de los juicios del grupo encuestado, lo que facilita medir la robustez de las opiniones de los encuestados. La encuesta tipo AHP se encuentra en el anexo B.2.

A continuación, se exponen los resultados de la encuesta normal y tipo AHP para, posteriormente, discutir las diferencias y decidir unos pesos de partida definitivos.

#### 7.1.4.1. Encuesta normal

La encuesta normal consiste en asignar un peso de 0 a 10 a cada criterio y subcriterio, representativo de su importancia respecto a los demás. En la Tabla 7.6 se muestran los resultados obtenidos con cada uno de los 8 expertos. Los valores se han normalizado para poder compararlos entre sí. Además, en cada nivel, se comparan los criterios y los subcriterios entre sí; de esta forma, la suma de los pesos de los criterios y la de los subcriterios de un nivel siempre valen 1. Adicionalmente se muestra el promedio de los valores y la desviación estándar (la cual, en ningún caso, supera el valor de 0,10).

Tabla 7.6 – Resultados de la encuesta normal

		Expertos								Promedio	Desviación estándar
		E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8		
Primer nivel de decisión	CP <sub>1</sub>	0,50	0,45	0,50	0,40	0,44	0,57	0,56	0,42	0,48	0,06
	CP <sub>2</sub>	0,50	0,55	0,50	0,60	0,56	0,43	0,44	0,58	0,52	0,06
	CP <sub>2-1</sub>	0,40	0,30	0,42	0,53	0,33	0,38	0,38	0,40	0,40	0,07
	CP <sub>2-2</sub>	0,40	0,35	0,42	0,27	0,33	0,29	0,29	0,25	0,32	0,06
	CP <sub>2-3</sub>	0,20	0,35	0,17	0,20	0,33	0,33	0,33	0,35	0,28	0,08
Segundo nivel de decisión	CS <sub>1</sub>	0,50	0,46	0,67	0,36	0,44	0,47	0,50	0,45	0,48	0,09
	CS <sub>2</sub>	0,50	0,54	0,33	0,64	0,56	0,53	0,50	0,55	0,52	0,09
	CS <sub>2-1</sub>	0,14	0,26	0,18	0,19	0,20	0,16	0,22	0,24	0,20	0,04
	CS <sub>2-2</sub>	0,43	0,37	0,35	0,29	0,28	0,16	0,26	0,24	0,30	0,08
	CS <sub>2-3</sub>	0,38	0,21	0,35	0,38	0,32	0,28	0,30	0,32	0,32	0,06
	CS <sub>2-4</sub>	0,05	0,16	0,12	0,14	0,20	0,40	0,22	0,20	0,18	0,10
Tercer nivel de decisión	CT <sub>1</sub>	0,53	0,46	0,50	0,36	0,44	0,50	0,53	0,42	0,47	0,06
	CT <sub>2</sub>	0,47	0,54	0,50	0,64	0,56	0,50	0,47	0,58	0,53	0,06
	CT <sub>2-1</sub>	0,53	0,32	0,47	0,38	0,29	0,32	0,35	0,40	0,38	0,08
	CT <sub>2-2</sub>	0,18	0,32	0,24	0,38	0,29	0,32	0,35	0,35	0,30	0,07
	CT <sub>2-3</sub>	0,29	0,37	0,29	0,25	0,41	0,37	0,30	0,25	0,32	0,06

### 7.1.4.2. Encuesta tipo AHP

La técnica AHP [Saaty, 1980] es una de las herramientas multicriterio más estudiadas en las últimas 3 décadas. Si bien inicialmente fue ideada para evaluar alternativas, su uso para ponderar criterios se ha extendido notablemente [Kallas & Gómez-Limón, 2006; Wang *et al.*, 2009]. Además, también está siendo muy utilizada como método de agregación de la opinión de distintos actores [Easley *et al.*, 2000].

El primer paso cuando se estudia un problema de ponderación de criterios bajo el enfoque AHP, es jerarquizar el problema, es decir, dividirlo y estructurarlo en: meta general, criterios y alternativas. De esta forma, el objetivo consiste en determinar un peso para los criterios y subcriterios de cada nivel de decisión y, para ello, se considera a cada experto como un problema independiente que, finalmente, se unifica.

Cada experto pondera los criterios y subcriterios correspondientes, mediante una Matriz de Comparación por Pares. En ella se comparan los criterios de 2 en 2, para definir la intensidad de preferencia entre uno y otro. El grado de intensidad se asigna con la escala de 1 a 9 (Tabla 7.7) propuesta por Saaty [1980], intuitiva y fácil de usar por cualquier decisor [Kallas & Gómez-Limón, 2006].

**Tabla 7.7 – Escala de valoración propuesta por Saaty [adaptado de Saaty, 1980]**

Intensidad de importancia	Definición	Explicación
1	Igualmente importante	Dos actividades contribuyen del mismo modo a un objetivo.
3	Ligeramente más importante	La primera actividad es ligeramente más importante que la segunda.
5	Notablemente más importante	La primera actividad es notablemente más importante que la segunda.
7	Demostablemente más importante	La primera actividad es mucho más importante que la segunda; su dominancia se puede demostrar.
9	Absolutamente más importante	La segunda actividad carece de importancia frente a la primera.

Complementariamente, los valores 2, 4, 6 y 8 se utilizan como valores intermedios, para ajustar las decisiones cuando existe un cierto compromiso. Por otra parte, como se puede observar, los valores de la tabla hacen referencia a cuando la primera actividad tiene más importancia que la segunda; en caso contrario se usan los valores recíprocos ( $1/X$ ).

Utilizando la tabla anterior, cada experto rellena su propia Matriz de Comparación por Pares. En la Tabla 7.8 se muestra una Matriz de Comparación por Pares ilustrativa para la valoración de los subcriterios del primer nivel de decisión (energía, potencia y autonomía). Como se puede observar, de las 9 celdas de la matriz, únicamente es necesario rellenar los 3 valores de la parte superior de la diagonal principal. La diagonal está compuesta por el valor 1, dado que la importancia de un criterio respecto a sí mismo es siempre igual. La parte inferior son los valores recíprocos a los de la parte superior, puesto que se trata de una matriz simétrica (si  $a$  es ligeramente más importante que  $b$ ,  $b$  es ligeramente menos importante que  $a$ ).



Tabla 7.8 – Ejemplo de la ponderación de los subcriterios del primer nivel de decisión

Matriz de Comparación por Pares				Vector de Prioridades	$\lambda_i$	$\lambda_{max}$	Índice de Consistencia	Ratio de Consistencia
	Energía	Potencia	Autonomía					
Energía	1	5	3	0,655	3,058	3,029	0,015	0,025
Potencia	1/5	1	1	0,158	3,015			
Autonomía	1/3	1/1	1	0,187	3,015			

Una vez determinada la Matriz de Comparación por Pares, se calcula el Vector de Prioridades, que representa el peso asociado a cada subcriterio. Existen diferentes métodos con este propósito, aunque en la literatura se ha demostrado que ninguno es claramente superior a los demás [Fichtner, 1986]. En esta tesis se propone utilizar el método del vector propio principal, por ser el más utilizado en la literatura y haberse demostrado que es adecuado [Saaty, 2003].

Supóngase una matriz cuadrada  $A$  de dimensión  $n \times n$ . Se puede hallar un vector  $\omega$  (vector propio) de dimensión  $n$ , tal que  $A \cdot \omega = \lambda \cdot \omega$ , donde  $\lambda$  es el valor propio. Si existe consistencia, es decir si la matriz  $A$  cumple que  $a_{ik} = a_{ij} \cdot a_{jk} \forall i, j, k$ , se tiene que  $\lambda = n$ . Si no existe consistencia (como suele suceder con juicios de valor humanos) se tiene que  $A \cdot \omega = \lambda_{max} \cdot \omega$  con  $\lambda_{max} \geq n$ , y la diferencia entre ambos valores indica la inconsistencia. De esta forma, se puede calcular un Índice de Consistencia igual a  $(\lambda_{max} - n)/(n - 1)$ . Si este valor se compara con índices de consistencia teóricos, se puede calcular la Ratio de Consistencia como la división entre el Índice de Consistencia calculado y el teórico. Numerosas publicaciones han estudiado este índice de consistencia teórico [Alonso & Lamata, 2006]. Sin embargo, aquí se opta por los valores calculados en Saaty [1980].

Retomando el ejemplo de la Tabla 7.8, primero se calcula el Vector de Prioridades como el vector propio de la Matriz de Comparación por Pares. A continuación se calcula el valor propio  $\lambda_i$  para cada subcriterio. El valor propio  $\lambda_{max}$  se calcula como la media de los valores propios  $\lambda_i$  [Saaty, 1980]. Conocida la dimensión del problema (en este caso 3), se puede calcular el Índice de Consistencia que es igual a 0,015. Conocido el valor teórico, igual a 0,58 para una dimensión de 3, la Ratio de Consistencia es igual a 0,025.

Como se puede observar, en el caso expuesto no existe una consistencia perfecta ya que la Ratio de Consistencia vale 0,025. De todas formas, según Saaty [1980] este valor de inconsistencia es aceptable al ser menor que 0,1. Como se puede observar en la Matriz de Comparación por Pares, Energía es 5 veces más importante que Potencia y 3 veces más que Autonomía, de este modo Autonomía debería ser más importante que Potencia, pero en la valoración se ha asignado la misma importancia a ambos subcriterios; de ahí la inconsistencia.

En este momento ya es posible obtener un Vector de Prioridades (columna izquierda para cada experto) y una Ratio de Consistencia (columna derecha para cada experto) para cada uno de los 8 expertos considerados, tal y como se expone en la Tabla 7.9.

**Tabla 7.9 – Resultados de la encuesta tipo AHP**

Expertos																	Media geom.	Desv. estándar
E1		E2		E3		E4		E5		E6		E7		E8				
<b>Primer nivel de decisión</b>																		
CP <sub>1</sub>	0,50	0,00	0,50	0,00	0,50	0,00	0,75	0,00	0,25	0,00	0,75	0,00	0,75	0,00	0,20	0,00	0,51	0,22
CP <sub>2</sub>	0,50	0,00	0,50	0,00	0,50	0,00	0,25	0,00	0,75	0,00	0,25	0,00	0,25	0,00	0,80	0,00	0,49	0,22
CP <sub>2-1</sub>	0,43		0,30		0,20		0,19		0,11		0,43		0,69		0,44		0,34	0,19
CP <sub>2-2</sub>	0,20	0,77	0,37	0,63	0,20	0,00	0,23	0,05	0,26	0,03	0,14	0,00	0,10	0,12	0,12	0,00	0,26	0,09
CP <sub>2-3</sub>	0,37		0,33		0,60		0,58		0,63		0,43		0,21		0,44		0,40	0,15
<b>Segundo nivel de decisión</b>																		
CS <sub>1</sub>	0,83	0,00	0,25	0,00	0,75	0,00	0,50	0,00	0,17	0,00	0,17	0,00	0,50	0,00	0,25	0,00	0,46	0,26
CS <sub>2</sub>	0,17	0,00	0,75	0,00	0,25	0,00	0,50	0,00	0,83	0,00	0,83	0,00	0,50	0,00	0,75	0,00	0,54	0,26
CS <sub>2-1</sub>	0,17		0,48		0,12		0,12		0,24		0,08		0,32		0,17		0,24	0,13
CS <sub>2-2</sub>	0,47	0,38	0,23	0,39	0,40	0,06	0,24	0,19	0,12	0,19	0,08	0,06	0,28	0,42	0,21	0,05	0,26	0,13
CS <sub>2-3</sub>	0,33		0,21		0,40		0,56		0,56		0,32		0,35		0,55		0,35	0,13
CS <sub>2-4</sub>	0,03		0,08		0,08		0,08		0,08		0,52		0,05		0,07		0,15	0,16
<b>Tercer nivel de decisión</b>																		
CT <sub>1</sub>	0,83	0,00	0,50	0,00	0,50	0,00	0,50	0,00	0,17	0,00	0,25	0,00	0,25	0,00	0,14	0,00	0,44	0,23
CT <sub>2</sub>	0,17	0,00	0,50	0,00	0,50	0,00	0,50	0,00	0,83	0,00	0,75	0,00	0,75	0,00	0,86	0,00	0,56	0,23
CT <sub>2-1</sub>	0,33		0,32		0,43		0,21		0,10		0,33		0,14		0,65		0,32	0,17
CT <sub>2-2</sub>	0,33	0,00	0,44	0,49	0,20	0,77	0,10	0,12	0,21	0,12	0,33	0,00	0,57	0,12	0,25	0,13	0,32	0,15
CT <sub>2-3</sub>	0,33		0,24		0,37		0,69		0,69		0,33		0,29		0,10		0,36	0,21

Para calcular un único Vector de Prioridades, representativo del conjunto de las opiniones de todos los expertos, existen diferentes métodos de agregación. En la literatura se acostumbra a utilizar la media aritmética, aunque ha sido demostrado que para decisiones grupales de tipo social es más adecuada la media geométrica [Forman & Peniwati, 1998; Kallas & Gómez-Limón, 2006]. En este trabajo se calcula la media geométrica y la desviación estándar, para poder comparar estos resultados con los obtenidos mediante la encuesta normal.

#### 7.1.4.3. Análisis de los resultados

Los resultados de la encuesta tipo AHP no parecen ser muy adecuados. Como se puede observar, los valores de la Ratio de Consistencia tienden a ser excesivamente elevados: atendiendo al criterio de Saaty [1980] para determinar si una matriz es consistente o no (Ratio de Consistencia  $\leq 0,1$ ), para los subcriterios del primer nivel 3 expertos no son consistentes, en el segundo nivel 5 expertos no lo son y en el tercer nivel 6 expertos no lo son. Esta elevada inconsistencia podría sorprender al lector, puesto que la herramienta AHP está diseñada para reducir la inconsistencia. Además, varias publicaciones la utilizan con éxito en zonas rurales de países en desarrollo. Tras la consulta con varios especialistas en multicriterio, se concluye que en este caso concreto la comparación por pares ha resultado confusa para los expertos, al no estar acostumbrados a este tipo de técnicas.

Por otra parte, al comparar las desviaciones estándar de la encuesta normal y tipo AHP, se observan valores mucho más reducidos en el primer caso. En efecto, la comparación por pares no responde a las necesidades de los expertos encuestados, ya que la encuesta tipo AHP no resulta tan intuitiva como la encuesta normal. Este hecho ocasiona que las respuestas no sean consistentes y, cuando lo son, las opiniones distan mucho entre sí. En cambio, la encuesta normal, a la que los expertos están mucho más acostumbrados, resulta más intuitiva y la desviación disminuye considerablemente.

En conclusión, la encuesta normal proporciona unos resultados menos dispares entre los expertos, de modo que se opta por los pesos obtenidos con dicha encuesta y que se resumen en la Tabla 7.10.

**Tabla 7.10 – Pesos iniciales finalmente seleccionados**

Nivel de decisión	Criterio		Peso	Subcriterio		Peso
Primero	CP <sub>1</sub>	Coste	0,48	-		
	CP <sub>2</sub>	Demanda	0,52	CP <sub>2.1</sub>	Energía	0,40
				CP <sub>2.2</sub>	Potencia	0,32
				CP <sub>2.3</sub>	Autonomía	0,28
Segundo	CS <sub>1</sub>	Coste	0,48	-		
	CS <sub>2</sub>	Gestión del sistema	0,52	CS <sub>2.1</sub>	Cantidad microrredes	0,20
				CS <sub>2.2</sub>	Tamaño microrredes	0,30
				CS <sub>2.3</sub>	Alcance microrredes	0,32
				CS <sub>2.4</sub>	Instalación medidores	0,18
Tercero	CT <sub>1</sub>	Coste	0,47	-		
	CT <sub>2</sub>	Seguridad del suministro	0,53	CT <sub>2.1</sub>	Porcentaje generación solar	0,38
				CT <sub>2.2</sub>	Cantidad equipos de generación	0,30
				CT <sub>2.3</sub>	Energía usuarios individuales	0,32

## 7.2. Evaluación de alternativas y agregación de resultados

La evaluación de alternativas es un proceso complejo, puesto que se pueden mezclar alternativas muy diferentes entre sí o criterios cualitativos con cuantitativos. Las herramientas de análisis multicriterio pueden ser aquí muy recomendables, si se desea dar consistencia a la opinión del decisor [Wang *et al.*, 2009]. En este caso es necesario tener presente que se está desarrollando una metodología de diseño adaptada al contexto de zonas rurales de países en desarrollo. Por este motivo, la herramienta de apoyo utilizada debe ser sencilla y transparente y, a ser posible, de fácil representación para facilitarle al decisor la comprensión de la clasificación de alternativas obtenida.

Se ha analizado el estado del arte expuesto en el capítulo 3 y se ha consultado a expertos en decisión multicriterio. En concreto se ha analizado la herramienta SURE, que selecciona la opción de electrificación más adecuada para proyectos rurales sobre la base de los criterios natural, físico, humano, social y financiero [Cherni *et al.*, 2007].

Además se ha consultado a 3 expertos en multicriterio, los doctores Guisepe Munda de la Universidad Autónoma de Barcelona, Pedro Linares de la Universidad Pontificia Comillas [Linares, 2005] y Carlos Romero de la Universidad Politécnica de Madrid [Romero, 1993].

Una vez realizado el trabajo anterior se ha llegado a la conclusión que la programación compromiso es una herramienta sencilla, transparente y fácil de utilizar [Yu, 1973; Zeleny, 1973; Zeleny, 1974]. Estas características hacen que dicha herramienta sea muy interesante en el contexto de zonas rurales de países en desarrollo.

Este apartado se divide en 4 subapartados. Primero se explica en qué consiste la programación compromiso (7.2.1). En segundo lugar se detalla cómo aplicar la programación compromiso al problema de estudio (7.2.2). A continuación se especifica el proceso de evaluación de alternativas (7.2.3) y, finalmente, se expone cómo clasificar las alternativas (7.2.4).

### 7.2.1. Programación compromiso

La estructura general de un problema multiobjetivo puede representarse mediante el siguiente modelo matemático [Romero, 1996]:

$$Z = (f_1(x), \dots, f_i(x), \dots, f_n(x)) \quad (7.1)$$

sujeto a:

$$x \in X \quad (7.2)$$

donde:

- $Z$  es el valor de la función objetivo.
- $f_i(x)$  es la función que representa el criterio  $i$ .
- $x$  es el conjunto de variables de decisión.
- $X$  es el conjunto de soluciones factibles determinadas por las restricciones.
- $n$  es la dimensión del problema o cantidad de criterios considerados.

La meta de un enfoque multiobjetivo consiste en encontrar el mejor conjunto de soluciones desde el punto de vista de todos los criterios considerados. En concreto, la programación compromiso parte del principio que, si el decisor actúa racionalmente, la solución más adecuada será aquella cuya distancia a la solución ideal sea menor [Yu, 1973; Zeleny, 1973; Romero, 1993]. Se puede así encontrar el conjunto de soluciones eficientes o conjunto compromiso [Zeleny, 1974]. Para ello, antes es necesario definir los conceptos de solución ideal y distancia.

La solución ideal se define como aquella solución óptima en todos los criterios, siempre y cuando se cumplan las restricciones del problema [Romero, 1996]:

$$Z^* = (F_1^*, \dots, F_i^*, \dots, F_n^*) \quad (7.3)$$

sujeto a:

$$x \in X \tag{7.2}$$

donde:

- $Z^*$  es el valor de la función objetivo para la solución óptima.
- $F_i^*$  es el valor ideal para el criterio  $i$ .

En este caso se debe optimizar la función de cada criterio. En algunos casos será necesario maximizar su valor (por ejemplo, los beneficios económicos) y en otros minimizarlo (por ejemplo, las emisiones de CO<sub>2</sub>). Si el valor  $Z^*$  de la función objetivo para la solución ideal es alcanzable, ésta será la solución óptima del problema y no es necesario un mayor análisis. Sin embargo, en la práctica esta solución suele ser inalcanzable debido a la existencia de restricciones que acotan el conjunto de soluciones factibles; en estos casos, la solución óptima será aquella alternativa más cercana a la solución ideal, según lo que se conoce como axioma de Zeleny [Zeleny, 1973].

Para saber si entre dos o más alternativas, una es más o menos cercana a la solución ideal en comparación con las demás, es necesario definir la distancia. Al utilizar la programación compromiso, se entiende que la desviación entre una alternativa y la solución ideal es el propio concepto matemático de distancia.

Como se ha comentado, cada solución está constituida en un espacio de  $n$  dimensiones (o criterios). Así, lo primero es definir la distancia entre el valor real de la alternativa para un criterio  $i$  y su valor ideal [Romero, 1996]:

$$d_i = |F_i^* - f_i(x)| \tag{7.4}$$

A continuación se debe relacionar todas estas distancias. Hay que tener en cuenta que los criterios pueden estar medidos en unidades diferentes y, por tanto, es recomendable normalizar los valores de las distancias, por ejemplo, dividiéndolas por la diferencia entre el valor ideal  $F_i^*$  y el valor anti-ideal  $f_i^*$  del criterio. Este último valor se define como la peor opción posible bajo cada criterio, es decir, el opuesto al valor ideal.

Por otra parte, también es necesario tener presente que el decisor puede preferir en mayor o menor medida un criterio sobre los demás. Para esto se utilizarán los pesos para cada criterio que se han definido en el subapartado 7.1.4.

Con todo lo anterior, la programación compromiso se puede formalizar con el siguiente modelo matemático [Zeleny, 1973]:

$$[MIN]L_p = \left[ \sum_{i=1}^n W_i^p \left( \frac{F_i^* - f_i(x)}{F_i^* - f_i^*} \right)^p \right]^{1/p} \tag{7.5}$$

sujeto a:

$$x \in X \tag{7.2}$$

donde:

- $p$  es la métrica utilizada.

- $L_p$  es la distancia entre cada alternativa y la solución ideal.  
 $W_i$  es el peso asignado por el decisor al criterio  $i$ .  
 $f_i(x)$  es el valor de la alternativa para el criterio  $i$ .  
 $F_i^*$  es el valor ideal para el criterio  $i$ .  
 $f_i^*$  es el valor anti-ideal para el criterio  $i$ .  
 $n$  es la dimensión del problema o cantidad de criterios.  
 $x$  es el conjunto de variables de decisión.  
 $X$  es el conjunto de soluciones factibles determinadas por las restricciones.

Es necesario analizar en este punto la métrica  $p$ . Cada valor de  $p$  representa un tipo de distancia diferente y, en consecuencia, la alternativa óptima será una u otra. Así, por ejemplo, para  $p=1$  se habla de distancia *Manhattan* y la función objetivo 7.5 se concreta en la 7.6. Por su parte, para  $p=2$  se habla de distancia *euclidiana* y la función objetivo 7.5 pasa a ser la 7.7.

$$[MIN]L_1 = \sum_{i=1}^n W_i \left( \frac{F_i^* - f_i(x)}{F_i^* - f_i^*} \right) \quad (7.6)$$

$$[MIN]L_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^n W_i^2 \left( \frac{F_i^* - f_i(x)}{F_i^* - f_i^*} \right)^2} \quad (7.7)$$

En ambos casos, la distancia posee un sentido geométrico. Sin embargo, para mayores valores de  $p$  se pierde el sentido geométrico, aunque no el matemático. En cualquier caso, a medida que se incrementa el valor de  $p$ , se asigna más importancia a la mayor diferencia entre el valor de la alternativa para un criterio concreto y su valor ideal [Romero, 1993]. Llevado al extremo, para  $p=\infty$  se habla de distancia *Tchebycheff*, que se define como la mayor diferencia entre el valor real de la solución factible para un criterio y su valor ideal. En este caso, la función objetivo 7.5 queda reducida a la 7.8 y las restricciones 7.9 complementan a las restricciones de 7.2.

$$[MIN]L_\infty = D \quad (7.8)$$

sujeto a:

$$\begin{aligned}
 D &\geq W_1 \left( \frac{F_1^* - f_1(x)}{F_1^* - f_1^*} \right) \\
 &\vdots \\
 D &\geq W_i \left( \frac{F_i^* - f_i(x)}{F_i^* - f_i^*} \right) \\
 &\vdots \\
 D &\geq W_n \left( \frac{F_n^* - f_n(x)}{F_n^* - f_n^*} \right)
 \end{aligned} \quad (7.9)$$

Como se puede observar, las funciones objetivo para  $p=1$  y  $p=\infty$  son lineales. En cambio, la función objetivo para  $p=2$ , o cualquier otro valor, son funciones no lineales y su resolución se vuelve mucho más compleja. Se puede utilizar cualquiera entre los infinitos valores de  $p$ , pero ha sido demostrado que para problemas con dos criterios el conjunto compromiso de soluciones eficientes queda acotado por las métricas  $p=1$  y  $p=\infty$  [Yu, 1973].

## 7.2.2. Aplicación de la programación compromiso al problema

En el subapartado anterior se ha introducido la teoría de la programación compromiso. Ahora es necesario realizar una serie de adaptaciones para utilizar esta técnica en la evaluación de alternativas. Como se ha expuesto, la programación compromiso es una herramienta que permite resolver problemas multiobjetivo. En cambio, en esta tesis se dispone de un conjunto de alternativas, que se desea clasificar. No se trata, por tanto, de un problema típico de programación compromiso continua, sino de una adaptación conocida como programación compromiso discreta [Romero, 1993]: el conjunto de alternativas inicial no es infinito, sino finito, y no se busca el conjunto compromiso, sino clasificar las alternativas disponibles de la más a la menos cercana a la solución ideal.

Con objeto de ilustrar este caso, en la Figura 7.5 se representa gráficamente la evaluación de alternativas mediante la programación compromiso (continua y discreta) para el primer nivel de decisión (en el que se enfrentan los criterios coste y demanda). El razonamiento ahora presentado es análogo en los otros 2 niveles de decisión.

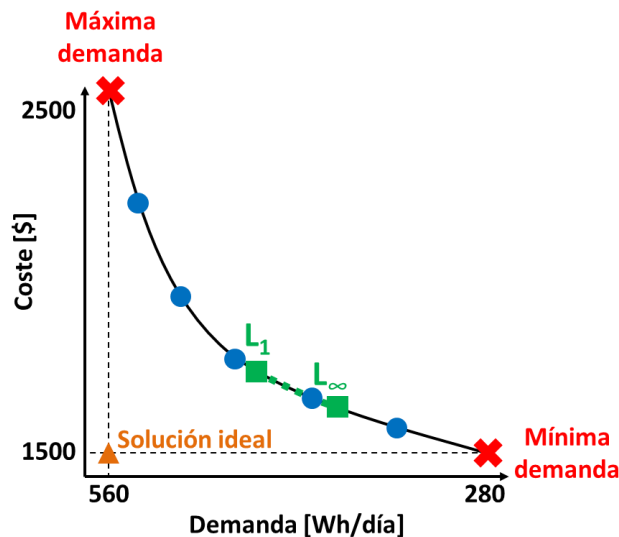


Figura 7.5 – Ejemplo de aplicación de la programación compromiso

La curva negra limita el conjunto de las infinitas alternativas posibles, las cuales están delimitadas por los valores mínimo y máximo de demanda (definidos por el decisor) e indicados por las cruces rojas. A su vez, dichos valores concretan el punto o solución ideal mostrada con un triángulo naranja y que representa una solución utópica de máxima demanda y mínimo coste.

La curva negra representa las alternativas eficientes: aquellas que para una demanda dada minimizan el coste. El espacio superior-derecha representa las alternativas posibles pero no eficientes y el espacio inferior-izquierda son las alternativas no posibles por no cumplir con las especificaciones del problema.

Puesto que el problema tiene 2 dimensiones (2 criterios) en cada nivel de decisión, si se resolvieran los modelos matemáticos para las métricas  $p=1$  y  $p=\infty$ , se obtendría que las alternativas con mínima  $L_1$  y  $L_\infty$  son las que se indican con los cuadrados verdes. De esta forma, el tramo verde discontinuo representa el conjunto compromiso, donde se encuentran las soluciones óptimas.

Pero en esta tesis el problema planteado es distinto: el decisor propone distintos valores objetivo para los atributos, cuya combinación da lugar a las posibles alternativas de electrificación, por ejemplo, las 7 alternativas representadas por los 5 puntos azules y las 2 cruces rojas. Por tanto, no se desea hallar los puntos con mínima  $L_1$  y  $L_\infty$ , sino que se trata de calcular dichos valores para cada alternativa generada y clasificarlas.

Una pregunta que puede surgir en este momento es: ¿por qué no aplicar directamente la programación compromiso continua al problema? De esta forma se ahorraría mucho tiempo, puesto que no habría que generar todas las alternativas, sino únicamente aquellas con mínima  $L_1$  y  $L_\infty$  (a partir de las ecuaciones presentadas en el subapartado anterior). Sin embargo se perdería la posibilidad que el decisor interactuara en la toma de decisiones, de modo que no podría estudiar diferentes valores objetivo de los atributos y la metodología de diseño sería mucho menos transparente.

### **7.2.3. Proceso de evaluación de alternativas**

Hasta aquí se ha definido la programación compromiso y su aplicación teórica al problema de estudio. A continuación se detalla la aplicación práctica al problema. En la Tabla 7.11 se exponen los criterios, subcriterios, y valores objetivo y reales de los atributos de cada nivel de decisión. Para cada subcriterio se impone un valor objetivo al atributo asociado y se evalúa su cumplimiento a partir del valor real. Adicionalmente se ha añadido una columna de signos +/-, que significa si se desea maximizar (+) o minimizar (-) el valor del atributo.

Nótese que los criterios gestión del sistema y seguridad del suministro son de tipo social; en cambio, los subcriterios y atributos asociados son de tipo técnico. En efecto, ésta es una tesis de perfil técnico y por tanto se estudian aportaciones técnicas que pretenden mejorar determinados aspectos socioeconómicos. Se observa que los valores reales de los atributos son cuantitativos, lo que permite una objetividad en la toma de decisiones, al no quedar ésta sujeta a la opinión del decisor.



Tabla 7.11 – Evaluación de criterios y subcriterios

Criterio	Subcriterio	Atributo						
		Valor objetivo del atributo		Valor real del atributo				
<b>CP<sub>1</sub></b>	Coste	-	-	-		<b>RP<sub>1</sub></b>	-	Coste de la solución.
<b>CP<sub>2</sub></b>	Demanda	<b>CP<sub>2-1</sub></b>	Energía	<b>AP<sub>2</sub></b>	Consumo de energía de cada punto de consumo.	<b>RP<sub>2</sub></b>	+	Punto de generación con menor ratio energía suministrada / energía mínima.
		<b>CP<sub>2-2</sub></b>	Potencia	<b>AP<sub>3</sub></b>	Consumo de potencia de cada punto de consumo.	<b>RP<sub>3</sub></b>	+	Punto de generación con menor ratio potencia suministrada / potencia mínima.
		<b>CP<sub>2-3</sub></b>	Autonomía	<b>AP<sub>4</sub></b>	Autonomía requerida.	<b>RP<sub>4</sub></b>	+	Punto de generación con menor ratio autonomía disponible / autonomía mínima.
<b>CS<sub>1</sub></b>	Coste	-	-	-		<b>RS<sub>1</sub></b>	-	Coste de la solución.
<b>CS<sub>2</sub></b>	Gestión del sistema	<b>CS<sub>2-1</sub></b>	Cantidad microrredes	<b>AS<sub>2</sub></b>	Número máximo de microrredes.	<b>RS<sub>2</sub></b>	-	Número de microrredes.
		<b>CS<sub>2-2</sub></b>	Tamaño microrredes	<b>AS<sub>3</sub></b>	Número mínimo de usuarios por microrred.	<b>RS<sub>3</sub></b>	+	Número de usuarios en la microrred más pequeña.
		<b>CS<sub>2-3</sub></b>	Alcance microrredes	<b>AS<sub>4</sub></b>	Número máximo de usuarios individuales.	<b>RS<sub>4</sub></b>	-	Número de usuarios individuales.
		<b>CS<sub>2-4</sub></b>	Instalación medidores	<b>AS<sub>5</sub></b>	Medidores en todos los puntos o sólo en microrredes.	<b>RS<sub>5</sub></b>	+	Cantidad de medidores.
<b>CT<sub>1</sub></b>	Coste	-	-	-		<b>RT<sub>1</sub></b>	-	Coste de la solución.
<b>CT<sub>2</sub></b>	Seguridad del suministro	<b>CT<sub>2-1</sub></b>	Porcentaje generación solar	<b>AT<sub>2</sub></b>	Mínimo porcentaje de la energía generada con paneles en cada punto de generación.	<b>RT<sub>2</sub></b>	+	Punto de generación con menor ratio energía generada con paneles / energía mínima.
		<b>CT<sub>2-2</sub></b>	Cantidad de equipos de generación	<b>AT<sub>3</sub></b>	Número mínimo de equipos de generación en cada punto de generación.	<b>RT<sub>3</sub></b>	+	Punto de generación con menor cantidad de equipos de generación.
		<b>CT<sub>2-3</sub></b>	Energía en usuarios individuales	<b>AT<sub>4</sub></b>	Mayor porcentaje de energía en usuarios individuales frente a usuarios en microrred.	<b>RT<sub>4</sub></b>	+	Punto individual con menor ratio energía suministrada / energía mínima.

### 7.2.3.1. Primer nivel de decisión

En el primer nivel se enfrentan los criterios coste y demanda:

- Coste ( $CP_1$ ). Directamente no se generan modificaciones sobre el coste, sino que para cada conjunto determinado de valores objetivo de los atributos del criterio demanda, se calcula la solución de mínimo coste ( $RP_1$ ). Cuanto menor sea este valor, mejor clasificada estará la alternativa.
- Demanda ( $CP_2$ ). Energía ( $CP_{2-1}$ ). Se propone estudiar distintos valores objetivo para el atributo consumo de energía ( $AP_2$ ). El decisor debe concretar unos valores mínimo y máximo, y un incremento porcentual de energía desde el mínimo hasta el máximo. El valor real ( $RP_2$ ) evalúa el punto de generación con mínima ratio entre la energía generada por los equipos instalados en el punto, y la energía mínima demandada por los usuarios que se abastecen (uno en sistemas individuales o varios en microrredes), considerando las pérdidas. Cuanto mayor sea este valor real, mejor clasificada estará la alternativa. Así se pretende beneficiar las alternativas tales que el usuario/s más desfavorecido/s, queda menos desfavorecido frente a las demás alternativas. Este razonamiento es válido para  $RP_3$ ,  $RP_4$ ,  $RS_3$ ,  $RT_2$ ,  $RT_3$  y  $RT_4$ .

- Demanda ( $CP_2$ ). Potencia ( $CP_{2-2}$ ). Se propone estudiar distintos valores objetivo para el atributo consumo de potencia ( $AP_3$ ). El decisor debe concretar unos valores mínimo y máximo, y un incremento porcentual de potencia desde el mínimo hasta el máximo. El valor real ( $RP_3$ ) evalúa el punto de generación con mínima ratio entre la potencia de los inversores instalados en el punto y la potencia mínima demandada por los usuarios que se abastecen, considerando las pérdidas. Cuanto mayor sea este valor real, mejor clasificada estará la alternativa.
- Demanda ( $CP_2$ ). Autonomía ( $CP_{2-3}$ ). Se propone estudiar distintos valores objetivo para el atributo autonomía requerida ( $AP_4$ ). El decisor debe concretar unos valores mínimo y máximo, y un incremento porcentual de autonomía desde el mínimo hasta el máximo. El valor real ( $RP_4$ ) evalúa el punto de generación con mínima ratio entre la capacidad de las baterías instaladas en el punto y la autonomía requerida por los usuarios que se abastecen, considerando las pérdidas. Cuanto mayor sea este valor real, mejor clasificada estará la alternativa.

A continuación se detalla la fórmula de la distancia para la métrica p-esima del primer nivel (ecuación 7.10). La notación es la utilizada en las Tablas 7.5 (para los pesos) y 7.11 (para el valor real de los atributos). Además, las mayúsculas con un \* se refieren al valor ideal y las minúsculas con un \* se refieren al valor anti-ideal.

$$L_p = \left[ W_{CP1} \left( \frac{RP_1 - RP_1^*}{rp_1^* - RP_1^*} \right)^p + W_{CP2} \left( W_{CP2-1} \frac{RP_2^* - RP_2}{RP_2^* - rp_2^*} + W_{CP2-2} \frac{RP_3^* - RP_3}{RP_3^* - rp_3^*} + W_{CP2-3} \frac{RP_4^* - RP_4}{RP_4^* - rp_4^*} \right)^p \right]^{1/p} \quad (7.10)$$

donde, por ejemplo,  $W_{CP1}$  es el peso asociado al coste,  $RP_1$  es el coste de la alternativa,  $RP_1^*$  es el mínimo coste (valor ideal) y  $rp_1^*$  es el máximo coste (valor anti-ideal).

### 7.2.3.2. Segundo nivel de decisión

En el segundo nivel se enfrentan los criterios coste y gestión del sistema:

- Coste ( $CS_1$ ). Directamente no se generan modificaciones sobre el coste, sino que para cada conjunto determinado de valores objetivo de los atributos del criterio gestión del sistema, se calcula la solución de mínimo coste ( $RS_1$ ). Cuanto menor sea este valor, mejor clasificada estará la alternativa.
- Gestión del sistema ( $CS_2$ ). Cantidad de microrredes ( $CS_{2-1}$ ). Se propone estudiar distintos valores objetivo para el atributo número máximo de microrredes ( $AS_2$ ). Del mismo modo que para los atributos  $AS_3$  y  $AS_4$ , el decisor impone los valores objetivo que desea analizar. El valor real ( $RS_2$ ) evalúa la cantidad de microrredes. Cuanto menor sea este valor real, mejor clasificada estará la alternativa.

- Gestión del sistema ( $CS_2$ ). Tamaño de las microrredes ( $CS_{2-2}$ ). Se propone estudiar distintos valores objetivo para el atributo número mínimo de usuarios por microrred ( $AS_3$ ). El valor real ( $RS_3$ ) evalúa la cantidad de usuarios de la microrred de menor tamaño. Cuanto mayor sea este valor real, mejor clasificada estará la alternativa.
- Gestión del sistema ( $CS_2$ ). Alcance de las microrredes ( $CS_{2-3}$ ). Se propone estudiar distintos valores objetivo para el atributo número máximo de usuarios individuales ( $AS_4$ ). El valor real ( $RS_4$ ) evalúa la cantidad de usuarios individuales. Cuanto menor sea este valor real, mejor clasificada estará la alternativa.
- Gestión del sistema ( $CS_2$ ). Instalación de medidores ( $CS_{2-4}$ ). Se propone estudiar los dos valores objetivo para este atributo ( $AS_5$ ): instalar un medidor en cada usuario o sólo en usuarios de microrred. El valor real ( $RS_5$ ) evalúa la cantidad de medidores instalados. Cuando mayor sea este valor real, mejor clasificada estará la alternativa.

A continuación se detalla la fórmula de la distancia para la métrica p-esima del segundo nivel (ecuación 7.11), de forma análoga a la ecuación 7.10 del primer nivel de decisión.

$$L_p = \left[ W_{CS1}^p \left( \frac{RS_1 - RS_1^*}{rs_1^* - RS_1^*} \right)^p + W_{CS2}^p \left( W_{CS2-1} \frac{RS_2 - RS_2^*}{rs_2^* - RS_2^*} + W_{CS2-2} \frac{RS_3^* - RS_3}{RS_3^* - rs_3^*} + W_{CS2-3} \frac{RS_4 - RS_4^*}{rs_4^* - RS_4^*} + W_{CS2-4} \frac{RS_5^* - RS_5}{RS_5^* - rs_5^*} \right)^p \right]^{1/p} \quad (7.11)$$

### 7.2.3.3. Tercer nivel de decisión

En el tercer nivel se enfrentan los criterios coste y seguridad del suministro:

- Coste ( $CT_1$ ). Directamente no se generan modificaciones sobre el coste, sino que para cada conjunto determinado de valores objetivo de los atributos del criterio seguridad del suministro, se calcula la solución de mínimo coste ( $RT_1$ ). Cuanto menor sea este valor, mejor clasificada estará la alternativa.
- Seguridad del suministro ( $CT_2$ ). Porcentaje de generación solar ( $CT_{2-1}$ ). Se propone estudiar distintos valores objetivo para el atributo mínimo porcentaje de la energía generada con paneles para cada punto de generación ( $AT_2$ ). El valor real ( $RT_2$ ) evalúa el punto de generación con mínima ratio entre la energía generada con los paneles fotovoltaicos instalados en el punto y la energía generada con todos los equipos de generación instalados en dicho punto. Cuanto mayor sea este valor real, mejor clasificada estará la alternativa.
- Seguridad del suministro ( $CT_2$ ). Cantidad de equipos de generación ( $CT_{2-2}$ ). Se propone estudiar distintos valores objetivo para el atributo número máximo de equipos de generación en cada punto de generación ( $AT_3$ ). El valor real ( $RT_3$ ) evalúa el punto de generación con menor cantidad de equipos de generación. Cuanto mayor sea este valor real, mejor clasificada estará la alternativa.

- Seguridad del suministro ( $CT_2$ ). Energía en usuarios individuales ( $CT_{2-3}$ ). Se propone estudiar distintos valores objetivo para el atributo porcentaje de energía adicional en usuarios individuales frente a usuarios en microrred ( $AT_4$ ). El valor real ( $RT_4$ ) evalúa el punto individual con mínima ratio entre la energía generada por los equipos de generación instalados en el punto y la energía mínima demandada por el punto. Cuanto mayor sea este valor real, mejor clasificada estará la alternativa.

A continuación se detalla la fórmula de la distancia para la métrica  $p$ -ésima del tercer nivel (ecuación 7.12), de forma análoga a la ecuación 7.10 del primer nivel de decisión.

$$L_p = \left[ W_{CT1} \left( \frac{RT_1 - RT_1^*}{rt_1^* - RT_1^*} \right)^p + W_{CT2} \left( W_{CT2-1} \frac{RT_2^* - RT_2}{RT_2^* - rt_2^*} + W_{CT2-2} \frac{RT_3^* - RT_3}{RT_3^* - rt_3^*} + W_{CT2-3} \frac{RT_4^* - RT_4}{RT_4^* - rt_4^*} \right)^p \right]^{1/p} \quad (7.12)$$

### 7.2.4. Proceso de clasificación de alternativas

A partir de la formulación introducida en el subapartado anterior, se puede calcular unas distancias  $L_p$  que indican la cercanía entre cada alternativa y la solución ideal. Como se ha comentado previamente, según si se utiliza un valor de la métrica  $p$  u otro, la clasificación puede ser diferente. Para ilustrar este hecho, en la Figura 7.6 se representan las 3 distancias con sentido geométrico ( $L_1$ ,  $L_2$  y  $L_\infty$ ). En rojo se indica la solución ideal y en negro 2 hipotéticas alternativas que se desea clasificar.

Nótese que, pese a haber descartado previamente la métrica  $p=2$  por el teorema de Yu [Yu, 1973], se ha incluido en la Figura 7.6 y en la explicación posterior, debido a su sentido geométrico y a que se ha considerado que clarifica lo que se desea exponer.

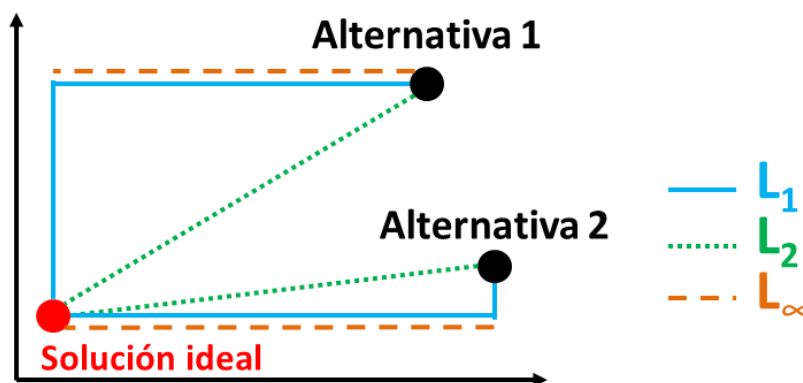


Figura 7.6 – Gráfico ilustrativo de las diferencias entre las distancias  $L_1$ ,  $L_2$  y  $L_\infty$

Para la distancia  $L_1$  o *Manhattan* (línea continua azul), la alternativa 2 es más cercana a la solución ideal que la alternativa 1. En el caso de  $L_2$  o *Euclidiana* (línea de puntos verdes) ambas alternativas están a la misma distancia. Para  $L_\infty$  o *Tchebycheff* (línea de guiones naranjas) la alternativa 1 está más cerca a la solución ideal que la alternativa 2.

Decidir la distancia más adecuada es, a menudo, un problema complejo y confuso. La mayoría de publicaciones revisadas no se decantan por un único valor, sino que un experto en multicriterio discute los resultados según las métricas estudiadas. De esta forma no se desea obtener una única clasificación, sino un conjunto de recomendaciones que, posteriormente, se exponen a un grupo de expertos conocedores del problema, encargados de la decisión final [Merino *et al.*, 2003; André & Romero, 2006].

Sin embargo, en esta tesis doctoral se debe proponer una única clasificación para cada nivel de decisión, que no requiera del decisor para seleccionar el valor de  $p$ . Para ello, es importante tener presente el significado de la métrica  $p$ : representa la importancia que se asigna a la desviación respecto al ideal de cada criterio, o lo que es lo mismo, la frustración respecto a cada criterio [Romero, 1993]. De esta forma, a mayor valor de  $p$ , mayor importancia se asigna a la máxima desviación [Hashimoto & Wu, 2004].

- $L_1$  asigna una importancia respecto a la desviación de cada criterio, proporcional al peso del criterio.
- $L_2$  mide la menor distancia geométrica.
- $L_\infty$  tiene únicamente en cuenta la máxima desviación.

Es necesario destacar que el valor de  $p$  a seleccionar depende del tipo de problema y del decisor, y, a mayor conflictividad entre decisores, se recomienda utilizar un menor valor de  $p$  [Teclé *et al.*, 1998]. Esto se debe a que pequeños valores de  $p$  permiten que la sobrevaloración de unos criterios compense la infravaloración de otros, mientras que grandes valores de  $p$  impiden que esto ocurra [Poff *et al.*, 2010]. De todos modos, en la literatura se ha expuesto que no existe ninguna razón inequívoca para decidirse por uno u otro valor de  $p$  [Hashimoto & Wu, 2004].

Algunas publicaciones han trabajado con los valores  $L_1$  y  $L_\infty$ , por ser los dos valores extremos [Ballesteros & Plà-Santamaría, 2003; Bilbao-Terol *et al.*, 2006]. Otras se han decantado por el valor  $L_2$ , intermedio y con un sentido geométrico claro, lo que facilita su interpretación [Shiau & Wu, 2006]. Un tercer grupo de estudios se ha decantado por utilizar los 3 valores  $L_1$ ,  $L_2$  y  $L_\infty$  [Romero, 1993; Teclé *et al.*, 1998; Chen *et al.*, 1999; André *et al.*, 2007; Poff *et al.*, 2010].

En Díaz-Balteiro & Romero [2004] se propone una combinación lineal de  $L_1$  y  $L_\infty$ , que asegura una gran flexibilidad para adaptarse a las características de cada decisor y problema. Esta combinación lineal supone un equilibrio entre el “máximo valor agregado” ( $L_1$ ) y el “valor más equilibrado” ( $L_\infty$ ). En función de un parámetro  $\alpha$  ( $\alpha \cdot L_1 + [1-\alpha] \cdot L_\infty$ ), se ajusta la toma de decisiones en mayor o menor medida a uno de los dos extremos. En esta tesis se propone utilizar dicha combinación lineal; en concreto, se utiliza el valor  $\alpha=0,5$ , tal y como se propone en la literatura [San Cristóbal, 2011].

En la Tabla 7.12 se presenta, a modo de ejemplo, la clasificación de alternativas para el segundo nivel de decisión, con 4 alternativas hipotéticas.

**Tabla 7.12 – Evaluación y clasificación de alternativas**

			Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
<b>RS<sub>1</sub></b>	<b>Coste</b>	-	28614	29453	34973	28957
<b>RS<sub>2</sub></b>	<b>Cantidad de microrredes</b>	-	3	3	1	1
<b>RS<sub>3</sub></b>	<b>Tamaño de microrredes</b>	+	2	2	20	14
<b>RS<sub>4</sub></b>	<b>Usuarios individuales</b>	-	8	6	6	12
<b>RS<sub>5</sub></b>	<b>Instalación medidores</b>	+	18	20	20	14
<b>L<sub>1</sub></b>			0,491	0,446	0,330	0,353
<b>L<sub>∞</sub></b>			0,491	0,402	0,330	0,335
<b><math>\alpha \cdot L_1 + (1-\alpha) \cdot L_\infty</math></b>			<b>0,491</b>	<b>0,424</b>	<b>0,330</b>	<b>0,344</b>
<b>Orden de preferencia</b>			<b>4</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>2</b>

En primer lugar se evalúa cada alternativa en función de cada criterio, siguiendo las indicaciones que se exponen en la Tabla 7.11. En segundo lugar se calculan los valores  $L_1$  y  $L_\infty$  para las 4 alternativas a partir de la ecuación 7.11. A continuación se obtienen los valores de  $\alpha \cdot L_1 + (1-\alpha) \cdot L_\infty$  en cada caso. Con estos resultados, en el ejemplo expuesto se aprecia que la alternativa 3 es la mejor clasificada, seguida de la alternativa 4, a continuación la alternativa 2 y finalmente la alternativa 1.

## 8. Validación de la metodología de diseño

En este capítulo se presenta la validación de la metodología de diseño propuesta, mediante su uso por expertos para diseñar sistemas de electrificación con datos reales. Para ello, se hace participar a dos técnicos de gran experiencia en electrificación rural:

- Experto 1. Ha trabajado con la ONG ISF en la sierra andina peruana. Además ha participado en proyectos de electrificación en Guinea Bissau. Entre su formación destaca el Máster en Cooperación al Desarrollo en la Universidad de Valencia.
- Experto 2. Ha trabajado con la ONG ISF en la sierra andina peruana. Además ha coordinado parte de las actividades de la ONG SP en distintos contextos de costa, sierra y selva de Perú, así como en Bolivia y Ecuador. Ha participado en diversos foros, paneles de expertos y seminarios entorno a la electrificación rural en gran parte de Sudamérica. Actualmente es Coordinador Técnico Regional del Programa Alianza en Energía y Ambiente con la Región Andina (AEA), en el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).

A ambos expertos se les propone (por separado) adoptar el rol de un supuesto decisor que trata de diseñar el sistema de electrificación de 2 comunidades. En todo momento, el autor de esta tesis se mantiene al margen de la toma de decisiones. De esta forma se espera validar si la metodología de diseño propuesta se ajusta a la toma de decisiones de un hipotético decisor.

Las comunidades seleccionadas son El Alumbre y Alto Perú (Cajamarca, Perú), por ser suficientemente distintas en cuanto a cantidad de población y concentración de las viviendas. Estas comunidades ya están electrificadas y ambos técnicos participaron en el diseño e implementación de los 2 proyectos, de modo que conocen las peculiaridades de cada zona. Ahora repetirán el proceso de diseño utilizando la metodología desarrollada, lo cual permitirá comparar los procesos seguidos y la propuesta final de diseño de electrificación.

La validación de la metodología se centra en la segunda y tercera etapa, puesto que se trata de las etapas donde se diseña propiamente el sistema de electrificación. Así, gran parte de la primera etapa es común para ambos expertos:

- Evaluación socioeconómica. Aprovechando que ambos expertos conocen en detalle las 2 comunidades, se plantea que cada uno haga las consideraciones oportunas, sobre todo en relación a la demanda.
- Evaluación energética. Ésta es la misma, independientemente del experto consultado, y evalúa los recursos viento y sol de cada comunidad.

- Evaluación técnica. Los equipos posibles a utilizar son los mismos para ambos expertos y se listan a continuación. Un mayor detalle se encuentra en el anexo A.1.
  - Aerogeneradores (4 tipos). Potencia máx: 300 a 3500 W; coste: \$1139 a \$5645.
  - Paneles (4 tipos). Potencia nominal: 50 a 150 W; coste: \$451 a \$1000.
  - Reguladores solares (4 tipos). Potencia máx: 50 a 200 W; coste: \$67 a \$125.
  - Baterías (4 tipos). Capacidad: 1500 a 3000 Wh/día; coste: \$225 a \$325; eficiencia: 85%; factor de descarga: 60%.
  - Inversores (5 tipos). Potencia máx: 300 a 3000 W; coste: \$377 a \$2300; eficiencia: 85%.
  - Conductores (3 tipos). Coste: \$4,94/m a \$5,79/m; resistencia: 2,60 a 0,16 $\Omega$ /km.

Este capítulo se divide en 6 apartados. En el primero se describen las características de las comunidades de estudio y, en concreto, se detalla su evaluación energética. En los apartados 8.2 a 8.5 se describe el proceso de diseño de cada uno de los dos expertos respecto a cada una de las dos comunidades. En el último apartado se exponen las conclusiones del capítulo, referentes a la validación de la metodología de diseño propuesta en esta investigación.

## 8.1. Descripción de las comunidades

Como se ha comentado, las comunidades seleccionadas para la validación de la metodología son El Alumbre y Alto Perú. Ambas se encuentran en la sierra andina norte de Perú. Se trata de zonas montañosas, situadas a más de 3500 m.s.n.m., alejadas de los centros poblados mayores y con unas condiciones climáticas muy adversas. La población vive principalmente a partir de la actividad agropecuaria y comercial a pequeña escala, con unas economías de subsistencia.

Los servicios básicos (agua potable, saneamiento, educación, sanidad, etc.) son muy limitados y, en concreto, ninguna de las 2 comunidades tenía acceso a la energía eléctrica. En este marco, las ONGs SP, ISF y GE han impulsado su electrificación mediante el uso de la energía eólica y solar.

En la Figura 8.1 se puede observar el emplazamiento de las 2 comunidades y del departamento de Cajamarca, en el mapa eólico de Perú. Se trata de una zona al norte de la cordillera andina peruana y cuyo recurso eólico es de los más elevados del país.

A continuación se describen las dos comunidades de estudio. Esta información es utilizada, posteriormente, por cada uno de los dos expertos para estudiar diferentes valores objetivo de los atributos de cada nivel de decisión de la segunda etapa de la metodología.



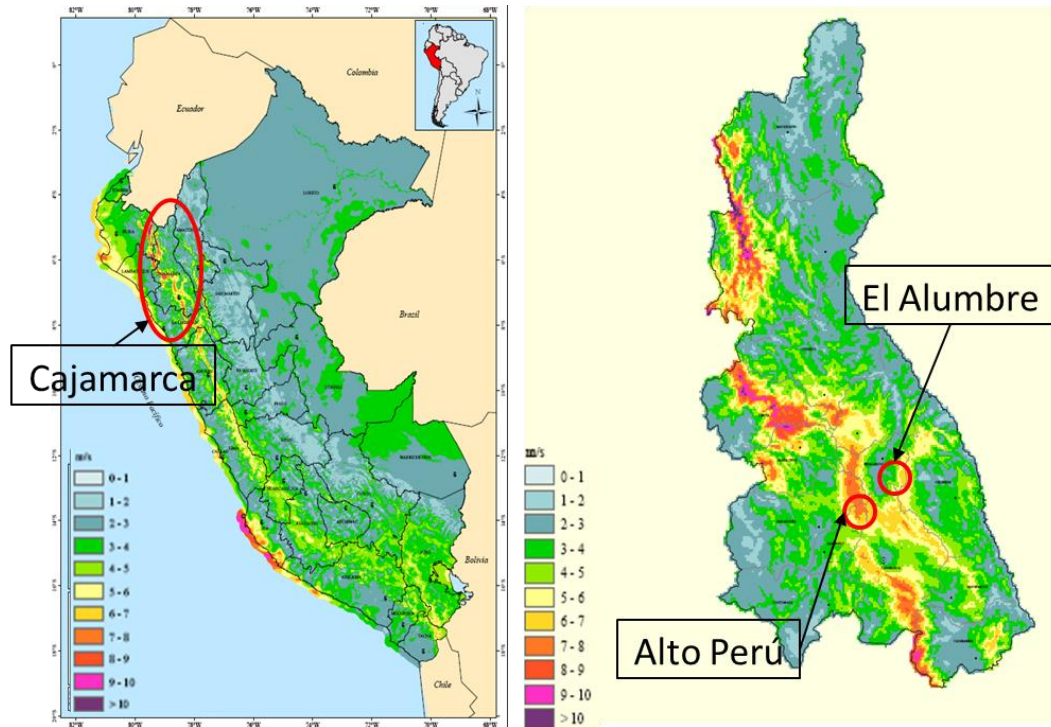


Figura 8.1 – Mapa de viento de Perú. Emplazamiento del departamento de Cajamarca y de las comunidades de El Alumbre y Alto Perú [Ferrer-Martí *et al.*, 2010]

### 8.1.1. El Alumbre

El Alumbre es una comunidad situada en el distrito de Bambamarca, provincia de Hualgayoc, departamento de Cajamarca, Perú [Ramírez & Mantilla, 2007; Ferrer-Martí *et al.*, 2010]. Cuenta con 33 familias que viven permanentemente y una población total de 175 habitantes. Los servicios básicos son los siguientes:

- Existe una escuela para educación primaria y secundaria. Sin embargo, la mayor parte de la población tiene la educación primaria incompleta, o únicamente estudios primarios, y una sola persona tiene estudios superiores. El analfabetismo está entorno al 9,5% y se concentra principalmente entre las mujeres.
- Existe un centro de salud, en el que trabaja una enfermera y dos técnicos en enfermería. Principalmente se resuelven emergencias básicas, siendo necesario desplazarse a un centro poblado mayor en caso de requerir intervenciones más importantes. Este centro atiende a la población de la comunidad y, también, a habitantes de comunidades cercanas.
- El 38% de las familias tiene agua potable en sus viviendas, mientras que el resto de la población se abastece de manantiales cercanos, siendo las mujeres y los niños los principales encargados de dicha tarea.
- Un 51% de las familias tiene letrinas.

Las principales actividades económicas son la agropecuaria y la mano de obra. La agricultura se enfoca principalmente en el cultivo de papa, olluco, oca y cebada, pero dada la poca fertilidad de los terrenos dicha producción se destina básicamente al autoconsumo. La ganadería es una actividad fundamental para muchas familias, sobre todo gracias a la venta de leche y, en algunos casos, la elaboración de productos derivados como el queso o el yogurt.

El clima es frío a lo largo de todo el año, con una temperatura media que ronda los 8°C pero que puede descender bajo 0°C por las noches. La orografía del terreno es bastante accidentada y la altura está entorno a los 3800 m.s.n.m. La comunidad ocupa una superficie de 3,5x3,5 km<sup>2</sup> y las viviendas se encuentran muy dispersas en todo el territorio, a excepción de una pequeña aglomeración en el centro de 5 viviendas, la escuela y el centro de salud. En la Figura 8.2.a se puede observar la distribución de los puntos a electrificar en el mapa topográfico de la región.

La evaluación energética consta, por una parte, de la elaboración del mapa de viento para el peor mes del año con el programa informático WAsP (en la Figura 8.2.b se puede observar el resultado). Las zonas de mayor recurso eólico (en rojo en la Figura 8.2.b) son las zonas más elevadas (en azul en la Figura 8.2.a). Por otra parte, para evaluar el recurso solar se han recopilado los datos de la base de datos HWO, obteniendo un valor de 4,3 Horas Solar Pico (PSH).

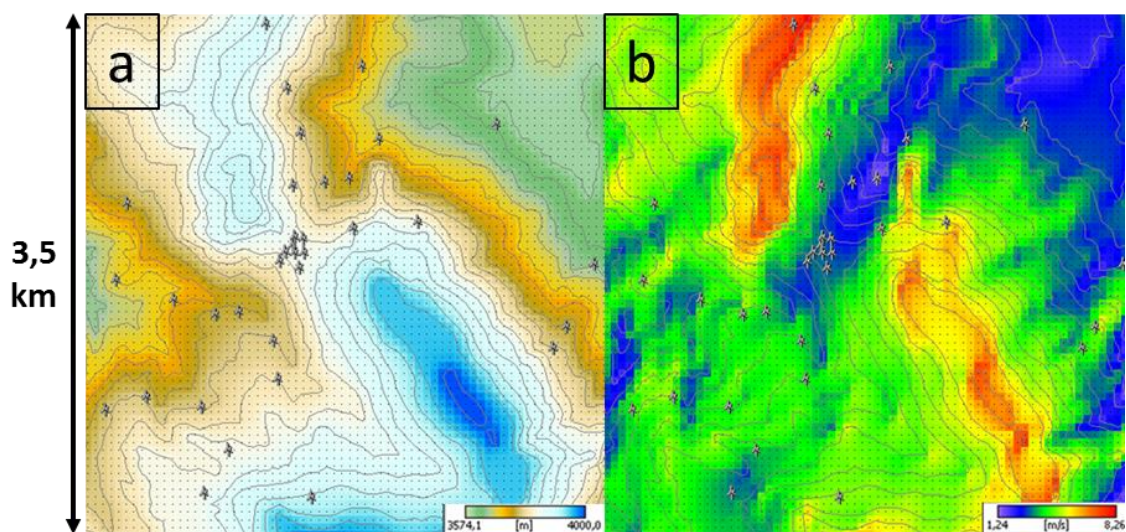


Figura 8.2 – Mapa de elevación (imagen a) y de viento (imagen b) de la comunidad de El Alumbre

Como se ha comentado, la comunidad ya fue electrificada y la ejecución del proyecto constó de 2 etapas:

- Etapa 1 – Marzo 2008. Instalación de 20 aerogeneradores individuales de 100W en 20 viviendas y 1 aerogenerador individual de 500W en la escuela.
- Etapa 2 – Febrero 2009. Instalación de 13 aerogeneradores individuales de 100W en las viviendas restantes y 1 aerogenerador individual de 500W en el centro de salud.

Complementariamente se capacitó a 1 técnico encargado del mantenimiento y reparación de los sistemas, y a un operador encargado de la gestión económica (pago de las tarifas mensuales).

### **8.1.2. Alto Perú**

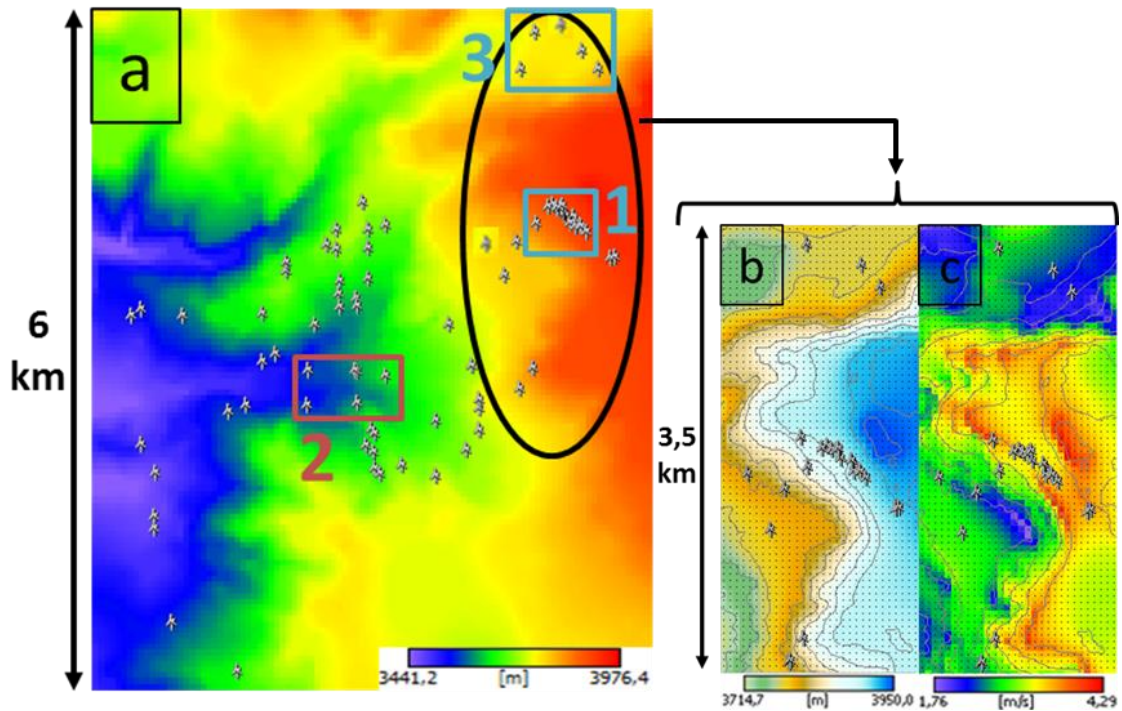
Alto Perú es una comunidad del distrito de Tumbadén, provincia de San Pablo, departamento de Cajamarca, Perú [Ramírez & Mantilla, 2009; Ferrer-Martí *et al.*, 2012]. Se trata de una comunidad con 62 viviendas y una población de 345 habitantes, de los que el 63% tienen menos de 30 años. Los servicios básicos son los siguientes:

- Existe un centro de enseñanza primaria pero casi la mitad de la población es analfabeta o tiene la educación primaria incompleta, mientras que muy pocos han finalizado los estudios secundarios y sólo un 6% tiene estudios superiores.
- No existe un centro de salud propio, pero en el proyecto de electrificación se considera electrificar el centro de salud de la comunidad vecina, que se encuentra en la frontera entre ambas.
- El 53% de la población cuenta con el servicio de agua entubada.
- El 100% de la población carece de desagüe y sólo el 63% tienen letrinas.
- Hay una iglesia en la principal agrupación de viviendas (zona azul 1, Figura 8.3.a).

La producción agrícola se destina al autoconsumo, siendo los cultivos más importantes los de papa, cebada, habas, oca, olluco y hortalizas; en esta actividad se emplean métodos tradicionales como la yunta y el arado. La producción ganadera se destina a la venta de leche, y también crían otras especies como ovejas, cerdos, cuyes, gallinas y conejos para el autoconsumo, así como caballos para movilidad y carga. Existen dos pequeñas tiendas, que permiten el abastecimiento de artículos de primera necesidad.

El clima es frío, con una temperatura que oscila entre 10 y 15°C. Las lluvias se concentran de diciembre a mayo, época en que el viento suele ser de menor intensidad que el resto del año. La orografía del terreno es muy accidentada y se distingue una parte alta con gran concentración de viviendas, y una parte baja con mucha dispersión. La altura varía de 3500 a 4000 m.s.n.m.

Dada la dispersión, el estudio a realizar por los dos expertos consultados únicamente se centra en 26 puntos distribuidos en un área de 3,5x1,5km<sup>2</sup>. En la Figura 8.3 se observa el mapa topográfico de la comunidad (8.3.a) y el detalle para los 26 puntos estudiados (8.3.b y 8.3.c), 25 viviendas y la iglesia, que corresponden a la zona enmarcada en negro en la Figura 8.3.a.



**Figura 8.3 – Mapa de elevación (imagen a) de Alto Perú y mapa de elevación (imagen b) y viento (imagen c) de los 26 puntos seleccionados para el estudio**

La evaluación energética consta de, primero, el mapa de viento para el peor mes del año, obtenido con el programa informático WAsP (Figura 8.3.c), y, por otra parte, el recurso solar, tomado de la base de datos HWO, con un valor de 4,3 PSH.

Como se ha introducido anteriormente, la comunidad entera fue electrificada y la ejecución del proyecto constó de 4 etapas:

- Etapa 1 – Julio 2009 (zona 1, Figura 8.3.a). Instalación de 4 aerogeneradores de 500W para alimentar 13 viviendas y la iglesia en 2 microrredes de 8 y 6 puntos.
- Etapa 2 – Julio 2010 (zona 2, Figura 8.3.a). Instalación de una picocentral hidráulica de 2kW para la escuela y 4 viviendas.
- Etapa 3 – Agosto 2010 (zona 3, Figura 8.3.a). Instalación de una microrred solar fotovoltaica de 760W para el centro de salud y 4 viviendas.
- Etapa 4 – Octubre 2010 (resto de puntos, Figura 8.3.a). Instalación de 41 paneles fotovoltaicos individuales de 95W en 41 viviendas.

Como se puede observar en la Figura 8.3.a, la zona a considerar para validar la metodología incluye los puntos electrificados en la etapa 1 y algunos de las etapas 3 y 4.

Complementariamente se capacitó a 2 equipos de 1 técnico y 1 operador cada uno, encargados del mantenimiento y la gestión.

## 8.2. Experto 1. El Alumbre

En este apartado se describe el proceso de diseño del sistema de electrificación seguido por el experto 1 para la comunidad de El Alumbre.

### *Etapa 1. Evaluaciones iniciales*

En primer lugar se realizan las evaluaciones iniciales para conocer las características de la comunidad a electrificar, que se resumen a continuación:

- Evaluación socioeconómica. El experto 1 establece las siguientes características en función de sus conocimientos.
  - Demanda mínima de energía: 300 Wh/día en las viviendas, 900 Wh/día en la escuela (punto 1) y en el centro de salud (punto 35), y 3000 Wh/día en el punto de consumo 9 donde se prevén actividades productivas.
  - Demanda mínima de potencia: 200 W en las viviendas, 600 W en la escuela y en el centro de salud, y 2000 W en el punto de consumo 9.
  - Autonomía mínima: 1,5 días debido a la variabilidad del viento y del sol.
- Evaluación energética. Véase el apartado 8.1.
- Evaluación técnica. Véase la introducción del capítulo 8.

### *Etapa 2. Nivel 1. Decisiones estratégicas. Coste vs Demanda*

En el primer nivel de decisión se enfrentan los criterios coste y demanda. El experto 1 estudia los siguientes valores objetivo de los atributos correspondientes a la demanda:

- Energía ( $AP_2$ ). Incrementos del 0, 17 y 33%. El escenario de demanda mínima está pensado para un consumo básico, y los incrementos propuestos permiten pequeñas comodidades domésticas progresivas. En el punto de consumo 9 no se considera ningún incremento.
- Potencia ( $AP_3$ ). Incrementos del 0 y 100%. El escenario de potencia mínima está pensado para conectar electrodomésticos como la televisión, el DVD, etc. El incremento propuesto permite el uso de una licuadora, que facilita la elaboración de jugos, que forman parte de la dieta de la población y tiene un consumo entorno a los 350W. En el punto de consumo 9 no se considera ningún incremento.
- Autonomía ( $AP_4$ ). Incrementos del 0, 33 y 100%. El escenario de autonomía mínima facilita un funcionamiento adecuado del sistema a lo largo del año. El incremento del 33% puede mejorar la continuidad del suministro con un leve aumento de coste.

El incremento del 100% está pensado para el punto de consumo 9, cuyas actividades productivas pueden verse beneficiadas con un suministro más constante.

Con estos valores objetivo de los atributos se generan 18 alternativas (3 escenarios de demanda x 2 escenarios de potencia x 3 escenarios de autonomía). Como se ha explicado en el apartado 6.7, se destina un máximo de 1800s a cada alternativa del primer nivel, de modo que el tiempo necesario para resolver las 18 alternativas es de unas 9 horas. En la Tabla 8.1 se presenta el detalle de las alternativas, en 3 subtablas:

- En la primera se lista el valor objetivo de los atributos  $AP_2$ ,  $AP_3$  y  $AP_4$ . En concreto, se muestra el porcentaje adicional impuesto a cada punto de consumo respecto a su demanda mínima.
- En la segunda se exponen los valores reales de los atributos. El coste ( $RP_1$ ) se especifica en dólares y los valores de energía ( $RP_2$ ), potencia ( $RP_3$ ) y autonomía ( $RP_4$ ) se presentan de forma análoga a la primera subtabla.
- En la tercera se calculan los valores  $L_1$  y  $L_\infty$ , con los resultados de la segunda subtabla, y los pesos de los criterios y subcriterios indicados en la Tabla 8.2 (extraídos de la Tabla 7.10). Finalmente se calcula la media de dichos valores ( $0,5 \cdot L_1 + 0,5 \cdot L_\infty$ ) y la clasificación resultante de las alternativas.

**Tabla 8.1 – Resultados de la validación: experto 1, El Alumbre, nivel 1**

	Valor objetivo atributos			Valor real atributos				Clasificación			
	$AP_2$	$AP_3$	$AP_4$	$RP_1$	$RP_2$	$RP_3$	$RP_4$	$L_1$	$L_\infty$	Media	Pos.
<b>A1</b>	+0%	+0%	+0%	60411	+5%	+0%	+1%	0,520	0,520	0,520	17
<b>A2</b>	+0%	+0%	+33%	61228	+5%	+0%	+34%	0,487	0,471	0,479	12
<b>A3</b>	+0%	+0%	+100%	64630	+5%	+0%	+102%	0,459	0,373	0,416	5
<b>A4</b>	+0%	+100%	+0%	72390	+5%	+100%	+1%	0,594	0,351	0,473	10
<b>A5</b>	+0%	+100%	+33%	73207	+5%	+100%	+34%	0,562	0,303	0,432	7
<b>A6</b>	+0%	+100%	+100%	76609	+5%	+100%	+102%	0,533	0,328	0,431	6
<b>A7</b>	+17%	+0%	+0%	66655	+18%	+0%	+1%	0,575	0,448	0,511	16
<b>A8</b>	+17%	+0%	+33%	68051	+19%	+0%	+34%	0,553	0,398	0,476	11
<b>A9</b>	+17%	+0%	+100%	70809	+18%	+0%	+101%	0,513	0,302	0,407	3
<b>A10</b>	+17%	+100%	+0%	78634	+18%	+100%	+1%	0,649	0,369	0,509	15
<b>A11</b>	+17%	+100%	+33%	80665	+25%	+100%	+34%	0,608	0,410	0,509	14
<b>A12</b>	+17%	+100%	+100%	83967	+18%	+100%	+102%	0,612	0,477	0,544	18
<b>A13</b>	+33%	+0%	+0%	66440	+37%	+0%	+1%	0,474	0,352	0,413	4
<b>A14</b>	+33%	+0%	+33%	69214	+44%	+0%	+34%	0,445	0,267	0,356	1
<b>A15</b>	+33%	+0%	+100%	73927	+38%	+0%	+102%	0,472	0,274	0,373	2
<b>A16</b>	+33%	+100%	+0%	78348	+37%	+100%	+1%	0,547	0,363	0,455	8
<b>A17</b>	+33%	+100%	+33%	81124	+44%	+100%	+34%	0,518	0,420	0,469	9
<b>A18</b>	+33%	+100%	+100%	84119	+37%	+100%	+101%	0,518	0,480	0,499	13

**Tabla 8.2 – Pesos de criterios y subcriterios: experto 1, El Alumbre, nivel 1**

	Peso Criterios		Peso Subcriterios
Coste ( $CP_1$ )	0,48	-	-
Demanda ( $CP_2$ )	0,52	Energía ( $CP_{2,1}$ )	0,40
		Potencia ( $CP_{2,2}$ )	0,32
		Autonomía ( $CP_{2,3}$ )	0,28

En la Tabla 8.3 se resumen las características de la configuración de cada alternativa.

**Tabla 8.3 – Configuración de las alternativas: experto 1, El Alumbre, nivel 1**

Alternativa	Microrredes	Puntos individuales
A1,A2,A3,A4,A5, A6,A7,A8,A10,A12	1 microrred de 8 puntos, incluidos 1 y 35	27 puntos, incluido 9
A9	1 microrred de 11 puntos, incluidos 1 y 35	24 puntos, incluido 9
A11	1 microrred de 7 puntos, incluidos 1 y 35	28 puntos, incluido 9
A13,A14,A16, A17,A18	1 microrred de 9 puntos, incluidos 1 y 35	26 puntos, incluido 9
A15	1 microrred de 6 puntos, incluidos 1 y 35	29 puntos, incluido 9

El experto 1 analiza las 18 alternativas en paralelo, y concluye que:

- El incremento de coste que supone pasar de demanda mínima de energía a un 17 o 33% más, es ampliamente compensado por las mejoras domésticas que esto puede ocasionar. En consecuencia, descarta las alternativas A1 a A6.
- El peso de los criterios  $CP_1$  y  $CP_2$  es similar, mientras que, una vez descartadas A1 a A6, es preferible priorizar las alternativas más baratas.
- El peso asignado al subcriterio  $CP_{2.1}$  no es suficiente, y el de los subcriterios  $CP_{2.2}$  y  $CP_{2.3}$  es excesivo, siendo  $CP_{2.2}$  ligeramente más importante que  $CP_{2.3}$ .

El experto 1 modifica el peso de los criterios y subcriterios para adecuarlos a sus preferencias, tal y como se muestra en la Tabla 8.4. Con los nuevos pesos, se obtiene una nueva clasificación que se presenta en la Tabla 8.5.

**Tabla 8.4 – Pesos de criterios y subcriterios: experto 1, El Alumbre, nivel 1, iteración 1**

	Peso Criterios		Peso Subcriterios
Coste ( $CP_1$ )	0,72	-	-
Demanda ( $CP_2$ )	0,28	Energía ( $CP_{2.1}$ )	0,60
		Potencia ( $CP_{2.2}$ )	0,10
		Autonomía ( $CP_{2.3}$ )	0,30

**Tabla 8.5 – Resultados de la validación: experto 1, El Alumbre, nivel 1, iteración 1**

	Valor objetivo atributos			Valor real atributos				Clasificación			
	AP <sub>2</sub>	AP <sub>3</sub>	AP <sub>4</sub>	RP <sub>1</sub>	RP <sub>2</sub>	RP <sub>3</sub>	RP <sub>4</sub>	L <sub>1</sub>	L <sub>∞</sub>	Media	Pos.
<b>A7</b>	+17%	+0%	+0%	66655	+18%	+0%	+1%	0,288	0,280	0,284	4
<b>A8</b>	+17%	+0%	+33%	68051	+19%	+0%	+34%	0,316	0,250	0,283	3
<b>A9</b>	+17%	+0%	+100%	70809	+18%	+0%	+101%	0,373	0,195	0,284	5
<b>A10</b>	+17%	+100%	+0%	78634	+18%	+100%	+1%	0,748	0,497	0,622	8
<b>A11</b>	+17%	+100%	+33%	80665	+25%	+100%	+34%	0,760	0,579	0,670	10
<b>A12</b>	+17%	+100%	+100%	83967	+18%	+100%	+102%	0,882	0,714	0,798	12
<b>A13</b>	+33%	+0%	+0%	66440	+37%	+0%	+1%	0,158	0,158	0,158	2
<b>A14</b>	+33%	+0%	+33%	69214	+44%	+0%	+34%	0,197	0,113	0,155	1
<b>A15</b>	+33%	+0%	+100%	73927	+38%	+0%	+102%	0,371	0,305	0,338	6
<b>A16</b>	+33%	+100%	+0%	78348	+37%	+100%	+1%	0,615	0,485	0,550	7
<b>A17</b>	+33%	+100%	+33%	81124	+44%	+100%	+34%	0,654	0,598	0,626	9
<b>A18</b>	+33%	+100%	+100%	84119	+37%	+100%	+101%	0,766	0,720	0,743	11

Con la nueva clasificación, el experto 1 selecciona las 3 alternativas mejor clasificadas: A14, A13 y A8; y decide estudiarlas conjuntamente en el siguiente nivel de decisión. En la Figura 8.4 se puede observar la configuración de dichas alternativas, que constan de un microrred en el centro de 8 o 9 puntos de consumo (según el caso), incluyendo la escuela y el centro de salud. El resto de puntos son electrificados individualmente. En las figuras los puntos verdes son puntos de generación y los amarillos son puntos que se abastecen de alguna microrred.

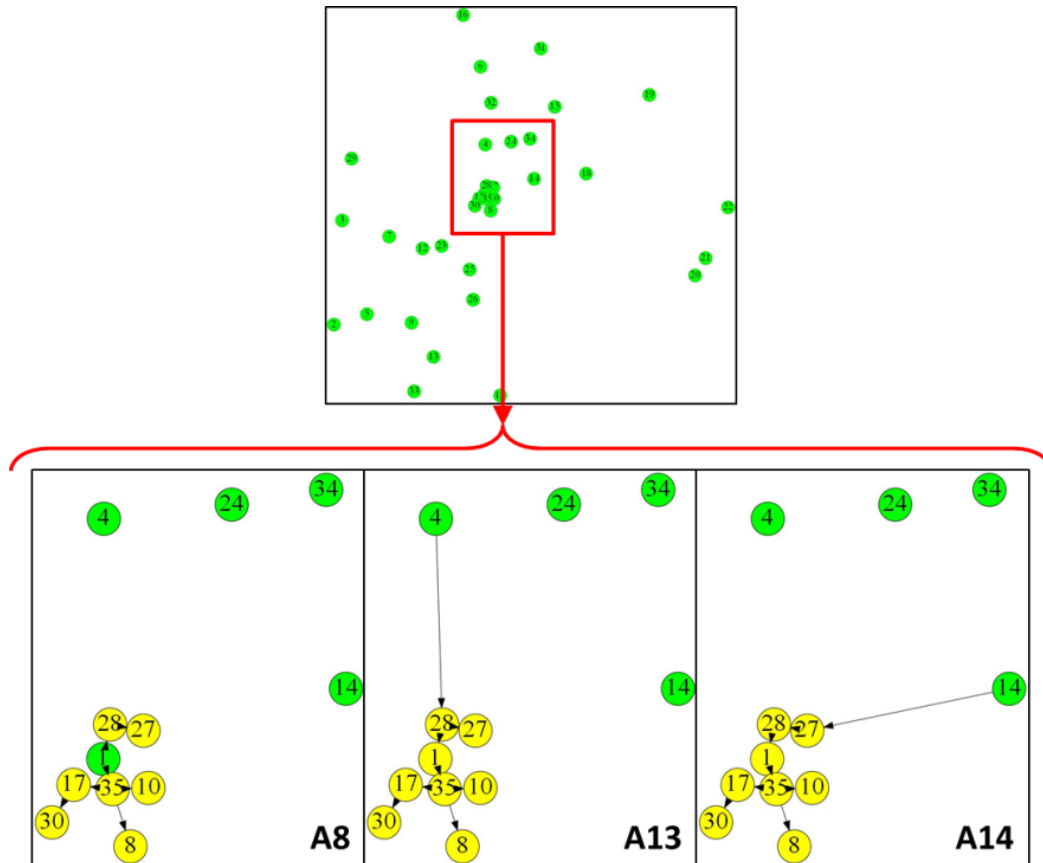


Figura 8.4 – Configuración de las alternativas seleccionadas: experto 1, El Alumbre, nivel 1

**Etapa 2. Nivel 2. Decisiones tácticas. Coste vs Gestión del sistema**

En el segundo nivel de decisión se enfrentan los criterios coste y gestión del sistema. El experto 1 estudia los siguientes valores objetivo de los atributos correspondientes a la gestión del sistema, teniendo en cuenta la configuración de las alternativas seleccionadas en el primer nivel: una microrred central y el resto puntos individuales. Concretamente plantea los siguientes valores:

- Número máximo de microrredes ( $AS_2$ ). No se estudia este atributo, de modo que al haber 35 puntos de consumo habrá, como máximo, 16 microrredes de 2 puntos y una de 3 puntos, por tanto 17 en total.
- Número mínimo de usuarios por microrred ( $AS_3$ ). No se estudia este atributo (0 puntos).



- Número máximo de usuarios individuales ( $AS_4$ ). Se estudia no imponer nada (es decir, 35 puntos individuales) o imponer un máximo del 30% de puntos individuales (es decir, 10 puntos) o un máximo del 0% (es decir, 0 puntos).
- Medidores en todos los usuarios o sólo en microrredes ( $AS_5$ ). Se considera que los medidores son fundamentales para una buena gestión de los sistemas, de modo que se obliga a su instalación en todos los puntos de consumo.

Como se ha expuesto en el capítulo 4, para pasar del primer al segundo nivel de decisión se fija la existencia de los conductores de la microrred formada (ya que es factible con el valor del atributo  $AS_3=0$ ), lo cual es validado por el experto 1.

Con estos valores objetivo de los atributos se generan 3 alternativas (3 valores máximos de usuarios individuales) para cada alternativa seleccionada en el primer nivel de decisión (A14, A13 y A8), es decir 9 alternativas en total. Como se ha explicado en el apartado 6.7, se destina un máximo de 1200s a cada alternativa del segundo nivel, de modo que el tiempo necesario para resolver las 9 alternativas es de unas 3 horas. En la Tabla 8.6 se presenta el detalle de las alternativas, en 3 subtablas:

- En la primera se lista el valor objetivo de los atributos  $AS_2$ ,  $AS_3$ ,  $AS_4$  y  $AS_5$ . Nótese que en caso de no estudiar un atributo determinado, en la primera subtabla se indica una cota máxima o mínima (según el caso).
- En la segunda se exponen los valores reales de los atributos. El coste ( $RS_1$ ) se especifica en dólares. Además se concretan los valores de cantidad ( $RS_2$ ), tamaño ( $RS_3$ ) y alcance ( $RS_4$ ) de las microrredes, e instalación de medidores ( $RS_5$ ).
- En la tercera se calculan los valores  $L_1$  y  $L_\infty$ , con los resultados de la segunda subtabla, y los pesos de los criterios y subcriterios indicados en la Tabla 8.7 (extraídos de la Tabla 7.10). Finalmente se calcula la media de dichos valores ( $0,5 \cdot L_1 + 0,5 \cdot L_\infty$ ) y la clasificación resultante de las alternativas.

**Tabla 8.6 – Resultados de la validación: experto 1, El Alumbre, nivel 2**

	Valor objetivo atributos				Valor real atributos					Clasificación			
	$AS_2$	$AS_3$	$AS_4$	$AS_5$	$RS_1$	$RS_2$	$RS_3$	$RS_4$	$RS_5$	$L_1$	$L_\infty$	Media	Pos.
<b>B8-1</b>	17	0	35	Todos	68051	1	8	27	35	0,265	0,229	0,247	3
<b>B8-2</b>	17	0	10	Todos	71843	4	2	10	35	0,416	0,295	0,356	4
<b>B8-3</b>	17	0	0	Todos	87989	13	2	0	35	0,798	0,483	0,640	9
<b>B13-1</b>	17	0	35	Todos	66440	1	9	26	35	0,194	0,194	0,194	1
<b>B13-2</b>	17	0	10	Todos	71531	6	2	10	35	0,430	0,316	0,373	5
<b>B13-3</b>	17	0	0	Todos	82189	5	2	0	35	0,584	0,353	0,468	7
<b>B14-1</b>	17	0	35	Todos	69214	1	9	26	35	0,257	0,194	0,226	2
<b>B14-2</b>	17	0	10	Todos	74552	6	2	10	35	0,498	0,316	0,407	6
<b>B14-3</b>	17	0	0	Todos	84938	5	2	0	35	0,645	0,414	0,530	8

**Tabla 8.7 – Pesos de criterios y subcriterios: experto 1, El Alumbre, nivel 2**

	Peso Criterios		Peso Subcriterios
<b>Coste (CS<sub>1</sub>)</b>	0,48	-	-
<b>Gestión del sistema (CS<sub>2</sub>)</b>	0,52	<b>Cantidad microrredes (CS<sub>2,1</sub>)</b>	0,20
		<b>Tamaño microrredes (CS<sub>2,2</sub>)</b>	0,30
		<b>Alcance microrredes (CS<sub>2,3</sub>)</b>	0,32
		<b>Instalación medidores (CS<sub>2,4</sub>)</b>	0,18

En la Tabla 8.8 se resumen las características de la configuración de cada alternativa.

**Tabla 8.8 – Configuración de las alternativas: experto 1, El Alumbre, nivel 2**

Alternativa	Microrredes	Puntos individuales
B8-1	1 microrred de 8 puntos, incluidos 1 y 35	27 puntos, incluido 9
B8-2	1 microrred de 19 puntos, incluidos 1 y 35 1 microrred de 2 puntos, incluido 9 2 microrredes de 2 puntos	10 puntos
B8-3	1 microrred de 8 puntos, incluidos 1 y 35 1 microrred de 2 puntos, incluido 9 3 microrredes de 3 puntos 8 microrredes de 2 puntos	0 puntos
B13-1, B14-1	1 microrred de 9 puntos, incluidos 1 y 35	26 puntos, incluido 9
B13-2	1 microrred de 13 puntos, incluidos 1 y 35 1 microrred de 4 puntos, incluido 9 4 microrredes de 2 puntos	10 puntos
B13-3, B14-3	1 microrred de 22 puntos, incluidos 1 y 35 1 microrred de 6 puntos, incluido 9 1 microrred de 3 puntos 2 microrredes de 2 puntos	0 puntos
B14-2	1 microrred de 15 puntos, incluidos 1 y 35 1 microrred de 2 puntos, incluido 9 4 microrredes de 2 puntos	10 puntos

El experto 1 analiza las 9 alternativas en paralelo, y concluye que:

- Los pesos de los criterios y subcriterios de la Tabla 8.7 coinciden con sus preferencias.
- El incremento de coste que supone pasar de un máximo de 35 a 10 o a 0 puntos individuales es excesivo.

En consecuencia, el experto 1 selecciona las alternativas que no suponen ninguna limitación en cuanto al número de puntos individuales: B8-1, B13-1 y B14-1; y decide estudiarlas conjuntamente en el siguiente nivel de decisión. La configuración de dichas alternativas se mantiene en los 3 casos respecto al primer nivel (véase la Figura 8.4).

### ***Etapa 2. Nivel 3. Decisiones operativas. Coste vs Seguridad del suministro***

En el tercer nivel de decisión se enfrentan los criterios coste y seguridad del suministro. El experto 1 estudia los siguientes valores objetivo de los atributos correspondientes a la seguridad del suministro, teniendo en cuenta la configuración de las alternativas seleccionadas en el primer nivel: una microrred central y el resto puntos individuales. Concretamente plantea los siguientes valores:

- Mínimo porcentaje de la energía generada con paneles fotovoltaicos ( $AT_2$ ). El recurso solar de la región es ligeramente más constante que el recurso eólico. De esta forma el experto 1 desea analizar la posibilidad de que, al menos, un 25% de la energía se genere con paneles y la posibilidad de no imponer ningún valor mínimo.
- Número mínimo de equipos de generación por punto de generación ( $AT_3$ ). El experto 1 no considera relevante este atributo para la comunidad, al existir en la cercanía un centro poblado mayor donde es posible reparar rápidamente los equipos.
- Mayor porcentaje de energía en usuarios individuales frente a usuarios en microrred ( $AT_4$ ). Los usuarios individuales se pueden ver perjudicados frente a los usuarios en microrred, lo que puede acarrear conflictos entre ellos. Por ello, el experto 1 desea estudiar si resulta interesante un extra del 25% de la energía en este tipo de usuarios.

Como se ha expuesto en el capítulo 4, para pasar del segundo al tercer nivel de decisión se fija la existencia y dirección de los conductores de la microrred formada, lo cual es validado por el experto 1.

Con estos valores objetivo de los atributos se generan 4 alternativas (2 porcentajes de generación solar x 2 extras de energía en usuarios individuales) para cada alternativa seleccionada en el segundo nivel de decisión (B13-1, B14-1 y B8-1), es decir 12 alternativas en total. Como se ha explicado en el apartado 6.7, se destina un máximo de 600s a cada alternativa del tercer nivel, de modo que el tiempo necesario para resolver las 12 alternativas es de unas 2 horas. En la Tabla 8.9 se presenta el detalle de las alternativas, en 3 subtablas:

- En la primera se lista el valor objetivo de los atributos  $AT_2$ ,  $AT_3$  y  $AT_4$ . Nótese que en caso de no estudiar un atributo determinado, en la primera subtabla se indica una cota máxima o mínima (según el caso).
- En la segunda se exponen los valores reales de los atributos. El coste ( $RT_1$ ) se especifica en dólares. Además se concretan los valores de porcentaje de generación solar ( $RT_2$ ), cantidad de equipos de generación ( $RT_3$ ) y energía en usuarios individuales ( $RT_4$ ).
- En la tercera se calculan los valores  $L_1$  y  $L_\infty$ , con los resultados de la segunda subtabla, y los pesos de los criterios y subcriterios indicados en la Tabla 8.10 (extraídos de la Tabla 7.10). Finalmente se calcula la media de dichos valores ( $0,5 \cdot L_1 + 0,5 \cdot L_\infty$ ) y la clasificación resultante de las alternativas.

**Tabla 8.9 – Resultados de la validación: experto 1, El Alumbre, nivel 3**

	Valor objetivo atributos			Valor real atributos				Clasificación			
	AT <sub>2</sub>	AT <sub>3</sub>	AT <sub>4</sub>	RT <sub>1</sub>	RT <sub>2</sub>	RT <sub>3</sub>	RT <sub>4</sub>	L <sub>1</sub>	L <sub>∞</sub>	Media	Pos.
<b>C8-1-1</b>	+0%	0	+0%	68051	+0%	1	+8%	0,541	0,504	0,522	9
<b>C8-1-2</b>	+0%	0	+25%	70771	+0%	1	+34%	0,484	0,385	0,435	6
<b>C8-1-3</b>	+25%	0	+0%	72310	+26%	1	+1%	0,466	0,331	0,398	3
<b>C8-1-4</b>	+25%	0	+25%	74162	+26%	1	+34%	0,360	0,183	0,272	1
<b>C13-1-1</b>	+0%	0	+0%	66440	+0%	1	+8%	0,504	0,504	0,504	8
<b>C13-1-2</b>	+0%	0	+25%	75817	+0%	1	+28%	0,630	0,415	0,522	10
<b>C13-1-3</b>	+25%	0	+0%	72119	+26%	1	+1%	0,460	0,330	0,395	2
<b>C13-1-4</b>	+25%	0	+25%	84561	+26%	2	+39%	0,415	0,415	0,415	4
<b>C14-1-1</b>	+0%	0	+0%	69214	+0%	1	+8%	0,567	0,504	0,535	11
<b>C14-1-2</b>	+0%	0	+25%	78079	+0%	1	+28%	0,682	0,415	0,548	12
<b>C14-1-3</b>	+25%	0	+0%	74894	+26%	1	+1%	0,523	0,330	0,427	5
<b>C14-1-4</b>	+25%	0	+25%	86822	+26%	2	+39%	0,467	0,467	0,467	7

**Tabla 8.10 – Pesos de criterios y subcriterios: experto 1, El Alumbre, nivel 3**

	Peso Criterios		Peso Subcriterios
<b>Coste (CT<sub>1</sub>)</b>	0,47	-	-
<b>Seguridad del suministro (CT<sub>2</sub>)</b>	0,53	<b>Porcentaje generación solar (CT<sub>2-1</sub>)</b>	0,38
		<b>Cantidad equipos generación (CT<sub>2-2</sub>)</b>	0,30
		<b>Energía usuarios individuales (CT<sub>2-3</sub>)</b>	0,32

Las configuraciones de las alternativas C8-1-X, C13-1-X y C14-1-X son idénticas a las respectivas del segundo nivel de decisión (B8-1, B13-1 y B14-1): una microrred de 8 o 9 puntos de consumo, y 27 o 26 puntos individuales (véase la Figura 8.4).

En este tercer nivel se muestra la Tabla 8.11, complementaria, donde se indican los equipos de generación utilizados en función del valor objetivo de los atributos.

**Tabla 8.11 – Equipos de generación: experto 1, El Alumbre, nivel 3**

		C8-1-X	C13-1-X y C14-1-X
<b>Microrred</b>	AT <sub>2</sub> = 0% AT <sub>4</sub> = 0 o 25%	1 aerog. 3500W 1 panel 50W	1 aerog. 3500W
	AT <sub>2</sub> = 25% AT <sub>4</sub> = 0 o 25%	1 aerog. 3500W 2 paneles 150W	1 aerog. 3500W 2 paneles 150W, 1 panel 75W 1 panel 50W
<b>Punto 9</b>	AT <sub>2</sub> = 0% AT <sub>4</sub> = 0%	1 aerog. 1750W	1 aerog. 1750W
	AT <sub>2</sub> = 0% AT <sub>4</sub> = 25%	1 aerog. 3500W	1 aerog. 3500W
	AT <sub>2</sub> = 25% AT <sub>4</sub> = 0%	1 aerog. 1200W 3 paneles 150W	1 aerog. 1200W 3 paneles 150W
	AT <sub>2</sub> = 25% AT <sub>4</sub> = 25%	1 aerog. 1750W 2 paneles 150W	1 aerog. 1750W 2 paneles 150W
<b>Puntos individuales</b>	AT <sub>2</sub> = 0 o 25% AT <sub>4</sub> = 0%	1 panel 150W	1 panel 150W
	AT <sub>2</sub> = 0% AT <sub>4</sub> = 25%		1 panel 150W y 1 panel 50W o 1 aerog. 100W en puntos 3,5,6,7,11,14,16,18,21
	AT <sub>2</sub> = 25% AT <sub>4</sub> = 25%		1 panel 150W 1 panel 50W

El experto 1 analiza las 12 alternativas en paralelo, y concluye que los pesos de los criterios y subcriterios de la Tabla 8.10 coinciden con sus preferencias. Con la clasificación obtenida, selecciona la alternativa mejor clasificada: C8-1-4. En la Figura 8.5 se observa la configuración de dicha alternativa, que consta de una microrred en el centro de 8 puntos de consumo, incluyendo la escuela y el centro de salud. El resto de puntos son electrificados individualmente, incluido el punto 9.

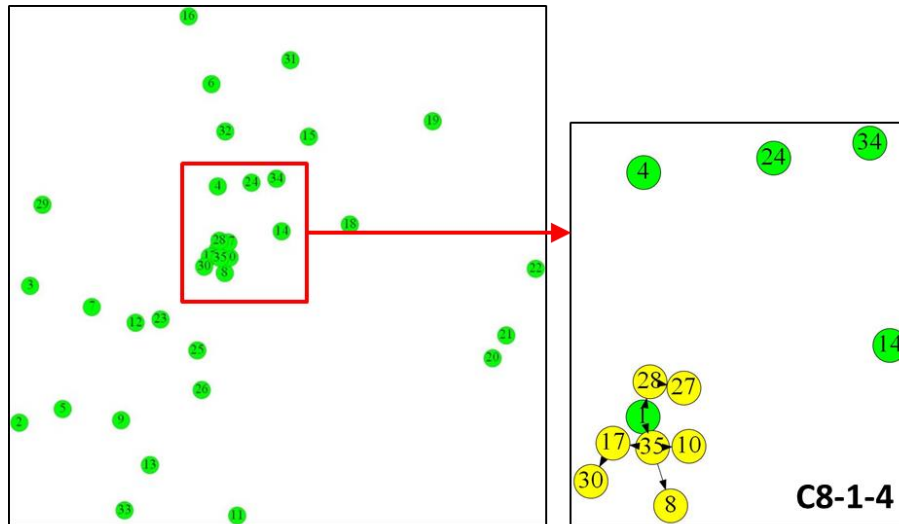


Figura 8.5 – Configuración de la alternativa seleccionada: experto 1, El Alumbre, nivel 3

El tiempo de cálculo total utilizado en la segunda etapa es de 14 horas.

### ***Etapa 3. Mejora del resultado***

Para finalizar el proceso de diseño del sistema, el experto 1 acepta intentar mejorar el coste de la alternativa seleccionada en la segunda etapa, manteniendo las decisiones tomadas en cuanto al valor objetivo de los atributos de los 3 niveles de decisión, e imponiendo un tiempo máximo de cálculo de 15 horas. Sin embargo, no se obtiene ninguna solución de menor coste y la alternativa definitiva es la C8-1-4.

## **8.3. Experto 1. Alto Perú**

En este apartado se describe el proceso de diseño del sistema de electrificación seguido por el experto 1 para la comunidad de Alto Perú.

### ***Etapa 1. Evaluaciones iniciales***

En primer lugar se realizan las evaluaciones iniciales para conocer las características de la comunidad a electrificar, que se resumen a continuación:

- Evaluación socioeconómica. El experto 1 establece las siguientes características en función de sus conocimientos.

- Demanda mínima de energía: 300 Wh/día en las viviendas y en la iglesia (punto 13), y 3000 Wh/día en los puntos de consumo 5 y 24, donde se prevén actividades productivas.
  - Demanda mínima de potencia: 200 W en las viviendas y en la iglesia, y 2000 W en los puntos de consumo 5 y 24.
  - Autonomía mínima: 1,5 días debido a la variabilidad del viento y del sol.
  - El diseño se realiza suponiendo que existe un presupuesto máximo de \$55000.
- Evaluación energética. Véase el apartado 8.1.
  - Evaluación técnica. Véase la introducción del capítulo 8.

### ***Etapa 2. Nivel 1. Decisiones estratégicas. Coste vs Demanda***

En el primer nivel de decisión se enfrentan los criterios coste y demanda. El experto 1 estudia los siguientes valores objetivo de los atributos correspondientes a la demanda:

- Energía ( $AP_2$ ). Incrementos del 0, 17 y 33%. El escenario de demanda mínima está pensado para un consumo básico, y los incrementos propuestos permiten pequeñas comodidades domésticas progresivas. En los puntos de consumo 5 y 24 no se considera ningún incremento.
- Potencia ( $AP_3$ ). Incrementos del 0 y 100%. El escenario de potencia mínima está pensado para conectar electrodomésticos como la televisión, el DVD, etc. El incremento propuesto permite el uso de una licuadora, que facilita la elaboración de jugos, que forman parte de la dieta de la población y tiene un consumo entorno a los 350W. En los puntos de consumo 5 y 24 no se considera ningún incremento.
- Autonomía ( $AP_4$ ). Incrementos del 0, 33 y 100%. El escenario de autonomía mínima facilita un funcionamiento adecuado del sistema a lo largo del año. El incremento del 33% puede mejorar la continuidad del suministro con un leve aumento de coste. El incremento del 100% está pensado para los puntos de consumo 5 y 24, cuyas actividades productivas pueden verse beneficiadas con un suministro más constante.

Con estos valores objetivo de los atributos se generan 18 alternativas (3 escenarios de demanda x 2 escenarios de potencia x 3 escenarios de autonomía). El tiempo necesario para resolver las 18 alternativas es de unas 9 horas. En la Tabla 8.12 se presenta el detalle de las alternativas, en 3 subtablas:

- En la primera se lista el valor objetivo de los atributos  $AP_2$ ,  $AP_3$  y  $AP_4$ . En concreto, se muestra el porcentaje adicional impuesto a cada punto de consumo respecto a su demanda mínima.

- En la segunda se exponen los valores reales de los atributos. El coste ( $RP_1$ ) se especifica en dólares y los valores de energía ( $RP_2$ ), potencia ( $RP_3$ ) y autonomía ( $RP_4$ ) se presentan de forma análoga a la primera subtabla.
- En la tercera se calculan los valores  $L_1$  y  $L_{\infty}$ , con los resultados de la segunda subtabla, y los pesos de los criterios y subcriterios indicados en la Tabla 8.13. Finalmente se calcula la media de dichos valores ( $0,5 \cdot L_1 + 0,5 \cdot L_{\infty}$ ) y la clasificación resultante de las alternativas.

**Tabla 8.12 – Resultados de la validación: experto 1, Alto Perú, nivel 1**

	Valor objetivo atributos			Valor real atributos				Clasificación			
	AP <sub>2</sub>	AP <sub>3</sub>	AP <sub>4</sub>	RP <sub>1</sub>	RP <sub>2</sub>	RP <sub>3</sub>	RP <sub>4</sub>	L <sub>1</sub>	L <sub>∞</sub>	Media	Pos.
A1	+0%	+0%	+0%	47594	+0%	+0%	+0%	0,520	0,520	0,520	18
A2	+0%	+0%	+33%	48883	+0%	+0%	+34%	0,511	0,471	0,491	16
A3	+0%	+0%	+100%	52289	+0%	+0%	+100%	0,519	0,374	0,447	11
A4	+0%	+100%	+0%	54083	+0%	+100%	+0%	0,552	0,352	0,452	12
A5	+0%	+100%	+33%	55370	+0%	+100%	+34%	0,543	0,303	0,423	8
A6	+0%	+100%	+100%	59153	+0%	+100%	+100%	0,563	0,357	0,460	14
A7	+17%	+0%	+0%	50192	+19%	+0%	+0%	0,493	0,413	0,453	13
A8	+17%	+0%	+33%	51672	+19%	+0%	+34%	0,489	0,363	0,426	9
A9	+17%	+0%	+100%	55337	+19%	+0%	+101%	0,505	0,266	0,385	7
A10	+17%	+100%	+0%	55358	+19%	+100%	+1%	0,484	0,244	0,364	1
A11	+17%	+100%	+33%	56830	+19%	+100%	+34%	0,480	0,285	0,383	6
A12	+17%	+100%	+100%	62147	+19%	+100%	+100%	0,549	0,449	0,499	17
A13	+33%	+0%	+0%	51484	+36%	+0%	+0%	0,435	0,315	0,375	4
A14	+33%	+0%	+33%	53794	+34%	+0%	+35%	0,466	0,275	0,370	2
A15	+33%	+0%	+100%	57082	+36%	+0%	+101%	0,462	0,293	0,377	5
A16	+33%	+100%	+0%	57177	+34%	+100%	+0%	0,453	0,296	0,374	3
A17	+33%	+100%	+33%	59864	+34%	+100%	+35%	0,485	0,379	0,432	10
A18	+33%	+100%	+100%	63152	+34%	+100%	+101%	0,491	0,480	0,486	15

**Tabla 8.13 – Pesos de criterios y subcriterios: experto 1, Alto Perú, nivel 1**

	Peso Criterios		Peso Subcriterios
Coste ( $CP_1$ )	0,48	-	-
Demanda ( $CP_2$ )	0,52	Energía ( $CP_{2,1}$ )	0,40
		Potencia ( $CP_{2,2}$ )	0,32
		Autonomía ( $CP_{2,3}$ )	0,28

En la Tabla 8.14 se resumen las características de la configuración de cada alternativa.

**Tabla 8.14 – Configuración de las alternativas: experto 1, Alto Perú, nivel 1**

Alternativa	Microrredes	Puntos individuales
A1	1 microrred de 12 puntos, incluidos 5 y 24 2 microrredes de 2 puntos	10 puntos
A2,A4,A5	1 microrred de 12 puntos, incluidos 5 y 24 1 microrred de 2 puntos	12 puntos
A3,A6	1 microrred de 12 puntos, incluidos 5 y 24	14 puntos
A7	1 microrred de 15 puntos, incluido 24 1 microrred de 2 puntos	9 puntos, incluido 5
A8,A9,A10,A11	1 microrred de 16 puntos, incluido 24 1 microrred de 2 puntos	8 puntos, incluido 5
A12	1 microrred de 13 puntos, incluido 24 2 microrredes de 2 puntos	9 puntos, incluido 5
A13,A16	1 microrred de 14 puntos, incluido 24 1 microrred de 2 puntos	10 puntos, incluido 5
A14,A15,A17,A18	1 microrred de 14 puntos, incluido 24	12 puntos, incluido 5

El experto 1 analiza las 18 alternativas en paralelo, y concluye que los pesos de los criterios y subcriterios de la Tabla 8.13 coinciden con sus preferencias. Con la clasificación obtenida, selecciona la alternativa mejor clasificada con un coste menor a \$52000: A13. Aunque el presupuesto es de \$55000, el experto 1 prefiere dejar un cierto margen para estudiar distintos valores objetivo de los atributos en el segundo y tercer nivel, que podrían conllevar pequeños incrementos de coste. En la Figura 8.6 se puede observar la configuración de dicha alternativa, que consta de una microrred en el centro de 14 puntos de consumo y una microrred de 2 puntos en la zona inferior. El resto de puntos son electrificados individualmente.

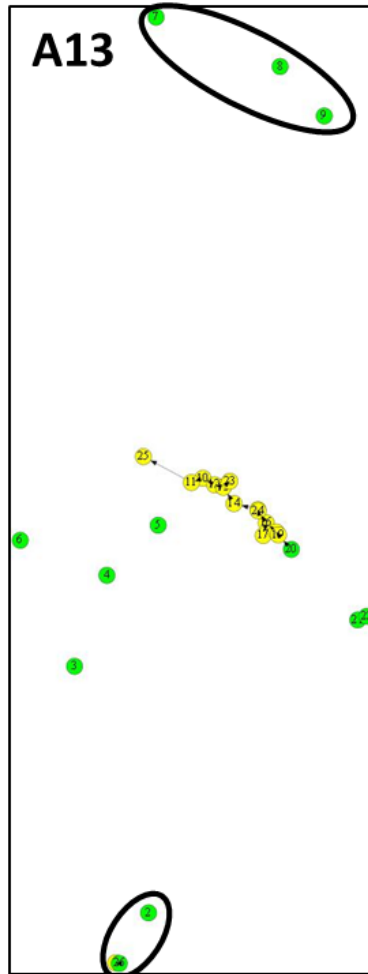


Figura 8.6 – Configuración de las alternativas seleccionadas: experto 1, Alto Perú, nivel 1

### ***Etapa 2. Nivel 2. Decisiones tácticas. Coste vs Gestión del sistema***

En el segundo nivel de decisión se enfrentan los criterios coste y gestión del sistema. El experto 1 estudia los siguientes valores objetivo de los atributos correspondientes a la gestión del sistema, teniendo en cuenta la configuración de las alternativas seleccionadas en el primer nivel: una gran microrred central, una microrred en la zona inferior y el resto puntos individuales. Concretamente plantea los siguientes valores:

- Número máximo de microrredes ( $AS_2$ ). No se estudia este atributo, de modo que al haber 26 puntos de consumo habrá, como máximo, 13 microrredes de 2 puntos.



- Número mínimo de usuarios por microrred ( $AS_3$ ). Se estudia no imponer nada (0 puntos). Además, puesto que existen dos agrupaciones de 3 usuarios (indicadas con círculos negros en la Figura 8.6), se estudia un mínimo de 4 usuarios por microrred, para analizar qué sucede al unir estos puntos con la microrred central.
- Número máximo de usuarios individuales ( $AS_4$ ). Se estudia no imponer nada (es decir, 26 puntos individuales) o imponer un máximo del 0% de puntos individuales (es decir, 0 puntos).
- Medidores en todos los usuarios o sólo en microrredes ( $AS_5$ ). Se considera que los medidores son fundamentales para una buena gestión de los sistemas, de modo que se obliga a su instalación en todos los puntos de consumo.

Para pasar del primer al segundo nivel de decisión se fija la existencia de los conductores de las microrredes de más de 4 puntos de consumo, es decir la gran microrred central, lo cual es validado por el experto 1.

Con estos valores objetivo de los atributos se generan 4 alternativas (2 mínimos de usuarios por microrred x 2 máximos de usuarios individuales) para la alternativa seleccionada en el primer nivel de decisión (A13). El tiempo necesario para resolver las 4 alternativas es de 1 hora y 20 minutos. En la Tabla 8.15 se presenta el detalle de las alternativas, en 3 subtablas:

- En la primera se lista el valor objetivo de los atributos  $AS_2$ ,  $AS_3$ ,  $AS_4$  y  $AS_5$ .
- En la segunda se exponen los valores reales de los atributos. El coste ( $RS_1$ ) se especifica en dólares. Además se concretan los valores de cantidad ( $RS_2$ ), tamaño ( $RS_3$ ) y alcance ( $RS_4$ ) de las microrredes, e instalación de medidores ( $RS_5$ ).
- En la tercera se calculan los valores  $L_1$  y  $L_\infty$ , con los resultados de la segunda subtabla, y los pesos de los criterios y subcriterios indicados en la Tabla 8.16. Finalmente se calcula la media de dichos valores ( $0,5 \cdot L_1 + 0,5 \cdot L_\infty$ ) y la clasificación resultante de las alternativas.

**Tabla 8.15 – Resultados de la validación: experto 1, Alto Perú, nivel 2**

	Valor objetivo atributos				Valor real atributos					Clasificación			
	$AS_2$	$AS_3$	$AS_4$	$AS_5$	$RS_1$	$RS_2$	$RS_3$	$RS_4$	$RS_5$	$L_1$	$L_\infty$	Media	Pos.
<b>B13-1</b>	13	0	26	Todos	51484	2	2	10	26	0,433	0,433	0,433	3
<b>B13-2</b>	13	0	0	Todos	56397	4	2	0	26	0,418	0,315	0,367	2
<b>B13-3</b>	13	4	26	Todos	56577	1	18	8	26	0,331	0,224	0,278	1
<b>B13-4</b>	13	4	0	Todos	74561	1	26	0	26	0,483	0,483	0,483	4

**Tabla 8.16 – Pesos de criterios y subcriterios: experto 1, Alto Perú, nivel 2**

	Peso Criterios		Peso Subcriterios
Coste ( $CS_1$ )	0,48	-	-
Gestión del sistema ( $CS_2$ )	0,52	Cantidad microrredes ( $CS_{2.1}$ )	0,20
		Tamaño microrredes ( $CS_{2.2}$ )	0,30
		Alcance microrredes ( $CS_{2.3}$ )	0,32
		Instalación medidores ( $CS_{2.4}$ )	0,18

En la Tabla 8.17 se resumen las características de la configuración de cada alternativa.

**Tabla 8.17 – Configuración de las alternativas: experto 1, Alto Perú, nivel 2**

Alternativa	Microrredes	Puntos individuales
B13-1	1 microrred de 14 puntos, incluido 24 1 microrred de 2 puntos	10 puntos, incluido 5
B13-2	1 microrred de 18 puntos, incluidos 5 y 24 2 microrredes de 3 puntos 1 microrredes de 2 puntos	0 puntos
B13-3	1 microrred de 18 puntos, incluidos 5 y 24	8 puntos
B13-4	1 microrred de 26 puntos, incluidos 5 y 24	0 puntos

El experto 1 analiza las 4 alternativas en paralelo, y concluye que los pesos de los criterios y subcriterios de la Tabla 8.16 coinciden con sus preferencias. Además, observa que el coste de todas las alternativas, salvo B13-1, es superior a \$55000, de modo que descarta todas ellas y selecciona B13-1. La configuración de dicha alternativa se mantiene respecto al primer nivel (véase la Figura 8.6).

### ***Etapa 2. Nivel 3. Decisiones operativas. Coste vs Seguridad del suministro***

En el tercer nivel de decisión se enfrentan los criterios coste y seguridad del suministro. El experto 1 estudia los siguientes valores objetivo de los atributos correspondientes a la seguridad del suministro, teniendo en cuenta la configuración de la alternativa seleccionada en el primer nivel: una gran microrred central, una microrred en la zona inferior y el resto puntos individuales. Concretamente plantea los siguientes valores:

- Mínimo porcentaje de la energía generada con paneles fotovoltaicos ( $AT_2$ ). El recurso solar de la región es ligeramente más constante que el recurso eólico. De esta forma el experto 1 desea analizar la posibilidad de que, al menos, un 25% de la energía se genere con paneles y la posibilidad de no imponer ningún valor mínimo.
- Número mínimo de equipos de generación por punto de generación ( $AT_3$ ). Aunque la comunidad no está muy alejada de un centro poblado mayor donde reparar equipos, el experto 1 desea estudiar el incremento de coste que supone imponer un mínimo 2 equipos en cada punto de generación frente a no imponer nada.
- Mayor porcentaje de energía en usuarios individuales frente a usuarios en microrred ( $AT_4$ ). Los usuarios individuales se ven perjudicados frente a las microrredes lo que, por las características socioeconómicas de la población puede ocasionar conflictos entre ellos. Por ello, el experto 1 desea estudiar qué aumento en el coste supone un incremento del 25 y 40% en este tipo de usuarios, frente a no considerarlo.

Para pasar del segundo al tercer nivel de decisión se fija la existencia y dirección de los conductores de las microrredes formadas, lo cual es validado por el experto 1.

Con esta información, se generan 12 alternativas (2 porcentajes de generación solar x 2 escenarios de equipos de generación x 3 valores de energía para usuarios individuales) para la alternativa seleccionada en el segundo nivel de decisión (B13-1). El tiempo necesario para resolver las 12 alternativas es de unas 2 horas. En la Tabla 8.18 se presenta el detalle de las alternativas, en 3 subtablas:

- En la primera se lista el valor objetivo de los atributos  $AT_2$ ,  $AT_3$  y  $AT_4$ .
- En la segunda se exponen los valores reales de los atributos. El coste ( $RT_1$ ) se especifica en dólares. Además se concretan los valores de porcentaje de generación solar ( $RT_2$ ), cantidad de equipos de generación ( $RT_3$ ) y energía en usuarios individuales ( $RT_4$ ).
- En la tercera se calculan los valores  $L_1$  y  $L_{\infty}$ , con los resultados de la segunda subtabla, y los pesos de los criterios y subcriterios indicados en la Tabla 8.19. Finalmente se calcula la media de dichos valores ( $0,5 \cdot L_1 + 0,5 \cdot L_{\infty}$ ) y la clasificación resultante de las alternativas.

**Tabla 8.18 – Resultados de la validación: experto 1, Alto Perú, nivel 3**

	Valor objetivo atributos			Valor real atributos				Clasificación			
	$AT_2$	$AT_3$	$AT_4$	$RT_1$	$RT_2$	$RT_3$	$RT_4$	$L_1$	$L_{\infty}$	Media	Pos.
<b>C13-1-1</b>	+0%	0	+0%	50904	+0%	1	+18%	0,480	0,480	0,480	12
<b>C13-1-2</b>	+0%	0	+25%	57874	+0%	2	+25%	0,534	0,281	0,408	3
<b>C13-1-3</b>	+0%	0	+40%	59458	+0%	2	+41%	0,514	0,311	0,412	5
<b>C13-1-4</b>	+0%	2	+0%	54450	+0%	2	+07%	0,501	0,372	0,437	7
<b>C13-1-5</b>	+0%	2	+25%	57874	+0%	2	+25%	0,534	0,281	0,408	4
<b>C13-1-6</b>	+0%	2	+40%	59458	+0%	2	+41%	0,514	0,311	0,412	6
<b>C13-1-7</b>	+25%	0	+0%	54238	+31%	1	+18%	0,402	0,281	0,342	2
<b>C13-1-8</b>	+25%	0	+25%	62568	+31%	2	+33%	0,463	0,424	0,443	8
<b>C13-1-9</b>	+25%	0	+40%	63761	+31%	2	+41%	0,467	0,467	0,467	10
<b>C13-1-10</b>	+25%	2	+0%	56147	+31%	2	+18%	0,311	0,190	0,251	1
<b>C13-1-11</b>	+25%	2	+25%	62568	+31%	2	+33%	0,463	0,424	0,443	9
<b>C13-1-12</b>	+25%	2	+40%	63761	+31%	2	+41%	0,467	0,467	0,467	11

**Tabla 8.19 – Pesos de criterios y subcriterios: experto 1, Alto Perú, nivel 3**

	Peso Criterios		Peso Subcriterios
<b>Coste (<math>CT_1</math>)</b>	0,47	-	-
<b>Seguridad del suministro (<math>CT_2</math>)</b>	0,53	<b>Porcentaje generación solar (<math>CT_{2,1}</math>)</b>	0,38
		<b>Cantidad equipos generación (<math>CT_{2,2}</math>)</b>	0,30
		<b>Energía usuarios individuales (<math>CT_{2,3}</math>)</b>	0,32

En la Tabla 8.20 se resumen las características de la configuración de cada alternativa.

**Tabla 8.20 – Configuración de las alternativas: experto 1, Alto Perú, nivel 3**

Alternativa	Microrredes	Puntos individuales
C13-1-1	1 microrred de 18 puntos, incluidos 5 y 24 1 microrred de 2 puntos	6 puntos
C13-1-2,C13-1-3,C13-1-4, C13-1-5,C13-1-6,C13-1-8, C13-1-9,C13-1-11,C13-1-12	1 microrred de 14 puntos, incluido 24 1 microrred de 2 puntos	10 puntos
C13-1-7	1 microrred de 15 puntos, incluidos 5 y 24 1 microrred de 2 puntos	9 puntos
C13-1-10	1 microrred de 15 puntos, incluidos 5 y 24 2 microrredes de 2 puntos	7 puntos

En este tercer nivel se muestra la Tabla 8.21, complementaria, donde se indican los equipos de generación utilizados en función del valor objetivo de los atributos.

**Tabla 8.21 – Equipos de generación: experto 1, Alto Perú, nivel 3**

		C13-3-X
Microrred grande	$AT_2 = 0\%$ $AT_3 = 0 \text{ o } 2$ $AT_4 = 0 \text{ o } 25 \text{ o } 40\%$	2 aerog. 3500W
	$AT_2 = 25\%$ $AT_3 = 0 \text{ o } 2$ $AT_4 = 0\%$	2 aerog. 3500W 6 paneles 150W 1 panel 100W
	$AT_2 = 25\%$ $AT_3 = 0 \text{ o } 2$ $AT_4 = 25 \text{ o } 40\%$	1 aerog. 3500W 1 aerog. 1750W 5 paneles 150W
Microrred pequeña	$AT_2 = 0 \text{ o } 25\%$ $AT_3 = 0 \text{ o } 2$ $AT_4 = 0 \text{ o } 25 \text{ o } 40\%$	2 paneles 150W
Puntos individuales	$AT_2 = 0 \text{ o } 25\%$ $AT_3 = 0$ $AT_4 = 0\%$	1 panel 150W
	$AT_2 = 0 \text{ o } 25\%$ $AT_3 = 0 \text{ o } 2$ $AT_4 = 25 \text{ o } 40\%$	1 panel 150W 1 panel 50W
	$AT_2 = 0 \text{ o } 25\%$ $AT_3 = 2$ $AT_4 = 0\%$	2 paneles 75W

El experto 1 analiza las 12 alternativas en paralelo, y concluye que los pesos de los criterios y subcriterios de la Tabla 8.19 coinciden con sus preferencias. Con la clasificación obtenida, selecciona la alternativa mejor clasificada con un coste menor a \$55000: C13-1-7. En la Figura 8.7 se observa la configuración de dicha alternativa, que consta de un microrred en el centro de 15 puntos de consumo y una microrred de 2 puntos en la zona inferior. El resto de puntos son electrificados individualmente.

El tiempo de cálculo total utilizado en la segunda etapa es de 12 horas y 20 minutos.

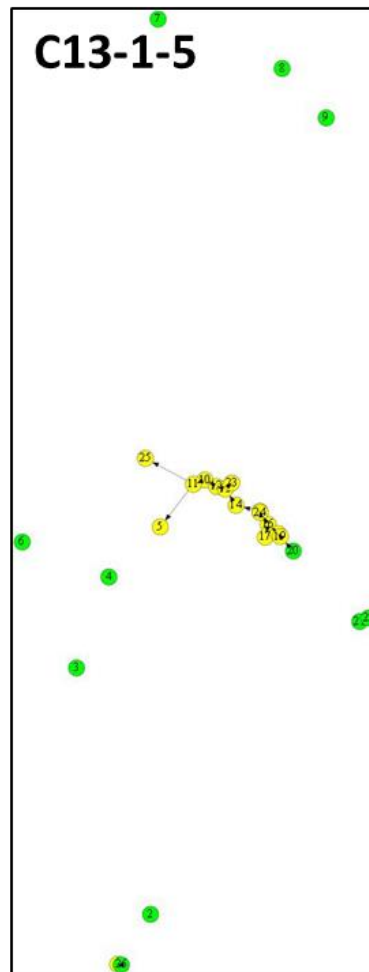


Figura 8.7 – Configuración de la alternativa seleccionada: experto 1, Alto Perú, nivel 3

### *Etapa 3. Mejora del resultado*

Para finalizar el proceso de diseño del sistema, el experto 1 acepta intentar mejorar el coste de la alternativa seleccionada en la segunda etapa, manteniendo las decisiones tomadas en cuanto al valor objetivo de los atributos de los 3 niveles de decisión, e imponiendo un tiempo máximo de cálculo de 15 horas. Sin embargo, no se obtiene ninguna solución de menor coste y la alternativa definitiva es la C13-1-5.

## **8.4. Experto 2. El Alumbre**

En este apartado se describe el proceso de diseño del sistema de electrificación seguido por el experto 2 para la comunidad de El Alumbre.

### *Etapa 1. Evaluaciones iniciales*

En primer lugar se realizan las evaluaciones iniciales para conocer las características de la comunidad a electrificar, que se resumen a continuación:

- Evaluación socioeconómica. El experto 2 establece las siguientes características en función de sus conocimientos.
  - Demanda mínima de energía: 400 Wh/día en las viviendas, y 1200 Wh/día en la escuela (punto 1) y en el centro de salud (punto 35).
  - Demanda mínima de potencia: 250 W en las viviendas, y 750 W en la escuela y en el centro de salud.
  - Autonomía mínima: 1 día debido a la variabilidad del viento y del sol.
- Evaluación energética. Véase el apartado 8.1.
- Evaluación técnica. Véase la introducción del capítulo 8.

### ***Etapa 2. Nivel 1. Decisiones estratégicas. Coste vs Demanda***

En el primer nivel de decisión se enfrentan los criterios coste y demanda. El experto 2 estudia los siguientes valores objetivo de los atributos correspondientes a la demanda:

- Energía ( $AP_2$ ). Incrementos del 0, 12,5, 25, 37,5 y 50%. Estos incrementos progresivos tienen como objetivo permitir pequeñas comodidades domésticas adicionales. Para los escenarios de mayor demanda se pueden cubrir, además, ciertas actividades productivas para mejorar la cadena de valor de algún producto.
- Potencia ( $AP_3$ ). Incremento del 0 y 100%. El escenario de potencia mínima está pensado para conectar electrodomésticos de uso doméstico. El incremento de potencia permite, además, la conexión de equipos para las actividades productivas.
- Autonomía ( $AP_4$ ). Incrementos del 0, 100 y 200%. El escenario de autonomía mínima facilita un funcionamiento adecuado del sistema a lo largo del año. El escenario de autonomía media implica una mayor continuidad del suministro para actividades domésticas en que es preferible que no haya interrupciones. El escenario de autonomía máxima se enfoca a actividades productivas cuyo funcionamiento dependa de la electricidad, y una interrupción pueda suponer pérdidas económicas.

Con estos valores objetivo de los atributos se generan 30 alternativas (5 escenarios de demanda x 2 escenarios de potencia x 3 escenarios de autonomía). Como se ha explicado en el apartado 6.7, se destina un máximo de 1800s a cada alternativa del primer nivel, de modo que el tiempo necesario para resolver las 18 alternativas es de unas 15 horas. En la Tabla 8.22 se presenta el detalle de las alternativas, en 3 subtablas:

- En la primera se lista el valor objetivo de los atributos  $AP_2$ ,  $AP_3$  y  $AP_4$ . En concreto, se muestra el porcentaje adicional impuesto a cada punto de consumo respecto a su demanda mínima.

- En la segunda se exponen los valores reales de los atributos. El coste ( $RP_1$ ) se especifica en dólares y los valores de energía ( $RP_2$ ), potencia ( $RP_3$ ) y autonomía ( $RP_4$ ) se presentan de forma análoga a la primera subtabla.
- En la tercera se calculan los valores  $L_1$  y  $L_\infty$ , con los resultados de la segunda subtabla, y los pesos de los criterios y subcriterios indicados en la Tabla 8.23 (extraídos de la Tabla 7.10). Finalmente se calcula la media de dichos valores ( $0,5 \cdot L_1 + 0,5 \cdot L_\infty$ ) y la clasificación resultante de las alternativas.

**Tabla 8.22 – Resultados de la validación: experto 2, El Alambre, nivel 1**

	Valor objetivo atributos			Valor real atributos				Clasificación			
	AP <sub>2</sub>	AP <sub>3</sub>	AP <sub>4</sub>	RP <sub>1</sub>	RP <sub>2</sub>	RP <sub>3</sub>	RP <sub>4</sub>	L <sub>1</sub>	L <sub>∞</sub>	Media	Pos.
A1	+0%	+0%	+0%	60790	+3%	+0%	+1%	0,520	0,520	0,520	30
A2	+0%	+0%	+100%	63913	+3%	+0%	+101%	0,486	0,446	0,466	26
A3	+0%	+0%	+200%	66269	+3%	+0%	+202%	0,443	0,372	0,408	16
A4	+0%	+100%	+0%	73522	+3%	+100%	+1%	0,515	0,352	0,434	24
A5	+0%	+100%	+100%	76645	+3%	+100%	+101%	0,482	0,278	0,380	7
A6	+0%	+100%	+200%	79001	+3%	+100%	+202%	0,439	0,234	0,337	2
A7	+12,5%	+0%	+0%	60912	+18%	+0%	+2%	0,460	0,459	0,460	25
A8	+12,5%	+0%	+100%	64281	+18%	+0%	+104%	0,429	0,385	0,407	15
A9	+12,5%	+0%	+200%	70525	+18%	+0%	+201%	0,438	0,313	0,376	6
A10	+12,5%	+100%	+0%	73677	+18%	+100%	+2%	0,457	0,291	0,374	5
A11	+12,5%	+100%	+100%	77044	+18%	+100%	+104%	0,426	0,216	0,321	1
A12	+12,5%	+100%	+200%	82648	+18%	+100%	+201%	0,427	0,281	0,354	3
A13	+25%	+0%	+0%	68244	+27%	+0%	+2%	0,516	0,420	0,468	27
A14	+25%	+0%	+100%	71883	+27%	+0%	+103%	0,489	0,346	0,417	19
A15	+25%	+0%	+200%	79747	+27%	+0%	+201%	0,518	0,274	0,396	10
A16	+25%	+100%	+0%	80784	+27%	+100%	+2%	0,510	0,257	0,383	8
A17	+25%	+100%	+100%	84752	+25%	+100%	+101%	0,496	0,309	0,402	14
A18	+25%	+100%	+200%	90115	+28%	+100%	+201%	0,483	0,378	0,430	22
A19	+37,5%	+0%	+0%	70924	+41%	+0%	+2%	0,497	0,367	0,432	23
A20	+37,5%	+0%	+100%	75474	+41%	+0%	+101%	0,483	0,294	0,388	9
A21	+37,5%	+0%	+200%	84098	+39%	+0%	+201%	0,530	0,300	0,415	18
A22	+37,5%	+100%	+0%	83917	+41%	+100%	+1%	0,496	0,298	0,397	11
A23	+37,5%	+100%	+100%	88562	+40%	+100%	+101%	0,486	0,358	0,422	21
A24	+37,5%	+100%	+200%	95286	+40%	+100%	+201%	0,500	0,444	0,472	28
A25	+50%	+0%	+0%	72615	+51%	+0%	+1%	0,478	0,325	0,402	13
A26	+50%	+0%	+100%	77411	+51%	+0%	+101%	0,466	0,252	0,359	4
A27	+50%	+0%	+200%	85874	+51%	+0%	+202%	0,501	0,323	0,412	17
A28	+50%	+100%	+0%	85584	+51%	+100%	+1%	0,477	0,319	0,398	12
A29	+50%	+100%	+100%	90176	+51%	+100%	+101%	0,462	0,378	0,420	20
A30	+50%	+100%	+200%	98095	+54%	+100%	+201%	0,481	0,480	0,481	29

**Tabla 8.23 – Pesos de criterios y subcriterios: experto 2, El Alambre, nivel 1**

	Peso Criterios		Peso Subcriterios
Coste ( $CP_1$ )	0,48	-	-
Demanda ( $CP_2$ )	0,52	Energía ( $CP_{2,1}$ )	0,40
		Potencia ( $CP_{2,2}$ )	0,32
		Autonomía ( $CP_{2,3}$ )	0,28

En la Tabla 8.24 se resumen las características de la configuración de cada alternativa.

Tabla 8.24 – Configuración de las alternativas: experto 2, El Alumbre, nivel 1

Alternativa	Microrredes	Puntos individuales
A1,A2,A3,A4,A5,A6, A7,A8,A9,A10,A11, A19,A20,A25,A26,A29	1 microrred de 9 puntos, incluidos 1 y 35	26 puntos
A12,A22	1 microrred de 12 puntos, incluidos 1 y 35	23 puntos
A13,A14,A16	1 microrred de 11 puntos, incluidos 1 y 35	24 puntos
A15,A30	1 microrred de 11 puntos, incluidos 1 y 35 1 microrred de 2 puntos	22 puntos
A17	1 microrred de 13 puntos, incluidos 1 y 35	22 puntos
A18	1 microrred de 17 puntos, incluidos 1 y 35	18 puntos
A21	1 microrred de 12 puntos, incluidos 1 y 35 1 microrred de 2 puntos	21 puntos
A23	1 microrred de 9 puntos, incluidos 1 y 35 2 microrredes de 2 puntos	22 puntos
A24,A27,A28	1 microrred de 9 puntos, incluidos 1 y 35 1 microrred de 2 puntos	24 puntos

El experto 2 analiza las 30 alternativas en paralelo, y concluye que:

- Dada la poca variabilidad de los recursos energéticos en la zona, el aumento de coste al pasar de 2 a 3 días de autonomía no se ve compensado por las mejoras que dicho cambio conlleva. En cambio, el aumento de coste para pasar de 1 a 2 días sí que se ve compensado por las mejoras en el suministro. En consecuencia únicamente mantiene las alternativas con 2 días de autonomía, es decir: A2, A5, A8, A11, A14, A17, A20, A23, A26 y A29.
- Es deseable disminuir el peso del criterio  $CP_1$  para priorizar las alternativas con mayor demanda.
- Es preferible no considerar el subcriterio  $CP_{2-3}$ , puesto que únicamente se consideran los escenarios con 2 días de autonomía. Además, se prefiere priorizar el subcriterio  $CP_{2-1}$  frente al  $CP_{2-2}$ .

El experto 2 modifica el peso de los criterios y subcriterios para adecuarlos a sus preferencias, tal y como se muestra en la Tabla 8.25. Con los nuevos pesos, se obtiene una nueva clasificación que se presenta en la Tabla 8.26.

Tabla 8.25 – Pesos de criterios y subcriterios: experto 2, El Alumbre, nivel 1, iteración 1

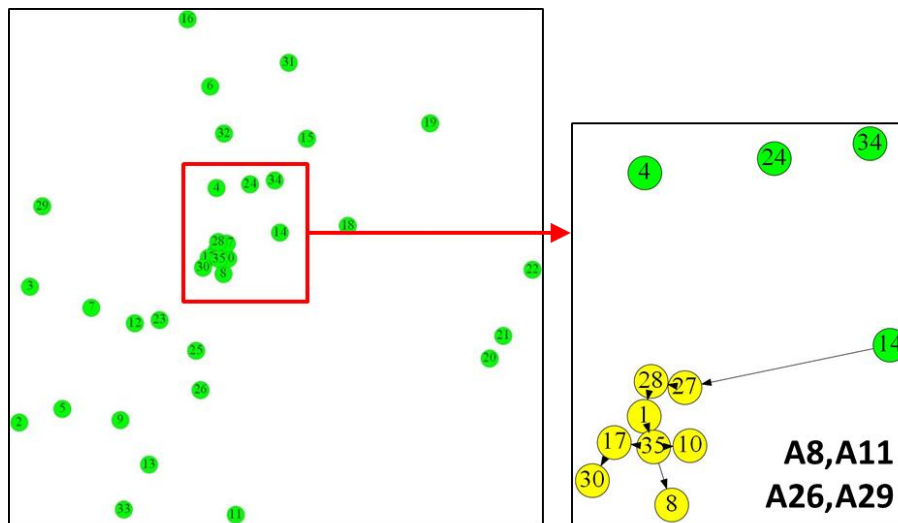
	Peso Criterios		Peso Subcriterios
Coste ( $CP_1$ )	0,35	-	-
Demanda ( $CP_2$ )	0,65	Energía ( $CP_{2-1}$ )	0,60
		Potencia ( $CP_{2-2}$ )	0,40
		Autonomía ( $CP_{2-3}$ )	0,00



**Tabla 8.26 – Resultados de la validación: experto 2, El Alumbre, nivel 1, iteración 1**

	Valor objetivo atributos			Valor real atributos				Clasificación			
	AP <sub>2</sub>	AP <sub>3</sub>	AP <sub>4</sub>	RP <sub>1</sub>	RP <sub>2</sub>	RP <sub>3</sub>	RP <sub>4</sub>	L <sub>1</sub>	L <sub>∞</sub>	Media	Pos.
<b>A2</b>	+0%	+0%	+100%	63913	+3%	+0%	+101%	0,650	0,650	0,650	10
<b>A5</b>	+0%	+100%	+100%	76645	+3%	+100%	+101%	0,560	0,390	0,475	7
<b>A8</b>	+12,5%	+0%	+100%	64281	+18%	+0%	+104%	0,534	0,529	0,532	9
<b>A11</b>	+12,5%	+100%	+100%	77044	+18%	+100%	+104%	0,444	0,269	0,357	3
<b>A14</b>	+25%	+0%	+100%	71883	+27%	+0%	+103%	0,558	0,451	0,504	8
<b>A17</b>	+25%	+100%	+100%	84752	+25%	+100%	+101%	0,485	0,278	0,381	5
<b>A20</b>	+37,5%	+0%	+100%	75474	+41%	+0%	+101%	0,498	0,344	0,421	6
<b>A23</b>	+37,5%	+100%	+100%	88562	+40%	+100%	+101%	0,418	0,328	0,373	4
<b>A26</b>	+50%	+0%	+100%	77411	+51%	+0%	+101%	0,440	0,260	0,350	1
<b>A29</b>	+50%	+100%	+100%	90176	+51%	+100%	+101%	0,350	0,350	0,350	2

Con la nueva clasificación, el experto 2 analiza las 10 alternativas en paralelo y selecciona las 3 mejor clasificadas: A26, A29 y A11. La primera proporciona mucha energía; la segunda, además, mucha potencia; y la tercera más potencia que energía. Además selecciona A8, al considerar que su diseño técnico es adecuado y reduce el coste en comparación con las otras alternativas seleccionadas. El experto 2 decide estudiar conjuntamente las 4 alternativas en el siguiente nivel. En la Figura 8.8 se puede observar la configuración de dichas alternativas, que constan de una microrred en el centro de 9 puntos de consumo, incluyendo la escuela y el centro de salud. El resto de puntos son electrificados individualmente.


**Figura 8.8 – Configuración de las alternativas seleccionadas: experto 2, El Alumbre, nivel 1**

### *Etapas 2. Nivel 2. Decisiones tácticas. Coste vs Gestión del sistema*

En el segundo nivel de decisión se enfrentan los criterios coste y gestión del sistema. El experto 2 estudia los siguientes valores objetivo de los atributos correspondientes a la gestión del sistema, teniendo en cuenta la configuración de las alternativas seleccionadas en el primer nivel: una microrred central y el resto puntos individuales. Concretamente plantea los siguientes valores:

- Número máximo de microrredes ( $AS_2$ ). No se estudia este atributo.

- Número mínimo de usuarios por microrred ( $AS_3$ ). Se estudia no imponer nada o imponer un mínimo de 3 puntos por cada microrred formada.
- Número máximo de usuarios individuales ( $AS_4$ ). No se estudia este atributo.
- Medidores en todos los usuarios o sólo en microrredes ( $AS_5$ ). Se estudia instalar medidores en todos los puntos o únicamente en los puntos de microrred.

Como se ha expuesto en el capítulo 4, para pasar del primer al segundo nivel de decisión se fija la existencia de los conductores de la microrred formada (ya que es compatible con el valor del atributo  $AS_3=3$ ), lo cual es validado por el experto 2.

Con estos valores objetivo de los atributos se generan 4 alternativas (2 mínimos de usuarios por microrred x 2 escenarios de instalación de medidores) para cada alternativa seleccionada en el primer nivel (A8, A11, A26 y A29), es decir 16 alternativas en total. Como se ha explicado en el apartado 6.7, se destina un máximo de 1200s a cada alternativa, de modo que el tiempo para resolver las 16 alternativas es de unas 5 horas y 20 minutos. En la Tabla 8.27 se presenta el detalle de las alternativas, en 3 subtablas:

- En la primera se lista el valor objetivo de los atributos  $AS_2$ ,  $AS_3$ ,  $AS_4$  y  $AS_5$ .
- En la segunda se exponen los valores reales de los atributos. El coste ( $RS_1$ ) se especifica en dólares. Además se concretan los valores de cantidad ( $RS_2$ ), tamaño ( $RS_3$ ) y alcance ( $RS_4$ ) de las microrredes, e instalación de medidores ( $RS_5$ ).
- En la tercera se calculan los valores  $L_1$  y  $L_{\infty}$ , con los resultados de la segunda subtabla, y los pesos de los criterios y subcriterios indicados en la Tabla 8.28 (extraídos de la Tabla 7.10). Finalmente se calcula la media de dichos valores ( $0,5 \cdot L_1 + 0,5 \cdot L_{\infty}$ ) y la clasificación resultante de las alternativas.

**Tabla 8.27 – Resultados de la validación: experto 2, El Alumbre, nivel 2**

	Valor objetivo atributos				Valor real atributos					Clasificación			
	$AS_2$	$AS_3$	$AS_4$	$AS_5$	$RS_1$	$RS_2$	$RS_3$	$RS_4$	$RS_5$	$L_1$	$L_{\infty}$	Media	Pos.
<b>B8-1</b>	17	0	35	Todos	64281	1	9	26	35	0,187	0,164	0,176	1
<b>B8-2</b>	17	0	35	Mred	62981	1	9	26	9	0,261	0,261	0,261	3
<b>B8-3</b>	17	3	35	Todos	64281	1	9	26	35	0,187	0,164	0,176	2
<b>B8-4</b>	17	3	35	Mred	62981	1	9	26	9	0,261	0,261	0,261	4
<b>B11-1</b>	17	0	35	Todos	77044	1	9	26	35	0,407	0,243	0,325	5
<b>B11-2</b>	17	0	35	Mred	75744	1	9	26	9	0,481	0,261	0,371	9
<b>B11-3</b>	17	3	35	Todos	77044	1	9	26	35	0,407	0,243	0,325	6
<b>B11-4</b>	17	3	35	Mred	75744	1	9	26	9	0,481	0,261	0,371	10
<b>B26-1</b>	17	0	35	Todos	77411	1	9	26	35	0,413	0,249	0,331	7
<b>B26-2</b>	17	0	35	Mred	76111	1	9	26	9	0,487	0,261	0,374	11
<b>B26-3</b>	17	3	35	Todos	77411	1	9	26	35	0,413	0,249	0,331	8
<b>B26-4</b>	17	3	35	Mred	76111	1	9	26	9	0,487	0,261	0,374	12
<b>B29-1</b>	17	0	35	Todos	90176	1	9	26	35	0,634	0,469	0,551	13
<b>B29-2</b>	17	0	35	Mred	89305	2	2	24	11	0,855	0,454	0,654	16
<b>B29-3</b>	17	3	35	Todos	90955	2	3	23	35	0,717	0,483	0,600	15
<b>B29-4</b>	17	3	35	Mred	88876	1	9	26	9	0,707	0,447	0,577	14

**Tabla 8.28 – Pesos de criterios y subcriterios: experto 2, El Alumbre, nivel 2**

	Peso Criterios		Peso Subcriterios
Coste ( $CS_1$ )	0,48	-	-
Gestión del sistema ( $CS_2$ )	0,52	Cantidad microrredes ( $CS_{2,1}$ )	0,20
		Tamaño microrredes ( $CS_{2,2}$ )	0,30
		Alcance microrredes ( $CS_{2,3}$ )	0,32
		Instalación medidores ( $CS_{2,4}$ )	0,18

En la Tabla 8.29 se resumen las características de la configuración de cada alternativa.

**Tabla 8.29 – Configuración de las alternativas: experto 2, El Alumbre, nivel 2**

Alternativa	Microrredes	Puntos individuales
B8-1,B8-2,B8-3,B8-4, B11-1,B11-2,B11-3,B11-4, B26-1,B26-2,B26-3,B26-4, B29-1,B29-4	1 microrred de 9 puntos, incluidos 1 y 35	26 puntos
B29-2	1 microrred de 9 puntos, incluidos 1 y 35 1 microrred de 2 puntos	24 puntos
B29-3	1 microrred de 9 puntos, incluidos 1 y 35 1 microrred de 3 puntos	23 puntos

El experto 2 analiza las 16 alternativas en paralelo, y concluye que:

- Al incrementar el peso del criterio  $CS_1$ , manteniendo los pesos de partida de los subcriterios, las alternativas que contemplan el uso de medidores resultan mejor clasificadas que con los pesos de partida (iteración 1, Tablas 8.30 y 8.31).
- Al modificar los pesos de los subcriterios, manteniendo los pesos de los criterios de la iteración 1, no se observan grandes cambios en la clasificación. En concreto se anula el peso de los subcriterios asociados a los atributos no estudiados y se incrementa proporcionalmente el peso de los subcriterios asociados a los atributos estudiados (iteración 2, Tablas 8.30 y 8.31).

**Tabla 8.30 – Resultados de la validación: experto 2, El Alumbre, nivel 2, iteraciones 1 y 2**

	Valor objetivo atributos				Valor real atributos					Clasificación Iteración 1				Clasificación Iteración 2			
	AS <sub>2</sub>	AS <sub>3</sub>	AS <sub>4</sub>	AS <sub>5</sub>	RS <sub>1</sub>	RS <sub>2</sub>	RS <sub>3</sub>	RS <sub>4</sub>	RS <sub>5</sub>	L <sub>1</sub>	L <sub>∞</sub>	Media	Pos.	L <sub>1</sub>	L <sub>∞</sub>	Media	Pos.
<b>B8-1</b>	17	0	35	Todos	64281	1	9	26	35	0,236	0,222	0,229	1	0,014	0,014	0,014	1
<b>B8-2</b>	17	0	35	Mred	62981	1	9	26	9	0,353	0,353	0,353	7	0,270	0,270	0,270	7
<b>B8-3</b>	17	3	35	Todos	64281	1	9	26	35	0,236	0,222	0,229	2	0,014	0,014	0,014	2
<b>B8-4</b>	17	3	35	Mred	62981	1	9	26	9	0,353	0,353	0,353	8	0,270	0,270	0,270	8
<b>B11-1</b>	17	0	35	Todos	77044	1	9	26	35	0,373	0,222	0,298	3	0,151	0,151	0,151	3
<b>B11-2</b>	17	0	35	Mred	75744	1	9	26	9	0,489	0,353	0,421	10	0,407	0,270	0,338	10
<b>B11-3</b>	17	3	35	Todos	77044	1	9	26	35	0,373	0,222	0,298	4	0,151	0,151	0,151	4
<b>B11-4</b>	17	3	35	Mred	75744	1	10	25	9	0,489	0,353	0,421	11	0,407	0,270	0,338	11
<b>B26-1</b>	17	0	35	Todos	77411	1	9	26	35	0,377	0,222	0,300	5	0,155	0,155	0,155	5
<b>B26-2</b>	17	0	35	Mred	76111	1	9	26	9	0,493	0,353	0,423	12	0,410	0,270	0,340	12
<b>B26-3</b>	17	3	35	Todos	77411	1	9	26	35	0,377	0,222	0,300	6	0,155	0,155	0,155	6
<b>B26-4</b>	17	3	35	Mred	76111	1	9	26	9	0,493	0,353	0,423	13	0,410	0,270	0,340	13
<b>B29-1</b>	17	0	35	Todos	90176	1	9	26	35	0,514	0,292	0,403	9	0,292	0,292	0,292	9
<b>B29-2</b>	17	0	35	Mred	89305	2	2	24	11	0,824	0,542	0,683	16	0,962	0,679	0,820	16
<b>B29-3</b>	17	3	35	Todos	90955	2	3	23	35	0,618	0,318	0,468	14	0,669	0,369	0,519	15
<b>B29-4</b>	17	3	35	Mred	88876	1	9	26	9	0,630	0,353	0,491	15	0,547	0,278	0,413	14

Tabla 8.31 – Pesos de criterios y subcriterios: experto 2, El Alumbre, nivel 2, iteraciones 1 y 2

	Peso Criterios			Peso Subcriterios	
	Iteración 1	Iteración 2		Iteración 1	Iteración 2
Coste ( $CS_1$ )	0,30	0,30	-	-	-
Gestión del sistema ( $CS_2$ )	0,70	0,70	Cantidad microrredes ( $CS_{2.1}$ )	0,20	0,00
			Tamaño microrredes ( $CS_{2.2}$ )	0,30	0,61
			Alcance microrredes ( $CS_{2.3}$ )	0,32	0,00
			Instalación medidores ( $CS_{2.4}$ )	0,18	0,39

El experto 2 considera que la clasificación obtenida en la iteración 2 es adecuada y selecciona las dos alternativas mejor clasificadas: B8-1 y B11-1 (las alternativas B8-3 y B11-3 son descartadas al ser iguales, respectivamente, a B8-1 y B11-1). El experto 2 analiza en detalle las dos alternativas y concluye que:

- B8-1 y B11-1 tienen la misma configuración, y la diferencia de coste se debe a una diferencia de potencia (del primer nivel de decisión). Esta diferencia no es prioritaria puesto que sólo se prevén usos domésticos de la electricidad.
- Un incremento en la demanda de energía resultaría interesante debido a que la mayor cantidad de energía permitiría una extensión de los usos domésticos como el estudio nocturno, etc.

En consecuencia, el experto 2 descarta la alternativa B11-1 y selecciona, junto con la alternativa B8-1, la siguiente alternativa mejor clasificada: B26-1. Además decide estudiar ambas alternativas por separado en el siguiente nivel de decisión. La configuración de dichas alternativas se mantiene en los 2 casos respecto al primer nivel (véase la Figura 8.8).

### ***Etapas 2. Nivel 3. Decisiones operativas. Coste vs Seguridad del suministro***

En el tercer nivel de decisión se enfrentan los criterios coste y seguridad del suministro. El experto 2 estudia los siguientes valores objetivo de los atributos correspondientes a la seguridad del suministro, teniendo en cuenta la configuración de las alternativas seleccionadas en el segundo nivel: una microrred central y el resto puntos individuales. Concretamente plantea los siguientes valores:

- Mínimo porcentaje de la energía generada con paneles fotovoltaicos ( $AT_2$ ). Se considera que la tecnología solar es mucho más fiable que la eólica, no sólo por la menor variabilidad del sol frente al viento, sino también porque los paneles tienden a estropearse con menor frecuencia que los aerogeneradores. Por ello se estudia no imponer nada o imponer un mínimo del 50% de la energía generada con paneles.
- Número mínimo de equipos de generación por punto de generación ( $AT_3$ ). Se estudia no imponer nada o imponer un mínimo de 2 equipos de generación.

- Mayor porcentaje de energía en usuarios individuales frente a usuarios en microrred ( $AT_4$ ). No se considera imprescindible este atributo, puesto que los valores de demanda de energía del primer nivel (450 y 600 Wh/día) son suficientes para cubrir los usos domésticos previstos. Sin embargo, se estudia un pequeño incremento del 10% de la energía en usuarios individuales y la posibilidad de no imponer nada.

Como se ha expuesto en el capítulo 4, para pasar del segundo al tercer nivel de decisión se fija la existencia y dirección de los conductores de las microrredes formadas, lo cual es validado por el experto 2.

Con esta información, se generan 8 alternativas (2 porcentajes de generación solar x 2 equipos de generación x 2 valores de energía para usuarios individuales) para cada alternativa seleccionada en el segundo nivel (B8-1 y B26-1), es decir 16 alternativas en total. Como se ha explicado en el apartado 6.7, se destina un máximo de 600s a cada alternativa del tercer nivel, de modo que el tiempo necesario para resolver las 16 alternativas es de unas 2 horas y 40 minutos. En las Tablas 8.32 y 8.33 se presenta el detalle de las alternativas C8-1-X y C26-1-X, respectivamente, obtenidas a partir de cada una de las 2 alternativas seleccionadas en el segundo nivel, en 3 subtablas:

- En la primera se lista el valor objetivo de los atributos  $AT_2$ ,  $AT_3$  y  $AT_4$ .
- En la segunda se exponen los valores reales de los atributos. El coste ( $RT_1$ ) se especifica en dólares. Además se concretan los valores de porcentaje de generación solar ( $RT_2$ ), cantidad de equipos de generación ( $RT_3$ ) y energía en usuarios individuales ( $RT_4$ ).
- En la tercera se calculan los valores  $L_1$  y  $L_\infty$ , con los resultados de la segunda subtabla, y los pesos de los criterios y subcriterios indicados en la Tabla 8.34 (extraídos de la Tabla 7.10). Finalmente se calcula la media de dichos valores ( $0,5 \cdot L_1 + 0,5 \cdot L_\infty$ ) y la clasificación resultante de las alternativas.

**Tabla 8.32 – Resultados de la validación: experto 2, El Alumbre, nivel 3, alternativas C8-1-X**

	Valor objetivo atributos			Valor real atributos				Clasificación			
	$AT_2$	$AT_3$	$AT_4$	$RT_1$	$RT_2$	$RT_3$	$RT_4$	$L_1$	$L_\infty$	Media	Pos.
<b>C8-1-1</b>	+0%	0	+0%	64281	+0%	1	+5%	0,533	0,533	0,533	7
<b>C8-1-2</b>	+0%	0	+10%	72511	+0%	1	+14%	0,700	0,490	0,595	8
<b>C8-1-3</b>	+0%	2	+0%	71871	+2%	2	+5%	0,560	0,365	0,462	4
<b>C8-1-4</b>	+0%	2	+10%	76525	+2%	2	+39%	0,510	0,314	0,412	1
<b>C8-1-5</b>	+50%	0	+0%	70775	+52%	1	+5%	0,496	0,330	0,413	2
<b>C8-1-6</b>	+50%	0	+10%	82501	+52%	2	+39%	0,467	0,467	0,467	5
<b>C8-1-7</b>	+50%	2	+0%	77847	+52%	2	+5%	0,517	0,348	0,432	3
<b>C8-1-8</b>	+50%	2	+10%	82501	+52%	2	+39%	0,467	0,467	0,467	6

**Tabla 8.33 – Resultados de la validación: experto 2, El Alumbre, nivel 3, alternativas C26-1-X**

	Valor objetivo atributos			Valor real atributos				Clasificación			
	AT <sub>2</sub>	AT <sub>3</sub>	AT <sub>4</sub>	RT <sub>1</sub>	RT <sub>2</sub>	RT <sub>3</sub>	RT <sub>4</sub>	L <sub>1</sub>	L <sub>∞</sub>	Media	Pos.
<b>C26-1-1</b>	+0%	0	+0%	77411	+0%	1	+3%	0,533	0,533	0,533	7
<b>C26-1-2</b>	+0%	0	+10%	86666	+0%	1	+11%	0,655	0,440	0,547	8
<b>C26-1-3</b>	+0%	2	+0%	78722	+3%	2	+5%	0,379	0,348	0,363	3
<b>C26-1-4</b>	+0%	2	+10%	87702	+3%	2	+11%	0,507	0,268	0,388	4
<b>C26-1-5</b>	+50%	0	+0%	87133	+52%	2	+5%	0,382	0,226	0,304	1
<b>C26-1-6</b>	+50%	0	+10%	97481	+52%	2	+18%	0,467	0,467	0,467	5
<b>C26-1-7</b>	+50%	2	+0%	87133	+52%	2	+5%	0,382	0,226	0,304	2
<b>C26-1-8</b>	+50%	2	+10%	97481	+52%	2	+18%	0,467	0,467	0,467	6

**Tabla 8.34 – Pesos de criterios y subcriterios: experto 2, El Alumbre, nivel 3**

	Peso Criterios		Peso Subcriterios
<b>Coste (CT<sub>1</sub>)</b>	0,47	-	-
<b>Seguridad del suministro (CT<sub>2</sub>)</b>	0,53	<b>Porcentaje generación solar (CT<sub>2-1</sub>)</b>	0,38
		<b>Cantidad equipos generación (CT<sub>2-2</sub>)</b>	0,30
		<b>Energía usuarios individuales (CT<sub>2-3</sub>)</b>	0,32

La configuración de las alternativas se mantiene (tanto para las C8-1-X como las C26-1-X), respecto a las soluciones del segundo nivel, con una microrred central de 9 puntos de consumo y 26 puntos electrificados individualmente (véase la Figura 8.8).

En este tercer nivel se muestra la Tabla 8.35, complementaria, donde se indican los equipos de generación utilizados en función del valor objetivo de los atributos.

**Tabla 8.35 – Equipos de generación: experto 2, El Alumbre, nivel 3**

		C8-1-X	C26-1-X
<b>Microrred</b>	AT <sub>2</sub> = 0% AT <sub>3</sub> = 0 AT <sub>4</sub> = 0 o 10%	1 aerog. 3500W	1 aerog. 3500W 1 panel 75W
	AT <sub>2</sub> = 0% AT <sub>3</sub> = 2 AT <sub>4</sub> = 0 o 10%	1 aerog. 3500W 1 panel 50W	
	AT <sub>2</sub> = 50% AT <sub>3</sub> = 0 o 2 AT <sub>4</sub> = 0 o 10%	1 aerog. 1750W 7 paneles 150W	1 aerog. 1750W 9 paneles 150W 1 panel 50W
<b>Puntos individuales</b>	AT <sub>2</sub> = 0 o 50% AT <sub>3</sub> = 0 AT <sub>4</sub> = 0%	1 panel 150W	1 panel 150W y 1 panel 50W o si AT <sub>2</sub> = 0% 1 aerog. 100W en puntos 6,16,18
	AT <sub>2</sub> = 0 o 50% AT <sub>3</sub> = 0 o 2 AT <sub>4</sub> = 10%	1 panel 50W y 1 panel 150W o si AT <sub>2</sub> = 0% y AT <sub>3</sub> = 0 1 aerog. 100W en puntos 3,5,6,7,11,16,18,21	1 panel 150W y 1 panel 75W o si AT <sub>2</sub> = 0% 1 aerog. 100W y 1 panel 50W en puntos 3,5,6,7,11,16,18,21
	AT <sub>2</sub> = 0 o 50% AT <sub>3</sub> = 2 AT <sub>4</sub> = 0%	1 panel 50W 1 panel 100W	1 panel 150W 1 panel 50W

El experto 2 analiza, por una parte las 8 alternativas C8-1-X en paralelo, y por otra las 8 alternativas C26-1-X en paralelo, y concluye que:

- El incremento de coste que supone pasar de no imponer un mínimo solar a imponer un mínimo del 50%, puede ser asumible, tanto para las alternativas C8-1-X como las C26-1-X.
- Debido a que el presupuesto no es muy limitado, se puede disminuir el peso del criterio  $CT_1$  e incrementar el del criterio  $CT_2$ .
- Para el atributo  $AT_3$  aunque sólo se instale 1 equipo de generación, éste será un panel fotovoltaico, el cual se considera fiable. Para el atributo  $AT_4$  las demandas de energía impuestas en el primer nivel de decisión permiten cubrir las necesidades de la población, de modo que incrementos adicionales no resultan imprescindibles. En consecuencia, se priorizan las alternativas que aseguran un mínimo del 50% de la energía generada con paneles, pero manteniendo las demás.

En consecuencia, el experto 2 modifica el peso de los criterios y los subcriterios para adecuarlos a sus preferencias, tal y como se indica en la Tabla 8.36, lo que le permite obtener las clasificaciones de las Tablas 8.37 y 8.38, para las alternativas C8-1-X y C26-1-X, respectivamente.

**Tabla 8.36 – Pesos de criterios y subcriterios: experto 2, El Alumbre, nivel 3, iteración 1**

	Peso Criterios		Peso Subcriterios
Coste ( $CT_1$ )	0,30	-	-
Seguridad del suministro ( $CT_2$ )	0,70	Porcentaje generación solar ( $CT_{2-1}$ )	0,80
		Cantidad equipos generación ( $CT_{2-2}$ )	0,10
		Energía usuarios individuales ( $CT_{2-3}$ )	0,10

**Tabla 8.37 – Resultados de la validación: experto 2, El Alumbre, nivel 3, alter. C8-1-X, iteración 1**

	Valor objetivo atributos			Valor real atributos				Clasificación			
	$AT_2$	$AT_3$	$AT_4$	$RT_1$	$RT_2$	$RT_3$	$RT_4$	$L_1$	$L_{\infty}$	Media	Pos.
<b>C8-1-1</b>	+0%	0	+0%	64281	+0%	1	+5%	0,700	0,700	0,700	7
<b>C8-1-2</b>	+0%	0	+10%	72511	+0%	1	+14%	0,817	0,682	0,750	8
<b>C8-1-3</b>	+0%	2	+0%	71871	+2%	2	+5%	0,735	0,610	0,672	6
<b>C8-1-4</b>	+0%	2	+10%	76525	+2%	2	+39%	0,742	0,540	0,641	5
<b>C8-1-5</b>	+50%	0	+0%	70775	+52%	1	+5%	0,247	0,140	0,193	1
<b>C8-1-6</b>	+50%	0	+10%	82501	+52%	2	+39%	0,300	0,300	0,300	3
<b>C8-1-7</b>	+50%	2	+0%	77847	+52%	2	+5%	0,293	0,223	0,258	2
<b>C8-1-8</b>	+50%	2	+10%	82501	+52%	2	+39%	0,300	0,300	0,300	4

**Tabla 8.38 – Resultados de la validación: experto 2, El Alumbre, nivel 3, alter. C26-1-X, iteración 1**

	Valor objetivo atributos			Valor real atributos				Clasificación			
	$AT_2$	$AT_3$	$AT_4$	$RT_1$	$RT_2$	$RT_3$	$RT_4$	$L_1$	$L_{\infty}$	Media	Pos.
<b>C26-1-1</b>	+0%	0	+0%	77411	+0%	1	+3%	0,700	0,700	0,700	7
<b>C26-1-2</b>	+0%	0	+10%	86666	+0%	1	+11%	0,800	0,661	0,730	8
<b>C26-1-3</b>	+0%	2	+0%	78722	+3%	2	+5%	0,614	0,594	0,604	5
<b>C26-1-4</b>	+0%	2	+10%	87702	+3%	2	+11%	0,715	0,561	0,638	6
<b>C26-1-5</b>	+50%	0	+0%	87133	+52%	2	+5%	0,210	0,145	0,178	1
<b>C26-1-6</b>	+50%	0	+10%	97481	+52%	2	+18%	0,300	0,300	0,300	3
<b>C26-1-7</b>	+50%	2	+0%	87133	+52%	2	+5%	0,210	0,145	0,178	2
<b>C26-1-8</b>	+50%	2	+10%	97481	+52%	2	+18%	0,300	0,300	0,300	4

Con las 2 nuevas clasificaciones obtenidas, el experto 2 selecciona, en cada caso, la alternativa mejor clasificada: C8-1-5 y C26-1-5; y las compara, concluyendo que la diferencia de coste entre ambas, causada por la distinta demanda de energía (450 Wh/día vs. 600 Wh/día), no compensa el aumento de coste \$16358. En consecuencia selecciona la alternativa C8-1-5. En la Figura 8.9 se muestra la configuración de dicha alternativa que consta de una microrred en el centro de 9 puntos de consumo, incluyendo la escuela y el centro de salud. El resto de puntos son electrificados individualmente.

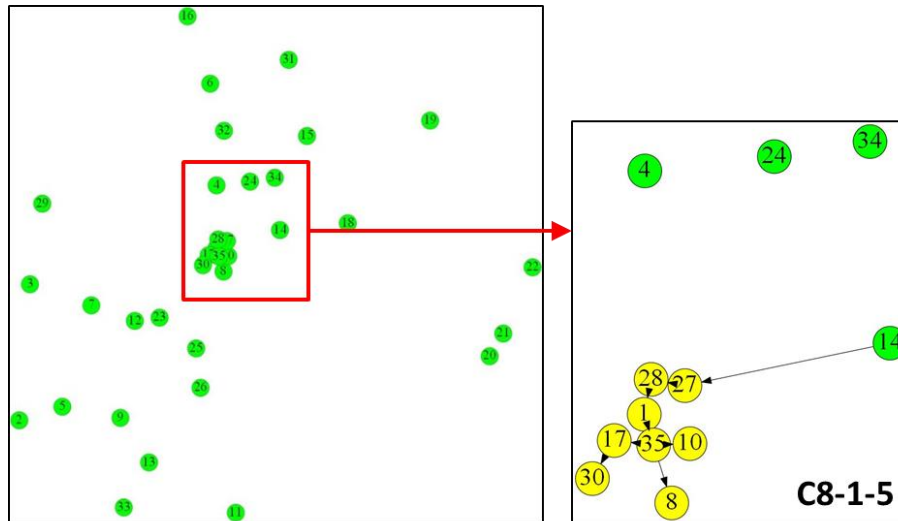


Figura 8.9 – Configuración de la alternativa seleccionada: experto 2, El Alumbre, nivel 3

El tiempo de cálculo total utilizado en la segunda etapa es de 23 horas.

### *Etapa 3. Mejora del resultado*

Para finalizar el proceso de diseño del sistema, el experto 2 no desea intentar mejorar el coste de la alternativa seleccionada en la segunda etapa, puesto que considera que la alternativa C8-1-5 ya es adecuada.

## 8.5. Experto 2. Alto Perú

En este apartado se describe el proceso de diseño del sistema de electrificación seguido por el experto 2 para la comunidad de Alto Perú.

### *Etapa 1. Evaluaciones iniciales*

En primer lugar se realizan las evaluaciones iniciales para conocer las características de la comunidad a electrificar, que se resumen a continuación:



- Evaluación socioeconómica. El experto 2 establece las siguientes características en función de sus conocimientos.
  - Demanda mínima de energía: 400 Wh/día en las viviendas y en la iglesia (punto 13).
  - Demanda mínima de potencia: 250 W en las viviendas y en la iglesia.
  - Autonomía mínima: 1 día debido a la variabilidad del viento y del sol.
- Evaluación energética. Véase el apartado 8.1.
- Evaluación técnica. Véase la introducción del capítulo 8.

### ***Etapa 2. Nivel 1. Decisiones estratégicas. Coste vs Demanda***

En el primer nivel de decisión se enfrentan los criterios coste y demanda. El experto 2 estudia los siguientes valores objetivo de los atributos correspondientes a la demanda:

- Energía ( $AP_2$ ). Incrementos del 0, 12,5, 25, 37,5 y 50%. Estos incrementos progresivos tienen como objetivo permitir pequeñas comodidades domésticas adicionales. Para los escenarios de mayor demanda se pueden cubrir, además, ciertas actividades productivas para mejorar la cadena de valor de algún producto.
- Potencia ( $AP_3$ ). Incremento del 0 y 100%. El escenario de potencia mínima está pensado para conectar electrodomésticos de uso doméstico. El incremento de potencia permite, además, la conexión de equipos para las actividades productivas.
- Autonomía ( $AP_4$ ). Incrementos del 0, 100 y 200%. El escenario de autonomía mínima facilita un funcionamiento adecuado del sistema a lo largo del año. El escenario de autonomía media implica una mayor continuidad del suministro para actividades domésticas en que es preferible que no haya interrupciones. El escenario de autonomía máxima se enfoca a actividades productivas cuyo funcionamiento dependa de la electricidad, y una interrupción puede suponer pérdidas económicas.

Con estos valores objetivo de los atributos se generan 30 alternativas (5 escenarios de demanda x 2 escenarios de potencia x 3 escenarios de autonomía). El tiempo necesario para resolver las 18 alternativas es de 15 horas. En la Tabla 8.40 se presenta el detalle de las alternativas, en 3 subtablas:

- En la primera se lista el valor objetivo de los atributos  $AP_2$ ,  $AP_3$  y  $AP_4$  para cada alternativa. En concreto, se muestra el porcentaje adicional impuesto a cada punto de consumo respecto a su mínima demanda.

- En la segunda se exponen los valores reales de los atributos. El coste ( $RP_1$ ) se especifica en dólares y los valores de energía ( $RP_2$ ), potencia ( $RP_3$ ) y autonomía ( $RP_4$ ) se presentan de forma análoga a la primera subtabla.
- En la tercera se calculan los valores  $L_I$  y  $L_{\infty}$ , con los resultados de la segunda subtabla, y los pesos de los criterios y subcriterios indicados en la Tabla 8.41. Finalmente se calcula la media de dichos valores ( $0,5 \cdot L_I + 0,5 \cdot L_{\infty}$ ) y la clasificación resultante de las alternativas.

Tabla 8.40 – Resultados de la validación: experto 2, Alto Perú, nivel 1

	Valor objetivo atributos			Valor real atributos				Clasificación			
	AP <sub>2</sub>	AP <sub>3</sub>	AP <sub>4</sub>	RP <sub>1</sub>	RP <sub>2</sub>	RP <sub>3</sub>	RP <sub>4</sub>	L <sub>I</sub>	L <sub>∞</sub>	Media	Pos.
A1	+0%	+0%	+0%	39199	+0%	+0%	+3%	0,517	0,517	0,517	30
A2	+0%	+0%	+100%	41963	+0%	+0%	+103%	0,499	0,445	0,472	27
A3	+0%	+0%	+200%	43644	+0%	+0%	+201%	0,460	0,374	0,417	17
A4	+0%	+100%	+0%	47178	+1%	+100%	+3%	0,501	0,346	0,423	21
A5	+0%	+100%	+100%	50295	+0%	+100%	+103%	0,493	0,277	0,385	8
A6	+0%	+100%	+200%	51976	+3%	+100%	+201%	0,442	0,249	0,345	1
A7	+12,5%	+0%	+0%	41414	+15%	+0%	+0%	0,504	0,461	0,482	29
A8	+12,5%	+0%	+100%	43608	+15%	+0%	+101%	0,474	0,388	0,431	24
A9	+12,5%	+0%	+200%	47393	+13%	+0%	+202%	0,480	0,321	0,400	14
A10	+12,5%	+100%	+0%	49623	+15%	+100%	+0%	0,496	0,292	0,394	12
A11	+12,5%	+100%	+100%	51817	+15%	+100%	+101%	0,465	0,246	0,356	2
A12	+12,5%	+100%	+200%	55725	+13%	+100%	+202%	0,474	0,322	0,398	13
A13	+25%	+0%	+0%	44462	+25%	+0%	+1%	0,522	0,419	0,471	26
A14	+25%	+0%	+100%	47545	+25%	+0%	+101%	0,509	0,346	0,428	23
A15	+25%	+0%	+200%	51489	+25%	+0%	+201%	0,514	0,274	0,394	11
A16	+25%	+100%	+0%	51919	+28%	+100%	+2%	0,486	0,248	0,367	4
A17	+25%	+100%	+100%	53999	+25%	+100%	+101%	0,467	0,288	0,377	6
A18	+25%	+100%	+200%	57943	+25%	+100%	+201%	0,471	0,365	0,418	18
A19	+37,5%	+0%	+0%	46071	+40%	+0%	+1%	0,493	0,359	0,426	22
A20	+37,5%	+0%	+100%	50050	+42%	+0%	+102%	0,490	0,279	0,384	7
A21	+37,5%	+0%	+200%	53900	+40%	+0%	+203%	0,499	0,286	0,393	10
A22	+37,5%	+100%	+0%	53472	+40%	+100%	+1%	0,469	0,278	0,374	5
A23	+37,5%	+100%	+100%	57110	+40%	+100%	+102%	0,467	0,349	0,408	16
A24	+37,5%	+100%	+200%	60762	+40%	+100%	+203%	0,465	0,420	0,442	25
A25	+50%	+0%	+0%	48095	+51%	+0%	+1%	0,488	0,315	0,402	15
A26	+50%	+0%	+100%	51805	+51%	+0%	+101%	0,488	0,246	0,367	3
A27	+50%	+0%	+200%	56536	+51%	+0%	+200%	0,508	0,338	0,423	19
A28	+50%	+100%	+0%	55413	+51%	+100%	+1%	0,463	0,316	0,389	9
A29	+50%	+100%	+100%	59006	+51%	+100%	+101%	0,460	0,386	0,423	20
A30	+50%	+100%	+200%	63849	+51%	+100%	+200%	0,482	0,480	0,481	28

Tabla 8.41 – Pesos de criterios y subcriterios: experto 2, Alto Perú, nivel 1

	Peso Criterios		Peso Subcriterios
Coste ( $CP_1$ )	0,48	-	-
Demanda ( $CP_2$ )	0,52	Energía ( $CP_{2,1}$ )	0,40
		Potencia ( $CP_{2,2}$ )	0,32
		Autonomía ( $CP_{2,3}$ )	0,28

En la Tabla 8.42 se resumen las características de la configuración de cada alternativa.

Tabla 8.42 – Configuración de las alternativas: experto 2, Alto Perú, nivel 1

Alternativa	Microrredes	Puntos individuales
A1	1 microrred de 11 puntos 1 microrred de 2 puntos	13 puntos
A2,A3,A5, A6,A9,A12	1 microrred de 10 puntos	16 puntos
A4	1 microrred de 11 puntos	15 puntos
A7,A8,A10,A11	1 microrred de 9 puntos	17 puntos
A13,A14,A15, A17,A18	1 microrred de 17 puntos 1 microrred de 2 puntos	7 puntos
A16	2 microrredes de 8 puntos 2 microrredes de 2 puntos	6 puntos
A19,A21,A24	1 microrred de 15 puntos 2 microrredes de 2 puntos	7 puntos
A20	1 microrred de 15 puntos	11 puntos
A22,A23	1 microrred de 15 puntos 1 microrred de 2 puntos	9 puntos
A25,A26,A27,A28	1 microrred de 14 puntos 1 microrred de 2 puntos	10 puntos
A29,A30	1 microrred de 14 puntos	12 puntos

El experto 2 analiza las 30 alternativas en paralelo, y concluye que:

- Dada la poca variabilidad de los recursos energéticos en la zona, el aumento de coste al pasar de 2 a 3 días de autonomía no se ve compensado por las mejoras que dicho cambio conlleva. En cambio, el aumento de coste para pasar de 1 a 2 días sí que se ve compensado por las mejoras en el suministro. En consecuencia únicamente mantiene las alternativas con 2 días de autonomía, es decir: A2, A5, A8, A11, A14, A17, A20, A23, A26 y A29.
- Es deseable disminuir el peso del criterio  $CP_1$  para priorizar las alternativas con mayor demanda.
- Es preferible no considerar el subcriterio  $CP_{2,3}$ , puesto que únicamente se consideran los escenarios con 2 días de autonomía. Además, se prefiere priorizar el subcriterio  $CP_{2,1}$  frente al  $CP_{2,2}$ .

El experto 2 modifica el peso de los criterios y subcriterios para adecuarlos a sus preferencias, tal y como se muestra en la Tabla 8.43. Con los nuevos pesos, se obtiene una nueva clasificación que se presenta en la Tabla 8.44.

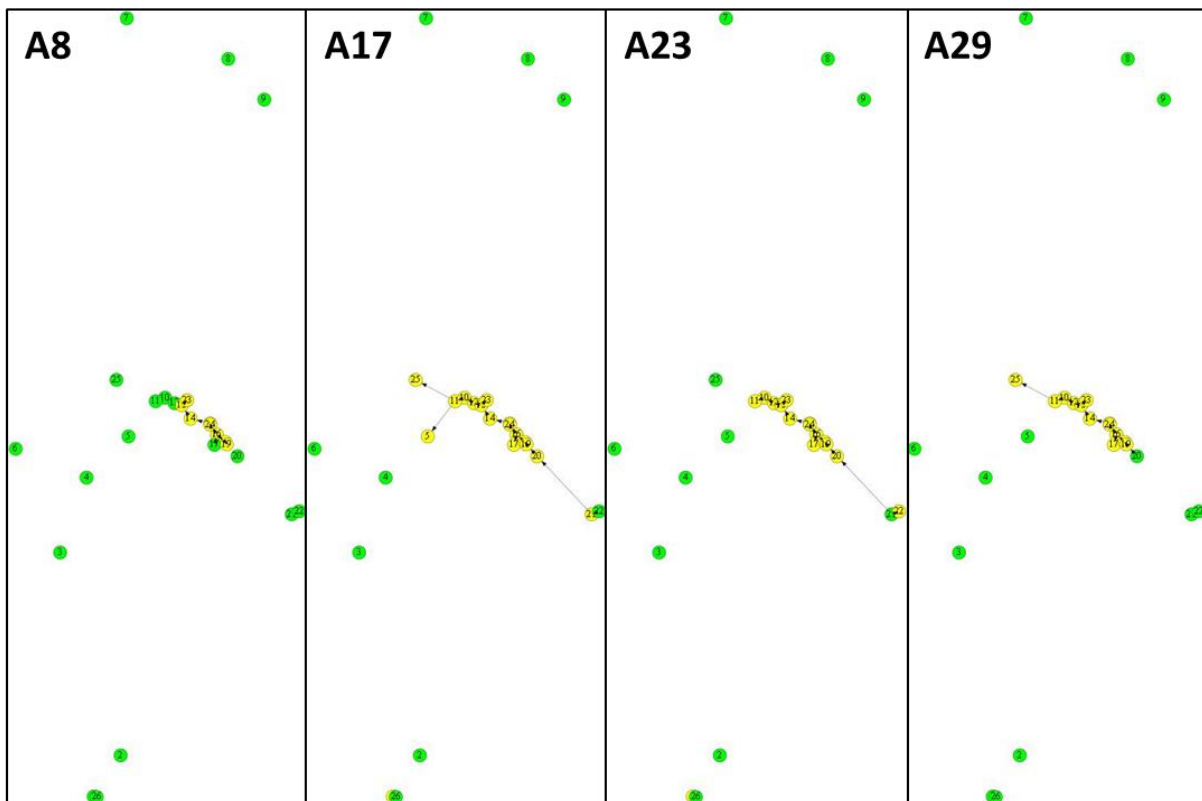
Tabla 8.43 – Pesos de criterios y subcriterios: experto 2, Alto Perú, nivel 1, iteración 1

	Peso Criterios		Peso Subcriterios
Coste ( $CP_1$ )	0,40	-	-
Demanda ( $CP_2$ )	0,60	Energía ( $CP_{2,1}$ )	0,45
		Potencia ( $CP_{2,2}$ )	0,20
		Autonomía ( $CP_{2,3}$ )	0,35

**Tabla 8.44 – Resultados de la validación: experto 2, Alto Perú, nivel 1, iteración 1**

	Valor objetivo atributos			Valor real atributos				Clasificación			
	AP <sub>2</sub>	AP <sub>3</sub>	AP <sub>4</sub>	RP <sub>1</sub>	RP <sub>2</sub>	RP <sub>3</sub>	RP <sub>4</sub>	L <sub>1</sub>	L <sub>∞</sub>	Media	Pos.
<b>A2</b>	+0%	+0%	+100%	41963	+3%	+0%	+101%	0,650	0,650	0,650	10
<b>A5</b>	+0%	+100%	+100%	50295	+3%	+100%	+101%	0,561	0,390	0,476	7
<b>A8</b>	+12,5%	+0%	+100%	43608	+18%	+0%	+104%	0,571	0,537	0,554	9
<b>A11</b>	+12,5%	+100%	+100%	51817	+18%	+100%	+104%	0,480	0,277	0,378	5
<b>A14</b>	+25%	+0%	+100%	47545	+27%	+0%	+103%	0,574	0,459	0,517	8
<b>A17</b>	+25%	+100%	+100%	53999	+25%	+100%	+101%	0,447	0,247	0,347	1
<b>A20</b>	+37,5%	+0%	+100%	50050	+41%	+0%	+101%	0,497	0,331	0,414	6
<b>A23</b>	+37,5%	+100%	+100%	57110	+40%	+100%	+101%	0,396	0,311	0,354	3
<b>A26</b>	+50%	+0%	+100%	51805	+51%	+0%	+101%	0,462	0,260	0,361	4
<b>A29</b>	+50%	+100%	+100%	59006	+51%	+100%	+101%	0,350	0,350	0,350	2

Con la nueva clasificación, el experto 2 analiza las 10 alternativas en paralelo y selecciona las 3 alternativas mejor clasificadas: A17, A29 y A23. Además selecciona A8, al considerar que su diseño técnico es adecuado y reduce el coste en comparación con las otras alternativas seleccionadas. El experto 2 decide estudiar conjuntamente las 4 alternativas en el siguiente nivel. En la Figura 8.10 se puede observar la configuración de dichas alternativas, que constan de una gran microrred en el centro de 9 (A8), 17 (A17), 15 (A23) o 14 (A29) puntos de consumo, y una pequeña microrred de 2 puntos en la zona inferior (A17 y A23). El resto de puntos son electrificados individualmente.



**Figura 8.10 – Configuración de las alternativas seleccionadas: experto 2, Alto Perú, nivel 1**

### ***Etapa 2. Nivel 2. Decisiones tácticas. Coste vs Gestión del sistema***

En el segundo nivel de decisión se enfrentan los criterios coste y gestión del sistema. El experto 2 estudia los siguientes valores objetivo de los atributos correspondientes a la gestión del sistema, teniendo en cuenta la configuración de las alternativas seleccionadas en el primer nivel: una microrred central, una pequeña microrred (en dos casos) y el resto puntos individuales. Concretamente plantea los siguientes valores:

- Número máximo de microrredes ( $AS_2$ ). No se estudia este atributo.
- Número mínimo de usuarios por microrred ( $AS_3$ ). Se estudia no imponer nada o imponer un mínimo de 3 puntos por cada microrred formada.
- Número máximo de usuarios individuales ( $AS_4$ ). No se estudia este atributo.
- Medidores en todos los usuarios o sólo en microrredes ( $AS_5$ ). Se estudia instalar medidores en todos los puntos o únicamente en los puntos de microrred.

Para pasar del primer al segundo nivel de decisión se fija la existencia de los conductores de la gran microrred formada (ya que es compatible con el atributo  $AT_3=3$ ) pero no de la de 2 puntos de consumo, lo cual es validado por el experto 2.

Con estos valores objetivo de los atributos se generan 4 alternativas (2 mínimos de usuarios por microrred x 2 escenarios de instalación de medidores) para cada alternativa seleccionada en el primer nivel de decisión (A8, A17, A23, A29), es decir 16 alternativas en total. El tiempo necesario para resolver las 16 alternativas es de 5 horas y 20 minutos. En la Tabla 8.45 se presenta el detalle de las alternativas, en 3 subtablas:

- En la primera se lista el valor objetivo de los atributos  $AS_2$ ,  $AS_3$ ,  $AS_4$  y  $AS_5$ .
- En la segunda se exponen los valores reales de los atributos. El coste ( $RS_1$ ) se especifica en dólares. Además se concretan los valores de cantidad ( $RS_2$ ), tamaño ( $RS_3$ ) y alcance ( $RS_4$ ) de las microrredes, e instalación de medidores ( $RS_5$ ).
- En la tercera se calculan los valores  $L_I$  y  $L_{\infty}$ , con los resultados de la segunda subtabla, y los pesos de los criterios y subcriterios indicados en la Tabla 8.46. Finalmente se calcula la media de dichos valores ( $0,5 \cdot L_I + 0,5 \cdot L_{\infty}$ ) y la clasificación resultante de las alternativas.

Tabla 8.45 – Resultados de la validación: experto 2, Alto Perú, nivel 2

	Valor objetivo atributos				Valor real atributos					Clasificación			
	AS <sub>2</sub>	AS <sub>3</sub>	AS <sub>4</sub>	AS <sub>5</sub>	RS <sub>1</sub>	RS <sub>2</sub>	RS <sub>3</sub>	RS <sub>4</sub>	RS <sub>5</sub>	L <sub>1</sub>	L <sub>∞</sub>	Media	Pos.
B8-1	13	0	26	Todos	43608	1	9	17	26	0,275	0,246	0,261	3
B8-2	13	0	26	Mred	42758	1	9	17	9	0,347	0,343	0,345	4
B8-3	13	3	26	Todos	43460	1	13	13	26	0,164	0,140	0,152	1
B8-4	13	3	26	Mred	42621	1	12	14	12	0,245	0,245	0,245	2
B17-1	13	0	26	Todos	53999	2	2	7	26	0,592	0,335	0,464	7
B17-2	13	0	26	Mred	53649	2	2	7	20	0,616	0,325	0,470	8
B17-3	13	3	26	Todos	54663	1	17	9	26	0,388	0,355	0,371	5
B17-4	13	3	26	Mred	54213	1	17	9	18	0,420	0,341	0,381	6
B23-1	13	0	26	Todos	57110	2	2	9	26	0,716	0,427	0,572	15
B23-2	13	0	26	Mred	56690	2	2	9	17	0,755	0,414	0,585	16
B23-3	13	3	26	Todos	57685	1	15	11	26	0,530	0,444	0,487	9
B23-4	13	3	26	Mred	57105	1	15	11	15	0,575	0,427	0,501	10
B29-1	13	0	26	Todos	59006	1	14	12	26	0,596	0,483	0,539	11
B29-2	13	0	26	Mred	58406	1	14	12	14	0,646	0,465	0,555	13
B29-3	13	3	26	Todos	59006	1	14	12	26	0,596	0,483	0,539	12
B29-4	13	3	26	Mred	58406	1	14	12	14	0,646	0,465	0,555	14

Tabla 8.46 – Pesos de criterios y subcriterios: experto 2, Alto Perú, nivel 2

	Peso Criterios		Peso Subcriterios
Coste (CS <sub>1</sub> )	0,48	-	-
Gestión del sistema (CS <sub>2</sub> )	0,52	Cantidad microrredes (CS <sub>2.1</sub> )	0,20
		Tamaño microrredes (CS <sub>2.2</sub> )	0,30
		Alcance microrredes (CS <sub>2.3</sub> )	0,32
		Instalación medidores (CS <sub>2.4</sub> )	0,18

En la Tabla 8.47 se resumen las características de la configuración de cada alternativa.

Tabla 8.47 – Configuración de las alternativas: experto 2, Alto Perú, nivel 2

Alternativa	Microrredes	Puntos individuales
B8-1,B8-2	1 microrred de 9 puntos	17 puntos
B8-3	1 microrred de 13 puntos	13 puntos
B8-4	1 microrred de 12 puntos	14 puntos
B17-1,B17-2	1 microrred de 17 puntos 1 microrred de 2 puntos	7 puntos
B17-3,B17-4	1 microrred de 17 puntos	9 puntos
B23-1,B23-2	1 microrred de 15 puntos 1 microrred de 2 puntos	9 puntos
B23-3,B23-4	1 microrred de 15 puntos	11 puntos
B29-1,B29-2 B29-3,B29-4	1 microrred de 14 puntos	12 puntos

El experto 2 analiza las 16 alternativas en paralelo, y concluye que:

- Al incrementar el peso del criterio CS<sub>1</sub>, manteniendo los pesos de partida de los subcriterios, las alternativas con mayores valores de demanda resultan mejor clasificadas que con los pesos de partida (iteración 1, Tablas 8.48 y 8.49).
- Al modificar los pesos de los subcriterios, manteniendo los pesos de los criterios de la iteración 1, no se observan grandes cambios en la clasificación. En concreto se anula el peso de los subcriterios asociados a los atributos no estudiados y se

incrementa proporcionalmente el peso de los subcriterios asociados a los atributos estudiados (iteración 2, Tablas 8.48 y 8.49).

**Tabla 8.48 – Resultados de la validación: experto 2, Alto Perú, nivel 2, iteraciones 1 y 2**

	Valor objetivo atributos				Valor real atributos					Clasificación Iteración 1				Clasificación Iteración 2			
	AS <sub>2</sub>	AS <sub>3</sub>	AS <sub>4</sub>	AS <sub>5</sub>	RS <sub>1</sub>	RS <sub>2</sub>	RS <sub>3</sub>	RS <sub>4</sub>	RS <sub>5</sub>	L <sub>1</sub>	L <sub>∞</sub>	Media	Pos.	L <sub>1</sub>	L <sub>∞</sub>	Media	Pos.
<b>B8-1</b>	13	0	26	Todos	43608	1	9	17	26	0,351	0,333	0,342	6	0,248	0,230	0,239	3
<b>B8-2</b>	13	0	26	Mred	42758	1	9	17	9	0,466	0,463	0,465	13	0,502	0,499	0,500	12
<b>B8-3</b>	13	3	26	Todos	43460	1	13	13	26	0,204	0,189	0,197	1	0,130	0,115	0,122	1
<b>B8-4</b>	13	3	26	Mred	42621	1	12	14	12	0,332	0,332	0,332	4	0,366	0,366	0,366	8
<b>B17-1</b>	13	0	26	Todos	53999	2	2	7	26	0,556	0,347	0,452	12	0,639	0,430	0,534	13
<b>B17-2</b>	13	0	26	Mred	53649	2	2	7	20	0,595	0,393	0,494	14	0,727	0,526	0,626	15
<b>B17-3</b>	13	3	26	Todos	54663	1	17	9	26	0,265	0,220	0,243	2	0,220	0,220	0,220	2
<b>B17-4</b>	13	3	26	Mred	54213	1	17	9	18	0,318	0,212	0,265	3	0,339	0,212	0,276	4
<b>B23-1</b>	13	0	26	Todos	57110	2	2	9	26	0,657	0,392	0,525	15	0,696	0,430	0,563	14
<b>B23-2</b>	13	0	26	Mred	56690	2	2	9	17	0,718	0,461	0,590	16	0,831	0,573	0,702	16
<b>B23-3</b>	13	3	26	Todos	57685	1	15	11	26	0,392	0,276	0,334	5	0,333	0,276	0,304	5
<b>B23-4</b>	13	3	26	Mred	57105	1	15	11	15	0,466	0,265	0,366	7	0,497	0,265	0,381	9
<b>B29-1</b>	13	0	26	Todos	59006	1	14	12	26	0,453	0,300	0,376	8	0,386	0,300	0,343	6
<b>B29-2</b>	13	0	26	Mred	58406	1	14	12	14	0,534	0,289	0,411	10	0,565	0,289	0,427	10
<b>B29-3</b>	13	3	26	Todos	59006	1	14	12	26	0,453	0,300	0,376	9	0,386	0,300	0,343	7
<b>B29-4</b>	13	3	26	Mred	58406	1	14	12	14	0,534	0,289	0,411	11	0,565	0,289	0,427	11

**Tabla 8.49 – Pesos de criterios y subcriterios: experto 2, Alto Perú, nivel 2, iteraciones 1 y 2**

	Peso Criterios			Peso Subcriterios	
	Iteración 1	Iteración 2		Iteración 1	Iteración 2
<b>Coste (CS<sub>1</sub>)</b>	0,30	0,30	-	-	-
<b>Gestión del sistema (CS<sub>2</sub>)</b>	0,70	0,70	<b>Cantidad microrredes (CS<sub>2-1</sub>)</b>	0,20	0,00
			<b>Tamaño microrredes (CS<sub>2-2</sub>)</b>	0,30	0,61
			<b>Alcance microrredes (CS<sub>2-3</sub>)</b>	0,32	0,00
			<b>Instalación medidores (CS<sub>2-4</sub>)</b>	0,18	0,39

El experto 2 considera que la clasificación obtenida en la iteración 2 es adecuada y selecciona la alternativa mejor clasificada: B8-3. En la Figura 8.11 se puede observar la configuración de dicha alternativa, que consta de una microrred central de 13 puntos de consumo. El resto de puntos son electrificados individualmente.

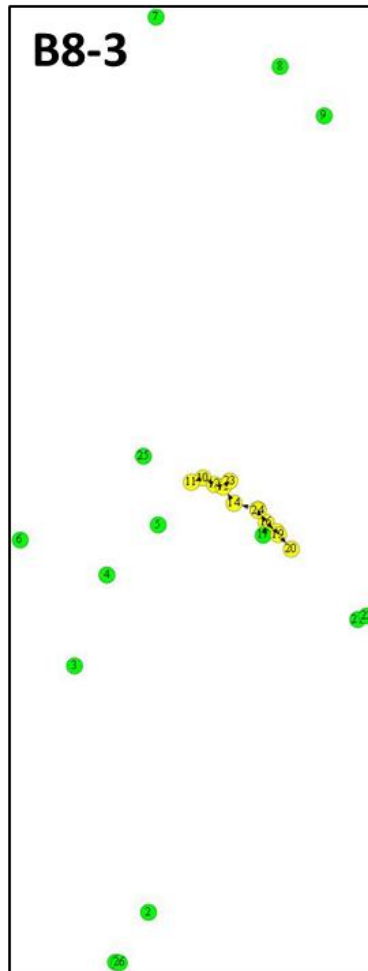


Figura 8.11 – Configuración de la alternativa seleccionada: experto 2, Alto Perú, nivel 2

**Etapa 2. Nivel 3. Decisiones operativas. Coste vs Seguridad del suministro**

En el tercer nivel de decisión se enfrentan los criterios coste y seguridad del suministro. El experto 2 estudia los siguientes valores objetivo de los atributos correspondientes a la seguridad del suministro, teniendo en cuenta la configuración de la alternativa seleccionada en el segundo nivel: una microrred central y el resto puntos individuales. Concretamente plantea los siguientes valores:

- Mínimo porcentaje de la energía generada con paneles fotovoltaicos ( $AT_2$ ). Se considera que la tecnología solar es mucho más fiable que la eólica, no sólo por la menor variabilidad del sol frente al viento, sino también porque los paneles tienden a estropearse con menor frecuencia que los aerogeneradores. Por ello se estudia no imponer nada o imponer un mínimo del 50% de la energía generada con paneles.
- Número mínimo de equipos de generación por punto de generación ( $AT_3$ ). Se estudia no imponer nada o imponer un mínimo de 2 equipos de generación.



- Mayor porcentaje de energía en usuarios individuales frente a usuarios en microrred ( $AT_4$ ). No se considera imprescindible este atributo, puesto que los valores de demanda de energía del primer nivel (450 y 600 Wh/día) son suficientes para cubrir los usos domésticos previstos. Sin embargo, se estudia un pequeño incremento del 10% de la energía en usuarios individuales y la posibilidad de no imponer nada.

Para pasar del segundo al tercer nivel de decisión se fija la existencia y dirección de los conductores de la microrred formada, lo cual es validado por el experto 2.

Con esta información, se generan 8 alternativas (2 porcentajes de generación solar x 2 equipos de generación x 2 valores de energía para usuarios individuales) para la alternativa seleccionada en el segundo nivel de decisión (B8-3). El tiempo necesario para resolver las 8 alternativas es de 1 hora y 20 minutos. En la Tabla 8.50 se presenta el detalle de las alternativas, en 3 subtablas:

- En la primera se lista el valor objetivo de los atributos  $AT_2$ ,  $AT_3$  y  $AT_4$ .
- En la segunda se exponen los valores reales de los atributos. El coste ( $RT_1$ ) se especifica en dólares. Además se concretan los valores de porcentaje de generación solar ( $RT_2$ ), cantidad de equipos de generación ( $RT_3$ ) y energía en usuarios individuales ( $RT_4$ ).
- En la tercera se calculan los valores  $L_1$  y  $L_\infty$ , con los resultados de la segunda subtabla, y los pesos de los criterios y subcriterios indicados en la Tabla 8.51. Finalmente se calcula la media de dichos valores ( $0,5 \cdot L_1 + 0,5 \cdot L_\infty$ ) y la clasificación resultante de las alternativas.

**Tabla 8.50 – Resultados de la validación: experto 2, Alto Perú, nivel 3, alternativas C8-1-X**

	Valor objetivo atributos			Valor real atributos				Clasificación			
	$AT_2$	$AT_3$	$AT_4$	$RT_1$	$RT_2$	$RT_3$	$RT_4$	$L_1$	$L_\infty$	Media	Pos.
<b>C8-3-1</b>	+0%	0	+0%	42819	+0%	1	+5%	0,533	0,533	0,533	8
<b>C8-3-2</b>	+0%	0	+10%	49323	+29	2	+39%	0,396	0,309	0,353	1
<b>C8-3-3</b>	+0%	2	+0%	44995	+0%	2	+5%	0,476	0,372	0,424	4
<b>C8-3-4</b>	+0%	2	+10%	49323	+29%	2	+39%	0,396	0,309	0,353	2
<b>C8-3-5</b>	+50%	0	+0%	46777	+52%	1	+5%	0,518	0,330	0,424	3
<b>C8-3-6</b>	+50%	0	+10%	52640	+52%	2	+39%	0,467	0,467	0,467	6
<b>C8-3-7</b>	+50%	2	+0%	50313	+52%	2	+5%	0,525	0,356	0,441	5
<b>C8-3-8</b>	+50%	2	+10%	52640	+52%	2	+39%	0,467	0,467	0,467	7

**Tabla 8.51 – Pesos de criterios y subcriterios: experto 2, Alto Perú, nivel 3**

	Peso Criterios		Peso Subcriterios
<b>Coste (<math>CT_1</math>)</b>	0,47	-	-
<b>Seguridad del suministro (<math>CT_2</math>)</b>	0,53	<b>Porcentaje generación solar (<math>CT_{2-1}</math>)</b>	0,38
		<b>Cantidad equipos generación (<math>CT_{2-2}</math>)</b>	0,30
		<b>Energía usuarios individuales (<math>CT_{2-3}</math>)</b>	0,32

La configuración de las alternativas se mantiene respecto a la solución del segundo nivel de decisión (véase la Figura 8.11).

En este tercer nivel se muestra la Tabla 8.52, complementaria, donde se indican los equipos de generación utilizados en función del valor objetivo de los atributos.

**Tabla 8.52 – Equipos de generación: experto 2, Alto Perú, nivel 3**

		<b>C8-3-X</b>
<b>Microrred</b>	$AT_2 = 0\%$ $AT_3 = 0$ o $2$ $AT_4 = 0\%$	2 aerog. 3500W
	$AT_2 = 0\%$ $AT_3 = 0$ o $2$ $AT_4 = 10\%$	1 aerog. 3500W 4 paneles 150W
	$AT_2 = 50\%$ $AT_3 = 0$ o $2$ $AT_4 = 0$ o $10\%$	1 aerog. 3500W 7 paneles 150W
<b>Puntos individuales</b>	$AT_2 = 0$ o $50\%$ $AT_3 = 0$ $AT_4 = 0\%$	1 panel 150W
	$AT_2 = 0$ o $50\%$ $AT_3 = 0$ o $2$ $AT_4 = 10\%$	1 panel 50W y 1 panel 150W o si $AT_2 = 0\%$ y $AT_3 = 0$ 1 aerog. 100W en puntos 3,5,6,7,11,16,18,21
	$AT_2 = 0$ o $50\%$ $AT_3 = 2$ $AT_4 = 0\%$	1 panel 50W 1 panel 100W

El experto 2 analiza las 8 alternativas en paralelo, y concluye que el peso de los criterios de la Tabla 8.51 se ajusta a sus preferencias. En cambio, el peso de los subcriterios no es adecuado. En concreto, el subcriterio  $CT_{2.1}$  debe tener más importancia puesto que el recurso eólico es más variable que el solar y la reparación de aerogeneradores es más lenta y costosa que la de paneles. Además, el subcriterio  $CT_{2.3}$  debe tener muy poca importancia y sólo si la diferencia de coste es pequeña, puesto que el nivel de energía del primer nivel de decisión ya es suficiente para los usos previstos de la electricidad.

En consecuencia, el experto 2 modifica el peso de los criterios y los subcriterios para adecuarlos a sus preferencias, tal y como se indica en la Tabla 8.53, lo que le permite obtener la clasificación de la Tabla 8.54.

**Tabla 8.53 – Pesos de criterios y subcriterios: experto 2, Alto Perú, nivel 3, iteración 1**

	<b>Peso Criterios</b>		<b>Peso Subcriterios</b>
<b>Coste (<math>CT_1</math>)</b>	0,47	-	-
<b>Seguridad del suministro (<math>CT_2</math>)</b>	0,53	<b>Porcentaje generación solar (<math>CT_{2.1}</math>)</b>	0,60
		<b>Cantidad equipos generación (<math>CT_{2.2}</math>)</b>	0,30
		<b>Energía usuarios individuales (<math>CT_{2.3}</math>)</b>	0,10

**Tabla 8.54 – Resultados de la validación: experto 2, Alto Perú, nivel 3, alter. C8-1-X, iteración 1**

	Valor objetivo atributos			Valor real atributos				Clasificación			
	AT <sub>2</sub>	AT <sub>3</sub>	AT <sub>4</sub>	RT <sub>1</sub>	RT <sub>2</sub>	RT <sub>3</sub>	RT <sub>4</sub>	L <sub>1</sub>	L <sub>∞</sub>	Media	Pos.
<b>C8-3-1</b>	+0%	0	+0%	42819	+0%	1	+5%	0,533	0,533	0,533	8
<b>C8-3-2</b>	+0%	0	+10%	49323	+29	2	+39%	0,446	0,309	0,378	2
<b>C8-3-3</b>	+0%	2	+0%	44995	+0%	2	+5%	0,477	0,373	0,425	5
<b>C8-3-4</b>	+0%	2	+10%	49323	+29%	2	+39%	0,446	0,309	0,378	3
<b>C8-3-5</b>	+50%	0	+0%	46777	+52%	1	+5%	0,401	0,213	0,307	1
<b>C8-3-6</b>	+50%	0	+10%	52640	+52%	2	+39%	0,467	0,467	0,467	6
<b>C8-3-7</b>	+50%	2	+0%	50313	+52%	2	+5%	0,410	0,356	0,383	4
<b>C8-3-8</b>	+50%	2	+10%	52640	+52%	2	+39%	0,467	0,467	0,467	7

Con la nueva clasificación, el experto 2 selecciona las dos alternativas mejor clasificadas: C8-3-5 y C8-3-2. La primera no proporciona un mínimo de 2 equipos pero, en caso de haber 1 solo equipo, éste será un panel. La segunda no destaca en cuanto al porcentaje solar, pero asegura unos valores muy aceptables en todos los subcriterios.

En este punto el experto 2 debería optar por una de las 2 alternativas seleccionadas, sobre la base de características muy específicas de la comunidad. Sin embargo, a medida que ha ido avanzando en el diseño del sistema ha descartado alternativas con una tendencia a generar una gran microrred en el centro. Ésta podría llegar a cubrir los 20 puntos más céntricos de la comunidad. Con este propósito mantiene las dos alternativas seleccionadas (C8-3-3 y C8-3-5) pero itera hasta el principio del segundo nivel de decisión.

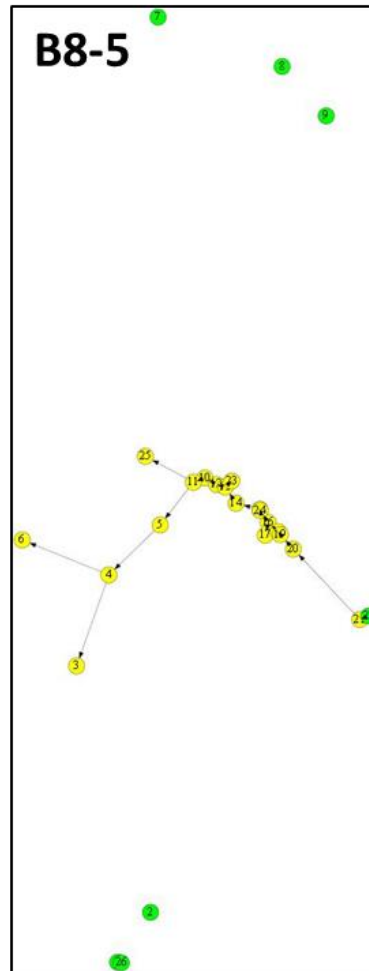
### **Etapa 2. Iteración 1**

Partiendo de la alternativa A8, seleccionada en el primer nivel de decisión, el experto 2 desea generar en el segundo nivel una única alternativa con un máximo de 1 microrred ( $AS_2$ ) y un máximo de 6 usuarios individuales ( $AS_4$ ), sin estudiar los demás atributos. Antes de generar esta alternativa se fija la existencia de los conductores de la microrred formada en la solución del primer nivel. Esta alternativa se genera en un tiempo de 20 minutos. En la Tabla 8.55, se presentan los valores objetivo y reales de los atributos:

**Tabla 8.55 – Resultados de la validación: experto 2, Alto Perú, nivel 2, iteración 1**

	Atributos								
	Valor objetivo				Valor real				
	AS <sub>2</sub>	AS <sub>3</sub>	AS <sub>4</sub>	AS <sub>5</sub>	RS <sub>1</sub>	RS <sub>2</sub>	RS <sub>3</sub>	RS <sub>4</sub>	RS <sub>5</sub>
<b>B8-5</b>	1	0	6	Todos	44214	1	20	6	26

En la Figura 8.12 se puede observar la configuración de la alternativa B8-5, que consta de una microrred en el centro con 20 puntos de consumo y 6 puntos electrificados individualmente.



**Figura 8.12 – Configuración de la alternativa seleccionada: experto 2, Alto Perú, nivel 2, iteración 1**

En el tercer nivel de decisión se estudian los mismos valores objetivo de los atributos correspondientes a la seguridad del suministro que para la alternativa B8-3:

- Mínimo porcentaje de la energía generada con paneles fotovoltaicos ( $AT_2$ ). Se estudia que un mínimo del 50% de la energía se genere con paneles fotovoltaicos o no imponer nada.
- Número mínimo de equipos de generación por punto de generación ( $AT_3$ ). Se estudia imponer un mínimo de 2 equipos de generación en cada punto de generación o no imponer nada.
- Mayor porcentaje de energía en usuarios individuales frente a usuarios en microrred ( $AT_4$ ). Se estudia imponer un porcentaje de energía adicional de 10% en usuarios individuales o no imponer nada.

Para pasar del segundo al tercer nivel de decisión se fija la existencia y dirección de los conductores de la microrred formada, lo cual es validado por el experto 2.

Con esta información, se generan 8 alternativas (2 porcentajes de generación solar x 2 equipos de generación x 2 valores de energía para usuarios individuales) para la

alternativa seleccionada en el segundo nivel de decisión (B8-5). El tiempo necesario para resolver las 8 alternativas es de 1 hora y 20 minutos. En la Tabla 8.56 se presenta el detalle de las alternativas, en 3 subtablas:

- En la primera se lista el valor objetivo de los atributos  $AT_2$ ,  $AT_3$  y  $AT_4$ .
- En la segunda se exponen los valores reales de los atributos. El coste ( $RT_1$ ) se especifica en dólares. Además se concretan los valores de porcentaje de generación solar ( $RT_2$ ), cantidad de equipos de generación ( $RT_3$ ) y energía en usuarios individuales ( $RT_4$ ).
- En la tercera se calculan los valores  $L_1$  y  $L_\infty$ , con los resultados de la segunda subtabla, y los pesos de los criterios y subcriterios indicados en la Tabla 8.57. Finalmente se calcula la media de dichos valores ( $0,5 \cdot L_1 + 0,5 \cdot L_\infty$ ) y la clasificación resultante de las alternativas. Nótese que los pesos de la Tabla 8.57 no son los pesos por defecto habitualmente utilizados para la primera clasificación, sino que el experto 2 desea imponer directamente los pesos que ya ha usado en la clasificación de la iteración 1 para las alternativas C8-3-X (véase la Tabla 8.54).

**Tabla 8.56 – Resultados de la validación: experto 2, Alto Perú, nivel 3, iteración 1**

	Valor objetivo atributos			Valor real atributos				Clasificación			
	$AT_2$	$AT_3$	$AT_4$	$RT_1$	$RT_2$	$RT_3$	$RT_4$	$L_1$	$L_\infty$	Media	Pos.
<b>C8-5-1</b>	+0%	0	+0%	45301	+6%	1	+5%	0,533	0,533	0,533	8
<b>C8-5-2</b>	+0%	0	+10%	48007	+6%	2	+39%	0,477	0,320	0,399	1
<b>C8-5-3</b>	+0%	2	+0%	46933	+6%	2	+5%	0,468	0,373	0,421	4
<b>C8-5-4</b>	+0%	2	+10%	48007	+6%	2	+39%	0,477	0,320	0,399	2
<b>C8-5-5</b>	+50%	0	+0%	50618	+53%	1	+5%	0,523	0,309	0,416	3
<b>C8-5-6</b>	+50%	0	+10%	53324	+53%	2	+39%	0,467	0,467	0,467	6
<b>C8-5-7</b>	+50%	2	+0%	52250	+53%	2	+5%	0,458	0,404	0,431	5
<b>C8-5-8</b>	+50%	2	+10%	53324	+53%	2	+39%	0,467	0,467	0,467	7

**Tabla 8.57 – Pesos de criterios y subcriterios: experto 2, Alto Perú, nivel 3, iteración 1**

	Peso Criterios		Peso Subcriterios
<b>Coste (<math>CT_1</math>)</b>	0,47	-	-
<b>Seguridad del suministro (<math>CT_2</math>)</b>	0,53	<b>Porcentaje generación solar (<math>CT_{2,1}</math>)</b>	0,60
		<b>Cantidad equipos generación (<math>CT_{2,2}</math>)</b>	0,30
		<b>Energía usuarios individuales (<math>CT_{2,3}</math>)</b>	0,10

La configuración de las alternativas se mantiene respecto a la solución del segundo nivel de decisión (véase la Figura 8.12).

En este tercer nivel se muestra la Tabla 8.58, complementaria, donde se indican los equipos de generación utilizados en función del valor objetivo de los atributos.

**Tabla 8.58 – Equipos de generación: experto 1, Alto Perú, nivel 3, iteración 1**

		<b>C8-5-X</b>
<b>Microrred</b>	$AT_2 = 0\%$ $AT_3 = 0 \text{ o } 2$ $AT_4 = 0 \text{ o } 10\%$	2 aerog. 3500W 1 panel 150W 1 panel 50W
	$AT_2 = 50\%$ $AT_3 = 0 \text{ o } 2$ $AT_4 = 0 \text{ o } 10\%$	1 aerog. 3500W 10 paneles 150W 1 panel 100W 1 panel 75W
<b>Puntos individuales</b>	$AT_2 = 0 \text{ o } 50\%$ $AT_3 = 0$ $AT_4 = 0\%$	1 panel 150W
	$AT_2 = 0 \text{ o } 50\%$ $AT_3 = 0 \text{ o } 2$ $AT_4 = 10\%$	1 panel 150W 1 panel 50W
	$AT_2 = 0 \text{ o } 50\%$ $AT_3 = 2$ $AT_4 = 0\%$	2 paneles 75W

Con la clasificación obtenida, el experto 2 selecciona las dos alternativas mejor clasificadas: C8-5-2 y C8-5-5; que son análogas a C8-3-2 y C8-3-5. Nótese que la alternativa en segunda posición es C8-5-4, pero se descarta al ser igual a C8-5-2.

Para finalizar la segunda etapa el experto 2 compara las 4 alternativas seleccionadas, cuyas principales características se exponen en la Tabla 8.59.

**Tabla 8.59 – Alternativas finales: experto 2, Alto Perú**

		<b>C8-3-2</b>	<b>C8-3-5</b>	<b>C8-5-2</b>	<b>C8-5-5</b>
<b>Coste</b>		49323	46777	48007	50618
<b>Nivel 1</b>		450Wh/día 250W 2días	450Wh/día 250W 2días	450Wh/día 250W 2días	450Wh/día 250W 2días
<b>Nivel 2</b>		1 mred. 13 puntos 13 puntos indiv.	1 mred. 13 puntos 13 puntos indiv.	1 mred. 20 puntos 6 puntos indiv.	1 mred. 20 puntos 6 puntos indiv.
<b>Nivel 3</b>	<b>Microrred</b>	1 aerog. 3500W 4 paneles 150W	1 aerog. 3500W 7 paneles 150W	2 aerog. 3500W 1 panel 150W 1 panel 50W	1 aerog. 3500W 10 paneles 150W 1 panel 100W 1 panel 75W
	<b>Puntos individuales</b>	1 panel 150W 1 panel 50W	1 panel 150W	1 panel 150W 1 panel 50W	1 panel 150W

A partir de esta información, el experto 2 concluye que:

- Las diferencias de coste entre unas y otras alternativas no son muy significativas.
- La demanda de energía establecida en el primer nivel de decisión es suficiente para cubrir los usos energéticos previstos de cada tipo de usuario, de modo que no es imprescindible incrementar (un 10%) la energía en usuarios individuales.
- La configuración de las alternativas C8-5-2 y C8-5-5 es más favorable que la de C8-3-2 y C8-3-5, sobre todo pensando en la adhesión de posibles nuevos usuarios. Esta posibilidad cobra especial sentido si se asegura una buena seguridad del suministro, como por ejemplo, sucede con los paneles fotovoltaicos (en la alternativa C8-5-5).

En consecuencia, el experto 2 selecciona la alternativa C8-5-5 como definitiva, la cual consta de una microrred de 20 puntos de consumo y 6 puntos electrificados individualmente (véase la Figura 8.12).

El tiempo de cálculo total utilizado en la segunda etapa es de 23 horas y 20 minutos.

### ***Etapa 3. Mejora del resultado***

Para finalizar el proceso de diseño del sistema, el experto 2 no desea intentar mejorar el coste de la alternativa seleccionada en la segunda etapa, puesto que considera que la alternativa C8-5-5 ya es adecuada.

## **8.6 – Conclusiones de la validación**

A partir de las validaciones realizadas por los dos expertos consultados de las 2 comunidades de la sierra andina peruana, en este apartado se concluye sobre la adecuación de la metodología de diseño de sistemas de electrificación autónomos para comunidades rurales propuesta en esta tesis doctoral. En primer lugar se resumen los valores objetivo de los atributos estudiados por cada experto en cada nivel de decisión. En segundo lugar se comparan las soluciones obtenidas por cada experto con las soluciones implementadas en la realidad. Finalmente se enumeran las principales conclusiones obtenidas.

Los dos expertos proponen el estudio de distintos valores objetivo para cada atributo en cada nivel de decisión. En concreto, el experto 1 tiene mayor tendencia a personalizar las decisiones, en función de la comunidad; en cambio, el experto 2 sigue un patrón más estandarizado en sus decisiones. En la Tabla 8.60, se presentan los valores objetivo de los atributos propuestos por cada experto en cada comunidad.

Como se observa, cada experto realiza su propia propuesta de valores objetivo, muy particularizada y que depende, tanto de la comunidad, como de las preferencias del propio decisor. De esta forma se puede afirmar que la metodología de diseño desarrollada permite adecuar la toma de decisiones al decisor y a las características socioeconómicas de la comunidad a electrificar. Al dividir y estructurar el problema, el decisor puede probar tantos valores objetivo de los atributos como desee y, en algunos casos, algunos valores que de otro modo hubiese sido difícil que se le ocurriesen. Las soluciones están así más justificadas.

Nótese que en la Tabla 8.60 (y también en la Tabla 8.61), a modo de ejemplo, sólo se han dado los valores objetivo de los atributos de cada nivel de decisión para las viviendas que no prevén el desarrollo de usos productivos, sin incluir las demandas de los otros puntos especiales como viviendas donde se prevén usos productivos, escuelas o centros de salud.

Tabla 8.60 – Valores objetivo de los atributos estudiados por cada experto en cada nivel

			Experto 1		Experto 2		
			El Alumbre	Alto Perú	El Alumbre	Alto Perú	
Nivel 1	AP <sub>2</sub>	Energía [Wh/día]	300; 350; 400	300; 350; 400	400; 450; 500; 550; 600	400; 450; 500; 550; 600	
	AP <sub>3</sub>	Potencia [W]	200; 400	200; 400	250; 500	250; 500	
	AP <sub>4</sub>	Autonomía [días]	1,5; 2; 3	1,5; 2; 3	1; 2; 3	1; 2; 3	
Nivel 2	AS <sub>2</sub>	Nº máx mredes	17	13	17	13	1
	AS <sub>3</sub>	Nº mín usuarios por mred	0	0; 4	0; 3	0; 3	0
	AS <sub>4</sub>	Nº máx usuarios indiv	35; 10; 0	26; 0	35	26	6
	AS <sub>5</sub>	Medidores en todos los usuarios o en microrred	Todos	Todos	Todos; Microrred	Todos; Microrred	Todos
Nivel 3	AT <sub>2</sub>	Mín porcentaje energía generada con paneles	0%; 25%	0%; 25%	0%; 50%	0%; 50%	
	AT <sub>3</sub>	Número mínimo de equipos de generación	0	0; 2	0; 2	0; 2	
	AT <sub>4</sub>	Mayor porcentaje de energía en usuarios individuales	0%; 25%	0%; 25%; 40%	0%; 10%	0%; 10%	
<b>Tiempo total segunda etapa</b>			14h	12h 20min	23h	23h 20 min	
<b>Tiempo tercera etapa (opcional) [h]</b>			15	15	0	0	

Por otro lado, el tiempo de cálculo obtenido no supera las 24h para la segunda etapa y las 32h para el conjunto del proceso. Estos valores se pueden considerar razonables y permiten probar multitud de opciones de electrificación. Además, la mayor parte de este tiempo no se requiere que el decisor esté trabajando en el diseño. Es sólo entre niveles cuando el decisor debe dedicar un tiempo para tomar las decisiones correspondientes (que en el caso de los expertos consultados no ha superado las 3 horas para el conjunto del proceso de diseño de cada comunidad). Este escaso tiempo contrasta con el proceso de diseño habitual, en el que un técnico especialista en electrificación rural debe dedicar 2 o 3 días para el diseño de unas pocas alternativas.

Tabla 8.61 – Soluciones mediante la metodología de diseño aplicada por los dos expertos y soluciones reales para las comunidades de El Alumbre y Alto Perú

		El Alumbre			Alto Perú		
		Experto 1	Experto 2	Real	Experto 1	Experto 2	Real
<b>Coste [\$]</b>		74162	70775	66081	54238	50618	45620
<b>Nivel 1</b>		350 Wh/día 200 W 2 días	450 Wh/día 250 W 2 días	280 Wh/día 200 W 2 días  Todos los puntos se electrifican individualmente con 1 aerog. de 100W Nadie medidor	300 Wh/día 400 W 1,5 días	450 Wh/día 250 W 2 días	280 Wh/día 200 W 2 días  1 mred. 8 pts. con 2 aerog. 1200W 1 mred. 6 pts. con 2 aerog. 1200W 1 mred. 3 pts. con 8 paneles 100W 9 pts indiv. con 1 panel 95W Mred medidor
<b>Nivel 2</b>		1 mred. 8 pts. 27 pts. indiv. Todos medidor	1 mred. 9 pts. 26 pts. indiv. Todos medidor		1 mred. 15 pts. 1 mred. 2 pts. 9 pts. indiv. Todos medidor	1 mred. 20 pts. 6 pts. indiv. Todos medidor	
<b>Nivel 3</b>	<b>Mred 1</b>	1 aerog. 3500W 2 paneles 150W	1 aerog. 1750W 7 paneles 150W		2 aerog. 3500W 6 paneles 150W 1 panel 100W	2 aerog. 3500W 10 paneles 150W 1 panel 100W 1 panel 75W	
	<b>Mred 2</b>				2 paneles 150W		
	<b>Puntos indiv.</b>	1 panel 150W	1 panel 150W	1 panel 150W	1 panel 150W		



En la Tabla 8.61 se muestran las soluciones obtenidas por cada experto y las soluciones implementadas en la realidad. Cabe destacar que en el diseño de electrificación real de estas comunidades no se utilizó la metodología propuesta y los datos de partida no fueron los mismos. Sin embargo, con esta tabla se pretende contrastar los resultados para determinar las facilidades que permite la metodología propuesta en relación al diseño de proyectos de electrificación, y la mayor variedad de opciones de diseño que permite estudiar y, así, obtener.

Como se observa, las soluciones presentan grandes diferencias en las dos comunidades:

- El Alumbre. El coste se incrementa en un 12,2% (experto 1) y en un 7,1% (experto 2) respecto a la solución para el proyecto real. A cambio se obtienen unos mayores valores de energía y potencia, una microrred en el centro que cubre la escuela y el centro de salud, y un suministro energético que no depende exclusivamente de la energía eólica. En consecuencia, las soluciones obtenidas permiten desarrollar una mayor cantidad de actividades domésticas y, además, proporcionan un suministro energético mucho más constante y seguro en todos los puntos y, específicamente, en la escuela y el centro de salud, los puntos más críticos de la comunidad.
- Alto Perú. El coste se incrementa en un 18,9% (experto 1) y en un 11,0% (experto 2) respecto a la solución para el proyecto real. A cambio se obtienen unos mayores valores de energía y potencia, una gran microrred en el centro, y un suministro energético más sujeto a paneles fotovoltaicos y con mayor cantidad de equipos en cada punto. En consecuencia, las soluciones obtenidas permiten reducir la complejidad de la gestión del sistema, puesto que la cantidad de microrredes es menor y se instalan medidores en todos los puntos. Además, la mejor continuidad del suministro permite evitar la aparición de conflictos entre vecinos, puesto que todos quedarán más satisfechos con la energía disponible.

En conclusión, se observa que los diseños obtenidos siguiendo la metodología propuesta mejoran las soluciones reales implementadas. Diversas evaluaciones posteriores realizadas por las ONGs SP e ISF han concluido que, en efecto, la seguridad del suministro es el principal problema en la comunidad de El Alumbre y la gestión del sistema es el problema más complejo en la comunidad de Alto Perú. Ambos problemas, sin embargo, quedan más reducidos con el diseño de los proyectos a través de la metodología desarrollada.

Las conclusiones del proceso de validación realizado son las siguientes:

- La conclusión principal es que la metodología propuesta es adecuada para diseñar sistemas de electrificación autónomos. Los dos expertos han podido experimentar el proceso de diseño, obteniendo unos resultados satisfactorios que coinciden con sus preferencias. Además, ambos aseveran haberse sentido muy cómodos, apoyados y guiados a lo largo de todo el proceso de toma de decisiones y, en concreto, mucho más cómodos que realizando dicho proceso del modo manual habitual.

- Gracias a la división de la metodología en niveles de decisión, se pueden analizar los resultados que se van obteniendo de una forma mucho más estructurada y clara. Si se comparan los resultados obtenidos por cada experto con las soluciones realmente implementadas, se ofrece una mayor demanda, se facilita la gestión del sistema y se mejora la seguridad del suministro. Esto conduce a una serie de beneficios sociales que facilitan en mayor medida la sostenibilidad de los proyectos.
- Los expertos afirman que con la metodología de diseño propuesta pueden probar una cantidad mucho mayor de alternativas de electrificación en únicamente de 2 o 3 días. Anteriormente se debía de dedicar mucho tiempo y esfuerzo para la elaboración de una sola alternativa, de modo que como máximo se estudiaban simultáneamente unas 3 alternativas. De esta forma, se puede ajustar en mayor medida la electrificación a las características socioeconómicas de cada comunidad.
- Entre los dos expertos consultados se han utilizado todos los atributos propuestos, de forma que queda validada su utilidad y pertinencia.
- Mientras que el experto 1 ha desarrollado un proceso de diseño algo distinto en las 2 comunidades, el experto 2 ha sido más estándar en este aspecto. Así, se ha validado que la metodología se adapta a las preferencias de cada decisor, tanto si tiene las ideas fijas como si está más sujeto a los resultados que vaya obteniendo.
- La propuesta de pesos de los criterios y subcriterios a utilizar por defecto, desarrollados en el apartado 7.1 y que permite en cada nivel de decisión obtener una clasificación inicial, parece ser adecuada. Para ambos expertos este hecho ha facilitado en gran medida la toma de decisiones. Además, al analizar los procesos de diseño, se observa que la propuesta de pesos por parte de los expertos ha presentado leves variaciones.

En resumen, la metodología de diseño propuesta en esta tesis doctoral ha sido validada, es adecuada a las características económicas, técnicas y sociales de las comunidades a electrificar, y considera las preferencias y prioridades de los actores involucrados en el proyecto de electrificación.

## 9. Conclusiones y extensiones futuras

En este capítulo, primero se presentan las conclusiones de la investigación realizada. En segundo lugar se exponen las investigaciones futuras como extensión del presente trabajo y, finalmente, se listan las publicaciones que derivan de la tesis doctoral.

### 9.1. Conclusiones

Actualmente, las estrategias para promover el acceso a la energía eléctrica en regiones remotas son excesivamente costosas o no se adaptan a las características de cada región a electrificar. Los trabajos revisados se suelen enfocar o bien en generar alternativas de electrificación, pero sin entrar en el detalle de las soluciones de electrificación, o bien en seleccionar uno entre diferentes escenarios, pero sin incluir el proceso de generación de dichos escenarios. Muy pocos estudios integran ambos procesos y, cuando lo hacen, se centran en aspectos económicos y técnicos, pero más difícilmente consideran aspectos sociales. En consecuencia, existe una brecha entre la utilidad de las herramientas existentes y las necesidades reales de los promotores de la electrificación rural aislada.

En este contexto, en esta tesis se ha desarrollado una metodología de diseño de sistemas de electrificación autónomos basados en las tecnologías eólica y solar, que combina puntos individuales y microrredes de distribución. La propuesta define el diseño del sistema, minimiza el coste de la inversión inicial, satisface la demanda de todos los puntos de consumo y tiene en cuenta el detalle de los recursos energéticos, así como consideraciones sociales (es decir, aportaciones técnicas que tienen por objetivo facilitar la gestión del sistema y mejorar la seguridad del suministro).

La metodología propuesta se ha dividido en 3 etapas. En la primera se realizan las evaluaciones iniciales para particularizar la comunidad a electrificar: la evaluación socioeconómica permite identificar los puntos de consumo, sus necesidades y las características de la población; la evaluación energética tiene como objetivo determinar el recurso eólico y solar de cada punto de la comunidad; y la evaluación técnica consiste en identificar todos los equipos disponibles en el mercado.

En la segunda etapa se realiza el diseño del sistema de electrificación propiamente dicho. Dada la multitud de opciones de diseño que se desea analizar, esta etapa se divide en 3 niveles de decisión, en función de la importancia de las decisiones a tomar: en el primero se enfrentan los criterios coste y demanda; en el segundo se enfrentan los criterios coste y gestión del sistema; y en el tercero se enfrentan los criterios coste y seguridad del suministro. Además, entre un nivel y el siguiente, se fija parte de la solución para que las decisiones de un nivel no perjudiquen las decisiones de niveles previos (de mayor importancia).

La estructura de cada uno de los 3 niveles de decisión se ha dividido en 2 pasos: primero se genera un conjunto de alternativas de electrificación incluyendo consideraciones técnicas y sociales, y segundo se selecciona la más adecuada sobre la base de criterios económicos, técnicos y sociales.

Para el paso de generación de alternativas se ha desarrollado un modelo matemático de programación lineal entera y mixta, en el que se incluyen conjuntos de restricciones en función del nivel de decisión. El modelo del primer nivel minimiza el coste de la inversión inicial, teniendo en cuenta la demanda de energía y potencia de cada punto de consumo, los días de autonomía y las relaciones técnicas entre componentes de la instalación. El modelo del segundo nivel incluye, además, conjuntos de restricciones para imponer un número máximo de microrredes, un número mínimo de usuarios por microrred, un número máximo de usuarios individuales y/o instalar medidores en todos los puntos o únicamente en las microrredes. El modelo del tercer nivel incluye, además, conjuntos de restricciones para imponer un mínimo porcentaje de la energía generada con paneles fotovoltaicos, un número mínimo de equipos de generación en cada punto de generación y un porcentaje adicional de energía en usuarios individuales.

Para limitar el tiempo de cálculo del paso de generación de alternativas, se propone un proceso de resolución heurístico mediante el que se obtienen soluciones en un tiempo razonable. Este proceso de resolución se valida con un experimento computacional y los resultados muestran que el error cometido es poco significativo para la notable mejora obtenida en el tiempo de cálculo.

Para el paso de selección de alternativas se propone un proceso de decisión multicriterio basado en la técnica de la programación compromiso. En primer lugar se han determinado unos criterios de evaluación que se han agrupado para cada nivel de decisión. En segundo lugar se han concretado unos pesos genéricos para cada criterio y subcriterio; cuyo valor se puede ajustar a las preferencias del decisor, mediante un proceso iterativo. Finalmente, las alternativas se clasifican en función de su cercanía respecto a una solución ideal. Esta clasificación se muestra al decisor para que pueda seleccionar una o varias alternativas y pasar al siguiente nivel de decisión.

Complementariamente se ha desarrollado un proceso iterativo que permite estudiar multitud de opciones de diseño y, en todo momento, volver al principio de cualquier nivel para estudiar nuevas opciones.

La tercera etapa, opcional, persigue intentar mejorar el coste de la solución de la segunda etapa, manteniendo las decisiones que se han tomado. Esta etapa surge del hecho que, como se ha comentado, entre un nivel y el siguiente se fija parte de la solución, de modo que su coste puede quedar ligeramente perjudicado.

Finalmente se ha validado la metodología de diseño, mediante dos expertos que han diseñado el sistema de electrificación de 2 comunidades de la sierra andina norte peruana (Cajamarca, Perú). Mediante esta validación se ha concluido que la metodología propuesta es adecuada para que promotores de la electrificación rural en países en desarrollo diseñen sistemas autónomos, incluyendo consideraciones económicas, técnicas y sociales. En concreto, la división en niveles de decisión permite estudiar el problema de forma clara y estructurada, analizando multitud de opciones de diseño en un tiempo razonable. Las soluciones que se obtienen se ajustan a las preferencias de cada decisor y a las peculiaridades de cada comunidad. Además, los beneficios sociales de las soluciones de electrificación obtenidas con la metodología compensan ampliamente el aumento de coste respecto a las soluciones reales.

## 9.2. Extensiones futuras

A continuación se presentan posibles temas de investigación futura, como extensión de esta tesis doctoral:

- Metodología de diseño. Aunque la metodología desarrollada en esta tesis ha sido validada, se consideran las siguientes investigaciones complementarias:
  - Tecnologías consideradas. En este trabajo sólo se consideran las tecnologías eólica y solar pero, en función del contexto en el que se trabaje, otras opciones tecnológicas también podrían resultar adecuadas: pequeñas centrales hidroeléctricas en presencia de ríos cercanos, generadores diésel para zonas de selva, etc.
  - Análisis de sensibilidad. En ocasiones, pequeñas variaciones en algunos parámetros pueden conllevar cambios significativos en las soluciones obtenidas. Por este motivo, puede ser interesante incluir un análisis de sensibilidad al finalizar el proceso de diseño, para intentar identificar si sería recomendable modificar algunos parámetros de la solución.
  - Programas informáticos libres. Para favorecer la difusión de la metodología, convendría transformarla en un paquete informático libre y, específicamente, poder resolver el modelo matemático con un programa gratuito.
- Estudio de nuevas opciones de diseño. A lo largo del desarrollo de esta tesis doctoral se han identificado las siguientes consideraciones de diseño a estudiar:
  - Mínimo porcentaje de la energía generada con aerogeneradores.
  - Combinación AC/DC en usuarios individuales. Actualmente se considera la distribución en corriente alterna para todos los casos, pero se ha observado que en usuarios individuales puede ser interesante instalar un doble sistema: uno para cargas en continua y otro para cargas en alterna, lo que permite reducir el uso del inversor, disminuyendo las pérdidas en este equipo.

- Generación de alternativas. Se considera interesante estudiar la inclusión de las siguientes características en el paso de generación de alternativas:
  - Individualizar cada punto de consumo. Aunque actualmente algunos parámetros ya están individualizados, como la demanda de energía y potencia, puede ser adecuado particularizar otros parámetros como el sobredimensionado de energía y potencia, o la autonomía. De esta forma se podría considerar las peculiaridades de cada punto de consumo y, así, adecuar en mayor medida la electricidad a las características de la población.
  - Costes de operación y mantenimiento. La función objetivo a optimizar únicamente considera el coste de la inversión inicial. Sin embargo, durante la vida útil de los proyectos se debe hacer frente a otros costes, como reparaciones o reposiciones de los equipos. En este sentido, podría resultar adecuado incorporar a la función objetivo los costes de operación y mantenimiento.
  - Puntos de no consumo. En las soluciones de diseño actuales únicamente se consideran los puntos de consumo como posibles puntos de generación. Sin embargo, puede ser interesante incluir puntos de no consumo como puntos de generación, que permitan aprovechar el potencial de zonas de la comunidad con un muy buen potencial eólico.
  
- Criterios ambientales en el paso de selección de alternativas. La selección de alternativas se realiza sobre la base de criterios económicos, técnicos y sociales. Por el momento, el aspecto ambiental no se tiene en cuenta puesto que en pequeños proyectos de electrificación rural, su importancia se considera limitada. Pese a ello, puede ser interesante incorporar criterios ambientales como la ocupación del suelo, la contaminación de los equipos, etc.

### 9.3. Artículos y ponencias realizadas

En este apartado se exponen los resultados de esta tesis doctoral, en lo que se refiere a publicaciones y otras actividades de difusión. En primer lugar se exponen los artículos publicados, aceptados y enviados a revistas indexadas JCR. En segundo lugar se listan las publicaciones en congresos. En tercer lugar se muestran las publicaciones en capítulos de libro. En cuarto lugar se detallan otras actividades de difusión realizadas a partir de este trabajo. Finalmente, en quinto lugar se detallan los proyectos en los que el autor de este documento ha participado para la realización de la tesis.

#### *Artículos en revistas JCR*

Ferrer-Martí L, Domenech B, García-Villoria A, Pastor R. A MILP model to design hybrid-photovoltaic isolated rural electrification projects in developing countries. *European Journal of Operational Research* 226 (2013) 293-300.

Ranaboldo M, Domenech B, Vilar D, Ferrer-Martí L, Pastor R, García-Villoria A. Wind energy projects to electrify isolated communities in Cape verde. *Energy Conversion and Management* (en proceso de revisión).

Domenech B, Ferrer-Martí L, García-Villoria A, Pastor R. Design of hybrid wind-PV rural electrification projects with technical and social considerations. *Energy* (en preparación).

Domenech B, Ferrer-Martí L, García-Villoria A, Pastor R. A multicriteria methodology for the design of autonomous electrification systems for rural communities structured in different levels of decisions. *Energy Policy* (en preparación).

### **Capítulos de libro**

Ferrer-Martí L, Domenech B, Canedo W, Reza C, Tellez M, Dominguez M, Perone L, Salinas J. Experiences of community wind electrification projects in Bolivia: evaluation and improvements for future projects. *Sustainable growth and applications in renewable energy sources*, Ed. Intech (Diciembre 2011) 85-106.

Escobar R, Vilar D, Velo E, Ferrer-Martí L, Domenech B. Promoting and improving renewable energy projects through local capacity development. *Modeling and optimization of renewable energy systems*, Ed. Intech (Marzo 2012) 147-170.

### **Congresos y ponencias**

Domenech B, Ferrer-Martí L, Pastor R. Diseño de sistemas autónomos de electrificación rural con energía eólica y solar. *VII Conferencia Internacional en Ciencias Empresariales*, La Habana, Cuba (Octubre 2010).

Domenech B, Ferrer-Martí L, Garfí A, García-Villoria A, Pastor R. Design models and multicriteria decisions in wind-PV electrification projects. *Small Scale Wind Energy International Workshop*, Pokhara, Nepal (Noviembre 2010).

Domenech B, Ferrer-Martí L, Pastor R. Optimizing the design of wind-PV electrification projects for developing countries. *Micro Perspectives for Decentralized Energy Supply International Conference*, Berlin, Alemania (Abril 2011).

Domenech B, Ferrer-Martí L, Pastor R. Generación de alternativas para el diseño de sistemas de electrificación rural. *XIV Congreso de Ingeniería Eléctrica*, La Habana, Cuba (Junio 2011).

Domenech B, Ferrer-Martí L, Pastor R, García-Villoria A. Desarrollo metodológico para la ubicación de microaerogeneradores a escala comunal. *Simposio Internacional de Energía Eólica de Pequeña Escala*, Lima, Perú (Diciembre 2011).

Domenech B, Ferrer-Martí L, Pastor R. Diseño de sistemas autónomos de electrificación con consideraciones técnicas y sociales. *XVI Congreso de Ingeniería en Organización, 6<sup>th</sup> International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management*, Vigo, España (Julio 2012).

Domenech B, Ferrer-Martí L, Pastor R. Multicriteria approach to design autonomous rural electrification projects. *76<sup>th</sup> Euro MCDA Workshop*, Portsmouth, United Kingdom (Septiembre 2012).

Domenech B, Ranaboldo M, Ferrer-Martí L, García-Villoria A, Pastor R. Design of autonomous rural electrification systems for isolated Spanish communities. *3<sup>rd</sup> International Conference on Microgeneration and Related Technologies*, Naples, Italy (Abril 2013).

### ***Otras actividades***

Ferrer-Martí L, Domenech B, Ranaboldo M. Wind systems to electrify Dhauwadi: A preliminary study. *Documento de asesoramiento a la ONG Practical Action, Nepal* (Marzo 2011).

Domenech B. Las energías renovables mejoran las condiciones de vida. *Boletín informativo del Centro de Cooperación al Desarrollo de la Universitat Politècnica de Catalunya* (Septiembre 2011).

Domenech B. Acción Directa. *Reportaje de las actividades realizadas en Cajamarca, Perú*, filmado Agosto y Septiembre 2011, emitido el sábado 4 de Noviembre de 2012 a las 12:30h en TVE2.

### ***Participación en proyectos***

Proyecto: Promoción de sistemas micro-eólicos y solares para la electrificación de comunidades de forma autónoma: análisis y desarrollo de herramientas de diseño y planificación para diferentes contextos y países. Fases I y II.

Financia: Centro de Cooperación al Desarrollo de la Universitat Politècnica de Catalunya.

Investigador principal: Laia Ferrer Martí.

Periodo: Mayo 2010 a Diciembre 2011.

Proyecto: Programa nacional de proyectos de investigación fundamental - ENE2010-15509.

Financia: Ministerio de Ciencia e Innovación de España. Co-financia: FEDER.

Investigador principal: Laia Ferrer Martí.

Periodo: Diciembre 2011 a Diciembre 2012.



## 10. Anexos

En este capítulo se presentan los anexos de esta tesis doctoral. En el Anexo A se expone el detalle de los datos técnicos utilizados en los experimentos computacionales. En el Anexo B se presentan las encuestas realizadas para la ponderación de criterios.

### Anexo A. Datos técnicos utilizados

En este anexo, se detallan las características técnicas de todos equipos de la instalación utilizados en los ejemplos, experimentos computacionales y validaciones, realizados a lo largo de esta tesis. Estos datos se han obtenido a partir de un estudio de mercado en el que se han analizado distintos proveedores con distribución en Cajamarca (Perú).

#### Anexo A.1. Datos técnicos 1

A continuación se exponen los datos usados en los apartados 4.4, 6.7 y en el capítulo 8.

- **Datos generales**

Distancia máx. entre puntos [m]	1000
Tensión nominal [V]	220

- **Aerogeneradores**

	Potencia máx. [W]	Coste [\$]
1	300	1139
2	1200	3022
3	1750	4448
4	3500	5645
Nº máx. en 1 punto	3	

- **Paneles fotovoltaicos**

	Potencia [W]	Energía [Wh/día]	Coste [\$]
1	50	217,2	451
2	75	325,7	636
3	100	434,3	821
4	150	651,5	1000
Nº máx. en 1 punto	10		

- **Reguladores solares**

	Potencia [W]	Coste [\$]
1	50	67
2	75	81
3	100	95
4	200	125

- **Baterías**

	Capacidad [Wh/día]	Coste [\$]
1	1500	225
2	1800	246
3	2400	292
4	3000	325
<b>Rendimiento</b>		0,85
<b>Factor de descarga</b>		0,6

- **Inversores**

	Potencia [W]	Coste [\$]
1	300	377
2	500	617
2	1200	1200
3	2000	1800
4	3000	2300
<b>Rendimiento</b>		0,85

- **Medidores**

	Coste [\$]
1	50

- **Conductores**

	Coste [\$m]	Resistencia [ $\Omega$ /m]	Intensidad máx. [A]
1	4,94	0,00260	64
2	5,49	0,00103	118
3	5,79	0,00016	380

## Anexo A.2. Datos técnicos 2

A continuación se exponen los datos usados en el apartado 6.2.

- **Datos generales**

Distancia máx. entre puntos [m]	500
Tensión nominal [V]	220

- **Aerogeneradores**

	Potencia máx. [W]	Coste [\$]
1	300	974
2	1200	2737
3	1750	4106
4	3500	5132
Nº máx. en 1 punto	2	

- **Reguladores eólicos**

	Potencia [W]	Coste [\$]
1	420	165
2	1440	285
3	1800	342
4	3600	513

- **Paneles fotovoltaicos**

	Potencia [W]	Energía [Wh/día]	Coste [\$]
1	50	217,2	451
2	75	325,7	636
3	100	434,3	821
Nº máx. en 1 punto	10		

- **Reguladores solares**

	Potencia [W]	Coste [\$]
1	50	67
2	75	81
3	100	95

- **Baterías**

	Capacidad [Wh/día]	Coste [\$]
1	1500	225
2	1800	246
3	2400	292
4	3000	325
Rendimiento	0,85	
Factor de descarga	0,6	

- **Inversores**

	Potencia [W]	Coste [\$]
1	300	377
2	1200	1200
3	2000	1800
4	3000	2300
Rendimiento	0,85	

- **Medidores**

	Coste [\$]
1	50

- **Conductores**

	Coste [\$m]	Resistencia [ $\Omega$ /m]	Intensidad máx. [A]
1	4,9	0,00271	89
2	5,1	0,00215	101

## Anexo B. Encuestas para la ponderación de criterios

En este anexo se exponen las encuestas realizadas para fijar la ponderación inicial de los criterios y subcriterios (subapartado 7.1.4). Se han desarrollado 2 tipos de encuestas. La primera, encuesta normal, consiste en ponderar de 0 a 10 cada criterio, y es el modo más sencillo y natural en que se realizaría una encuesta en zonas rurales de países en desarrollo. La segunda se basa en el método AHP, muy estudiado en la literatura, y consiste en comparar los criterios por pares mediante una escala predeterminada.

### Anexo B.1. Encuesta normal

Asignar un valor de 0 (no importante) a 10 (muy importante) a cada criterio.

<b>1</b>	<b>Coste</b>	
<b>2</b>	<b>Demanda</b>	
2.1	Energía	
2.2	Potencia	
2.3	Autonomía	
<b>1</b>	<b>Coste</b>	
<b>2</b>	<b>Gestión del sistema</b>	
2.1	Cantidad de microrredes	
2.2	Tamaño de microrredes	
2.3	Alcance de microrredes	
2.4	Instalación de medidores	
<b>1</b>	<b>Coste</b>	
<b>2</b>	<b>Seguridad del suministro</b>	
2.1	Generación solar	
2.2	Equipos de generación	
2.3	Consumo energía individuales	

Coste	Coste de la inversión inicial.
Demanda	Cantidad de electricidad suministrada.
Energía	Consumo de energía de cada punto de consumo.
Potencia	Consumo de potencia de cada punto de consumo.
Autonomía	Días de autonomía requeridos.
Gestión del sistema	Organización comunidad entorno sistema durante vida útil.
Cantidad de microrredes	Número máximo de microrredes.
Tamaño de microrredes	Número mínimo de usuarios por microrred.
Alcance de microrredes	Número máximo de usuarios individuales
Instalación de medidores	Medidores en todos los puntos o sólo en microrred.
Seguridad del suministro	Fiabilidad frente averías y falta de recursos energéticos.
Generación solar	Mínimo porcentaje de la energía generada con paneles.
Equipos de generación	Número mínimo de equipos de generación.
Consumo energía individuales	Mayor porcentaje de energía en usuarios individuales.

## Anexo B.2. Encuesta tipo AHP

### Escala para la comparación

Valor	Explicación
1	Ambas partes son igual de importantes.
3	La primera parte es ligeramente más importante que la segunda.
5	La primera parte es considerablemente más importante que la segunda.
7	La primera parte es mucho más importante que la segunda.
9	La segunda parte no importa frente a la primera.
2,4,6,8	Valores intermedios.

### Preguntas: Asignar un valor de la tabla anterior a cada celda.

<b>1.1</b>	<b>Coste vs. Demanda</b>	
1.2	Energía vs. Potencia	
1.3	Energía vs. Autonomía	
1.4	Potencia vs. Autonomía	
<b>2.1</b>	<b>Coste vs. Gestión del sistema</b>	
2.2	Cantidad de microrredes vs. Tamaño de microrredes	
2.3	Cantidad de microrredes vs. Alcance de las microrredes	
2.4	Cantidad de microrredes vs. Instalación de medidores	
2.5	Tamaño de microrredes vs. Alcance de las microrredes	
2.6	Tamaño de microrredes vs. Instalación de medidores	
2.7	Alcance de las microrredes vs. Instalación de medidores	
<b>3.1</b>	<b>Coste vs. Seguridad del suministro</b>	
3.2	Generación solar vs. Equipos de generación	
3.3	Generación solar vs. Consumo energía individuales y microrredes	
3.4	Equipos de generación vs. Consumo energía individuales y microrredes	

Coste                      Coste de la inversión inicial.

Demanda	Cantidad de electricidad suministrada.
Energía	Consumo de energía de cada punto de consumo.
Potencia	Consumo de potencia de cada punto de consumo.
Autonomía	Días de autonomía requeridos.
Gestión del sistema	Organización comunidad entorno sistema durante vida útil
Cantidad de microrredes	Número máximo de microrredes.
Tamaño de microrredes	Número mínimo de usuarios por microrred.
Alcance de las microrredes	Número máximo de usuarios individuales.
Instalación de medidores	Medidores en todos los puntos o sólo en microrred.
Seguridad del suministro	Fiabilidad frente averías y falta de recursos energéticos.
Generación solar	Mínimo porcentaje de la energía generada con paneles.
Equipos de generación	Número mínimo de equipos de generación.
Consumo energía individuales	Mayor porcentaje de energía en usuarios individuales.

# 11. Referencias

- Afgan NH, Carvalho MG, Hovanov NV. Energy system assessment with sustainability indicators. *Energy Policy* 28 (2000) 603-612.
- AGECC. Energy for a sustainable future – Summary report and recommendations. The secretary-general's *Advisor Group on Energy and Climate Change* (2010).
- Akella AK, Sharma MP, Saini RP. Optimum utilization of renewable energy sources in a remote area. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11 (2007) 894-908.
- Akorede MF, Hizam H, Pouresmaeil E. Distributed energy resources and benefits to the environment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (2010) 724-734.
- Alarcón-Rodríguez A, Ault G, Galloway S. Multi-objective planning of distributed energy resources: A review of the state-of-the-art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (2010) 1353-1366.
- Alonso JA, Lamata MT. Consistency in the analytic hierarchy process: a new approach. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems* 14 (2006) 445-459.
- Alvial-Palavicino C, Garrido-Echeverría N, Jiménez-Estévez G, Reyes L, Palma-Behnke R. A methodology for community engagement in the introduction of renewable based smart microgrid. *Energy for Sustainable Development* 15 (2011) 314-323.
- Alzola JA, Vechiu I, Camblong H, Santos M, Sall, Sowd G. Microgrids project, Part 2: Design of an electrification kit with high content of renewable energy sources in Senegal. *Renewable Energy* 34 (2009) 2151-2159.
- Amador J, Dominguez J. Application of geographical information systems to rural electrification with renewable energy sources. *Renewable Energy* 30 (2005) 1897-1912.
- Anderson T, Doig A. Community planning and management of energy supplies – international experience. *Renewable Energy* 19 (2000) 325-331.
- André FJ, Cardenete MA, Romero C. Using compromise programming for macroeconomic policy making in a general equilibrium framework: theory and application to the Spanish economy. *Journal of the Operational Research Society* (2007) 1-9.
- André FJ, Romero C. On the equivalence between compromise programming and the use of composite compromise metrics. *Working Papers Series WP Econ* 06.33 (2006).
- Aoki K, Nara K, Satoh T, Kitagawa M, Yamanaka K. New approximate optimization method for distribution system planning. *IEEE Transactions on Power Systems* 5 (1990).
- Ashok S. Optimized model for community-based hybrid energy system. *Renewable Energy* 32 (2007) 1155-1164.
- Atamtürk A, Savelsbergh MWP. Integer-programming software systems. *Annals of Operations Research* 140 (2005) 67-124.

- Bala BK, Siddique SA. Optimal design of a PV-diesel hybrid system for electrification of an isolated island—Sandwip in Bangladesh using genetic algorithm. *Energy for Sustainable Development* 13 (2009) 137-142.
- Ballester E, Plà-Santamaría D. Portfolio selection on the Madrid Exchange: a compromise programming model. *International Transactions in Operational Research* 10 (2003) 33-51.
- Baños R, Manzano-Agugliaro F, Montoya FG, Gil C, Alcayde A, Gómez J. Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2011) 1753-1766.
- Bekele G, Tadesse G. Feasibility study of small hydro/PV/wind hybrid system for off-grid rural electrification in Ethiopia. *Applied Energy* 97 (2012) 5-15.
- Bilbao-Terol A, Pérez-Gladish B, Arenas-Parra M, Rodríguez-Uría MV. Fuzzy compromise programming for portfolio selection. *Applied Mathematics and Computation* 173 (2006) 251-264.
- Biswas WK, Bryce P, Diesendorf M. Model for empowering rural poor through renewable energy technologies in Bangladesh. *Environmental Science & Policy* 4 (2001) 333-344.
- Bhattacharyya SC. Review of alternative methodologies for analyzing off-grid electricity supply. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (2012) 677- 694.
- Brans JP, Vincke P, Mareschal B. How to select and how to rank projects: the PROMETHEE method. *European Journal of Operational Research* 24 (1986) 228-238.
- Browne D, O'Regan B, Moles R. Use of multi-criteria analysis to explore alternative domestic energy and electricity policy scenarios in an Irish city-region. *Energy* 35 (2010) 518-528.
- Cai YP, Huang GH, Yang ZF, Lin QG, Tan Q. Community-scale renewable energy systems planning under uncertainty— An interval chance-constrained programming approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (2009) 721-735.
- Camblong H, Sarr J, Niang AT, Curea O, Alzola JA, Sylla EH, Santos M. Micro-grids project, Part I: Analysis of rural electrification with high content of renewable energy sources in Senegal. *Renewable Energy* 34 (2009) 2141-2150.
- Capó GM. Modelo para la ubicación de aerogeneradores y paneles fotovoltaicos en proyectos de electrificación rural con microrredes. *Proyecto Final de Carrera*, Universitat Politècnica de Catalunya (2009).
- Casisi M, Pinamonti P, Reini M. Optimal lay-out and operation of combined heat & power (CHP) distributed generation systems. *Energy* 34 (2009) 2175-2183
- Cavallaro F, Ciraolo L. A multicriteria approach to evaluate wind energy plants on an Italian island. *Energy Policy* 33 (2005) 235-244.
- CEDECAP. II Curso Internacional de Especialización en Sistemas Fotovoltaicos y Microhidroenergía. *Centro de Demostración y Capacitación en Tecnologías Apropriadas*, Cajamarca, Perú (2006).
- CEDECAP. Curso – Taller, Energías renovables para zonas rurales aisladas. *Centro de Demostración y Capacitación en Tecnologías Apropriadas*, Cajamarca, Perú (2012).

- Chatzimouratidis AI, Pilavachi PA. Technological, economic and sustainability evaluation of power plants using the Analytic Hierarchy Process. *Energy Policy* 37 (2009) 778-787.
- Chaurey A, Kandpal TC. A techno-economic comparison of rural electrification based on solar home systems and PV microgrids. *Energy Policy* 38 (2010) 3118-3129.
- Chaurey A, Ranganathana M, Mohanty P. Electricity access for geographically disadvantaged rural communities—technology and policy insights. *Energy Policy* 32 (2004) 1693-1705.
- Chen W, Wiecek MM, Zhang J. Quality utility – A compromise programming approach to robust design. *Journal of Mechanical Design* 121 (1999) 179-187.
- Cherni JA, Dyer I, Henao F, Jaramillo P, Smith R, Olade R. Energy supply for sustainable rural livelihoods. A multi-criteria decision-support system. *Energy Policy* 35 (2007) 1493-1504.
- Copa R, Vásquez E. Estudio técnico-social del consumo energético en el municipio de Morochata. Patrones de consumo energético en poblaciones rurales. Bolivia, Cochabamba (2009).
- Cossi AM, Romero R, Sanches Mantovani JR. Planning of Secondary Distribution Circuits Through Evolutionary Algorithms. *IEEE Transactions On Power Delivery* 20 (2005).
- De Juana JM (coord.), Francisco A, Fernández J, Santos F, Herrero MA, Crespo A. *Energías renovables para el desarrollo*. Thomson Paraninfo (2003).
- Deshmukh MK, Deshmukh SS. Modeling of hybrid renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12 (2008) 235-249.
- Devadas V. Planning for rural energy system: Part I. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 5 (2001) 203-226.
- DFID. Energy for the poor. Underpinning the Millennium Development Goals. *Department of International Development* (2002).
- Diaz-Balteiro L, Romero C. In search of a natural systems sustainability index. *Ecological Economics* 49 (2004) 401-405.
- Díaz Villar D. Confiabilidad de los sistemas fotovoltaicos autónomos: Aplicación a la electrificación rural. *Tesis Doctoral*, Madrid (2003).
- Dorji T, Urmee T, Jennings P. Options for off-grid electrification in the Kingdom of Bhutan. *Renewable Energy* 45 (2012) 51-58.
- Dufo-López R, Bernal-Agustín JL. HOGA (Hybrid Optimization by Genetic Algorithms) software. Disponible en [www.unizar.es/rdufo](http://www.unizar.es/rdufo) (2011).
- Dufo-López R, Bernal-Agustín JL, Yusta-Loyo JM, Domínguez-Navarro JA, Ramírez-Rosado IJ, Lujano J, Aso I. Multi-objective optimization minimizing cost and life cycle emissions of stand-alone PV–wind–diesel systems with batteries storage. *Applied Energy* 88 (2011) 4033-4041.
- Dunnett S, Khennas S, Piggott H. Small wind systems for battery charging. A guide for development workers. *Department for International Development* (2001).
- Easley RF, Valacich JS, Venkataramanan MA. Capturing group preferences in a multicriteria decision. *European Journal of Operational Research* 125 (2000) 73-83.

- Edwards W. How to use multiattribute utility measurement for social decision making. *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics* 7 (1977) 326-340.
- Ekren BY, Ekren O. Simulation based size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage under various load and auxiliary energy conditions. *Applied Energy* 86 (2009) 1387–1394.
- El Bassam N. Renewable energy for rural communities. *Renewable Energy* 24 (2001) 401-408.
- Elma E, Selamogullari US. A comparative sizing analysis of a renewable energy supplied stand-alone house considering both demand side and source side dynamics. *Applied Energy* 96 (2012) 400-408.
- Eppel T. Description and procedure invariance in multiattribute utility measurement. School of Management, Purdue Univ., West Lafayette, IN, (1992).
- Erdinc O, Uzunoglu M. Optimum design of hybrid renewable energy systems: Overview of different approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (2012) 1412-142.
- Escobar R. Planificación energética rural para zonas aisladas utilizando energías renovables. Una propuesta para el desarrollo energético local. *Hidrorred*, Red Latinoamericana de Microhidroenergía (2009).
- Escobar R, Vilar D, Velo E, Ferrer-Martí L, Domenech B. Promoting and improving renewable energy projects through local capacity development. *Modeling and optimization of renewable energy systems*, Ed. Intech (2012).
- ESMAP. Best practice manual: Promoting decentralized electrification system. *Energy Sector Management Assistance Program* (2001).
- Ferrer-Martí L, Garwood A, Chiroque J, Escobar R, Coello J, Castro M. A community small-scale wind generation project in Peru. *Wind Engineering. Special Issue on Small Wind Energy for Developing Countries* (2010) 277-288.
- Ferrer-Martí L, Pastor R, Capó GM, Velo E. Optimizing microwind rural electrification projects. A case study in Peru. *Journal of Global Optimization* 50 (2011) 127-143.
- Ferrer-Martí L, Garwood A, Chiroque J, Ramírez B, Marcelo O, Garfí M, Velo E. Evaluating and comparing three community small-scale wind electrification projects. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 16 (2012) 5379-5390.
- Fichtner J. On deriving priority vectors from matrices of pairwise comparisons. *Socio-Economic Planning Sciences* 20 (1986) 341-345.
- Fomin FV, Kratsch D. Exact exponential algorithms. Springer Heidelberg Dordrech London New York (2010).
- Forman E, Peniwati K. Aggregating individual judgments and priorities with the Analytic Hierarchy Process. *European Journal of Operational Research* 108 (1998) 165-169.
- Garfí A, Ferrer-Martí L, Bonoli A, Tondelli S. Multicriteria analysis for improving strategic environmental assessment of water programs. A case study in semi-arid region of Brazil. *Journal of Environmental Management* 92 (2011) 665-675.



- Georgopoulou E, Lalas D, Papagiannakis L. A Multicriteria Decision aid approach for energy planning problems: The case of renewable energy option. *European Journal of Operational Research* 103 (1997) 38-54.
- Gitrakos GP, Tsoutsos TD, Mouchtaropoulos PG, Naxakis GD, Stavrakakis G. Sustainable energy planning based on a stand-alone hybrid renewable energy/hydrogen power system: Application in Karpathos Island, Greece. *Renewable Energy* 34 (2009) 2562-2570.
- Gonen T, Foote BL. Distribution-system planning using mixed-integer programming. *IEEE Proceedings* 128C (1981).
- Greening LA, Bernow S. Design of coordinated energy and environmental policies: use of multi-criteria decision-making. *Energy Policy* 32 (2004) 721-735.
- Gupta CL. Role of renewable energy technologies in generating sustainable livelihoods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 7 (2003) 155-174.
- Gupta A, Saini RP, Sharma MP. Modeling of hybrid energy system Part I: Problem formulation and model development. *Renewable Energy* 36 (2011) 459-465.
- Hashimoto A, Wu DA. A DEA-compromise programming model for comprehensive ranking. *Journal of Operational Research of Japan* 47 (2004) 73-81.
- Henríquez B. Fotovoltaica – Manual de diseño e instalación. Solar Energy International (2003).
- Hiremath RB, Shikha S, Ravindranath NH. Decentralized energy planning, modeling and application: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11 (2007) 729-752.
- Hobbs BF, Chankong V, Hamadeh W, Stakhiv EZ. Does choice of multicriteria method matter? An experiment in water resources planning. *Water Resources Research* 28 (7) (1992) 1767-1779.
- Hobbs BF, Meier PM. Multicriteria methods for resource planning: An experimental comparison. *IEEE Transactions on Power Systems* 9 (1994) 1811-1817.
- Huacuz JM. Energía solar para el México rural. Experiencia y lecciones aprendidas. *Gerencia de Energías No Convencionales, Instituto de Investigaciones Eléctricas, Cuernavaca, México* (2006).
- IEA, International Energy Association. *World energy outlook* (2011).
- Jebaraj S, Iniyamb S. A review of energy models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 10 (2006) 281-311.
- Jiayi H, Chuanwen J, Rong X. A review on distributed energy resources and MicroGrid. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12 (2008) 2472-2483.
- Kaldellis JK, Zafirakis D. Optimum sizing of stand-alone wind-photovoltaic hybrid systems for representative wind and solar potential cases of the Greek territory. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 107-108 (2012) 169-178.
- Kallas Z, Gómez-Limón JA. Valoración de la multifuncionalidad agraria: una aplicación conjunta de la valoración contingente y el proceso analítico jerárquico. *XX Congreso Internacional de Economía Aplicada ASEPELT, La Laguna* (2006).

- Kanagawa M, Nakata T. Assessment of access to electricity and the socio-economic impacts in rural areas of developing countries. *Energy Policy* 36 (2008) 2016-2029.
- Karger CR, Hennings W. Sustainability evaluation of decentralized generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (2009) 583-593.
- Keeney RL, Raiffa H. Decisions with multiple objectives: preferences and value tradeoffs. New York, Wiley (1976).
- Keller S, Naciri S, Nejmi A, Dos Ghali J. Simulation-based decision support tool for electrification of isolated areas using a network with multiple renewable sources. *International Conference on Clean Electrical Power* (2007).
- Kenfack J, Neirac FP, Tatietsé TT, Mayer D, Fogue M, Lejeune A. Microhydro-PV-hybrid system: Sizing a small hydro-PV-hybrid system for rural electrification in developing countries. *Renewable Energy* 34 (2009) 2259-2263.
- Kirubi C, Jacobson A, Kammen DM, Mills A. Community-Based Electric Micro-Grids Can Contribute to Rural Development: Evidence from Kenya. *World Development* 37 (2009) 1208-1221.
- Klamler C. On the closeness aspect of three voting rules: Borda – Copeland – Maximin. *Group Decision and Negotiation* 14 (2005) 233-240.
- Kumar Basua A, Chowdhury SP, Chowdhury S, Paul S. Microgrids: Energy management by strategic deployment of DERs – A comprehensive survey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2011) 4348-4356.
- Kumar Lal D, Bhusan Dash B, Akella AK. Optimization of PV/Wind/Micro-Hydro/Diesel Hybrid Power System in HOMER for the Study Area. *International Journal on Electrical Engineering and Informatics* 3 (2011) 307-325.
- Lambert TW, Hittle DC. Optimization of autonomous village electrification systems by simulated annealing. *Solar Energy*, 68 (2000) 121-132.
- Landberg L, Myllerup L, Rathmann O, Petersen EL, Jorgensen BH, Badger J, Mortensen NG. Wind resource estimation – An overview. RisøNational National Laboratory. *Wind Energy* 6 (2003) 261-271.
- Leary J, While A, Howell R. Locally manufactured wind power technology for sustainable rural electrification. *Energy Policy* 43 (2012) 173-183.
- Lew DJ. Alternatives to coal and candles: wind power in China. *Energy Policy* 28 (2000) 271-286.
- Linares P. Una aplicación de la programación multiobjetivo a la planificación eléctrica. CIEMAT-IEE (2005).
- Loken E. Use of multicriteria decision analysis methods for energy planning problems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11 (2007) 1584-1595.
- Luna-Rubio R, Trejo-Perea M, Vargas-Vázquez D, Ríos-Moreno GJ. Optimal sizing of renewable hybrids energy systems: A review of methodologies. *Solar Energy* 86 (2012) 1077-1088.
- Manwell JF, Rogers A, Hayman G, Avelar CT, McGowan JG, Abdulwahid U, Wu K. HYBRID2 – A hybrid system simulation model. Theory manual. *Renewable Energy Research Laboratory* (2006).

- Mendes G, Ioakimidis C, Ferrao P. On the planning and analysis of integrated community energy systems: A review and survey of available tools. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2011) 4836- 4854.
- Merino GG, Jones DD, Clements DL, Miller D. Fuzzy compromise programming with precedence order in the criteria. *Applied Mathematics and Computation* 13 (2003) 185-205.
- Mitjà A, Torra C, Satué D, Peters C, Vallvé X, Vosseler I. MSG – The sustainable alternative for rural electrification. *Institut Català d’Energia* (2003).
- Modi V, McDade S, Lallement D, Saghir J. Energy and the Millennium Development Goals. Energy Sector Management Assistance Programme, United Nations Development Programme, UN Millennium Project, and World Bank (2005).
- Mortensen NG, Landberg L, Troen I, Petersen EL. Wind Atlas Analysis and Application Program (WAsP). Vol. 1: Getting Started. Vol. 2: User’s Guide. Risø National Laboratory (1993).
- Nieuwenhout FDJ, Van Dijk A, Lasschuit PE, Van Roekel G, Van Dijk VAP, Hirsch D, Arriaza H, Hankins M, Sharma BD, Wade H. Experience with solar home systems in developing countries: A review. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* (2001) 455-474.
- Nijkamp P, Reitveld P, Voogd H. Multicriteria Evaluation in Physical Planning. North Holland, Amsterdam. *Elsevier Science* (1990).
- Notton G, Diaf S, Stoyanov L. Hybrid photovoltaic/wind energy systems for remote locations. *Energy Procedia* 6 (2011) 666-677.
- NYSERDA. Wind Resource Assessment Handbook – Final report. AWS Truepower (2010).
- Ochoa JL. Criterios de evaluación y análisis de alternativas para el diseño de proyectos de electrificación rural con energía eólica y solar en países en desarrollo. *Proyecto Final de Máster*, Universitat Politècnica de Catalunya (2009).
- Ostergaard PA. Reviewing optimization criteria for energy systems analyses of renewable energy integration. *Energy* 34 (2009) 1236-1245.
- Paciornik N, Ferland JA, Cleroux R. The electrical distribution network planning problem. *International Transaction in Operational Research* 10 (2003) 77-87.
- Poff B, Teclé A, Neary DG, Geils B. Compromise programming in forest management. *Journal of the Arizona-Nevada Academy of Science* 42 (2010) 44-60.
- Pohekar SD, Ramachandran M. Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 8 (2004) 365-381.
- Polatidis H, Haralambopoulos DA, Munda G, Vreeker R. Selecting an appropriate multi-criteria analysis technique for renewable energy planning. *Energy Sources* 1 (2006) 181-193.
- Ponce de Leao MT, Matos MA. Multicriteria distribution network planning using simulated annealing. *International Transactions in Operational Research* 6 (1999) 377-391.
- Quiggin D, Cornell S, Tierney M, Buswell R. A simulation and optimization study: Towards a decentralized microgrid, using real world fluctuation data. *Energy* 41 (2012) 549-559.

- Ramanathan R, Ganesh LS. Energy resource allocation incorporating qualitative and quantitative criteria: An integrated model using goal programming and AHP. *Socio-Economic Planning Science* 29 (3) (1995) 197-218.
- Ramírez B, Mantilla W. Diagnóstico socioeconómico del caserío de El Alumbre. Soluciones Prácticas – ITDG, Cajamarca, Perú (2007).
- Ramírez B, Mantilla W. Diagnóstico socioeconómico del caserío de Alto Perú. Soluciones Prácticas – ITDG, Cajamarca, Perú (2009).
- Ramon-Marin M, Ferrer J, Albet V, Sumper A, Villafafila-Robles R. Reducing uncertainties caused by distributed generation in medium voltage network planning. *CIREN Workshop*, Lyon (2010).
- Ranaboldo M. Evaluación del recurso eólico a escala micro. Aplicación a proyectos de electrificación rural. *Proyecto Final de Máster*, Universitat Politècnica de Catalunya (2009).
- Ren H, Gao W. A MILP model for integrated plan and evaluation of distributed energy systems. *Applied Energy* 87 (2010) 1001-1014.
- Rojas JC. Planificación del suministro eléctrico en áreas rurales de los países en vías de desarrollo: un marco de referencia para la toma de decisiones. *Tesis Doctoral*, Universidad de Zaragoza (2012).
- Romero C. Teoría de la decisión multicriterio: Conceptos, técnicas y aplicaciones. Ed. Alianza editorial (1993).
- Romero C. Análisis de las decisiones multicriterio. Ed. Isdefe (1996).
- Roy B, Vincke P. Multicriteria analysis: survey and new directions. *European Journal of Operational Research* 8 (1981) 207-218.
- Saaty TL. The analytic hierarchy process. *Wiley*, New York (1980).
- Saaty TL. Decision-making with the AHP: Why is the principal eigenvector necessary? *European Journal of Operational Research* 145 (2003) 85-91.
- San Cristóbal JR. Multi-criteria decision-making in the selection of a renewable energy project in Spain: The VIKOR method. *Renewable Energy* 36 (2011) 498-502.
- Savic D. Single-objective vs. multi-objective optimization for integrated decision support. In: *Proceedings of the first biennial meeting of the international environment modeling and software society* vol. 1 (2007) 7-12.
- Schäfer M, Kebir N, Neumann K. Research needs for meeting the challenge of decentralized energy supply in developing countries. *Energy for Sustainable Development* 15 (2011) 324-329.
- Scott G. Strategic planning for high-tech product development. *Technology Analysis & Strategic Management* 13 (2001) 343-364.
- Seitz M. Patagonia wind aids remote communities, *BBC News* (2006).
- Selim Ustun T, Ozansoy C, Zayegh A. Recent developments in microgrids and example cases around the world – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2011) 4030-4041.

- Sempértegui R, Bautista J, Griño R, Pereira J. Models and procedures for electric energy distribution planning. A review. *Proceedings of the 15<sup>th</sup> IFAC World Congress*, Barcelona (2002).
- Shiau JT, Wu FC. Compromise programming methodology for determining instream flow under multiobjective water allocation criteria. *Journal of American Water Resources Association* 42 (2006) 1179-1191.
- Teclé A, Shrestha BP, Duckstein L. A multiobjective decision support system for multiresource forest management. *Group Decision and Negotiation* 7 (1998) 23-40.
- Ter-Gazarian AG, Kagan N. Design model for electrical distribution Systems considering renewable, conventional and energy storage units. *IEE Proceedings-C Generation, Transmission and Distribution* 139 (1992) 499-504.
- They R, Zarate P. Energy planning: A multi-level and multicriteria decision making structure proposal. *CEJOR* 17 (2009) 265-274.
- Triadó J, Ferrer-Martí L, García-Villoria A, Pastor R. Heurística basada en PLEM para resolver proyectos de electrificación rural. *XVI Congreso de Ingeniería de Organización* (2012).
- Turkay, B. Distribution system planning using mixed integer. *ELEKTRIK* 6 (1998).
- Tzeng GH, Shiau JT, Lin CY. Application of multicriterio decision making to the evaluation of new energy system development in Taiwan. *Energy* 17 (1992) 983-992.
- Velo E. Proyectos de abastecimiento de energía en zonas rurales. *Curso de Ingeniería Sin Fronteras* (2005).
- Velo E, Sánchez T, Escobar R, Sneij J, Vilar D. Energía y cooperación para el desarrollo. *Curso de introducción de Ingeniería Sin Fronteras* (2007).
- VMEH. Manual para la elaboración de proyectos de electrificación rural (MEPER). *Viceministerio de Energía e Hidrocarburos de Bolivia – Banco Mundial* (2000).
- Wall DL, Thompson GL, Northcote-Green JED. An optimization model for planning radial distribution Networks. *IEEF Transactions on Power Apparatus and Systems* PAS-98 (1979).
- Wang J-J, Jing Y-Y, Zhang C-F, Zhao J-H. Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (2009) 2263-2278.
- Williams A, Maher P. Mini-grid design for rural electrification: optimization and applications. In: *Universitas 21 Energy Conference*. Birmingham 8-10 Sept. (2008).
- WSSD. Draft plan of implementation. *World Summit on Sustainable Development* (2002).
- Yadoo A, Cruickshank H. The role for low carbon electrification technologies in poverty reduction and climate change strategies: A focus on renewable energy mini-grids with case studies in Nepal, Peru and Kenya. *Energy Policy* 42 (2012) 591-602.
- Yang HT, Chen SL. Incorporating a multicriteria decision procedure into the combined dynamic programming/production simulation algorithm for generation expansion planning. *IEEE Transactions on Power Systems* 4 (1989) 165-175.
- Yu PL. A class of solution for group decision problem. *Management Science* 19 (1973) 936-946.

- Zahedi A. Solar photovoltaic (PV) energy; latest developments in the building integrated and hybrid PV systems. *Renewable Energy* 31 (2006) 711-718.
- Zeleny M. Compromise programming. *Multiple criteria decision making*. University of South Carolina Press, Columbia (1973) 263-301.
- Zeleny M. A concept of compromise solutions and the method of the displaced ideals. *Computers and Operational Research* 1 (1974) 479-496.
- Zhang X, Gu S, Liu W, Gan L. Wind energy technology development and diffusion: a case study of Inner Mongolia, China. *Natural Resources Forum* 25 (2001) 33-42.
- Zhou P, Ang BW, Poh KL. Decision analysis in energy and environmental modeling: An update. *Energy* 31 (2006) 2604-2622.
- Zhou W, Lou C, Li Z, Lu L, Yang H. Current status of research on optimum sizing of stand-alone hybrid solar-wind power generation systems. *Applied Energy* 87 (2010) 380-389.
- Zitzler E. Two decades of evolutionary multi-criterion optimization: A glance back and a look ahead (Presentation). In: *IEEE symposium on computational intelligence in multi criteria decision making (MCDM)* (2007).