

Resumen

Una tercera parte de la población mundial, casi en su totalidad en comunidades rurales en países en desarrollo, carece de electricidad. Los sistemas de electrificación basados en fuentes de energía renovable han demostrado ser adecuados para proveer de energía eléctrica a comunidades aisladas de forma autónoma. En la actualidad la instalación de sistemas individuales microeólicos y fotovoltaicos son opciones utilizadas para satisfacer este fin.

El objetivo de este trabajo es desarrollar de un modelo matemático de programación lineal y un proceso de resolución para determinar el tipo de tecnología y la ubicación de los diferentes equipos para abastecer la demanda energética de una comunidad rural, ya sea mediante equipos individuales como mediante una o varias microrredes. La creación de microrredes, permite el uso de equipos de mayor potencia por lo que se reducen costes de inversión inicial y no se limita al usuario al recurso energético disponible de su ubicación. El modelo permite que el usuario se alimente de la tecnología más adecuada en función del recurso energético de la zona. Como datos de partida, el modelo utiliza el recurso energético de la zona, tanto eólico como solar, y la demanda de energía y potencia de los usuarios, que se establece mediante una evaluación socioeconómica de la comunidad. El modelo y el proceso de resolución se validan a través de su aplicación en tres casos reales con tres comunidades, Cerro Alto, Alto Perú y El Alumbre, situadas en la región norte de la sierra andina del Perú.

Se han desarrollado diferentes modelos matemáticos en función de las variables utilizadas, binarias o enteras, y en función de la tecnología (eólica, solar e híbrida). Antes de realizar una experimentación detallada de cada comunidad se ha comparado que modelo en función de las variables utilizadas obtiene resultados más satisfactorios, se determina que el modelo de variables enteras obtiene resultados más satisfactorios. El modelo de variables enteras es el utilizado en la experimentación detallada.

Como procesos de resolución se estudian y se analizan dos alternativas para obtener soluciones más satisfactorias y reducir los tiempos de cálculo. El primer proceso directo considera como puntos de generación tanto a los puntos de consumo como a puntos creados mediante una cuadrícula por el modelizador, así pues, pudiéndose colocar equipos de generación en punto de alto recurso energético. El segundo proceso por pasos solo considera como posibles puntos de generación a los puntos de consumo, posteriormente se gráfica la solución y se secciona la comunidad añadiendo puntos de cuadrícula creando problemas más pequeños de más sencilla solución. Mediante la experimentación desarrollada se determina que el segundo método de resolución obtiene soluciones más satisfactorias.

Finalmente los resultados obtenido con el modelo se comparan la instalación de equipos individuales y la diferentes tecnologías. Los resultados muestran que el uso de microrredes reduce el coste considerablemente con respecto a la instalación de equipos individuales y que la solución tecnológica más adecuada para electrificar una comunidad es el uso de tecnología híbrida, instalando equipos individuales con generación solar en usuarios aislados y creando microrredes con generación eólica en zonas donde la dispersión de usuarios es baja.



Sumario

Resumen	1
Sumario.....	3
1 Introducción.....	5
2 Descripción del sistema	6
2.1 Electrificación rural	6
2.2 Recursos energéticos.....	7
2.2.1 Energía eólica y recurso eólico para electrificación rural	7
2.2.2 Energía solar y recurso solar para electrificación rural	8
2.3 Sistemas de generación eléctrica	8
2.3.1 Sistemas microeólicos	9
2.3.2 Sistemas fotovoltaicos	9
2.3.3 Sistemas híbridos (eólico-solar)	9
2.3.4 Configuración de los sistemas	9
2.4 Componentes de generación	11
2.4.1 Aerogenerador	11
2.4.2 Panel fotovoltaico	14
2.5 Componentes de la instalación	15
2.5.1 Batería o acumulador.....	15
2.5.2 Regulador eólico.....	16
2.5.3 Regulador solar.....	16
2.5.4 Inversor.....	17
2.5.5 Conductor	17
2.5.6 Microrred	18
2.5.7 Medidor	19
2.6 Demanda de energía y de potencia eléctricas	19
2.7 Relación entre componentes del sistema	20
3 Modelización matemática del sistema	22
3.1 Consideraciones de diseño	22
3.1.1 Evaluación de recurso eólico	22
3.1.2 Evaluación de recurso solar	22
3.1.3 Esquema y diseño de la microrred.....	22
3.1.4 Pérdidas en la instalación	23
3.1.5 Capacidad de las baterías.....	24
3.2 Modelos de PL	24
3.2.1 Estructura de los modelos de programación matemática lineal	25
3.2.2 Programación Lineal Entera y Mixta (PLEM)	25
3.2.3 Resolución de modelo matemáticos lineales	25
3.3 Formulación matemática planteada	27
3.3.1 Parámetros del modelo de PLEM.....	27
3.3.2 Modelo de variables enteras con tecnología eólica.	29
3.3.3 Modelo de variables binarias con tecnología eólica.....	33
3.3.4 Modelo de variables enteras con tecnología solar	35
3.3.5 Modelo de variables enteras con tecnología híbrida	37



4	Experimentación computacional realizada	39
4.1	Descripción de comunidades.....	39
4.1.1	Cerro Alto	39
4.1.2	Alto Perú	41
4.1.3	El Alumbre.....	43
4.2	Experimentación preliminar	45
4.2.1	Experimentación realizada.....	45
4.2.2	Comparación de modelos.....	46
4.2.3	Influencia de puntos de cuadrícula.....	49
4.3	Propuesta de procesos de resolución	49
5	Resultados y análisis del proceso de resolución	52
5.1	Experimentación realizada	52
5.2	Resultados de Cerro Alto	53
5.3	Resultados de Alto Perú	55
5.4	Resultados de El Alumbre.....	56
5.5	Análisis del proceso.....	58
6	Resultados y análisis de las soluciones tecnológicas	59
6.1	Resultados de Cerro Alto	59
6.2	Resultados de Alto Perú	62
6.3	Resultados de El Alumbre.....	65
7	Estudio del impacto ambiental y socio-económico.....	68
7.1	Impacto medioambiental	68
7.2	Impacto socio-económico.....	68
8	Presupuesto	70
8.1	Presupuesto.....	70
8.2	Viabilidad económica.....	70
	Conclusiones	73
	Agradecimientos	75
	Referencias bibliográficas.....	75

1 Introducción

Los sistemas de electrificación basados en fuentes de energía renovables han demostrado ser adecuados para proveer de energía eléctrica a comunidades aisladas de forma autónoma (Hirematha *et al*, 2007)). En concreto, la electrificación mediante energía eólica y solar es una de las opciones técnicas que se ha utilizado recientemente en proyectos implementados en la sierra norte de Perú (Coello y Chiroque, 2008b). Debido a la característica dispersión entre domicilios en las comunidades, hasta el momento estos proyectos han tendido a instalar microaerogeneradores y paneles fotovoltaicos individuales por punto de consumo. Como alternativa se propone considerar tanto los equipos individuales aislados como la generación y distribución de electricidad mediante una o varias microrredes. La localización de los diferentes equipos de generación y el diseño de la(s) microrred(es) se define considerando el recurso energético cada punto y la localización y la demanda de los puntos de consumo. La creación de microrredes reduce el coste inicial de la instalación por el uso de equipos de mayor potencia y no limita al usuario al

En la actualidad existen herramientas de ayuda a la toma de decisiones que definen una red eléctrica autónoma, pero considerando un número muy reducido de los puntos de generación, y que entran en más o menos detalle en diferentes aspectos. Por ejemplo, Keler *et al* (2007) presentan una herramienta de simulación que decide una combinación de fuentes de generación, pero limita a uno los puntos de generación para cada tipo de energía considerada, y sólo proporciona un esquema general de la red. Paralelamente se han desarrollado estudios para el diseño y optimización de la distribución, algunos basados en modelos de programación lineal entera mixta (PLEM) para la obtención de la solución óptima. La mayoría de estos trabajos se desarrollan para entornos urbanos.

En este trabajo se desarrolla un modelo de PLEM para el diseño óptimo de sistemas de electrificación rural basados en tres tipos de tecnología: eólica, solar e híbrida. La solución debe proporcionar la ubicación de los puntos de generación dentro de toda la comunidad y el diseño de la microrred, seleccionando los conductores y considerando las caídas de tensión. El modelo también proporciona la ubicación y el dimensionado de otros equipos de la instalación, por ejemplo, baterías, inversores y reguladores. Este trabajo amplía el modelo presentado en Ferrer *et al* (2009), incorporando, entre otros, el uso de diferentes tecnologías. Como dato de entrada se parte de la energía que podría generar cada tipo de aerogenerador y panel fotovoltaico en cada punto en cada punto de posible ubicación. El criterio de resolución considerado es la minimización de la inversión inicial de la instalación del sistema.

Se desarrolla dos tipos de modelos, en función de las variables utilizadas, binarias o enteras y tres tipos de tecnología. Se proponen diferentes procesos de resolución para obtener mejores soluciones. Estos procesos se comparan entre ellos. La validación del modelo y la comparación de procesos de resolución se realiza mediante la aplicación a tres casos reales implementados en la sierra norte de Perú.



2 Descripción del sistema

En este capítulo se presentan los sistemas autónomos de electrificación rural. Se describen y se compara las diferentes opciones tecnológicas destacando los sistemas microeólicos y fotovoltaicos, que son el objeto de este proyecto. Para estas alternativas se detalla la evaluación de recurso, las posibles configuraciones del sistema y las características de los componentes de cada una de ellas.

2.1 Electrificación rural

Una tercera parte de la población mundial, casi es su totalidad en los países en desarrollo, carece de electricidad. La estrategia natural para aumentar el acceso a la electricidad en zonas rurales es mediante la extensión de la red eléctrica, esta solución es muy cara es por ello que los sistemas de electrificación, aislados y autónomos, han demostrado ser adecuados para proveer de energía eléctrica a comunidades rurales.

A continuación se realiza una breve explicación y comparación de sistemas de electrificación descentralizados y autónomos (Velo *et al*, 2005):

Energía hidráulica: Aprovecha la energía potencial acumulada en el agua para la generación de electricidad mediante una turbina hidráulica. El recurso es variable, en las diferentes estaciones del año y, por lo tanto, el dimensionamiento de la turbina se realiza teniendo en cuenta la época de menor caudal. La energía generada es continua y constante durante todo el día, los usuarios pueden disponer de ella en cualquier instante y no son necesarios equipos de acumulación. En general la energía hidráulica tiene la mejor relación de kilowatio instalado por coste de instalación de entre el resto de posibilidades. Por esta razón, si una comunidad rural tiene recurso hidráulico se tiende a escoger esta alternativa.

Energía eólica: Aprovecha la energía del viento para la obtención de energía eléctrica mediante un aerogenerador: El viento incide sobre las palas del aerogenerador, provoca la rotación de las palas y el generador transforma esta energía cinética en energía eléctrica. El recurso eólico es variable durante el día, durante días y durante diferentes épocas del año. El consumo por parte de los usuarios también es variable por lo tanto es necesario colocar equipos de acumulación de energía ya que la generación y el consumo no son simultáneos. En general, la evaluación del recurso eólico es compleja.

Energía solar: Aprovecha la radiación solar para la obtención de energía eléctrica. El proceso de transformación de energía solar en energía eléctrica se produce en un elemento semiconductor que se denomina célula fotovoltaica. La energía generada depende de la radiación solar que incide en las celdas fotovoltaicas, normalmente no constante durante el día, y nula durante la noche. Como la energía generada es intermitente, como también lo es el consumo por parte de los usuarios, se hace necesario el uso de equipos de acumulación. En general la evaluación de recurso es sencilla, pero el ratio kilowatio instalado por el coste de instalación no es muy bueno.

Grupo diesel: Aprovecha la energía química del diesel mediante combustión para la generación de energía eléctrica. Su coste es muy elevado, considerando como costes, los costes de adquisición y los costes de desplazamiento para su obtención. Es un recurso no reproducido localmente y, por tanto, se crea una dependencia sobre el exterior.

Dependiendo de las necesidades de suministro de electricidad, también pueden instalarse sistemas híbridos que se basan en la combinación de diferentes tecnologías como sistemas eólicos con sistemas fotovoltaicos, o sistemas eólicos con microturbinas hidráulicas u otros.

Tipo de energía	Ventajas	Inconvenientes
<i>Energía hidráulica</i>	Generación de energía constante No necesita sistemas de acumulación. Tiene una muy buena relación de kilowatio instalado por coste de instalación. Recurso energético local.	Necesidad de una obra civil importante.
<i>Energía eólica</i>	Tiene una buena relación de kilowatio instalado por coste de instalación. No necesidad una gran obra civil. Recurso energético local.	Generación intermitente. Necesidad de sistemas de acumulación.
<i>Energía solar</i>	No necesidad de una gran obra civil. Recurso energético local.	Generación intermitente. Necesidad de sistemas de acumulación. Tiene una baja relación de kilowatio instalado por coste de instalación.
<i>Grupo diesel</i>	No necesidad de una gran obra civil.	La comunidad rural depende de agentes externos, recurso no local. Coste elevado. Generación de gases de efecto invernadero.

Tabla 2.1 Comparación de diferentes generaciones eléctricas

Finalmente se concluye que la instalación un grupo diesel es una mala solución tecnológica debido a la poca sostenibilidad. Se considera que la energía hidráulica es la mejor solución tecnológica, pero no obstante, no existe recurso hídrico en todos los lugares, es por ello que esta situación los sistemas eólicos y solares son una buena solución.

2.2 Recursos energéticos

En los siguientes apartados se describe recurso energético y los sistemas de generación eólicos y solares, que son el objeto de este trabajo.

2.2.1 Energía eólica y recurso eólico para electrificación rural

La energía eólica es la energía que proviene del viento. Definimos recurso eólico como cantidad de energía eólica que existe en un punto o superficie. Una característica es que el viento tiene tres tipos de variabilidades: temporal, superficial y dependiendo de la zona terrestre.

Dependiendo de la zona terrestre: Es la variabilidad que sufre el viento dependiendo a la zona del globo terráqueo. El efecto combinado del desigual calentamiento de la tierra y de las fuerzas centrífugas y de Coriolis debidas a la rotación de la tierra, da lugar a vientos a escala terráquea, con unas tendencias más o menos permanentes.



Variabilidad temporal: Es la variabilidad que sufre el viento a lo largo del tiempo. El viento no es constante a lo largo del tiempo, éste sufre variaciones de manera horaria, diaria y de forma estacional.

Variabilidad superficial: Es la variabilidad que sufre el viento debido a la forma de la superficie. Existen dos tipos de variaciones superficiales:

- Las variaciones horizontales nos indican que, en una misma comunidad, puntos cercanos pueden tener recursos eólicos muy diferentes, debido a la topografía y orografía del terreno.
- Las variaciones verticales nos indican que el recurso eólico varía con la altura, esta variación vertical es producida por la rugosidad del terreno.

Todos estos factores hacen que el cálculo del recurso eólico de una zona sea complejo e imprescindible antes de realizar un proyecto.

2.2.2 Energía solar y recurso solar para electrificación rural

La energía solar es la energía que proviene del sol. Definiremos recurso solar como la radiación solar que incide sobre un punto o una superficie. La generación eléctrica mediante la conversión de radiación solar depende de un combustible con un proceso de transformación que no genera residuos, inagotable, distribuido por toda la superficie del planeta, especialmente intenso en las regiones más pobres y del que se conoce con bastante precisión su variación en el tiempo, al menos en cuanto a los valores medios (Velo et al, (2005)):

El recurso solar no es constante pero es menos intermitente entre días consecutivos que el recurso eólico. El recurso varía durante el día, estacionalmente y dependiendo de la zona terrestre en la que nos encontremos.

Dependiendo de la zona terrestre: Es la variabilidad que sufre la radiación solar dependiendo de la zona del globo terráqueo.

Variabilidad temporal: Durante el día la radiación solar durante la noche es nula, en la Figura 2.2 podemos ver un día de radiación perfecta y en la Figura 2.3 un día con nubes. Varía también estacionalmente ya que las condiciones meteorológicas son diferentes en las diferentes estaciones del año.

Si se compara el recurso eólico con el recurso solar para instalaciones a pequeña escala hay que destacar que la radiación solar no sufre a penas variación superficial con respecto al recurso eólico.

2.3 Sistemas de generación eléctrica

La configuración del sistema de generación eléctrica es función del tipo de energía que utiliza. A continuación se muestran las diferentes alternativas que se utilizan a lo largo de este trabajo.

2.3.1 Sistemas microeólicos

Los componentes principales de un sistema microeólico son los que muestran a continuación:

1. *Aerogenerador*: Genera energía eléctrica a partir de la fuerza del viento.
2. *Regulador eólico*: El regulador es el encargado de proteger las baterías de sobrecargas y descargas excesivas. Es el encargado de transformar la corriente alterna (AC), generada por el aerogenerador, a corriente continua (DC) para su posterior almacenaje en la baterías.
3. *Batería*: Una batería, también conocido como acumulador, es un dispositivo que mediante procesos electroquímicos es capaz de almacenar energía eléctrica.
4. *Inversor*: Un inversor, también llamado ondulator, es un circuito utilizado para convertir corriente continua en corriente alterna.
5. *Conductor*: Transporta la energía eléctrica de un punto a otro.
6. *Medidor*: Un medidor es un aparato que limita el consumo de energía de un usuario.

2.3.2 Sistemas fotovoltaicos

Los componentes principales de un sistema fotovoltaico son los que muestran a continuación:

1. *Panel fotovoltaico*: Genera energía eléctrica a partir de la radiación solar.
2. *Regulador solar*: Protege las baterías de sobrecargas y descargas profundas. También gradúa la tensión del sistema.

El resto de elementos, baterías, inversor, conductores y medidores, son iguales a los utilizados en los sistemas microeólicos.

2.3.3 Sistemas híbridos (eólico-solar)

Los sistemas híbridos eólico-solar son sistemas que están compuestos por las dos tecnologías anteriormente explicadas, aprovechan tanto la energía eólica, mediante un aerogenerador, como la energía solar, mediante un panel fotovoltaico. Los elementos utilizados son iguales a los utilizados en los sistemas eólicos o solares. La fiabilidad de los sistemas híbridos en general es mayor con respecto a los sistemas eólicos y solares, normalmente en los días de poca radiación el viento sopla con más fuerza y viceversa, así pues se contrarrestan las carencias de cada uno de los sistemas. También son necesarios sistemas de acumulación ya que el recurso es intermitente.

2.3.4 Configuración de los sistemas

La configuración de los sistemas microeólicos, fotovoltaicos e híbridos se separan en dos grupos dependiendo del número de usuarios que proveen de energía.

Sistemas individuales: Cada usuario tiene su propio sistema individual, ya sea eólico (Figura 3.4), solar (Figura 3.5) o híbrido (Figura 3.6). La distribución se limita a los puntos de consumo que tiene el usuario en su vivienda.



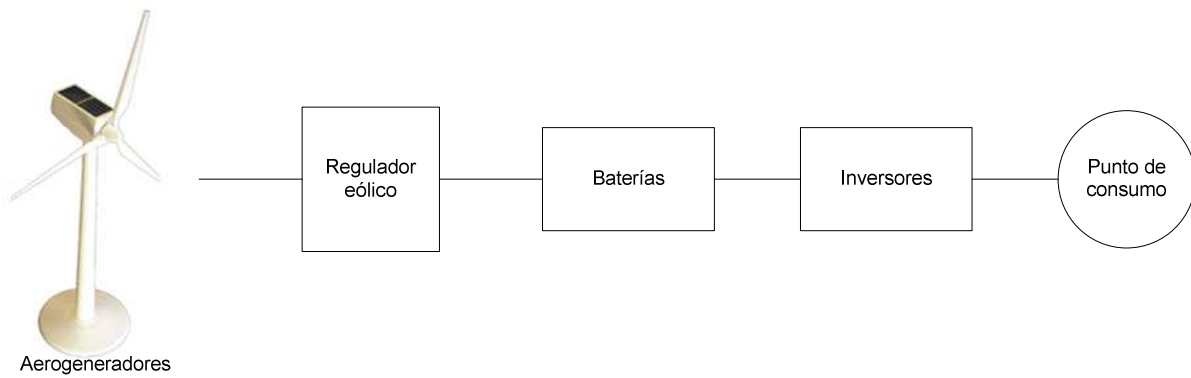


Figura 2.1 Sistema microeólico

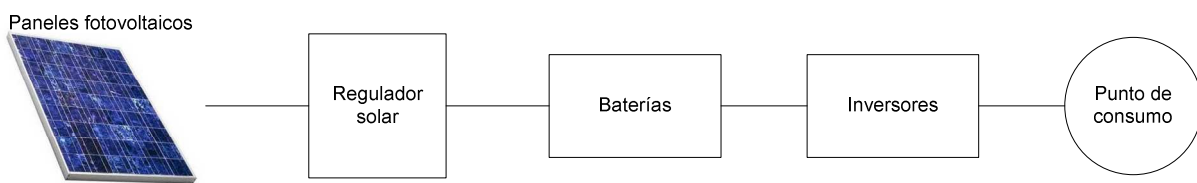


Figura 2.2 Sistema fotovoltaico

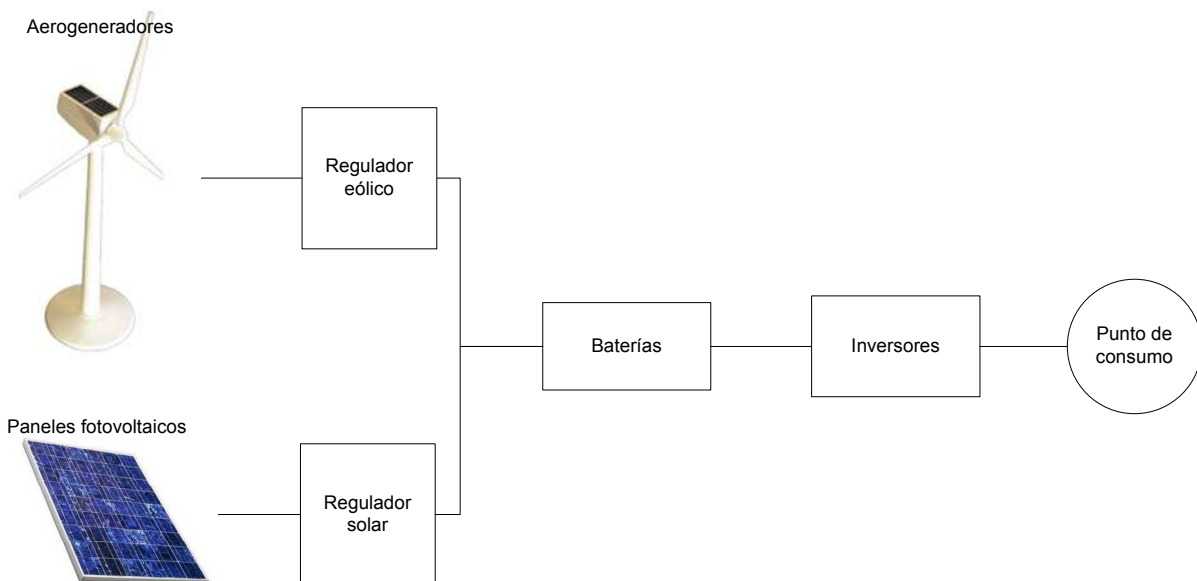


Figura 2.3 Sistema híbrido

Microrred: El sistema de generación, eólico, solar o híbrido, abastece de electricidad a más de un usuario. La distribución de electricidad se realiza mediante una microrred eléctrica (Figura 2.7). Aparece la necesidad de colocar medidores a los usuarios conectados a la microrred para controlar sus consumos. Puede suceder que un usuario aproveche la situación de estar en una microrred para consumir más energía que el resto de usuarios.

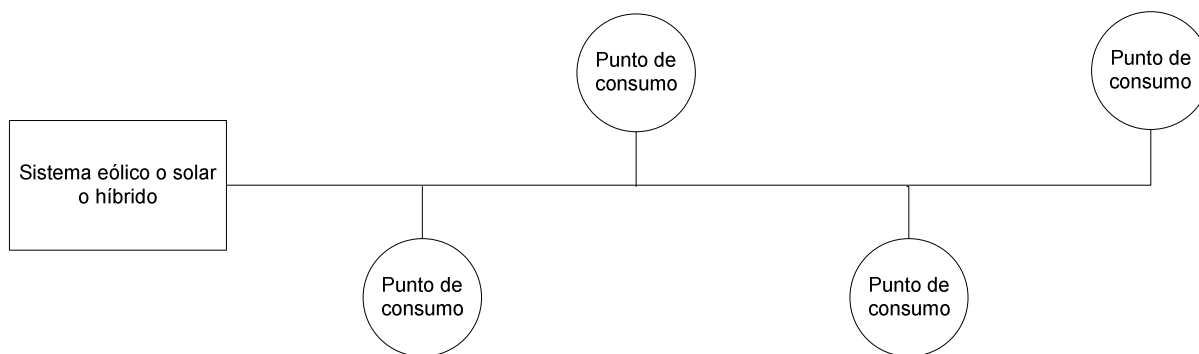


Figura 2.4 Microrred

2.4 Componentes de generación

Los componentes de generación son aquellos capaces de convertir un tipo de fuente de energía en energía eléctrica. Para el presente trabajo se considera aerogeneradores y paneles fotovoltaicos.

2.4.1 Aerogenerador

Un aerogenerador es un generador eléctrico, transforma la energía cinética del viento en energía mecánica que mediante una transmisión y normalmente un alternador trifásico se convierte en energía eléctrica. Los aerogeneradores utilizados a lo largo de este trabajo son microaerogeneradores ya que son de baja potencia. Las palas del aerogenerador giran por acción del viento creando la rotación de un eje que está unido a un generador de imanes de permanentes. La rotación de dicho eje genera campos magnéticos e induce electricidad en el generador mediante bobinas.

Los aerogeneradores se dividen en dos grupos en función de la posición del eje:

- Eje vertical: Son aquellos en los que el eje de rotación del equipo se encuentra perpendicular al suelo. No necesita mecanismo de orientación para girar el rotor en la dirección del viento y su eficiencia es menor.
- Eje horizontal: Son aquellos en los que el eje de rotación del equipo se encuentra paralelo al suelo. Ésta es la tecnología más ampliamente utilizada, por su eficiencia y confiabilidad y la capacidad de adaptarse a diferentes potencias y son los utilizados en el proyecto

Los aerogeneradores de eje horizontal se componen de los siguientes elementos principales:

- Alabes: normalmente hechos de madera o de fibra de vidrio, son los encargados de convertir la energía del viento en movimiento de rotación.
- Rotor: convierte la energía eólica en energía mecánica para que posteriormente el generador convierta esta energía mecánica en eléctrica.
- Generador: Compuesto por el alternador y el plato de imanes permanentes. La energía mecánica que sale el rotor pasa por el alternador convirtiéndola en energía eléctrica. Normalmente en microaerogeneración, esta energía pasa por los imanes permanentes, usualmente de Neodimio (Nd), que permiten obtener el voltaje deseado.



- Cola: Su función es colocar las alabes en la dirección del viento. En especial también consta de un sistema de seguridad que permite inutilizar el aerogenerador con vientos muy altos.

Los parámetros que definen las características de los aerogeneradores son:

- Velocidad de arranque: Velocidad (m/s) del viento cuando el aerogenerador empieza a generar
- Potencia nominal: Potencia máxima (W) a la que puede trabajar el aerogenerador de forma continua sin que este se averíe, los elementos están fabricados para trabajar a esa potencia.
- Velocidad nominal: Velocidad (m/s) del viento cuando el aerogenerador está trabajando a potencia nominal.
- Potencia máxima: Potencia máxima (W) a la que puede llegar el aerogenerador.
- Velocidad de corte: Velocidad máxima (m/s) del viento que aguanta el aerogenerador a partir del cual el aerogenerador deja de generar.
- Voltaje: Voltaje (V) al que genera electricidad.
- Vida útil: Tiempo (años) en el que se estima que un aerogenerador funciona correctamente. La vida útil depende del fabricante pero la media está entre 10 años.

Un aerogenerador obtiene su potencia de entrada convirtiendo la fuerza del viento en un par (fuerza de giro) actuando sobre las palas del rotor. La cantidad de energía transferida al rotor por el viento depende de la densidad del aire, del área de barrido del aerogenerador y de la velocidad del viento. La energía del viento que pasa perpendicularmente a través de una superficie circular (palas del aerogenerador) es:

$$E = \int_0^t \frac{1}{2} \rho v_t^3 D^2 dt$$

E = Energia (Wh)
 ρ = Densidad aire (kg / m³)
v = Velocidad del viento (m / s)
D = Diametro de la superficie (m)
t = tiempo (h)

Densidad del aire: La densidad del aire varía con la altitud, a más altura menor densidad y , por lo tanto, menor potencia. La densidad con respecto la altura varía según la ley barométrica.

Área de Barrido: El área que describen las palas, en el caso de un aerogenerador, al girar.

Velocidad del viento: La velocidad del viento es el factor más importante para definir la instalación de un sistema de aerogeneración, es debido a que la potencia de generación

aumenta con el cubo de la velocidad. La velocidad del viento es función del tiempo, la distribución de esta se puede ver en la curva de duración (Figura 2.1).

Un aerogenerador se caracteriza por su curva de potencia, que indica cual es la potencia generada en función de la velocidad del viento. En la figura 2.1 se puede observar que en base a esta curva de potencia y a las características del viento del emplazamiento se puede determinar cuál será la energía producida por el aerogenerador.

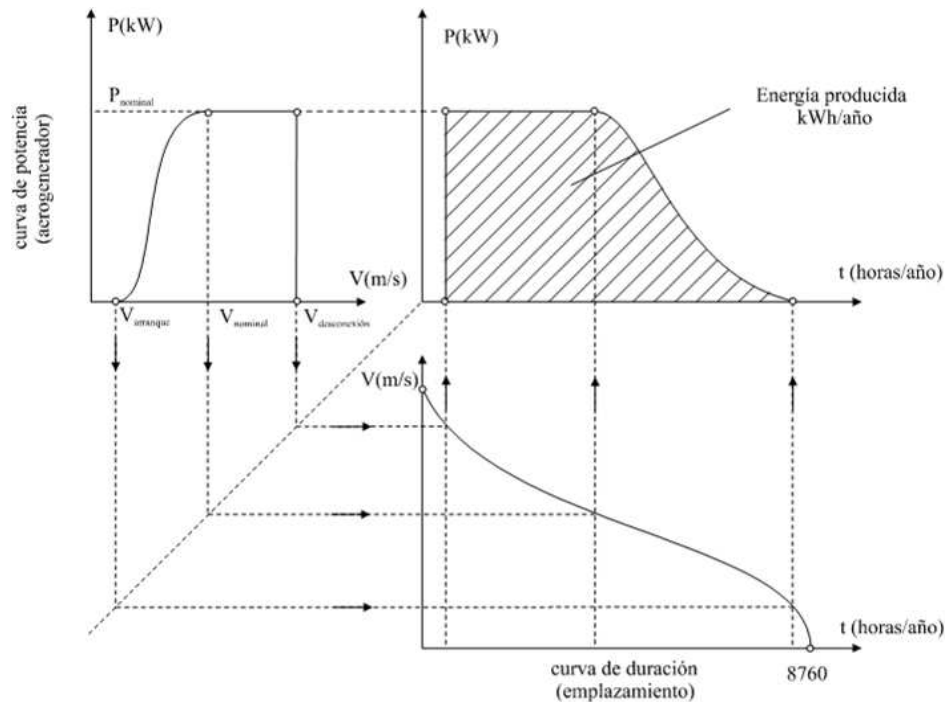


Figura 2.5 Curva de duración de la potencia (Fuente: Crespo, 2003)

A partir del valor medio de la velocidad, se puede realizar una estimación aproximada (ideal) de la energía que podremos obtener en un emplazamiento. Para sistemas autónomos a pequeña escala ésta es una forma común de realizar cálculos sobre el potencial energético del recurso eólico en un emplazamiento, pero menos precisos que tener en cuenta la distribución de velocidades.

La determinación del recurso eólico de una comunidad se obtiene mediante la formulación de mapas de viento, creados por software especializados. Para realizar el mapa de viento es necesario conocer la orografía y topografía del terreno conjuntamente con los datos de viento obtenidos de un anemómetro, tanto la dirección como la velocidad del viento.

Las curvas de potencia de los aerogeneradores están en condiciones estándares, a una temperatura de 25°C y 0m sobre la altitud del mar, si la instalación del aerogenerador se realiza en otras condiciones, como a 4000m.s.n.m donde la densidad del aire es diferente, se extrapola la curva obteniendo otros parámetros característicos.

Los aerogeneradores son obstáculos para el viento y crean turbulencias dentro de su



trayectoria disminuyendo la capacidad de generación de otros aerogeneradores. Ha de existir una distancia mínima entre ellos. Por esta razón se ha de limitar el número máximo en un punto.

2.4.2 Panel fotovoltaico

Los paneles fotovoltaicos son generadores eléctricos que son capaces de transformar la radiación solar en energía eléctrica. Los paneles están compuestos por células fotovoltaicas que son capaces de convertir la radiación incidente del sol en energía eléctrica. Al incidir la luz solar sobre las células fotovoltaicas los electrones tienden agruparse sobre la cara iluminada, generándose una cara positiva y una negativa, si estas dos caras se ponen en contacto mediante un conductor se crea una fuerza electromotriz creando un potencial eléctrico para igual las cargas generando energía eléctrica.

Los paneles fotovoltaicos pueden dividirse en dos grupos

- Amorfos: El silicio que compone la célula no ha cristalizado
- Cristalinos

Monocristalinos: Las células fotovoltaicas están compuestas por un único cristal de silicio (son reconocibles por su forma circular o hexagonal)

Policristalinos: Están formadas por pequeñas partículas cristalizadas de silicio. Estos paneles son los utilizados en el proyecto, son las que tienen mayor rendimiento.

Las diferencias entre cada tipo vienen definidas por el coste y el rendimiento. Cuanto más grande sea el cristal de silicio mayor será el rendimiento de la panel, esto significa que las del primer tipo tienen un rendimiento mayor (20%) pero el coste es muy superior. En cuanto a las amorfas tienen un rendimiento más o menos del 10%.

Los parámetros que definen un panel fotovoltaico son los siguientes:

- Potencia Máxima: Es la potencia máxima (W) que puede dar el panel a unas condiciones estandarizadas. Una radiación solar de $1000 \frac{W}{m^2}$ y una temperatura de 25°C (no temperatura ambiente).
- Voltaje: Voltaje (V) al que genera el panel, normalmente a 12 V.
- Potencia máxima: Es el producto entre intensidad de cortocircuito (A) y el voltaje del panel.
- Vida útil: Tiempo (años) en el que se estima que un panel fotovoltaico funciona correctamente. La vida útil depende del fabricante pero la media está en 30 años.

La información meteorológica necesaria para saber la cantidad de energía generada por un panel fotovoltaico es la siguiente:

- Insolación $\left(\frac{kWh}{m^2}\right)$ Energía solar que incide sobre una superficie
- Hora Solar Pico (HSP): La hora solar pico equivale a la energía recibida durante una hora, a una irradiación promedio de $1000 \frac{W}{m^2}$.
- Temperatura ($^{\circ}C$): Temperatura media diaria de la zona de estudio.

La determinación del recurso solar se obtiene mediante bases de datos publicadas (RETScreen, mapas regionales, o otras). Solo son necesarias las características de los paneles solares para determinar cuanta energía son capaces de generar.

La energía generada por un panel fotovoltaico se calcula según:

$$E = P \cdot HSP \cdot \frac{\eta}{100}$$

$$\eta = 100\% - (T_{\text{AMBIENTE}}^{\circ}C + 15^{\circ}C - 25^{\circ}C) 0,5\%$$

$E = \text{Energía generada (Wh)}$

$P = \text{Potencia panel (W)}$

$HSP = \text{Horas Solar Pico (h)}$

$\eta = \text{Rendimiento}$

$T_{\text{AMBIENTE}}^{\circ}C = \text{Temperatura ambiente (}^{\circ}C\text{)}$

2.5 Componentes de la instalación

Los componentes de la instalación de un sistema, tanto microeólico como solares como híbridos, ya comentados anteriormente, son: batería, inversor, medidor y conductor. En este apartado se describirá su funcionamiento y los parámetros que los caracterizan.

2.5.1 Batería o acumulador

Una batería, también conocida como acumulador, es un dispositivo que mediante procesos electroquímicos es capaz de almacenar energía eléctrica. La energía generada es intermitente con lo que surge la necesidad de un componente capaz de almacenar esta energía y suministrarla cuando el usuario lo desee. Las baterías tienen una vida útil corta en comparación con el resto de la instalación, tienen una baja eficiencia y contienen sustancias tóxicas.

Los parámetros que definen una batería son los siguientes:

- Tensión o voltaje: Tensión (V) de trabajo de la batería
- Capacidad: Cantidad de energía (Ah) que se puede almacenar dentro de ella, para posteriormente ser suministrada. Si se multiplica este parámetro por el voltaje de la batería se obtiene la cantidad de energía que puede almacenar la batería



- Factor de descarga: Es el cociente entre la energía que puede suministrar la batería y la capacidad total de energía que puede almacenar. La descarga profunda o descarga completa daña al equipo perdiendo este sus propiedades viéndose obligado a sustituir el equipo.
- Rendimiento: Es el cociente entre la energía que puede suministrar la batería y la energía útil que puede almacenar.
- Vida útil de la batería: Tiempo (años) en el que se estima que una batería funciona correctamente. La vida útil depende del fabricante pero la media está en 3 años.

2.5.2 Regulador eólico.

El regulador de un sistema microeólico tiene como funciones principales:

- Es el encargado de proteger las baterías de sobrecargas y descargas profundas de las baterías.
- Es el encargado de rectificar la electricidad proveniente del aerogenerador, significa esto pasar de corriente continua a corriente alterna para su posterior almacenaje en las baterías.

Hay reguladores de diferentes tecnologías, los más simples detectan el voltaje entre bornes de la batería, si este voltaje llega a un límite, significa que la batería está llena, y se deriva la energía sobrante a un banco de resistencias. Son de construcción sencillas, normalmente están compuesto por un transistor de circuito sencillo. Los modelos más sofisticados revisan que la batería no se haya descargado por completo o llegue a una descarga profunda.

- Potencia máxima (W): Es la potencia máxima que puede soportar el regulador. Se obtiene por el producto de su intensidad máxima (A) y su tensión de trabajo (V). A diferencia de los otros elementos de la instalación los reguladores están compuestos por elementos de electrónica de potencia con elevados rendimiento, llegando casi al 100%.

2.5.3 Regulador solar.

El regulador de un sistema fotovoltaico tiene como funciones principales:

- Proteger a las baterías de sobrecargas y descargas profundas de las baterías.
- Variar la tensión para que esta entre con una tensión adecuada a las baterías.

Las características importantes de los reguladores son su intensidad máxima (A) y su tensión de trabajo (V), determinando mediante el producto se determina la potencia máxima (W) que puede soportar el regulador. Como los reguladores utilizados en sistema microeólicos el rendimiento se considera de un 100%.

2.5.4 Inversor

Un inversor, también llamado ondulator, es un circuito utilizado para convertir corriente continua saliente de las baterías en corriente alterna. Este dispositivo se utiliza en instalaciones donde los puntos de consumo (televisor, bombillas, DVD) funcionan con corriente alterna. Si una instalación funciona con corriente continua este componente no es necesario.

Los inversores caracterizan por la calidad de la señal de salida: mejor será la señal de salida contra más parecido tenga con una onda senoidal. El precio del inversor viene determinado en gran parte por la calidad de señal. Se define de menor a mayor calidad de señal como onda cuadrada, onda senoidal modificada y onda senoidal pura. Utilizar inversores de onda senoidal pura da una calidad de servicio excelente al usuario pudiendo conectar todo tipo de aparatos. Si dicha señal de salida no es de alta calidad se limita el tipo de aparatos que se pueden conectar a la red.

El parámetro que define a un inversor son los siguientes:

- Potencia de trabajo: Potencia (W) óptima a la cual el inversor minimiza sus pérdidas. Este parámetro está totalmente relacionado con el rendimiento.
- Rendimiento: El rendimiento (%) de un inversor es relativamente bajo, entre un 80% y un 90% trabajando a la potencia de trabajo. Dicho rendimiento decrece cuando el inversor se aleja de esta potencia de trabajo produciéndose grandes pérdidas en este componente. Una solución para disminuir pérdidas es la colocación de bancos de inversores de diferentes tamaños, y conectándose unos u otros o unos con otros dependiendo de la potencia demandada en ese momento por la instalación minimizando en cada instante de tiempo las pérdidas en los inversores, logrando que trabajen a la potencia de trabajo cada una de ellos.

2.5.5 Conductor

Un conductor eléctrico se encarga de conducir o transmitir la electricidad, se utilizan para el transporte de electricidad entre puntos. Los materiales más utilizados en la fabricación de conductores eléctricos son el cobre y el aluminio. Ambos metales tienen una conductividad eléctrica excelente. El uso de uno u otro material como conductor, dependerá de sus características eléctricas (capacidad para transportar la electricidad), mecánicas (resistencia al desgaste, maleabilidad), del uso específico que se le quiera dar y del costo. Los parámetros que definen las características técnicas de los conductores son:

- Sección: Área (mm^2) del conductor. El conductor está identificado en cuanto a su tamaño por un calibre, que puede ser milimétrico y expresarse en mm^2 o americano y expresarse en AWG o MCM con una equivalencia en mm^2 .
- Resistividad (Ω/m): oposición al paso de la corriente eléctrica por el conductor

El transporte de electricidad de un punto a otro mediante un conductor provoca unas pérdidas de energía en forma de calor, llamado efecto Joule, generando una caída de tensión entre los



dos puntos. Las pérdidas por efecto Joule y la caída de tensión entre dos puntos en corriente monofásica se expresan mediante las fórmulas que se muestra a continuación:

$$Q = R I^2 t = \frac{V^2}{R} t$$

(Pérdidas por efecto Joule)

$Q = \text{Calor (Wh)}$
 $R = \text{Resistencia } (\Omega)$
 $V = \text{Voltaje (V)}$
 $I = \text{Intensidad (A)}$
 $t = \text{Tiempo (h)}$

$$V_1 - V_2 = \frac{\rho L_{12} I \cos\phi}{S}$$

(Caída de tensión)

$V_1 = \text{Voltaje en 1 (V)}$
 $V_2 = \text{Voltaje en 2 (V)}$
 $\rho = \text{Resistividad (W mm}^2/\text{m)}$
 $L_{12} = \text{Longitud entre 1 y 2 (m)}$
 $I = \text{Intensidad (A)}$
 $S = \text{Seccion (mm}^2\text{)}$
 $\cos\phi = \text{factor de potencia}$

El factor de potencia se define como el cociente de la potencia activa y la potencia aparente, significa esto la cantidad de energía que se ha convertido en trabajo. El valor ideal del factor de potencia es 1, esto significa que toda la energía utilizada es transformada en trabajo. La potencia reactiva es la encargada de generar los campos magnéticos que requieren para sus funcionamientos tanto motores como transformadores, es este tipo de potencia la que disminuye el valor del factor de potencia, a más potencia reactiva menor factor de potencia. Se ha considerado que las instalaciones carecen de este tipo de cargas, considerando un factor de potencia igual a 1.

2.5.6 Microrred

La distribución eléctrica se realiza mediante diferentes estructuras de microrred:

- Microrred de bucle cerrado o en anillo: Presenta diferentes puntos de generación que se interconectan formando una línea cerrada de la que parten las líneas de distribución. El coste es más elevado que en la red radial, pero su seguridad es mucho mayor, quedando asegurada la instalación aún en caso de avería en las líneas de interconectado.
- Microrred radial o en antena: Presenta un único punto de generación, a partir de este la microrred se forma en forma de árbol. Cada punto solo podrá tener un conductor de entrada y varios de salida. No se pueden formar uniones entre ramas del árbol. La ventaja más importante es su bajo coste, pero tiene un índice de seguridad bajo debido a que si corta el suministro en al inicio de una rama del árbol, toda la rama se queda sin suministro eléctrico. Este tipo de configuración es la utilizada. A continuación se

puede observar un gráfico de una microrred posible cumpliendo la condición de radialidad:

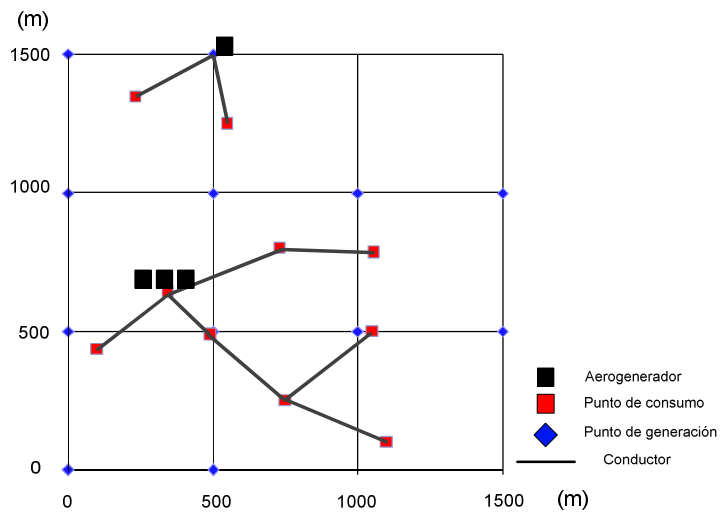


Figura 2.6 Estructuras de una microrred radial

Se definen dos tipos de distribución dependiendo del tipo de corriente:

- Corriente continua: No es necesaria la colocación del inversor. Encontrar elementos que funcionen con esta tecnología no es fácil y resulta más caro.
- Corriente alterna monofásica: Necesidad de colocar un inversor, convirtiendo la corriente continua en corriente alterna. En la actualidad es la tecnología consolidada, por lo que existe una gran facilidad de encontrar elementos comerciales que funcionen con dicha corriente.

De entre todas las posibles maneras de distribuir la electricidad, en el presente trabajo se utiliza una distribución mediante una red radial y con corriente alterna monofásica.

2.5.7 Medidor

El medidor de energía eléctrica es un aparato que mide y limita la energía consumida por el usuario. Los medidores se instalan en los puntos de consumo que forman parte de una microrred para gestionar la energía y equilibrar el consumo entre usuarios. Un usuario que está conectado a una microrred puede consumir toda o gran parte de la energía generada dejando al resto de usuarios sin energía, es por esta razón la necesidad de instalar medidores para una gestión equilibrada de la red.

2.6 Demanda de energía y de potencia eléctricas

La demanda se define como las necesidades energéticas de cada usuario o punto de consumo. Dentro de las comunidades diferenciamos diferentes puntos, por ejemplo escuelas, centro de salud, viviendas, etc. Cada punto de consumo puede necesitar una cantidad diferente de energía y de potencia eléctricas, por tanto la demanda es variable dependiendo del usuario.



La demanda al igual que el recurso eólico tiene una gran variabilidad, un usuario no consume la misma electricidad en cada instante de tiempo.

- Variabilidad diaria: el usuario dependiendo del instante del día consume más o menos energía.
- Variabilidad anual: variabilidad entre diferentes estaciones del año, por ejemplo verano e invierno, el usuario conecta un tipo de equipo u otro.
- Variabilidad entre días: variabilidad ya sea por celebraciones, festividades o eventos, unos días se consume más energía que otros. Estos tipos de variabilidades se tienen en cuenta a la hora de estimar la demanda de cada usuario.

Finalmente teniendo en cuenta las diferentes variabilidades se determina una demanda diaria para cada usuario. Como se ha comentado, la variabilidad entre la demanda y la generación y la no coincidencia entre ellas hacen necesario la acumulación en baterías.

2.7 Relación entre componentes del sistema

En este apartado se explicará cómo se relacionan los componentes de los sistemas y como se dimensionan para el correcto funcionamiento de la instalación.

- El parámetro que determina que tipo y que número de sistemas de generación, tanto eólico como solar como ambos, es la energía que pueden generar en ese punto. La energía generada por todos los equipos instalados en ese punto ha de ser superior a la energía demanda por los usuarios que están conectados a ese punto de generación.
- El tamaño de las baterías en punto de generación es función de las necesidades de consumo, demanda de energía de los puntos de consumo que abastece, dependiendo de los usuarios conectados a ese punto de generación y sus respectivas demandas. También es función de los días de autonomía que se le quiere dar al usuario, considerando como días de autonomía como los días a cubrir por falta de recurso de energético. Y por último, como ya se ha comentado anteriormente, el factor de descarga.
- Los reguladores se dimensionan en función de la potencia máxima admisible de estos. Esta suma de potencias máximas de los reguladores ha de ser superior a la suma de potencias máximas de los aerogeneradores para los reguladores eólicos y superior a la suma de potencias máximas de los paneles para los reguladores solares.
- El tamaño de los inversores viene dado por la relación de potencia y los usuarios. La potencia de trabajo de los inversores ha de ser superior o igual a la suma de potencias de los usuarios que se alimentan de ese sistema. Cuando se determina el tamaño del inversor es importante tener en cuenta el factor de simultaneidad. En general no se conectan todos los puntos de consumo de un usuario a la vez, como máximo habrá un

cierto número de equipos con sus respectivas potencias funcionando al mismo tiempo, es lo que se llama factor de simultaneidad el que tiene en consideración dicha diferencia. Su valor es igual al cociente entre la suma de potencias del máximo número de equipos que pueden estar conectados a la vez entre la suma total de potencias de los equipos de la instalación. Si el sistema es individual el factor de simultaneidad solo tendrá en cuenta la anterior consideración, en cambio si el sistema alimenta a varios usuarios se tendrá en cuenta que no todos los usuarios se conectan a la red al mismo tiempo, no siendo la potencia total empleada la suma de todos los usuarios sino el factor de dicha suma por el factor de simultaneidad. El factor de simultaneidad se multiplica por la demanda de potencia de los usuarios obteniendo la potencia real de consumo de cada usuario.

- La selección de un conductor u otro en una microrred viene determinada por la caída de tensión entre dos puntos y por la intensidad máxima admisible que puede circular por este. La caída de tensión entre dos puntos ha de ser menor a una caída de tensión máxima admisible definida por el modelizador, si un conductor la supera es necesario un conductor con menor resistividad. La intensidad que circula por el conductor ha de ser menor a su admisible.
- Se limita el número máximo de equipos de generación como también de cada equipo de la instalación en un punto. La limitación de equipos generación viene determinada por razones tecnológicas. Los equipos de la instalación se impone teniendo en cuenta la limitación de los equipos de generación.



3 Modelización matemática del sistema

En este capítulo se describen las consideraciones sobre el diseño general de los proyectos de electrificación que se han tenido en cuenta en el presente trabajo. A continuación se presenta la formulación matemática del problema y variaciones en función del tipo de variable y las opciones tecnológicas consideradas.

3.1 Consideraciones de diseño

En este apartado se presenta las diferentes consideraciones y limitaciones sobre un sistema general que se tendrán en cuenta en este proyecto.

3.1.1 Evaluación de recurso eólico

Para definir el recurso eólico se escoge la época de menor recurso eólico, si se satisface el suministro de energía en dicha época lo aseguraremos el resto del año. Para la modelización se escoge los datos de dicha época, registrados en el anemómetro y se determina el recurso eólico en cada punto de la comunidad mediante un software, obteniendo el mapa de viento de la época del año más desfavorable. Con el mismo software, a partir de estos datos se extrapola la energía generada en cada punto con los diferentes tipos de aerogenerador. Al trabajar con medias de épocas no podemos garantizar el suministro en periodos más cortos, pero si podemos decir que lo garantizaremos durante todas las épocas del año, considerando como época del año un periodo de tiempo en días determinado por el modelizador. Contra más corto sea este periodo de tiempo la probabilidad de garantizar el servicio cada instante de tiempo aumentará.

La energía producida por un aerogenerador depende del modelo concreto de máquina instalado a una cierta altura. El mismo modelo de máquina instalado a una altura diferente se considera un tipo de aerogenerador distinto, ya que produce una cantidad de energía diferente.

3.1.2 Evaluación de recurso solar

Para la selección del recurso solar, como se realiza con el recurso eólico, se escoge la época de menor recurso solar para asegurar el suministro el resto de épocas. Los datos de radiación solar se obtienen de bases de datos publicadas, donde se especifica las horas de radiación pico de la zona de estudio. Para las comunidades de estudio se ha utilizado un programa llamado HWO (Velo *et al*, 2005). Todos los puntos de una comunidad tiene el mismo recurso solar.

3.1.3 Esquema y diseño de la microrred

La distribución de electricidad desde las baterías a los puntos de consumo se realiza en corriente alterna monofásica a la tensión de consumo, considerando la tensión de consumo entre dos valores estimados por el modelizador en Voltios. Antes de definir las consideraciones se definen los tipos de puntos que pertenecen al modelo:

1. Puntos de consumo: Son aquellos que demandan tanto energía como potencia.
2. Puntos de generación: Son aquellos que tiene la capacidad de generar energía, o lo que es lo mismo en los cuales se permite colocar aerogeneradores o paneles solares.

Todos los puntos de consumo se consideran puntos de generación. Además de estos se incluyen diferentes puntos del terreno para aprovechar puntos con un alto recurso energético, los que se llamarán de no consumo.

Para el diseño de la microrred se han realizado una serie de consideraciones para la simplificación del modelo.

- Se limitan las conexiones entre puntos:

La unión entre dos puntos de no consumo.

Un punto de no consumo solo puede tener conductores de salida, y que estos vayan a puntos de consumo, determinando una estructura radial para la red.

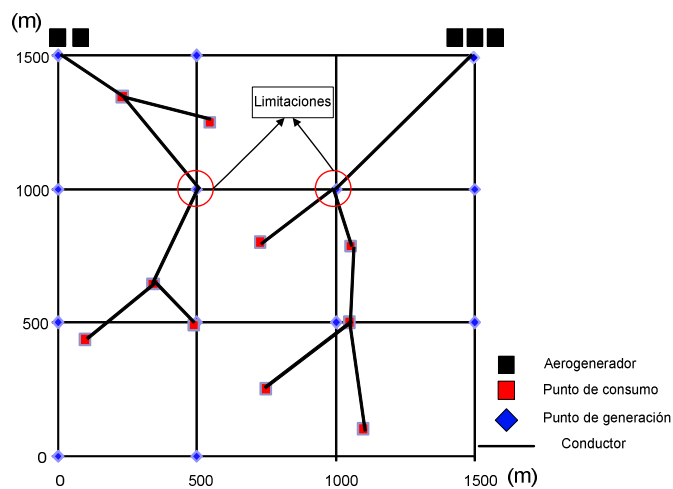


Figura 3.1 Limitaciones de la microrred

- Se limita la longitud máxima del conductor que une dos puntos de una microrred aunque no se limita la longitud máxima de una microrred. Esta longitud se determina en función de la situación geográfica de los puntos de consumo y del mapa de viento de la comunidad. Para comunidades con una dispersión elevada la longitud será mayor. Si hay puntos de consumos aislados con un recurso eólico bajo es necesario que este punto pueda unirse o tenga la posibilidad de hacerlo, para ello esta longitud máxima no debe limitar sus uniones.

3.1.4 Pérdidas en la instalación

En los sistemas microeólicos se producen diferentes tipos de pérdidas, las pérdidas del sistema se pueden dividir en dos grupos:

Perdidas de energía: Las pérdidas las podemos dividir entre los diferentes componentes de la instalación:

- *Pérdidas en el inversor:* Como ya se comentó anteriormente el inversor tiene un rendimiento bajo y sobretodo sino trabaja a su potencia de trabajo. Se considera un rendimiento constante para todos los tipos de inversores, considerando así las pérdidas



del inversor constante y que afectan a todos los usuarios por igual.

- *Pérdidas en los conductores:* De igual importancia existen las pérdidas en los conductores producidas por la caída de tensión entre puntos. Cuando dos puntos están unidos por un conductor existe una pérdida de energía en el conductor. Para todos los puntos que pertenecen a una microrred se considera tienen una caída de tensión máxima. De esta forma se sobrevaloran las pérdidas en la microrred, siendo muy restrictivo.
- *Pérdidas en las baterías:* Para las baterías también se considera un rendimiento constante para todos los tipos de baterías utilizadas y que afecta de igual manera a todos los usuarios.

Pérdidas de potencia: Las pérdidas de potencia se producen por la caída de tensión entre dos puntos.

- *Pérdidas en los conductores:* Dichas pérdidas solo se tendrán en cuenta en aquellos puntos de consumo que pertenezcan a una microrred. De igual forma que en las pérdidas de energía en los conductores, se considera la caída máxima admisible para todos los puntos de la microrred sobrevalorando así las pérdidas de potencia existentes.

3.1.5 Capacidad de las baterías

La energía se almacena en baterías situadas en el mismo punto de generación. La capacidad mínima de las baterías viene determinada por la demanda de los puntos de consumo a los que abastece, por la autonomía requerida (número de días sin abastecimiento a cubrir) y el factor de descarga de las baterías.

Se asume que todos los puntos de consumo requieren los mismos días autonomía. Si algún punto requiriera mayor tiempo de autonomía, por ejemplo un centro de salud, éste se complementaría con un sistema de respaldo individual, por ejemplo un grupo diesel. Esta posibilidad se trataría una vez resuelto el modelo sin afectar a su validez. Se considera que todos los tipos de batería tienen el mismo factor de descarga.

3.2 Modelos de PL

La Programación Lineal es una técnica matemática utilizada para la optimización de problemas y dar solución a problemas que se plantean muy comúnmente en diversas disciplinas como economía, ingeniería, sociología, biología, etc.

En esencia trata de maximizar y/o minimizar una función lineal de dos o más variables teniendo en cuenta unos parámetros de entrada y que las mismas variables deben cumplir determinadas exigencias (llamadas restricciones).

Fue en la década de los años 40 del siglo XX que a través del trabajo de equipos formados por matemáticos, economistas y físicos, entre los cuales merece especial destaque George B. Dantzing, se sentaron las bases para la resolución de problemas de Programación Lineal y No

Lineal (Moya, 1994). Muchas personas clasifican el desarrollo de la programación lineal entre los avances científicos más importantes de mediados del siglo XX, su impacto desde 1950 ha sido extraordinario. En la actualidad es una herramienta de uso normal que ha ahorrado elevadas cantidades de dinero a muchas compañías o negocios, incluyendo empresas medianas en los distintos países industrializados del mundo; su aplicación a otros sectores de la sociedad se está ampliando con rapidez. Una proporción muy grande de los cálculos científicos en computadoras está dedicada al uso de la programación lineal.

3.2.1 Estructura de los modelos de programación matemática lineal

La programación lineal utiliza un modelo matemático para describir problemas combinatorios. El adjetivo lineal significa que todas las funciones matemáticas del modelo deben ser funciones lineales. Así, la programación lineal trata el planteamiento de las actividades para obtener un resultado óptimo, esto es, el resultado que mejor alcance el objetivo (según el modelo matemático) entre todas las alternativas de solución. Que todas las funciones deban ser lineales es un planteamiento que puede ser bastante restrictivo, debido a que en el mundo real nos encontramos con muchas funciones no lineales.

La Programación Lineal se basa en una cierta estructura, hay que destacar cuatro de elementos característicos.

1. Parámetros: Datos conocidos del problema necesarios para resolver el modelo matemático.
2. Variables: Son los elementos de estudio que definen la solución, se desconoce su valor, deben cumplir las restricciones.
3. Función Objetivo: El objetivo del problema es maximizar o minimizar una función. Determina los valores de las variables para maximizar o minimizar dicha función.
4. Restricciones: Exigencias que deben cumplir las variables. Son funciones lineales.

3.2.2 Programación Lineal Entera y Mixta (PLEM)

Las variables de un modelo de programación matemática se pueden clasificar en los siguientes tipos: variables reales, variables enteras y variables binarias que: son variables que solo pueden coger el valor de 1 o 0.

En algunos problemas de programación lineal es necesario que las variables deban tener valores enteros para que la solución de dicho problema tenga sentido. Si todas las variables son enteras diremos que tenemos un modelo de programación lineal entero. Si hay variables enteras o reales el problema se llamará programación lineal mixta.

La utilización tanto de variables enteras como binarias da la oportunidad de ampliar el abanico de posibles problemas a resolver pero por el contrario la resolución de programas matemáticos con dichas variables se complica notablemente (Sallán *et al*, 2002).

3.2.3 Resolución de modelo matemáticos lineales

A diferencia de un modelo de variables reales los modelos programación lineal entera o mixta



(PLEM) de variables binarias y enteras tienen un número limitado de soluciones, por lo que podría plantearse encontrar la solución mediante la exploración de todas las soluciones. Esto es factible para problemas con dimensiones reducidas pero a medida que aumentan las variables y restricciones esto se hace imposible. Así que se han desarrollado metodologías que permiten explorar de manera más eficiente que la mera enumeración del conjunto de soluciones posibles. Gran número de estas metodologías emplean la lógica del *branch and bound*, y están incorporadas a la mayoría de programas informáticos que resuelven modelos lineales (Sallán et al, 2002).

Muchos de los problemas de optimización, en los que la combinatoria juega un papel importante admiten algoritmos matemáticos exactos pero ineficientes en función del tiempo. En su lugar se utilizan heurísticas que no garantizan el óptimo pero si un valor cercano a este, siendo eficientes a en función del tiempo. Uno de estos métodos es el Branch & Bound (Ramificar y Acotar), con la característica principal que si encuentra el valor óptimo.

Es una metodología que proporciona el valor óptimo solo enumerando y evaluando una sola parte del conjunto de soluciones. La idea es partir de estado inicial y dividirlo en subconjuntos y estos de nuevo en subconjuntos. En cada fase se selecciona uno de los subconjuntos y trata de eliminarlo de consideraciones posteriores. La manera de realizar la eliminación depende mucho de las características del problema en cuestión, pero hay consideraciones que son de carácter general. Supongamos que pretendemos maximizar una función de cuyos valores se conoce una cota inferior, que suele ser un valor determinado anteriormente calculado, ya sea por asignación trivial de las variables de decisión o por un estudio previo. Para cada uno de los subconjuntos calculados el algoritmo calcula su cota superior, si esta cota superior es menor que la cota inferior anteriormente calculada podremos decir que dicho subconjunto no puede contener la solución óptima, y en consecuencia ese subconjunto queda descartado para su exploración. Si más de un conjunto tiene una cota superior mayor que la cota inferior calculada se avanza la exploración por que tiene una cota superior. Así sucesivamente hasta garantizar la solución óptima del problema. La metodología que se sigue es la siguiente:

1. Un criterio para dividir subconjuntos.
2. El cálculo de la cota (tanto inferior como superior) para los valores de la función en cada subconjunto.
3. Un criterio para seleccionar un subconjunto para la partición posterior.

Existe software comerciales que utilizan este método de resolución. A medida que el número de variables y restricciones de un modelo de programación lineal aumenta se hace inviable el uso de métodos manuales para la obtención del valor óptimo, es por ello que se utiliza software especializado para la resolución. Para ello se utilizan diferentes software, que usan el branch and bound; como por ejemplo ILOG o Lingo.

Para el desarrollo experimental del proyecto se ha utilizado el software especializado de ILOG. Dicho software utiliza dos programas que se conectan entre sí: CPLEX y OPL.

- CPLEX: Motor de resolución, ejecuta el código desarrollado en el OPL y resuelve el modelo.
- OPL: En dicho software se escribe, mediante lenguaje de programación, el programa matemático lineal. Es el input y el output para el usuario, en él se visualiza tanto la entrada como la salida del modelo.

3.3 Formulación matemática planteada

En este apartado se presenta de manera detalla los diferentes modelos de programación matemática lineal utilizados. Todos los modelos utilizados tienen la misma estructura general, inicialmente se presenta los parámetros comunes en todos los modelos. A continuación, se describen dos modelos para desarrollar proyectos de energía eólica, uno de ellos está creado con variables enteras y el segundo está formado por variables binarias. Finalmente, se detallan el modelo para desarrollar proyectos de energía solar y por último proyectos híbridos, estos dos modelos solo se expondrán basándose en el modelo de variables enteras.

Existen diferencias entre los cuatro modelos, así pues el primer modelo se explica de manera detallada y los siguientes solo remarcando las diferencias que tienen con respecto al modelo de variables enteras con tecnología eólica.

3.3.1 Parámetros del modelo de PLEM

Son los datos de entrada del problema. Son los datos que necesita el modelizador para que el modelo funcione. Los parámetros que se presentan a continuación se dividen en tres grupos: los comunes en todos los modelos, los de generación eólica y los de generación solar.

Parámetros comunes

A continuación se muestran los parámetros comunes en todos los modelos:

Demanda

D , Conjunto de puntos de consumo (domicilios, centros de salud, escuelas)

P , Conjunto de puntos de posible ubicación de aerogeneradores (puntos de consumo y otros)

L_{pd} , Distancia [m] entre el punto p y el punto de consumo d ; $p \in P; d \in D$

L_{max} , Distancia máxima entre 2 puntos que pueden unirse directamente con un conductor.

Q_p , Conjunto de puntos d con los que un punto p puede unirse directamente con un conductor; $p \in P; d \in D; p \neq d, L_{pd} \leq L_{max}$

PD_d, ED_d , Demanda de potencia [W] y energía [Wh/día] del punto de consumo d ; $d \in D$

FS, VB , Factor de simultaneidad y tiempo de autonomía que deben cubrir las baterías [días]



Acumulación

B , NB , Tipos de baterías ($b = 1, \dots, B$) y número máximo de baterías de un tipo que se pueden instalar en un mismo punto

DB , factor de descarga de las baterías [%]

CB_b , EB_b , Coste [\$] y capacidad equivalente [Wh] de una batería del tipo b ; $b = 1, \dots, B$

Definición de la red

C , Tipos de conductores $c = 1, \dots, C$

CC_c , Coste [\$/m] del conductor de tipo c , incluido el coste de infraestructura; $c = 1, \dots, C$

RC_c , IC_c , Resistencia e intensidad máxima admisible del conductor tipo c [Ω/m]; $c = 1, \dots, C$

V_n , V_{min} , V_{max} , Voltaje nominal, mínima y máxima a satisfacer [v]

cdt_{max} , Caída de tensión máxima permitida [%] $cdt_{max} = \frac{V_{max} - V_{min}}{V_N}$

η_c , Rendimiento por caída de tensión [%] $\eta_c = 1 - cdt_{max}$

Equipos

I , NI , Tipos de inversores ($i = 1, \dots, I$) y número máximo de inversores de un tipo que se pueden instalar en un mismo punto

CI_i , PI_i , Coste [\$] y potencia máxima [W] de un inversor de tipo i ; $i = 1, \dots, I$

CM , Coste de un medidor [\$]

η_b, η_i , Rendimiento [%] de las baterías y de los inversores

Parámetros de generación eólica

A continuación se muestran los parámetros utilizados en los modelos que tienen energía eólica como fuente de 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 situado en el punto p del tipo a ; $p \in P; a = 1, \dots, A$

CA_a , PA_a , Coste [\$] y potencia máxima [W] de un aerogenerador de tipo a ; $a = 1, \dots, A$

R , NR , Tipos de reguladores ($r = 1, \dots, R$) eólicos y número máximo de reguladores eólicos de un tipo que se pueden instalar en un mismo punto

CR_r , PR_r , Coste [\$], potencia máxima [W] de un regulador de tipo r ; $r = 1, \dots, R$

Parámetros de generación solar

A continuación se muestran los parámetros utilizados en los modelos que tienen energía solar como fuente de generación:

S , NS , Tipos de panels ($s = 1, \dots, S$) y número máximo de paneles que se pueden instalar en un mismo punto

ES_s , Energía generada [Wh/día] por una panel tipo s ; $s = 1, \dots, S$

CS_s , PS_s , Coste [\$] y potencia máxima [W] de una panel de tipo s ; $s = 1, \dots, S$

Z , NZ , Tipos de reguladores solares ($z = 1, \dots, Z$) y número máximo de reguladores solares de un tipo que se pueden instalar en un mismo punto

CZ_z , PZ_z , Coste [\$], potencia máxima [W] de un regulador solar de tipo z ; $z = 1, \dots, Z$

3.3.2 Modelo de variables enteras con tecnología eólica.

A continuación se describe detalladamente las variables de las que consta el modelo.

Variables

A continuación se presenta las variables de decisión del modelo:

x_p , Variable binaria que indica si en el punto p se instala algún aerogenerador. Toma el valor de 1 en caso afirmativo y valor 0 en caso contrario; $p \in P$

xa_{pa} , Variable entera que indica el número de aerogeneradores que se instalan en el punto p del tipo a . $p \in P$; $a = 1, \dots, A$

xb_{pb} , Variable entera que indica el número de baterías que se instalan del tipo b en el punto p . $p \in P$; $b = 1, \dots, B$

xi_{pi} , Variable entera que indica el número de inversores que se instalan del tipo i en el punto p . $p \in P$; $i = 1, \dots, I$

xr_{pr} , Variable entera que indica el número de reguladores que se instalan del tipo r en el punto p . $p \in P$; $r = 1, \dots, R$



xc_{pdc} , Variable binaria que indica la unión de los puntos p y d con conductor tipo c . Toma valor 1 en caso afirmativo, 0 en caso contrario; $p \in P; d \in Q_p; c = 1, \dots, C$

fe_{pd} , Variable real que indica el flujo de energía [Wh/día] entre los puntos p y d ; $p \in P; d \in Q_p$

fp_{pd} , Variable real que indica el flujo de potencia [W] entre los puntos p y d ; $p \in P; d \in Q_p$

v_p , Variable real que indica la tensión [v] en el punto p ; $v_p \in [V_{min}, V_{max}]$; $p \in P$

xm_d , Variable binaria que indica si se instala un medidor en el punto d . Toma valor 1 en caso afirmativo, 0 en caso contrario; $d \in D$

Función objetivo

La función objetivo (1) minimiza el coste de la inversión inicial considerando todos los equipos: aerogeneradores, conductores, baterías, inversores, reguladores y medidores.

$$\begin{aligned}
 [MIN]Z = & \sum_{p \in P} \sum_{a=1}^A CA_a xa_{pa} + \sum_{p \in P} \sum_{d \in Q_p} \sum_{c=1}^C L_{pd} CC_c xc_{pdc} + \sum_{p \in P} \sum_{b=1}^B CB_b xb_{pb} + \\
 & \sum_{p \in P} \sum_{i=1}^I CI_i xi_{pi} + \sum_{p \in P} \sum_{r=1}^R CR_r xr_{pr} + \sum_{d \in D} CM xm_d
 \end{aligned} \tag{1}$$

Restricciones

Generación y acumulación de energía

La colocación, el tipo y la cantidad de aerogeneradores a colocar se determinan mediante las restricciones (2) y (3). Determinan en qué puntos p se colocan aerogeneradores. La condición de conservación de energía y de satisfacción de la demanda se impone en las restricciones (4), para los puntos de consumo, y (5) para los puntos de no consumo. Las dos restricciones son balances de energía en el punto d en la restricción (4) y en el punto p en la restricción (5), la energía que entra en el punto más la que genera ha de ser mayor o igual a la que consume más la que sale. Puede ser mayor debido a que los aerogeneradores pueden generar más energía que la que consumen los puntos de consumo que se alimentan de este, significará esto que hay energía generada que no se consume y se pierde. Se tienen en cuenta las pérdidas producidas tanto en los equipos como en los conductores, considerando los rendimientos de las baterías y de los inversores y teniendo en cuenta la caída de tensión máxima admisible entre puntos.

Las restricciones (6) y (7) son equivalentes a la (4) y (5), para la conservación y satisfacción de la potencia. La diferencia es que son balances de potencia en lugar de balances de energía. Determinan la colocación, el tipo y la cantidad de inversores a colocar. Los inversores no suministran la potencia a los usuarios sino que la potencia que es demandada por los usuarios,

fijada por el modelizador en cada de consumo, la ha de poder soportar el inversor para que este no se queme. En cuanto a las pérdidas, estas restricciones solo se ven afectadas por las pérdidas en los conductores.

Las baterías deben almacenar la energía suficiente para cubrir la demanda de sus puntos de consumo considerando la autonomía y el factor de descarga, en (8), para los puntos de consumo, y en (9), para los puntos de generación que a la vez no son puntos de consumo. Las baterías han poder abastecer la demanda de los usuarios conectados, o lo que es lo mismo han de tener la capacidad suficiente para almacenar los flujos de energía que salen del punto de generación más su propio consumo teniendo en cuenta los dos factores anteriormente comentados. La suma de los flujos de energía que salen de un punto de generación es igual a la suma de demandas de los usuarios que se alimentan de ese punto.

$$\sum_{a=1}^A x a_{pa} \leq N A x_p \quad p \in P \quad (2)$$

$$\sum_{a=1}^A x a_{pa} \geq x_p \quad p \in P \quad (3)$$

$$\sum_{p \in P | d \in Q_p} f e_{pd} + \sum_{a=1}^A E A_{da} x a_{da} \geq \frac{E D_d}{\eta b \eta i} \left(\frac{1}{\eta c} + \left(1 - \frac{1}{\eta c} \right) x_p \right) + \sum_{q \in Q_d} f e_{dq}; \quad d \in D \quad (4)$$

$$\sum_{a=1}^A E A_{pa} x a_{pa} \geq \sum_{d \in Q_p} f e_{pd} \quad p \in P | p \notin D \quad (5)$$

$$\sum_{p \in P | d \in Q_p} f p_{pd} + \sum_{i=1}^I P I_i x i_{di} \geq F S \cdot P D_d \left(\frac{1}{\eta c} + \left(1 - \frac{1}{\eta c} \right) x_p \right) + \sum_{q \in Q_d} f p_{dq} \quad d \in D \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^I P I_i x i_{pi} \geq \sum_{d \in Q_p} f p_{pd} \quad p \in P | p \notin D \quad (7)$$

$$\sum_{b=1}^B E B_b x b_{db} + \left(\frac{V B}{D B} \sum_{j \in D} \frac{E D_j}{\eta b \eta i \eta c} \right) (1 - x_d) \geq \frac{V B}{D B} \left(\sum_{q \in Q_d} f e_{dq} + E D_d \right); \quad d \in D \quad (8)$$

$$\sum_{b=1}^B E B_b x b_{pb} + \left(\frac{V B}{D B} \sum_{j \in D} \frac{E D_j}{\eta b \eta i \eta c} \right) (1 - x_p) \geq \frac{V B}{D B} \sum_{d \in Q_p} f e_{pd} \quad p \in P | p \notin D \quad (9)$$

Definición de la red

Las restricciones (10) y (11) relacionan, respectivamente, los flujos de energía y potencia con la existencia del conductor. Si existe un flujo de energía o de potencia entre un punto y otro es necesario colocar un conductor entre dichos puntos.

La condición de radialidad se impone con la restricción (12). Esta define, la estructura de la microrred en forma de árbol, que un punto como máximo puede tener un conductor de entrada a excepción de los puntos de generación que no pueden tener ninguno.

La restricción (13) calcula y limita la caída de tensión entre dos puntos, considerando el tipo



de conductor que los une (Sempertegui *et al*, 2002). La caída de tensión entre dos puntos p y d , entre los cuales existe conductor, ha de ser superior al producto de la potencia que circula por el conductor por la resistividad de este y por la distancia entre puntos. Así, se define también el tipo de conductor que colocar entre dos puntos; se selecciona aquel de mínimo coste que su resistividad le permite cumplir con dicha restricción. Se fija un voltaje máximo y mínimo en la definición de la variable v_p definiendo la caída de tensión máxima entre dos puntos.

La restricción (14) define la intensidad máxima admisible en un conductor: si existe un conductor entre el punto p y d la intensidad que circula por este no puede ser superior a la admisible por el tipo del conductor ya que este se quemaría dañando la instalación.

$$fe_{pd} \leq \left(\sum_{j \in D} \frac{ED_j}{\eta b \eta i \eta c} \right) \sum_{c=1}^C xc_{pdc} \quad p \in P; d \in Q_p \quad (10)$$

$$fp_{pd} \leq \left(\sum_{j \in D} \frac{PD_j}{\eta c} \right) \sum_{c=1}^C xc_{pdc} \quad p \in P; d \in Q_p \quad (11)$$

$$\sum_{j|d \in Q_j} \sum_{c=1}^C xc_{jdc} + x_d \leq 1 \quad d \in D \quad (12)$$

$$v_p - v_d \geq \frac{L_{pd} RC_c fp_{pd}}{V_n} - (V_{max} - V_{min})(1 - xc_{pdc}) \quad p \in P; d \in Q_p; c = 1, \dots, C \quad (13)$$

$$\frac{fp_{pd}}{V_n} - \left(\sum_{j \in D} \frac{PD_j}{V_{min} \eta c} \right) (1 - xc_{pdc}) \leq IC_c \quad p \in P; d \in Q_p; c = 1, \dots, C \quad (14)$$

Equipos

Los reguladores deben ser de la potencia adecuada (15), que viene fijada por la potencia máxima de los aerogeneradores instalados en el mismo punto. La suma de las potencias de los reguladores que se instalan en un punto ha de ser superior a la suma de las potencias máximas que pueden suministrar los aerogeneradores colocados en ese punto. Determina la dimensión y la cantidad de reguladores a colocar en punto.

Las restricciones (16)-(18) definen la colocación de los medidores, se colocarán en los puntos de consumo pertenecientes a una microrred. Si dos puntos consumo están unidos por un conductor, en dichos puntos se ha de instalar medidor, son las restricciones (16) y (17) las determinan dichas restricciones. La restricción (16) coloca medidor en los puntos de consumo que tienen un conductor de salida y la restricción (17) coloca medidor en los en los puntos de consumo que tienen conductor de entrada. Por último, si existe un punto de no consumo del cual salen como mínimo dos conductores y por la tanto alimenta a más de un punto consumo, en estos se tendrá que instalar medidor, es por ello que la restricción (18) define la colocación de medidor en aquel punto de consumo que se alimenta de un punto de no consumo y este

punto de no consumo a la vez alimenta a otro punto de consumo. Con estas tres restricciones definimos todos los casos donde tiene que ir colocado un medidor.

La restricción (19) define que en los inversores solo se pueden colocar en aquellos puntos donde exista generación, o lo que es lo mismo en los puntos donde se coloque algún aerogenerador.

$$\sum_{r=1}^R P R_r x r_{pr} \geq \sum_{a=1}^A P A_a x a_{pa} \quad p \in P \quad (15)$$

$$\sum_{j \in Q_d} \sum_{c=1}^C x c_{dpc} \leq (D-1) x m_d \quad d \in D \quad (16)$$

$$\sum_{j \in Q_d} \sum_{c=1}^C x c_{pdc} \leq x m_d \quad d \in D \quad (17)$$

$$\sum_{j \in Q_p | j \neq d} \sum_{c=1}^C x c_{pj c} \leq (D-1) \left[x m_d + \left(1 - \sum_{c=1}^C x c_{pdc} \right) \right] \quad p \in P; d \in Q_p \quad (18)$$

$$x i_{pi} \leq N I z_p \quad p \in P; i \in I; \quad (19)$$

3.3.3 Modelo de variables binarias con tecnología eólica

A continuación se presenta el modelo de variables binarias con sus respectivos cambios con respecto al modelo de variables enteras.

Variables

Las variables relativas a la colocación de equipos $x a_{pa}$, $x b_{pb}$, $x r_{pr}$ y $x i_{pi}$ se sustituyen por las siguientes:

$x a_{pa} \rightarrow x a_{pan}$, Variable binaria que indica si se instala el aerogenerador número n del tipo a en el punto p . Toma valor 1 en caso afirmativo, 0 en caso contrario;
 $p \in P; a = 1, \dots, A; n = 1, \dots, NA$

$x b_{pb} \rightarrow x b_{pbn}$, Variable binaria que indica si se instala la batería número n del tipo b en el punto p . Toma valor 1 en caso afirmativo, 0 en caso contrario;
 $p = 1, \dots, P; b = 1, \dots, B; n = 1, \dots, NB$

$x r_{pr} \rightarrow x r_{prn}$, Variable binaria que indica si se instala el regulador número n del tipo r en el punto p . Toma valor 1 en caso afirmativo, 0 en caso contrario;
 $p \in P; r = 1, \dots, R; n = 1, \dots, NR$

$x i_{pi} \rightarrow x i_{pin}$, Variable binaria que indica si se instala el inversor número n del tipo i en el punto p . Toma valor 1 en caso afirmativo, 0 en caso contrario; $p \in P; i = 1, \dots, I; n = 1, \dots, NI$



Función objetivo

La función objetivo es ahora:

$$[MIN]Z = \sum_{p \in P} \sum_{a=1}^A \sum_{n=1}^{NA} CA_a xa_{pan} + \sum_{p \in P} \sum_{d \in Q_p} \sum_{c=1}^C L_{pd} CC_c xc_{pdc} + \sum_{p \in P} \sum_{b=1}^B \sum_{n=1}^{NB} CB_b xb_{pbn} + \sum_{p \in P} \sum_{i=1}^I \sum_{n=1}^{NI} CI_i xi_{pin} + \sum_{p \in P} \sum_{r=1}^R \sum_{n=1}^{NR} CR_r xr_{prn} + \sum_{d \in D} CM xm_d \quad (1')$$

Restricciones

Igual que en la función objetivo las restricciones también se ven afectadas por el cambio de variables. El significado de las restricciones es el mismo que en el modelo de variables enteras, la numeración también es la misma, solo que si tiene una comilla es que existe una variación en la restricción. La restricción X' sustituye a la restricción X. Si aparece un número nuevo la restricción se añade.

Generación y acumulación de energía

$$\sum_{a=1}^A \sum_{n=1}^{NA} xa_{pan} \leq NA x_p \quad p \in P \quad (2')$$

$$\sum_{a=1}^A \sum_{n=1}^{NA} xa_{pan} \geq x_p \quad p \in P \quad (3')$$

$$\sum_{p \in P | d \in Q_p} fe_{pd} + \sum_{a=1}^A \sum_{n=1}^{NA} EA_{da} xa_{dan} \geq \frac{ED_d}{\eta b \eta i} \left(\frac{1}{\eta c} + \left(1 - \frac{1}{\eta c} \right) x_p \right) + \sum_{q \in Q_d} fe_{dq}; \quad d \in D \quad (4')$$

$$\sum_{a=1}^A \sum_{n=1}^{NA} EA_{pa} xa_{pan} \geq \sum_{d \in Q_p} fe_{pd} \quad p \in P | p \notin D \quad (5')$$

$$\sum_{p \in P | d \in Q_p} fp_{pd} + \sum_{i=1}^I \sum_{n=1}^{NI} PI_i xi_{din} \geq FS \cdot PD_d \left(\frac{1}{\eta c} + \left(1 - \frac{1}{\eta c} \right) x_p \right) + \sum_{q \in Q_d} fp_{dq} \quad d \in D \quad (6')$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{n=1}^{NI} PI_i xi_{pin} \geq \sum_{d \in Q_p} fp_{pd} \quad p \in P | p \notin D \quad (7')$$

$$\sum_{b=1}^B \sum_{n=1}^{NB} EB_b xb_{dbn} + \left(\frac{VB}{DB} \sum_{j \in D} \frac{ED_j}{\eta b \eta i \eta c} \right) (1 - x_d) \geq \frac{VB}{DB} \left(\sum_{q \in Q_d} fe_{dq} + ED_d \right); \quad d \in D \quad (8')$$

$$\sum_{b=1}^B \sum_{n=1}^{NB} EB_b xb_{pbn} + \left(\frac{VB}{DB} \sum_{j \in D} \frac{ED_j}{\eta b \eta i \eta c} \right) (1 - x_p) \geq \frac{VB}{DB} \sum_{d \in Q_p} fe_{pd} \quad p \in P | p \notin D \quad (9')$$

Equipos

$$\sum_{r=1}^R \sum_{n=1}^{NR} P R_r x r_{prn} \geq \sum_{a=1}^A \sum_{n=1}^{NA} P A_a x a_{pan} \quad p \in P \quad (15')$$

$$x i_{pin} \leq x_p \quad p \in P; i \in I; n \in NI \quad (19')$$

Adicionales

En el modelo de variables binarias se añaden estas restricciones al modelo que evitan las simetrías que pueden aparecer en las variables referentes a la colocación aerogeneradores, baterías, reguladores e inversores, del mismo tipo.

$$x a_{pan} \geq x a_{pa(n+1)} \quad p = 1, \dots, P; a = 1, \dots, A; n = 1, \dots, NA - 1 \quad (20)$$

$$x b_{pbn} \geq x b_{pb(n+1)} \quad p = 1, \dots, P; b = 1, \dots, B; n = 1, \dots, NB - 1 \quad (21)$$

$$x r_{prn} \geq x r_{pr(n+1)} \quad p = 1, \dots, P; r = 1, \dots, R; n = 1, \dots, NR - 1 \quad (22)$$

$$x i_{pin} \geq x i_{pi(n+1)} \quad p = 1, \dots, P; i = 1, \dots, I; n = 1, \dots, NI - 1 \quad (23)$$

3.3.4 Modelo de variables enteras con tecnología solar

El modelo con tecnología solar con respecto al eólico se diferencia en el tipo de equipos que coloca, en lugar de colocar aerogeneradores se colocan paneles fotovoltaicos. Por lo que hace referencia tanto a los parámetros como a las variables se eliminan todos aquellos relacionados con aerogeneradores y se añaden los relacionados con paneles fotovoltaicos.

Variables

Las variables que se eliminan son: x_p , $x a_{pa}$ y $x r_{pr}$.

Las variables que se añaden se ven a continuación.

$x s_{psn}$, Variable entera que indica si se instala el panel número n de tipo s en el punto p .

Toma valor 1 en caso afirmativo, 0 en caso contrario; $p \in P; s = 1, \dots, S; n = 1, \dots, NS$

$x r s_{pzn}$, Variable entera que indica si se instala el regulador número n del tipo z en el punto p .

Toma valor 1 en caso afirmativo, 0 en caso contrario; $p \in P; s = 1, \dots, S; n = 1, \dots, NZ$

y_p , Variable entera que indica si en el punto p se instala algún panel. Toma el valor de 1 en caso afirmativo y valor 0 en caso contrario; $p \in P$



Función objetivo

A continuación se muestra la función objetivo:

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

Restricciones

Las restricciones tienen un significado análogo a las restricciones que aparecen en el modelo con tecnología eólica, la diferencia es que, como equipos de generación, se sustituyen los aerogeneradores por paneles fotovoltaicos, como también se sustituyen los reguladores eólicos por solares. La restricciones X del modelo con tecnología eólica de variables enteras se cambian por las restricciones X''.

Generación y acumulación de energía

$$\sum_{s=1}^S xs_{ps} \leq NS y_p \quad p \in P \quad (2'')$$

$$\sum_{s=1}^S xs_{ps} \geq y_p \quad p \in P \quad (3'')$$

$$\begin{aligned}
 \sum_{p \in P | d \in Q_p} fe_{pd} + \sum_{s=1}^S ES_s xs_{ds} \geq \\
 \frac{ED_d}{\eta b \eta i} \left(\frac{1}{\eta c} + \left(1 - \frac{1}{\eta c} \right) z_p \right) + \sum_{q \in Q_d} fe_{dq}; \quad d \in D
 \end{aligned} \quad (4'')$$

$$\sum_{s=1}^S ES_s xs_{ps} \geq \sum_{d \in Q_p} fe_{pd} \quad p \in P | p \notin D \quad (5'')$$

$$\sum_{p \in P | d \in Q_p} fp_{pd} + \sum_{i=1}^I PI_i xi_{di} \geq FS \cdot PD_d \left(\frac{1}{\eta c} + \left(1 - \frac{1}{\eta c} \right) y_p \right) + \sum_{q \in Q_d} fp_{dq} \quad d \in D \quad (6'')$$

$$\sum_{b=1}^B EB_b xb_{db} + \left(\frac{VB}{DB} \sum_{j \in D} \frac{ED_j}{\eta b \eta i \eta c} \right) (1 - y_d) \geq \frac{VB}{DB} \left(\sum_{q \in Q_d} fe_{dq} + ED_d \right); \quad d \in D \quad (8'')$$

$$\sum_{b=1}^B EB_b xb_{pb} + \left(\frac{VB}{DB} \sum_{j \in D} \frac{ED_j}{\eta b \eta i \eta c} \right) (1 - y_p) \geq \frac{VB}{DB} \sum_{d \in Q_p} fe_{pd} \quad p \in P | p \notin D \quad (9'')$$

Definición de la red

$$\sum_{j | d \in Q_j} \sum_{c=1}^C xc_{jdc} + y_d \leq 1 \quad d \in D \quad (12'')$$

Equipos

$$\sum_{z=1}^Z PZ_z xz_{pz} \geq \sum_{s=1}^S PS_s xs_{ps} \quad p \in P \quad (15'')$$

$$xi_{pi} \leq NI y_p \quad p \in P; i \in I; \quad (19'')$$

3.3.5 Modelo de variables enteras con tecnología híbrida

Como ya se ha explicado anteriormente el modelo con tecnología híbrida permite la colocación de las dos tecnologías, tanto eólica como solar. Los cambios de este modelo se comparan con respecto al modelo con tecnología eólica de variables enteras.

Variables

Se añaden las mismas variables que en el modelo de tecnología solar. Además de estas se añade otra nueva variable.

z_p , Variable binaria que indica si en el punto p se instala algún panel fotovoltaico o algún aerogenerador. Toma el valor de 1 en caso afirmativo y valor 0 en caso contrario; $p \in P$

Función objetivo

La función objetivo es la que se muestra a continuación

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

Restricciones

Si una restricción sufre un cambio con respecto al modelo de variables enteras con tecnología eólica la restricción X pasa a X'''. Si se añade una restricción nueva al modelo entonces la restricción sigue la numeración.

Generación y acumulación de energía

La restricción (24) y (25) obligan a la variable y_p a coger el valor de 1 cuando se coloca un panel solar en un punto p y a valer 0 en caso contrario, exactamente igual que en modelo de solar. Las restricciones (26), (27) y (28) definen cuando en un punto se coloca un equipo de generación, si en un punto un panel fotovoltaico, un aerogenerador o ambos ese punto es de generación y por la tanto la variable z_p valdrá 1. En caso contrario valdrá 0, ya que no se coloca ningún equipo de generación. El resto de restricciones simplemente sufren variaciones.

$$\sum_{s=1}^S xs_{ps} \leq NS y_p \quad p \in P \quad (24)$$



$$\sum_{s=1}^S x s_{ps} \geq y_p \quad p \in P \quad (25)$$

$$y_s \leq z_p \quad p \in P \quad (26)$$

$$x_s \leq z_p \quad p \in P \quad (27)$$

$$x_p + y_p \geq z_p \quad p \in P \quad (28)$$

$$\sum_{p \in P | d \in Q_p} f e_{pd} + \sum_{a=1}^A E A_{da} x a_{da} + \sum_{s=1}^S E S_s x s_{ds} \geq \frac{E D_d}{\eta b \eta i} \left(\frac{1}{\eta c} + \left(1 - \frac{1}{\eta c} \right) z_p \right) + \sum_{q \in Q_d} f e_{dq}; \quad d \in D \quad (4''')$$

$$\sum_{a=1}^A E A_{pa} x a_{pa} + \sum_{s=1}^S E S_s x s_{ps} \geq \sum_{d \in Q_p} f e_{pd} \quad p \in P | p \notin D \quad (5''')$$

$$\sum_{p \in P | d \in Q_p} f p_{pd} + \sum_{i=1}^I P I_i x i_{di} \geq F S \cdot P D_d \left(\frac{1}{\eta c} + \left(1 - \frac{1}{\eta c} \right) z_p \right) + \sum_{q \in Q_d} f p_{dq} \quad d \in D \quad (6''')$$

$$\sum_{i=1}^I P I_i x i_{pi} \geq \sum_{d \in Q_p} f p_{pd} \quad p \in P | p \notin D \quad (7''')$$

$$\sum_{b=1}^B E B_b x b_{db} + \left(\frac{V B}{D B} \sum_{j \in D} \frac{E D_j}{\eta b \eta i \eta c} \right) (1 - z_d) \geq \frac{V B}{D B} \left(\sum_{q \in Q_d} f e_{dq} + E D_d \right); \quad d \in D \quad (8''')$$

$$\sum_{b=1}^B E B_b x b_{pb} + \left(\frac{V B}{D B} \sum_{j \in D} \frac{E D_j}{\eta b \eta i \eta c} \right) (1 - z_p) \geq \frac{V B}{D B} \sum_{d \in Q_p} f e_{pd} \quad p \in P | p \notin D \quad (9''')$$

Definición de la red

La definición de la red solo se sustituye la variable que hace referencia a la localización de los equipos.

$$\sum_{j | d \in Q_j} \sum_{c=1}^C x c_{jdc} + z_d \leq 1 \quad d \in D \quad (12''')$$

Equipos

La restricción (29) se añade determinado el número de reguladores necesarios para la instalación fotovoltaica.

$$\sum_{z=1}^Z P Z_z x z_{pz} \geq \sum_{s=1}^S P S_s x s_{ps} \quad p \in P \quad (29)$$

$$x i_{pi} \leq N I z_p \quad p \in P; i \in I; \quad (20''')$$

4 Experimentación computacional realizada

En este capítulo se presenta la experiencia computacional realizada para validar el modelo de sistemas de electrificación planteado. En el primer apartado se introducen los proyectos reales en los cuales se basará la experimentación. A continuación se realiza una experimentación preliminar para comparar las dos formulaciones matemáticas desarrolladas en el capítulo anterior en relación al tipo de variable utilizadas. Por último se plantea la experimentación computacional completa que servirá para evaluar los procesos de resolución y opciones tecnológicas de electrificación.

4.1 Descripción de comunidades

La experimentación se realiza en tres comunidades llamadas Cerro Alto, Alto Perú y El Alumbre. Las tres comunidades están situadas en Perú en la región de Cajamarca (Figura 4.1).

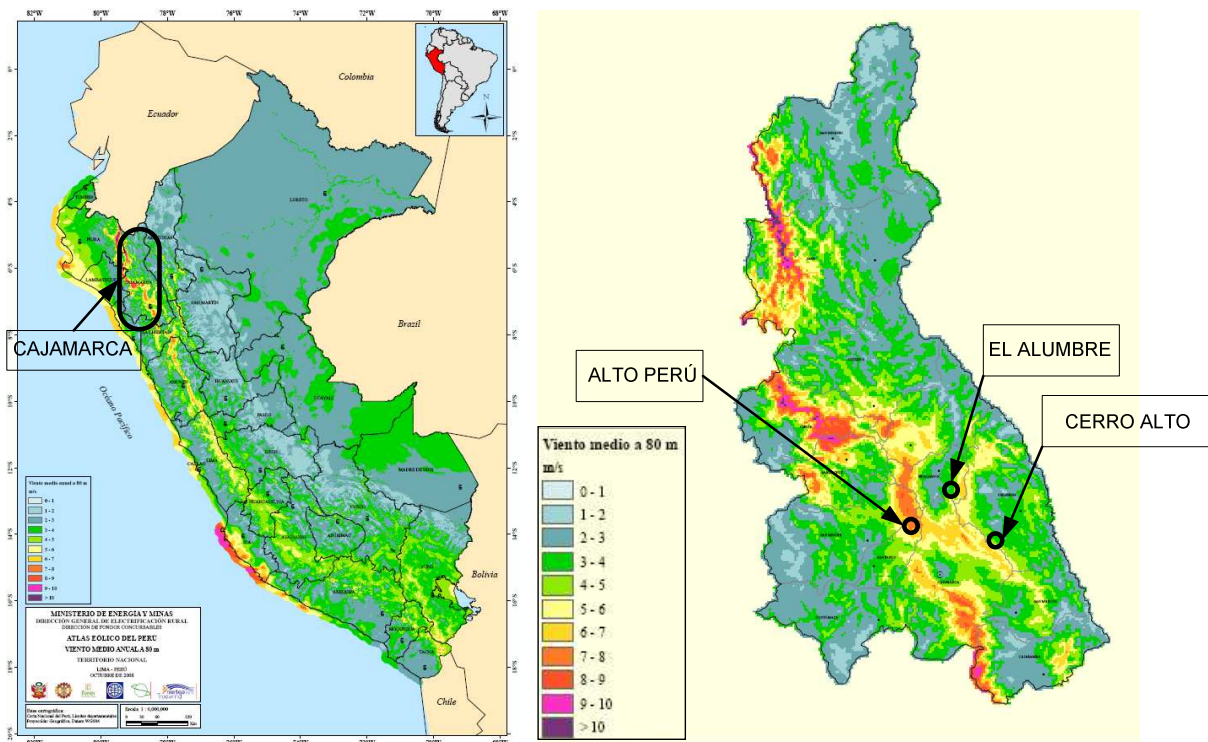


Figura 4.1. Localización de la región de Cajamarca y de las tres comunidades en el mapa de viento de Perú medio a 80m (Fuente: Meteosim Treuwind & Latin Bridge Business, 2008).

Estas tres comunidades son los primeros proyectos de electrificación rural mediante el uso de generación eólica y solar implementados en la sierra norte del Perú. Con los resultados obtenidos se pudo comparar como se hubieran podido hacer los proyectos.

4.1.1 Cerro Alto

La comunidad está situada distrito de Namora, provincia de Cajamarca, región Cajamarca, Perú. La comunidad está compuesta por veinte familias y están bastante dispersas. (Ramirez et al, 2006b).

Las principales actividades que generan algún ingreso económico para la población de la zona



son la agricultura, ganadería y para algunas familias la venta de mano de obra (fuerza de trabajo). La ganadería es la actividad de mayor importancia, para todas las familias, de ella depende gran parte de los ingresos, a través de la venta de leche principalmente.

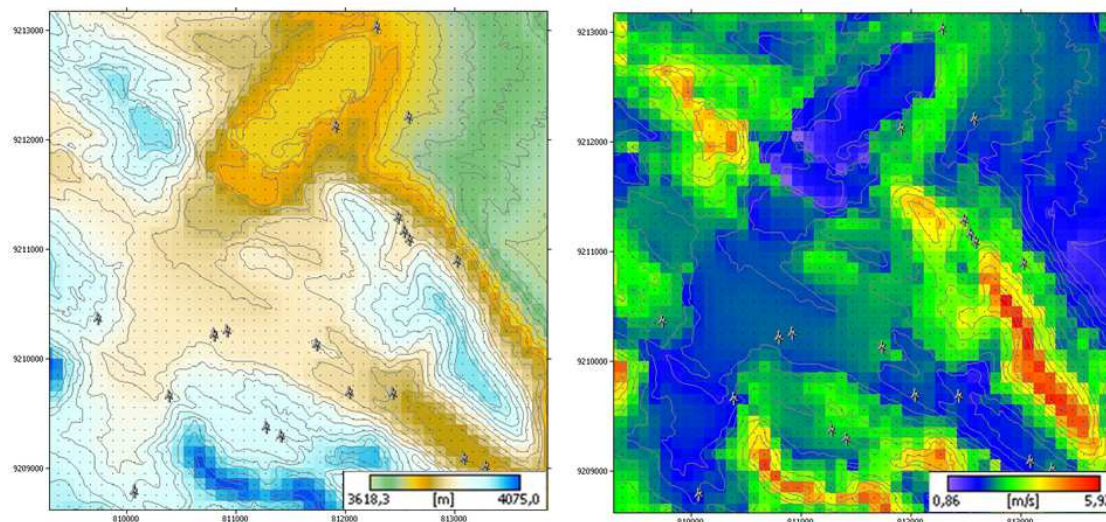


Figura 4.2 Mapas de recurso eólico y elevación de Cerro Alto.

Cerro Alto está ubicada a 3700 m.s.n.m, tiene un clima frío durante todo el año, con precipitaciones pluviales promedios de 827mm durante los meses de enero a abril y con presencia de vientos fuertes durante los meses de julio, agosto y septiembre. La temperatura promedio durante en el día es de 8 °C y por las noche desciende bajo 0 °C.

La comunidad se encuentra muy dispersa entre una superficie de 5km x 4,5km (Figura 4.2). Es la comunidad que tiene menos concentración de usuarios por kilómetro cuadrado, igual a 2,1 usuarios por kilómetro cuadrado. Observando el mapa recurso eólico vemos que hay puntos de la superficie con un muy buen potencial eólico, pero en estas zonas no hay ningún usuario. Los puntos de consumo se encuentran en zonas de escaso recurso eólico. Al cruzar el mapa de elevación con el mapa de recurso, se destaca que las zonas más altas coinciden con las zonas de mayor recurso eólico.

Por lo que hace referencia al recurso solar de la comunidad, como ya se ha comentado se escoge de bases de datos del ministerio, la comunidad de Cerro Alto tiene un PSH de 4,3.

Es la primera comunidad de la sierra norte andina del Perú electrificada mediante sistemas híbridos. Se ha instalado un sistema híbrido por usuario, en un total de veinte sistemas, los sistemas híbridos constan de un panel de 50W y de un aerogenerador de 100W (Figura 4.3). El proyecto fue llevado a cabo mediante ITDG-Soluciones Prácticas (Perú) conjuntamente con el gobierno regional de Perú finalizando la instalación en agosto del 2008.



Figura 4.3 Vista general de la comunidad de Cerro Alto y de los aerogeneradores de 100W y paneles fotovoltaicos de 50W.

4.1.2 Alto Perú

La comunidad rural de Alto Perú se encuentra ubicada en el distrito de Tumbadén, provincia de San Pablo, región Cajamarca, Perú (Ramirez et al, 2009). En la comunidad viven 85 familias permanentemente. Las familias están muy dispersas en el territorio (Figura 4.4). La comunidad se divide en dos zonas: una parte Alta, donde viven 26 familias con una población de 99 habitantes, y una parte Baja, donde viven el resto de familias y viven un total de 256 habitantes.

Las actividades productivas giran en torno a la ganadería, la agricultura, los servicios y la venta de fuerza de trabajo. De éstas, la agricultura y la ganadería son las actividades más importantes. La producción agrícola está destinada en la mayoría de los casos para autoconsumo. Los principales cultivos en el caserío, son: la papa, la cebada, las habas, y en menor proporción la oca, el olluco y diversas hortalizas en huertas caseras. En cuanto a la producción ganadera, la crianza de ganado vacuno es la más importante, pues constituye una fuente adicional de ingresos económicos principalmente por la venta de leche.

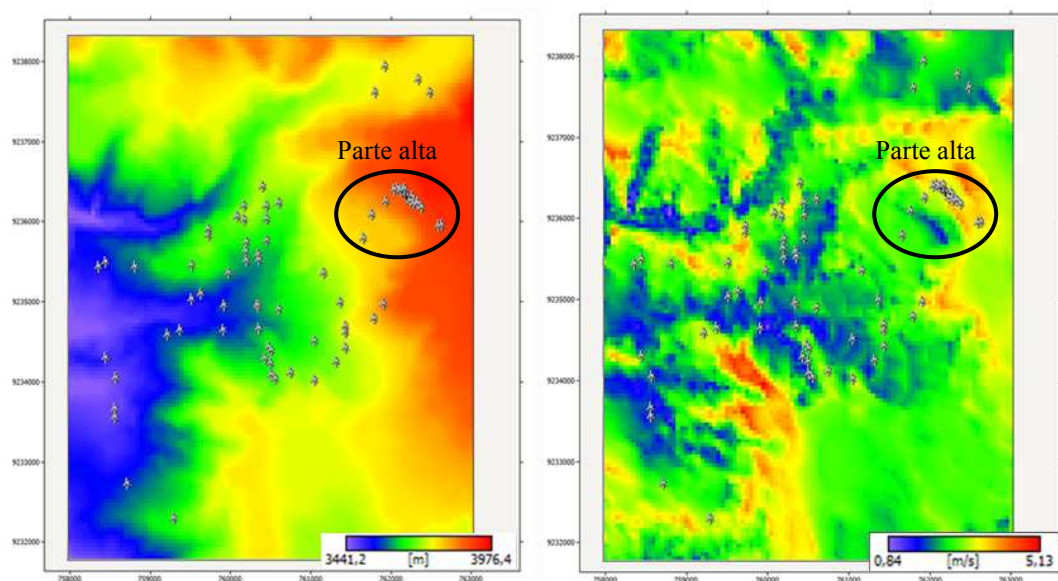


Figura 4.4 Mapa de elevación y recurso eólico de Alto Perú.



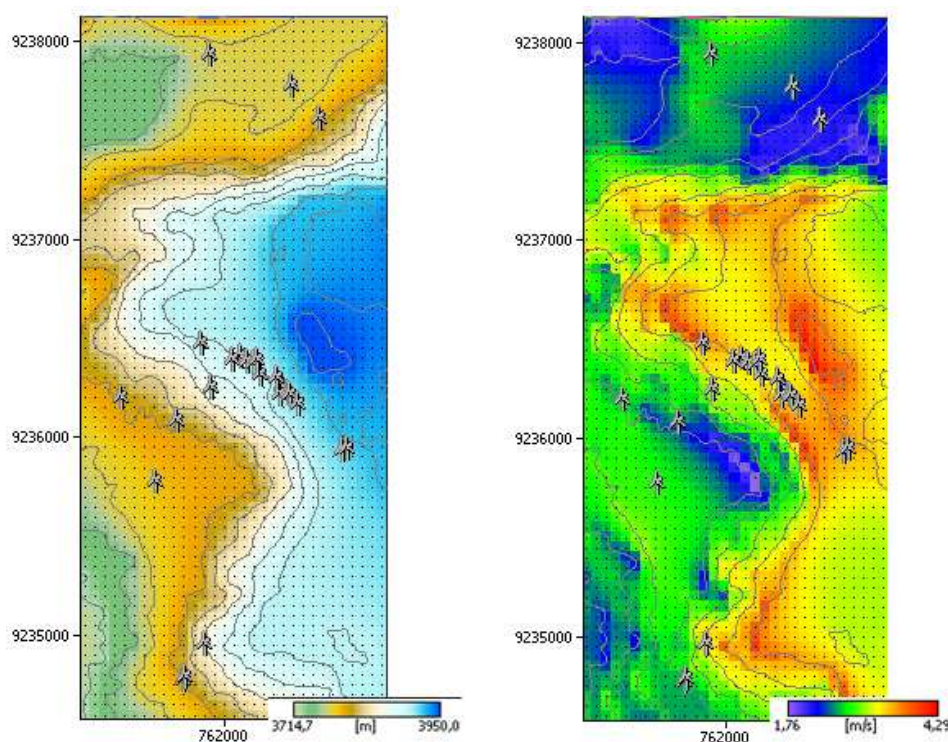


Figura 4.5 Mapa de elevación y recurso eólico de Alto Perú, Parte Alta.

La comunidad de Alto Perú se ubica entre los 3450 a 4000 m.s.n.m. Su clima es frío, la temperatura oscila entre los 10°C y 15°C. La época de lluvias se presenta entre los meses de diciembre a mayo, mientras que durante los meses de junio a noviembre inicia la temporada de verano, acompañada de vientos de mayor intensidad.

Por lo que hace referencia al recurso solar de la comunidad, como ya se ha comentado se escoge de bases de datos del ministerio, la Comunidad de Alto Perú tiene un PSH de 4,3.

La zona marcada en la Figura 4.4 hace referencia a la parte alta de la comunidad. Es la zona de la comunidad sobre la cual se realiza la experimentación de esta comunidad. Como se puede apreciar es la zona con mejor recurso eólico de la comunidad. Se puede observar que los puntos de consumo situados en los mapas tanto de elevación como de recurso eólico (Figura 4.5).

Esta parte alta de la comunidad, está situada como se puede ver en el mapa de elevación a unos 3900 m.s.n.m. Esta zona tiene 3 zonas claramente diferenciadas, una parte central donde la concentración de viviendas es grande, en la zona alta tres usuarios dispersos y con poco recurso eólico. Y por último en la parte inferior tres usuarios.

La parte Alta de Alto Perú es el segundo proyecto de electrificación rural mediante energía eólica de la sierra norte andina del Perú. Se ha electrificado mediante de dos microrredes eléctricas con energía eólica (Figura 4.6). Se ha dado electricidad a 13 familias que se encuentran muy juntas en la parte central de la parte Alta de la comunidad. La solución adoptada es la creación de dos microrredes, utilizando como equipos de generación dos

aerogeneradores de 500W en cada una de las microrredes. El proyecto fue promovido por ITDG-Soluciones Prácticas (Perú), Ingeniería Sin Fronteras-Cataluña (España) y con GreenEmpowerment (EE.UU). La implementación del proyecto finalizó en julio 2009.



Figura 4.6 Instalación de aerogenerador de 500W en la comunidad de Alto Perú y vista general de la comunidad

4.1.3 El Alumbre

La comunidad de El Alumbre se encuentra ubicada al sur del distrito de Bambamarca, provincia de Hualgayoc, región Cajamarca, Perú (Ramírez *et al*, 2007a). En la comunidad viven 35 familias permanentemente, con aproximadamente 175 pobladores. Las familias están muy alejadas unas de otras. En el centro de la comunidad existen sólo 5 viviendas, además de la escuela de nivel primario, secundario, el centro de salud, la iglesia evangélica y el local comunal.

La agricultura, la ganadería y la venta de fuerza de trabajo se constituyen en las principales actividades económicas de la mayor parte de las familias. Los suelos son turbosos con escasa cobertura vegetal, la producción agrícola es principalmente para el autoconsumo, los cultivos son: papa, oca, olluco, cebada, habas. La ganadería es una de las actividades más importantes, puesto que de ella depende sus ingresos económicos, a través de la venta de leche, la cría de ganado vacuno y ovino son los más principales.

El clima es frío durante todo el año, La temperatura promedio durante todo el día es de 8°C y por la noche desciende bajo 0°C. En cuanto a la topografía, el relieve del terreno es accidentado. Se dispone de mapas topográficos del terreno, que son necesarios para el cálculo del recurso del eólico de la comunidad. La comunidad se encuentra situada entre 3500 y 4000 m.s.n.m.

La comunidad se encuentra comprendida en una superficie de 3,5km x 3,5 km. La dispersión de las casa es alta excepto en la parte central de la comunidad donde podría considerarse el centro poblado de la comunidad, donde se encuentran diversos usuarios conjuntamente con la escuela y la posta de salud (Figura 4.7).



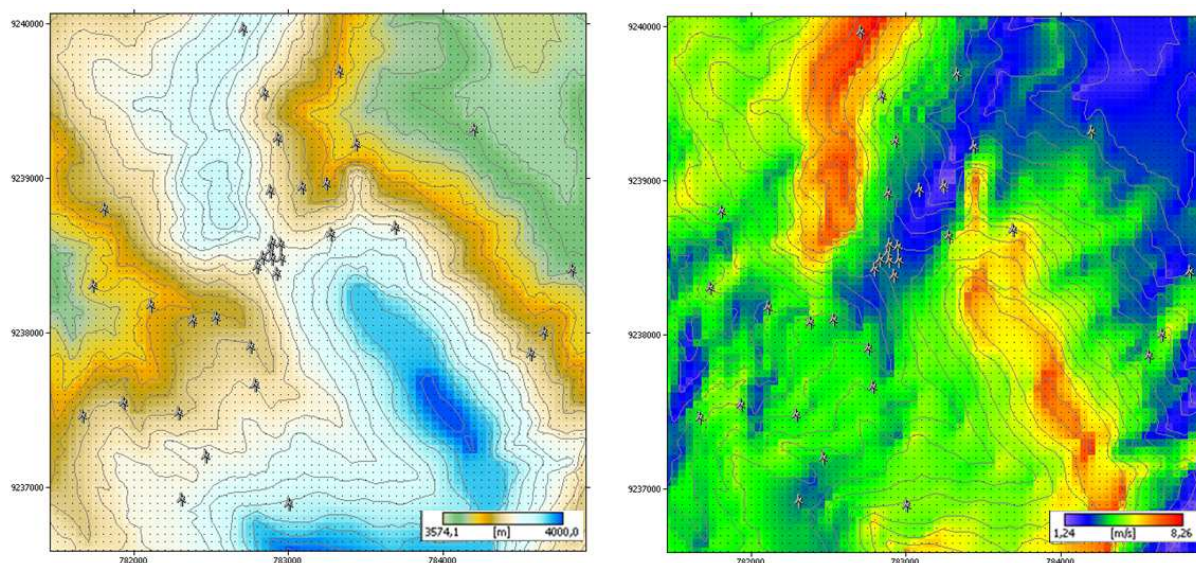


Figura 4.7 Mapa de elevación y mapa de recurso eólico de El Alumbre

Comparando los dos mapas se destaca que en las zonas más altas de la comunidad (color rojo del mapa de la izquierda) coinciden con las zonas de mayor recurso eólico de la comunidad. De igual modo las zonas de pertenecientes al valle o mejor dicho de menor elevación tiene un recurso eólico bajo (Figura 4.7).

Por lo que hace referencia al recurso solar de la comunidad, como ya se ha comentado se escoge de bases de datos del ministerio, la Comunidad de El Alumbre tiene un PSH de 4,3.

El Alumbre es la primera comunidad que ha sido electrificada en Perú, en la sierra norte de los Andes, mediante energía eólica (Figura 4.8). La ejecución del proyecto la llevo a cabo ITDG-Soluciones Prácticas (Perú) conjuntamente con Ingeniería Sin Fronteras–Cataluña (España). La ejecución del proyecto constó de dos etapas:

- Primera etapa: Se instaló un aerogenerador individual a cada usuario de 100W con un total de 21 aerogeneradores de 100W y se instaló un sistema de 500 W en la escuela de la comunidad. La primera etapa finalizó en marzo 2008.
- Segunda etapa: Instalaron 13 equipos individuales de 100W para 13 usuarios y por último un aerogenerador de 500W en la posta de salud de la comunidad. La segunda fase finalizó en febrero de 2009.

Con estas dos etapas se completo la electrificación de la comunidad, todos los usuarios tienen su propio equipo individual. Los recursos básicos de la comunidad también quedaron cubiertos con la electrificación del centro de salud y de la escuela. Dentro de la comunidad se capacito a dos técnicos que son los encargados de realizar el mantenimiento y los recambios pertinentes de los sistemas microeólicos.



Figura 4.8 Vista general de la comunidad de El Alumbre y de los aerogeneradores de 100W y 500W instalados.

4.2 Experimentación preliminar

Antes de empezar la experimentación detallada, se realiza una experimentación preliminar para determinar qué modelo se utilizará, el modelo de variables binarias o el de variables enteras. A partir de estos resultados se selecciona el que obtenga los resultados más satisfactorios para realizar el resto de la experimentación. Además, los resultados servirán para analizar el efecto de añadir puntos de cuadrícula y su influencia en el funcionamiento del modelo y en los resultados. La experimentación preliminar se centrará en el modelo con tecnología eólica; los resultados obtenidos sobre esta tecnología se consideran representativos para el resto (solar e híbrido).

4.2.1 Experimentación realizada

La experimentación preliminar consiste en la resolución de los siguientes ejemplares:

1. Se toman como ejemplo las 3 comunidades anteriormente presentadas (Cerro Alto, Alto Perú y El Alumbre) en relación al recurso eólico disponible, al número y situación de los puntos de consumo, a los días de autonomía y al factor de simultaneidad.
2. Se consideran 2 escenarios de demanda:
 - a. Demanda Baja (DB): Se define la demanda de energía y potencia según la evaluación de la demanda realizada durante el análisis socioeconómico de las comunidades: 380Wh/día y 200W para los domicilios familiares y 1325Wh/día y 600W para la escuela y la posta de salud.
 - b. Demanda Alta (DA): Se considera el doble de la demanda baja; este escenario se genera pensando en posibles futuros usos productivos de la energía, que no se consideraron en los análisis socioeconómicos.
3. En cuanto a la posible incorporación de puntos de cuadrícula como posibles puntos de generación, se consideran los siguientes casos:
 - a. Sin cuadrícula (SC): Solo se consideran como posibles puntos de generación a los mismos puntos de consumo.
 - b. Cuadrícula de 500 m (C.500), de 250 m (C.250) o de 100 m (C.100): La idea de crear estas cuadrículas es la de aprovechar puntos de buen recurso eólico de la



zona. Para generar estas cuadrículas, primero se selecciona un área rectangular que comprenda todos los puntos de consumo. En esta área se genera una cuadrícula de 500 m, 250 m o 100 m en función de la experimentación y se escogen los puntos que rodean los puntos de consumo como posibles puntos de generación.

4. En cuanto a los datos de equipos de generación se consideran los aerogeneradores de 100W y 500W (Chiroque, (2008a)), ya instalados en las comunidades. También se consideran equipos de generación de 1000W y 2000W (Bornay). Con respecto a los datos de los equipos de instalación se consideran datos reales de equipos instalados.
5. Tiempo de cálculo: Se consideran todos los experimentos con dos tiempos de cálculo, 3600s y 18000s.

Todos los ejemplares se han resuelto en un PC IntelCore Duo T5870 2Gb de RAM. El detalle de los ejemplares se encuentra en el anexo A.1.

4.2.2 Comparación de modelos

Los resultados de esta experimentación se presentan en las dos siguientes tablas, según el tiempo de cálculo considerado: la Tabla 4.1 muestra los resultados obtenidos con un tiempo de cálculo de 3600 s y la Tabla 4.2 con 18000 s. Las tabla 4.1 y 4.2, muestran las soluciones obtenidas para cada una de las comunidades y para cada opción de cuadrícula. Para cada ejemplar se muestra en número de variables y restricciones, la demanda, la solución obtenida y la cota. En cada tabla se añade una columna Dif (%), que calcula la diferencia entre soluciones de los dos modelos:
$$Dif (\%) = \frac{Sol B - Sol E}{max(Sol B, Sol E)} \times 100$$
 Si Dif es positivo, la

solución del coste total del modelo de variables enteras es inferior a la solución del modelo de variables binarias, y por lo tanto el modelo de variables enteras obtiene una mejor solución; si Dif es negativo, el modelo de variables binarias es el que obtiene la mejor solución. La última fila de la experimentación de cada comunidad muestra la suma total de todas las soluciones, así como también la diferencia en tanto por ciento entre dichas sumas.

Comun.	Cuadr.	VARIABLES BINARIAS					VARIABLES ENTERAS				Dif (%)
		Var.	Restr.	Dem.	Sol B (\$)	Cota(\$)	Var.	Restr.	Sol E(\$)	Cota(\$)	
Cerro Alto	SC	3269	4214	DB	34227	32977	1269	1814	34227	33917	0,000
				DA	52915	46937			51134	47729	3,366
	C.500	7535	9093	DB	34252	31540	2135	2644	34662	32264	-1,183
				DA	54589	41755			51481	42543	5,693
	C.250	7492	9054	DB	35161	32443	2092	2574	34227	32632	2,656
				DA	52440	45965			51266	47200	2,239
	C.100	5026	6310	DB	34227	32697	1726	2350	34227	33275	0,000
				DA	51257	45964			51016	47095	0,470
	Total				349068				342240		1,956

Alto Perú	SC	4671	6216	DB	39310	36002	2071	3096	39391	36286	-0,206
				DA	58707	51761			58508	52632	0,339
	C.500	6927	9093	DB	38937	33996	2927	4293	39436	33560	-1,265
				DA	59419	48994			58762	49282	1,106
	C.250	9207	12165	DB	39284	31864	4007	5025	39348	31620	-0,163
				DA	60667	47878			59388	47430	2,108
	C.100	11129	14840	DB	44143	28776	5029	7520	40987	29511	7,149
				DA	62022	46541			58690	45491	5,372
	Total				402489				394510		1,982
El Alumbre	SC	5926	7735	DB	60716	53856	2426	3535	61061	52341	-0,565
				DA	94988	77036			96179	73550	-1,238
	C.500	12326	15722	DB	61471	51254	4626	6482	60683	47105	1,282
				DA	117940	70226			109975	66728	6,753
	C.250	18878	24281	DB	66175	42333	7378	10481	63599	42162	3,893
				DA	140343	63317			116668	61591	16,869
	C.100	23440	30352	DB	81903	33142	9440	13552	62625	34866	23,538
				DA	136123	60593			127401	54737	6,407
	Total				759659				698191		8,092

Tabla 4.1 Comparación de variables enteras y binarias, tiempo = 3600s.

Resultado de la comparación de modelos (3600 s):

Cerro Alto: Solo en un ejemplar el resultado con variables binarias obtiene una solución mejor. En dos ejemplares la solución es la misma pero las cotas con el modelo de variables enteras son mayores, acercándose más el modelo de variables enteras a la solución objetivo. En el resto de ejemplares se obtiene mejores soluciones con el modelo de variables enteras.

Alto Perú: En un 62,5% de los ejemplares (5 de 8), las soluciones con el modelo de variables enteras son mejores. Al incrementar el número de variables y restricción al añadir puntos de cuadrícula el modelo de variables enteras responde mejor. La suma total de soluciones del modelo de variables enteras es inferior en un 1,982% con respecto al de binarias.

El Alumbre: Las soluciones con el modelo de variables enteras generalmente obtiene mejores soluciones. En un 75% de los ejemplares (6 de 8) son más satisfactorias las soluciones obtenidas con el modelo de variables enteras. Al aumentar las restricciones y variables del modelo las diferencias entre los modelos crecen, favoreciendo al modelo de variables enteras. La suma total de soluciones enteras es un 8,092% menor en el modelo de variables enteras.

Comun.	Cuadr.	VARIABLES BINARIAS					VARIABLES ENTERAS				Dif(%)
		Var.	Restr.	Dem.	Sol B (\$)	Cota(\$)	Var.	Restr.	Sol E (\$)	Cota(\$)	
Cerro Alto	SC	3269	4214	DB	34227	33993	1269	1814	34227	34227	0
				DA	52464	47864			51109	48737	2,583
	C.500	7535	9093	DB	34227	32333	2135	2644	34227	33285	0
				DA	53886	42479			51323	43164	4,756
	C.250	7492	9054	DB	34227	33631	2092	2574	34227	33243	0
				DA	53886	42479			51323	43164	4,756



				DA	51122	47225			51109	48097	0,025
	C.100	5026	6310	DB	34227	33984	1726	2350	34227	34227	0
				DA	51257	46947			51017	48103	0,468
	Total				345637				341466		1,207
Alto Perú	SC	4671	6216	DB	39310	37740	2071	3096	39391	37275	-0,206
				DA	58707	53353			58508	54079	0,339
	C.500	6927	9093	DB	38904	35032	2927	4293	38937	34817	-0,085
				DA	58739	50600			56120	50901	4,459
	C.250	9207	12165	DB	38937	33567	4007	5025	39335	32335	-1,012
				DA	59565	48834			59141	48252	0,712
	C.100	11129	14840	DB	40453	30112	5029	7520	39772	30536	1,683
				DA	61283	47548			58577	46851	4,416
	Total				395898				389781		1,545
Alumbre	SC	5926	7735	DB	60683	55188	2426	3535	61061	52341	-0,619
				DA	93597	78477			95099	74968	-1,579
	C.500	12326	15722	DB	61061	52561	4626	6482	60683	48379	0,619
				DA	96997	71220			105058	67877	-7,673
	C.250	18878	24281	DB	61799	42832	7378	10481	60843	43663	1,547
				DA	107187	65701			103630	62700	3,318
	C.100	23440	30352	DB	62153	34715	9440	13552	62400	36177	-0,396
				DA	130191	63068			120828	55609	7,192
	Total				673668				669602		0,604

Tabla 4.2 Comparación de variables enteras y binarias, tiempo = 18000s

Resultado de la comparación de modelos (18000s):

Cerro Alto: En la mitad de los casos la solución obtenida es la misma en ambos modelos. De entre estos cuatro casos en dos ellos el modelo de variables enteras encuentra la solución óptima, y en los otros casos las cotas son mayores con respecto al modelo de variables binarias, estando la solución más cercana al óptimo. En el otro 50% de los casos el modelo de variables enteras obtiene mejores soluciones.

Alto Perú: En un 62,5% de los ejemplares (5 de 8) las soluciones obtenidas con el modelo de variables enteras son más satisfactorias. Al aumentar el número de variables y restricciones el modelo de variables enteras funciona mejor.

El Alumbre: Cada uno de los modelos tiene un 50% soluciones mejores, pero la suma total de las soluciones del modelo de variables enteras es un 0,604% mejor. Al aumentar el número de variables el modelo de variables enteras responde mejor, esta diferencia con respecto a el ejemplar de 3600s a disminuido considerablemente.

Conclusiones de la comparación de modelos:

- En todas las comunidades siempre hay un mayor número de mejores soluciones con el modelo de variables enteras, excepto en la comunidad de El Alumbre con un ejemplar de 18000s, donde el número de mejores soluciones coincide.

- La suma total de las soluciones de los ejemplares para cada comunidad siempre es mejor con el modelo de variables enteras.
- Cuando las soluciones entre ambos modelos coinciden, el modelo de variables enteras encuentra la solución óptima u obtiene cotas más altas, estando más cerca del óptimo.

Así, se concluye que el modelo de variables enteras obtiene mejores resultados que el modelo de variables binarias. Por lo tanto, el resto de la experimentación de este trabajo se centrará en el uso del modelo de variables enteras.

4.2.3 Influencia de puntos de cuadrícula

La experimentación preliminar permite la comparación de modelos pero también permite estudiar cómo responde el modelo al añadir puntos de cuadrícula como puntos posibles de generación. Añadir estos puntos permite potencialmente encontrar una solución mejor, pero aumenta el número tanto de variables como de restricciones y lo que generalmente dificulta la resolución. Las comparaciones se realizan teniendo en cuenta tanto las soluciones obtenidas con el modelo de variables binarias como con el modelo de variables enteras.

Cerro Alto: En un 37,5% de los ejemplares (9 de 24) las soluciones sin cuadrícula obtienen mejores resultados que añadiendo las cuadrículas. En un 20,83% los ejemplares (5 de 24 ejemplares) con cuadrícula son mejores, añadiendo las cuadrículas, y en el resto, las soluciones son iguales. De las diez soluciones iguales en un 90% (9 de 10) de las coincidencias, las cotas obtenidas con la experimentación sin cuadrícula es mayor, el resto 10% (1 de 10) las cotas coinciden ya que se encuentra en la solución óptima.

Alto Perú: En un 66,6% los ejemplares (16 de 24), las soluciones sin cuadrícula son mejores, en el resto de los casos las soluciones con cuadrícula son mejores. Al aumentar el número de variables y restricciones por el uso de las diferentes cuadrículas las diferencias aumentan, empeorando, con respecto a no utilizar la cuadrícula.

El Alumbre: En un 87,5% de los ejemplares (21 de 24), las soluciones sin utilizar la cuadrícula son mejores. Solo hay en 3 de los ejemplares donde la cuadrícula funciona mejor. Como en el caso de Alto Perú al aumentar el número de variables y restricciones se encuentran peores soluciones.

Observando el número de variables y restricciones, Cerro Alto es la comunidad con menor número de variables, con unos resultados mejores, seguida de Alto Perú y por último En El Alumbre añadir los puntos de la cuadrícula no mejora la solución. En general, aunque potencialmente la cuadrícula puede mejorar la solución, a la práctica las soluciones obtenidas son peores ya que el modelo responde peor al aumentar el número de variables y restricciones.

4.3 Propuesta de procesos de resolución

Según el análisis de resultados de la experimentación preliminar, añadir puntos de la cuadrícula como posibles puntos de generación, tal como se han generado las cuadrículas, no favorece encontrar soluciones mejores. Esto es debido al aumento en el número de variables y



restricciones de los ejemplares. A partir de aquí, se estudian métodos alternativos de resolución de generar puntos de la cuadrícula que conservar las ventajas de añadir puntos de generación sin incrementar excesivamente el tamaño de los ejemplares. Los métodos se proponen a partir de dos ideas básicas: mejorar la generación de puntos a incluir y permitir una resolución secuencial y por partes

En cuanto a la generación, en la experimentación preliminar las cuadrículas se generan pensando en el uso de puntos lejanos (a 500m), intermedios (a 250m) y cercanos a (a 100m) de generación con buen potencial eólico, independientemente. Como es lógico, en una misma comunidad le pueden favorecer el uso tanto de puntos lejanos como intermedios como cercanos, es por eso necesario la creación de una fusión de entre todas las cuadrículas. Para limitar el incremento de variables y restricciones que produciría una unión directa de estas cuadrículas, se propone un método que compara el potencial eólico de los puntos y solo incluye los más favorables. No se añaden todos los puntos de las cuadrículas:

- Cuadrícula de 100m: Solo se añaden aquellos puntos que rodean a un punto de consumo y que su recurso eólico es superior al de los puntos de consumo.
- Cuadrícula de 250m Solo se añaden aquellos puntos que rodean a un punto de consumo y que su recurso eólico es superior a un punto añadido de la cuadrícula de 100m que envuelve a ese mismo punto de consumo.
- Cuadrícula de 500m: Solo se añaden aquellos puntos que rodean a un punto de consumo y que su recurso eólico es superior a un punto añadido de la cuadrícula de 250m que envuelve a ese mismo punto de consumo.

Si a un punto consumo no se le añade ningún punto de la cuadrícula de 100m, se añadirán los puntos de la cuadrícula de 250m que rodean a un punto de consumo y que su recurso eólico es superior al de ese punto de consumo. De igual manera con los puntos de la cuadrícula de 250m y de 500m.

En cuanto a los procesos de resolución, se plantea 2 posibles procesos de resolución alternativos.

Proceso 1: Se añaden los puntos de la cuadrícula como posibles puntos de ubicación de elementos de generación conjuntamente con los puntos de consumo, y se resuelve el modelo completo de toda la comunidad.

Proceso 2: Este proceso de resolución consta de varias etapas y considera secciones.

Etapas 1: Experimentación solo y exclusivamente considerando como posibles puntos de ubicación de elementos de generación los puntos de consumo, a un tiempo de cálculo determinado.

Etapas 2: Se grafica la solución obtenida, a partir de esta solución, se divide la comunidad en secciones. Para realizar secciones se tienen en cuenta una serie de consideraciones:

- Cuando dos zonas estén alejadas entre ellas una distancia L_{max} se seccionan. L_{max} es la longitud máxima de un conductor impuesta en el modelo.
- Al seccionar una comunidad se tiene que poder obtener la solución obtenida en el proceso 1, por lo tanto se tiene que seccionar respetando los conductores y las microrredes de la solución.
- No se secciona la comunidad al máximo, se intenta obtener secciones con un número razonable de variables y restricciones.

A cada sección se le añaden nuevos puntos de generación creados por el modelizador. Se experimenta cada sección de manera independiente incluyendo los puntos de la cuadrícula como posibles puntos de generación.

Etapas 3: Se calcula el coste de cada sección y se compara con los resultados obtenidos con las soluciones del proceso 1 y se da como solución final la mejor.

En el próximo capítulo se realiza una experimentación en la que se comparará el funcionamiento y los resultados obtenidos mediante los 2 procesos.



5 Resultados y análisis del proceso de resolución

En este capítulo se exponen y se analizan los resultados obtenidos en relación al proceso de resolución. Se presentan los resultados para cada una de las comunidades y se concluye que proceso de resolución obtiene resultados más satisfactorios.

5.1 Experimentación realizada

La experimentación preliminar consiste en la resolución de los siguientes ejemplares:

1. Se toman como ejemplo las 3 comunidades anteriormente presentadas (Cerro Alto, Alto Perú y El Alumbre) en relación al recurso eólico disponible, al número y situación de los puntos de consumo, a los días de autonomía y al factor de simultaneidad (Anexo A.2).
2. Los datos de generación y consumo utilizados difieren con respecto a los utilizados en la experimentación preliminar. Se tienen más datos de monitoreo, registrados en la comunidad de Cerro Alto, de generación, consumo y viento. Se ajusta más tanto los datos de generación como los datos de consumo a la realidad.
3. Se consideran 2 escenarios de demanda:
 - a. Demanda Baja (DB): Se ha concretado la demanda de energía en 280Wh/día y la demanda de potencia a 200W por familia. En la escuela y centro de salud se ha concretado una demanda de energía de 975 Wh/día y una demanda de potencia de 600Wh/día. Las demandas se han concretado mediante el análisis de datos de equipos de monitoreo instalados en la comunidad de Cerro Alto.
 - b. Demanda Alta (DA): Se considera el doble tanto de la demanda de energía, para domicilios 560Wh/día y para la escuela y centro de salud 1950Wh/día, como de demanda de potencia, para domicilios 400W y para la escuela y posta de salud 1200W. La creación de este escenario permite visualizar como actúa el modelo cambios de demanda.
4. En cuanto a la posible incorporación de puntos de cuadrícula como posibles puntos de generación, se consideran los dos procesos de resolución:
 - a. Sin cuadrícula (SC): Se resuelve el modelo a un tiempo de resolución fijado. En este caso se estudia para observar las ventajas que suponen colocar puntos de cuadrícula.
 - b. Con cuadrícula total (CC.total): Se resuelve el modelo mediante el proceso 1 con un tiempo de resolución fijado.
 - c. Con cuadrícula por secciones (CC.Secc): Una vez obtenida la solución del ejemplar SC se resuelve el modelo mediante el proceso 2. Los valores de dicha fila son iguales a la suma de los valores de todas las secciones.

5. En cuanto a los datos de equipos de generación se consideran los aerogeneradores de 100W y 500W (Chiroque (2008a)), ya instalados en las comunidades. También se consideran equipos de generación de 1000W y 2000W (Bornay). Con respecto a los datos de los equipos de instalación se consideran datos reales de equipos instalados y extendidos a equipos de mayores dimensiones.
6. En cuanto al modelo de tecnología solar se considera que todos los puntos de la comunidad tienen el mismo recurso solar es por ello que no se han aplicado los procesos de resolución con este modelo. No aprovechará ningún punto con buen recurso solar de la cuadrícula ya que todos los puntos tienen el mismo recurso.
7. Se define el mismo tiempo de cálculo para los dos procesos de resolución. Se tiene en cuenta cada comunidad para fijar el tiempo de cálculo total en función del número de variables y restricciones. En el proceso de resolución 1 se dedica todo el tiempo de cálculo al mismo ejemplar completo. En el proceso de resolución 2 el tiempo máximo de cálculo se debe dividir en la suma total del ejemplar sin cuadrícula más la suma de los ejemplares de cada una de las secciones. Teniendo en cuenta que las variables y restricciones del ejemplar sin cuadrícula y de los ejemplares de las secciones pueden ser muy diferentes y que por tanto la complejidad y el tiempo de resolución puede variar significativamente, se decide no dividir equitativamente entre todos los ejemplares. Se fija como tiempo de resolución máximo para cada ejemplar sin cuadrícula y para cada uno de las secciones la mitad del tiempo total establecido. Con esta repartición, se asume que algún de los ejemplares del proceso 2 se resolverá con un tiempo reducido y la suma total de tiempos será equivalente, como se comprueba en las siguientes tablas de resultados.

Todos los ejemplares se han resuelto en un PC IntelCore Duo T5870 2Gb de RAM. El detalle de las características de los puntos de cuadrícula y secciones de las comunidades en anexo B.

5.2 Resultados de Cerro Alto

La tabla 5.1 muestra los resultados de la experimentación realizada en la comunidad de Cerro Alto. Para cada escenario de demanda, demanda baja (DB) y demanda alta (DA), y para cada opción tecnológica (eólica e híbrida) se compara que tipo de proceso de resolución obtiene respuestas más satisfactorias

Para esta comunidad se fija el tiempo máximo de los ejemplares sin cuadrícula por secciones a 18000s. Teniendo en cuenta los resultados del proceso que se iban obteniendo, se decide fijar para el proceso 1 también 18000s.

Para todos los casos de resolución se presenta: el número de variables (Var.), el número de restricciones (Restr.), el tiempo de resolución (T(s)), el coste de la solución (C.total(\$)), el coste del caso sin cuadrícula, ya sea de toda la comunidad o de cada sección, C.SC(\$), la cota(\$) y el Gap(%) o error de la solución, $Gap(\%) = \frac{C.total - Cota}{C.total} \times 100$.



Dem.	Tec.	Caso	Var.	Restr.	T(s)	C.total(\$)	C.SC.(\$)	Cota (\$)	Gap(%)
DB	Eólica	CC.total	2288	2052	18000,00	57412	60816	52764	8,10
		SC.	455	401	29,69	60816	-	60816	0,00
		CC.Secc.	-	-	18048,36	57297	60816	56388	1,59
		S1	170	126	0,42	3971	5050	3971	0,00
		S2	295	260	0,92	5231	5231	5231	0,00
		S3	994	911	18000,00	30367	32010	29457	2,99
		S4	835	758	47,02	17729	18525	17729	0,00
	Híbrida	CC.total	3023	4351	4352	30360	30360	30360	0,00
		SC	614	520	1,63	30360	-	30360	0,00
		CC.Secc.	-	-	97,11	30360	30360	30360	0,00
		S1	233	173	1,00	1518	1518	1518	0,00
		S2	390	331	1,31	3036	3036	3036	0,00
		S3	1305	1144	74,50	15180	15180	15180	0,00
		S4	1098	955	20,30	10626	10626	10626	0,00
	Solar	SC	421	400	1,13	30360	-	30360	0,00
DA	Eólica	CC.total	2288	2052	18000,00	77297	85288	74989	2,99
		SC.	455	401	65,72	85288	-	85288	0,00
		CC.Secc.	-	-	265,00	77297	85288	77297	0,00
		S1	170	126	0,31	5237	6724	5237	0,00
		S2	295	260	0,75	7359	7359	7359	0,00
		S3	994	911	233,30	39181	44462	39181	0,00
		S4	835	758	30,89	25520	26743	25520	0,00
	Híbrida	CC.total	3023	4351	18000,00	57048	57048	54346	4,74
		SC	614	520	528,91	57048	-	57048	0,00
		CC.Secc.	-	-	1833,47	57048	57048	57048	0,00
		S1	233	173	1,34	2911	2911	2911	0,00
		S2	390	331	4,00	5822	5822	5822	0,00
		S3	1305	1144	1738,44	28788	28788	28788	0,00
		S4	1098	955	89,69	19527	19527	19527	0,00
	Solar	SC	421	400	8,29	57898	-	57898	0,00

Tabla 5.1 Resultados del proceso de resolución. Cerro Alto.

SC (azul): Se obtiene la solución óptima todos los experimentos. Los tiempos de resolución son relativamente bajos están entre 1s y 529s. Estos tiempos bajos son debidos a reducido número de variables y restricciones del modelo. Los tiempos de resolución de demanda baja son menores con respecto a los de demanda alta.

C.C.Secc (naranja): Solo en una sección, de las dieciséis experimentadas, la solución no es óptima. En el resto de soluciones se encuentra la solución en tiempos relativamente bajos, entre 0,42 s y 1738 s. Las soluciones con C.C.secc, tecnología eólica y demanda baja reduce el coste de la solución encontrada con C.C.secc en un 0,20% (\$57297 vs \$57412) con respecto a la solución encontrada con C.C.total. En los otros casos las soluciones obtenidas son las mismas pero el tiempo de resolución se reduce considerablemente (gracias al reducido número de variables y restricciones de cada sección).

C.C.total (verde): En tres de los experimentos la solución obtenida no es óptima, los Gaps tienen valores entre 2,99% y 7,59%. Esto se debe a que el número de variables y restricciones del modelo aumenta notablemente. Las soluciones con C.C.total en tecnología híbrida obtienen el mismo resultado que SC y C.Secc, pero en eólica reducen el coste de la solución significativamente con respecto SC un 5,59% en DB (\$57412 vs \$60816) y un 9,38% en DA (\$77297 vs \$85288) pero no sobre la reduce con respecto C.Secc.

En la comunidad de Cerro Alto, los tiempos de resolución en los casos de sin cuadrícula son cortos y siempre garantizan el óptimo. El uso de puntos de cuadrícula como puntos de generación reduce la solución. La resolución mediante el proceso resolución, cuadrícula por secciones, obtiene soluciones más satisfactorias con respecto al caso con cuadrícula total especialmente en relación al tiempo de resolución.

5.3 Resultados de Alto Perú

La tabla 4.2 muestra los resultados de la experimentación realizada en la comunidad de Alto de Alto Perú. La estructura es la misma que la utilizada en la tabla 4.1, explicada en el apartado anterior. Para esta comunidad un tiempo máximo de cálculo de 36000s

Dem.	Tec.	Caso	Var.	Restr.	T(s)	C.total(\$)	C.SC.(\$)	Cota(\$)	Gap(%)
DB	Eólica	C.C.total	4782	6295	36000,00	39567	42129	32952	16,72
		SC	1544	2173	18000,00	42129	-	41017	2,64
		C.C.Secc	-	-	18027,75	39900	42129	35578	10,83
		S1	567	524	22,92	9143	9143	9143	0,00
		S2	3792	5347	18000,00	25255	27484	20933	17,11
		S3	427	426	4,83	5502	5502	5502	0,00
	Híbrida	C.C.total	5565	6882	36000,00	32092	32087	26919	16,12
		SC	1751	2328	18000,00	32087	-	30973	3,47
		C.C.Secc	-	-	18003,17	32361	32190	27827	14,01
		S1	742	655	0,75	4554	4554	4554	0,00
		S2	4279	5712	18000,00	23253	22979	18719	19,50
		S3	613	598	3,17	4554	4554	4554	0,00
	Solar	SC	1491	2172	18000,00	39239	-	35935	8,42
DA	Eólica	C.C.total	4782	6295	36000,00	59606	59272	50008	16,10
		SC	1544	2173	18000,00	59272	-	58164	1,87
		C.C.Secc	-	-	18009,10	59606	59272	52519	11,89
		S1	567	524	5,83	11190	11190	11190	0,00
		S2	3792	5347	18000,00	40638	40304	33551	17,44
		S3	427	426	3,27	7778	7778	7778	0,00
	Híbrida	C.C.total	5565	6882	36000,00	54340	56603	45051	17,09
		SC	1751	2328	18000,00	56603	-	51406	9,18
		C.C.Secc	-	-	18021,37	53956	56603	48462	10,18
		S1	742	655	10,37	8733	8733	8733	0,00
		S2	4279	5712	18000,00	37445	40092	31951	14,67
		S3	546	515	11,00	7778	7778	7778	0,00
	Solar	SC	1491	2172	18000,00	72842	-	65861	9,58

Tabla 5.2 Resultados del proceso de resolución. Alto Perú



SC (azul): En ningún ejemplar se encuentra la solución óptima, pero los Gaps están comprendidos entre 1,87% y 9,58%. Los Gaps en los ejemplares de tecnología eólica son muy bajos, mientras que en la tecnología solar los Gaps son los más altos en comparación con el resto de tecnologías. En un dos de los cuatro ejemplares encuentra la mejor solución de entre el resto de casos.

C.C.Secc (naranja): En 8 de los 12 ejemplares se encuentra la solución óptima. En los ejemplares de la S2, en que el número de variables y restricciones es significativamente mayor al resto de secciones, son en los que no se encuentran las soluciones óptimas y en que los Gaps son más altos, entre 14,67% y 19,50%. En una de las soluciones se obtiene la mejor solución es un 0,71% (\$53956 vs \$54340) mejor con respecto al ejemplar C.total.

C.C.total (verde): En ningún ejemplar se encuentra la solución óptima, y los Gaps tienen valores altos comprendidos entre 16,10% y 17,09%. El número de variables y restricciones ha aumentado considerablemente dificultando la resolución y obteniendo Gaps grandes. En dos de los ejemplares la solución obtenida es mejor con respecto a SC, utilizando puntos de cuadrícula como puntos de generación. El ejemplar DB-eólica obtiene la mejor solución comparada con el otro proceso de resolución, mejor en un 0,83% (\$39567 vs \$39900) y un 6,08% (\$39567 vs \$42129) con respecto al ejemplar C.Secc y SC respectivamente.

En la comunidad de Alto Perú, en un 75% (3 de 4 ejemplares) de los casos se obtiene mejor solución utilizando el proceso de resolución 1, en dos de los ejemplares de Sc se obtiene la mejor solución y en uno de los ejemplares de C.Secc también. El uso de puntos de cuadrícula como puntos de generación no siempre reduce la solución, solo en dos de los casos.

5.4 Resultados de El Alumbre

La tabla 5.3 muestra los resultados de la experimentación realizada en la comunidad de El Alumbre. La estructura es la misma que la utilizada en la tabla 5.1 y 5.2, explicadas en los apartados anteriores. Para esta comunidad un tiempo máximo de cálculo de 36000s.

Las secciones realizadas son diferentes según el escenario de demanda, esto se debe a que las soluciones obtenidas SC en los diferentes escenarios de demanda varían. Así para el escenario de demanda baja se consideran cinco secciones y para el escenario de demanda alta cuatro secciones. Dos de las secciones de todos los ejemplares coincide, S1 y S2.

Dem.	Tec.	Caso	Var.	Restr.	T(s)	C.total(\$)	C.SC(\$)	Cota(\$)	Gap(%)
DB	Eólica	C.C.total	4812	5436	36000,00	58597	58530	44004	24,90
		SC	1280	1534	18000,00	58530	-	56240	3,91
		C.C.Secc	-	-	3037,67	58530	58530	58530	0,00
		S1	1041	990	181,11	10446	10446	10446	0,00
		S2	324	290	2,13	6964	6964	6964	0,00
		S3	851	872	2401,88	12187	12187	12187	0,00
		S4	1439	1845	441,47	16746	16746	16746	0,00
		S5	729	680	11,09	12187	12187	12187	0,00

DA	Híbrida	C.C.total	5939	6281	36000,00	54719	53178	40412	26,15
		SC	1559	1743	18000,00	53178	-	49591	6,74
		C.C.Secc	-	-	28016,26	52912	53178	50905	3,79
		S1	1352	1223	9108,00	9108	9108	9108	0,00
		S2	427	367	2,97	6072	6072	6072	0,00
		S3	1082	1045	890,34	10626	10626	10626	0,00
		S4	2102	2546	18000,00	19516	19782	17509	10,28
		S5	724	652	14,95	7590	7590	7590	0,00
	Solar	SC	1212	1533	18000,00	58870	-	56944	3,27
	Eólica	C.C.total	4812	5436	36000,00	NS	89056	NS	NS
		SC	1280	1534	18000,00	89056	-	80672	9,41
		C.C.Secc	-	-	36007,21	89424	89056	73203	18,14
		S1	1041	990	18000,00	16661	16661	16184	2,87
		S2	324	290	5,98	11693	11693	11693	0,00
		S6	153	116	1,23	3312	3312	3312	0,00
		S7	3260	3973	18000,00	57758	57389	42015	27,26
	Híbrida	C.C.total	5939	6281	36000,00	NS	87027	NS	NS
		SC	1559	1743	18000,00	87027	-	75945	12,73
		C.C.Secc	-	-	36038,25	NS	87027	NS	NS
		S1	1352	1223	18000,00	16073	16073	14837	7,69
		S2	427	367	38,13	11267	11267	11267	0,00
		S6	208	157	0,312	2736	2736	2736	0,00
		S7	3915	4464	18000,00	NS	56951	NS	NS
	Solar	SC	1212	1533	18000,00	111723	-	105331	5,72

Tabla 5.3 Resultados del proceso de resolución. Alumbre

SC (azul): En ningún ejemplar se encuentra la solución óptima, los Gaps son los más elevados comparado con los Gaps de las otras comunidades, entre 3,27% y 12,73%. Los Gaps con el escenario de demanda alta son notablemente más altos en comparación al escenario de demanda baja.

C.C.Secc (naranja): En 13 de los 18 ejemplares se encuentra la solución óptima. En las secciones que no alcanzan el óptimo los Gaps obtenidos son altos con valores comprendidos entre 2,87% y 27,27%. En el escenario DA la sección 7 tiene un número elevado de variables y restricciones, no obteniendo ninguna solución para la tecnología híbrida y obteniendo una solución, con un Gap considerablemente elevado, peor que la obtenida con el ejemplar SC en un 0,64% (\$57758 vs \$57389). Una de las soluciones es mejor con respecto al resto de procesos de resolución.

C.C.total (verde): En dos de los ejemplares el modelo no encuentra solución (NS), estos dos ejemplares son en el escenario de demanda alta. En el escenario de demanda baja en ningún ejemplar se encuentra la solución óptima, y los Gaps tienen valores muy altos comprendidos entre 24,90% y 26,15%. Las soluciones de estos dos ejemplares son peores que las obtenidas en los otros dos procesos de resolución.

En la comunidad de El Alumbre, el tiempo de cálculo de alguna de las secciones ha sido muy



elevado y por consiguiente el tiempo de total de tres ejemplares del proceso 2 ha superado al tiempo del proceso 1. Aunque estos tres casos no se pueden comparar las soluciones de los procesos, se destaca que el proceso 2 obtiene solución en 18000s mejores que el proceso 1 en 36000s, que no encuentra solución en dos casos.

5.5 Análisis del proceso

En este análisis, se diferencia los casos en que el tiempo de resolución de los dos procesos ha sido equivalente (9 casos) y los que el tiempo de cálculo del proceso 2 resultó superior al proceso 2 (3 casos, El Alumbre).

Para el primer grupo de casos con tiempos de resolución equivalentes:

- En un 55,5% de los casos posibles (5 de 9 casos) se obtiene mejores soluciones con el proceso de resolución 2.
- En un 33,3% de los casos de posibles (3 de 9 casos) se obtiene la misma solución entre los dos procesos de resolución. En dos de estos casos los tiempos de cálculo del proceso 1 es menor con respecto al tiempo del proceso 2. El otro caso mediante el proceso 2 se asegura el óptimo y mediante el proceso 1 no.
- Solo en 1 de los 9 casos posibles se encuentra mejor solución con el proceso de resolución 1.
- En la comunidad de Cerro Alto las diferencias entre procesos de resolución es mínima debido al reducido número de variables y restricciones.

En cuanto al segundo grupo casos, en dos de ellos, con un tiempo de 36000s, el proceso de resolución 1 no encuentra solución y en el tercero, la solución obtenida con el proceso 2 es mejor que la encontrada con el proceso 2.

Se concluye que el proceso de resolución 2 obtiene soluciones más satisfactorias comparado con el proceso de resolución 1. En algunos casos, este proceso usa puntos cuadrícula como puntos de generación y mejora la solución.

6 Resultados y análisis de las soluciones tecnológicas

En este capítulo se analizan los resultados en relación a las propuestas de electrificación obtenidas. Se presentan y se comparan las soluciones obtenidas mediante la instalación de equipos individuales respecto a la creación de microrredes con cada una de las opciones tecnológicas (eólica, solar, híbrida) para cada una de las comunidades, Cerro Alto, Alto Perú y El Alumbre. Los resultados hacen referencia a los del apartado anterior

6.1 Resultados de Cerro Alto

La tabla 6.1 muestra los resultados de la resultados obtenidos en la comunidad de Cerro Alto. Para cada escenario de demanda, demanda baja (DB) y demanda alta (DA), y para cada opción tecnológica (eólica, solar, híbrida) se compara la opción de electrificación exclusivamente con equipos individuales (Ind) y la solución obtenida con los modelos que consideran microrredes (Mred). Para las dos opciones de solución se presenta: el coste (\$), el número de aerogeneradores y paneles de cada potencia, en Watts, y en número de microrredes.

Dem.	Tec.	Tipo	Coste(\$)	NºAerog.				NºPan.			Nºred
				100W	500W	1000W	2000W	50W	75W	100W	
DB	Eólica	Ind.	67530	16	11	1	0	-	-	-	0
		Mred.	57297	12	7	1	0	-	-	-	4
	Solar	Ind.	30360	0	0	0	0	0	0	20	0
		Mred.	30360	-	-	-	-	0	0	20	0
	Híbrido	Ind.	30360	0	0	0	0	0	0	20	0
		Mred.	30360	0	0	0	0	0	0	20	0
DA	Eólica	Ind.	99884	5	9	9	1	-	-	-	0
		Mred.	77296	1	4	4	2	-	-	-	4
	Solar	Ind.	58220	-	-	-	-	0	0	40	0
		Mred.	57898	-	-	-	-	0	0	40	1
	Híbrido	Ind.	58220	-	-	-	-	0	0	40	0
		Mred.	57048	0	0	1	0	0	0	34	1

Tabla 6.1 Resultados de la experimentación tecnológica en Cerro Alto.

A continuación se muestra los resultados en demanda baja y alta. Posteriormente se comparan las diferentes tecnologías y finalmente se describen las conclusiones.

Demanda Baja

Eólica: La solución de Mred reduce el coste de la solución Ind. un 15,15% (\$57297 vs \$67530). Esta solución (Figura 6.1a) utiliza cuatro microrredes que suministran energía al 50% de los domicilios; en el resto de domicilios se instalan equipos individuales. Como el recurso eólico de la comunidad es bajo, en la mayoría de los domicilios es necesario colocar dos equipos de 100W o equipos de mayor potencia.

Solar: La solución óptima es el uso de equipos individuales en todos los domicilios. En cada usuario se instala un panel de 100W. No se crea ninguna microrred.

Híbrida: La solución óptima es la misma que la encontrada en el modelo de solar, equipos solares individuales de 100W (Figura 6.1c).



Demanda Alta

Eólica: La solución de Mred (Figura 6.1b) reduce el coste de la solución Ind. un 22,61% (\$57297 vs \$67530). Se crean cuatro microrredes y tres ellas utilizan puntos de la cuadrícula.

Solar: La solución obtenida de Mred crea una microrred de tres domicilios formados por seis paneles fotovoltaicos e instala dos paneles fotovoltaicos de 100W al resto de los domicilios. Esta solución reduce ligeramente el costo de la solución Ind (\$57898 vs \$58220), no reduce el número de paneles por usuario pero si reduce el número de equipos de la instalación.

Híbrida: La solución de Mred (Figura 6.1d) reduce el coste de la solución Ind. un 2,01% (\$57048 vs \$58220). En la solución de equipos individuales se instalan dos paneles fotovoltaicos de 100W en todos los domicilios. En la solución Mred se colocan los mismos equipos en domicilios individuales pero también se utiliza un aerogenerador de 1000W suministra energía a 3 domicilios muy cercanos entre sí.

Comparación de tecnologías

Existen diferencias considerables entre el uso de una tecnología u otra. En el caso de demanda baja el uso paneles fotovoltaicos de 100W individuales reduce el coste con respecto al uso energía eólica en un 47,01% (\$30360 vs \$57297). En el caso de demanda alta esta diferencia se reduce a un 26,19% (\$57048 vs \$77296) y la solución del modelo con tecnología híbrida es la mejor, combina equipos individuales de energía solar con un microrred mediante energía eólica (Figura 3d).

Hay que destacar que un aumento de demanda en un 100% (DA vs DB) genera un incremento de coste en eólica de solo un 34,90% (\$77296 vs \$57297), mientras que en el caso de solar o híbrido los incrementos son casi proporcionales a la demanda (un 90,71% y un 87,9% respectivamente). La diferencia de incrementos de costes es debida a que la solución con energía eólica y demanda baja tiene un coste mucho más elevado que las otras dos tecnologías, mientras que la diferencia en demanda alta no es tan significativa.

Conclusiones

- Se tiende a colocar equipos individuales a la mayor parte de domicilios. Esto se considera debido a la gran dispersión de los domicilios de la comunidad (los veinte domicilios se encuentran comprendidos en una superficie de 22,5 km²)
- En instalación de equipos individuales, en demanda baja, la opción más económica es colocar un panel fotovoltaico de 100W. En la solución eólica, el escaso recurso e hace necesario instalar aerogeneradores de mayor potencia, con lo que se el coste de la solución con eólica es significativamente mayor que la solar o híbrido. En el caso de demanda alta la utilización dos paneles de 100W en sistemas individuales continúa teniendo un coste inferior que la opción solar.

- La utilización solo de energía eólica tiende a crear microrredes, para poder utilizar equipos de más potencia situados en los puntos de mayor potencial. El caso de eólica, uso de puntos de la cuadrícula permite disminuir significativamente el coste.

En Cerro Alto el recurso eólico y la gran dispersión (que condiciona el uso los aerogeneradores de mayor potencia y microrredes) hacen que la electrificación mediante energía solar sea en general la alternativa tecnológica más adecuada. La energía eólica es económicamente beneficiosa para algunos domicilios en escenarios de demanda alta.

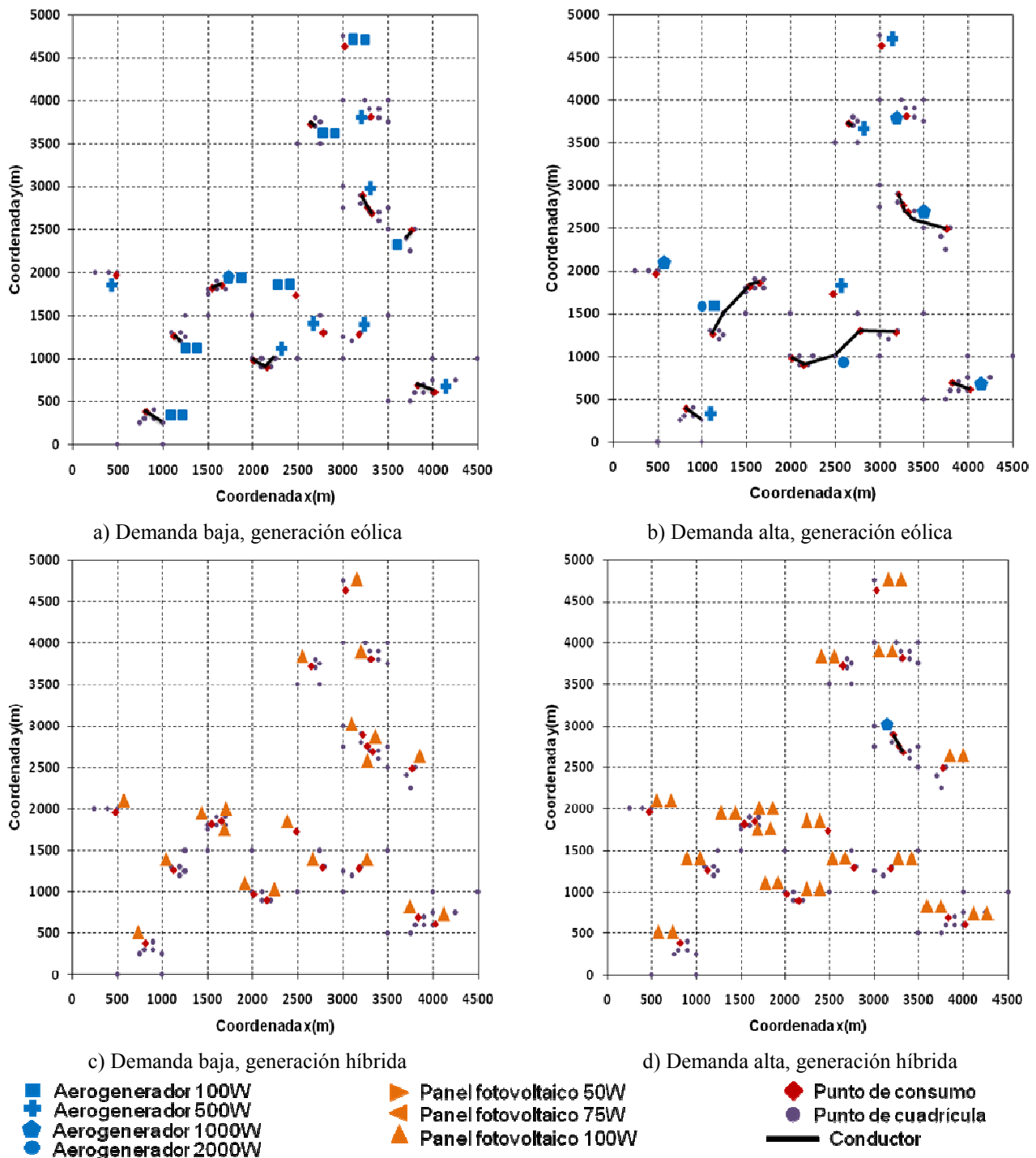


Figura 6.1 Soluciones de las comparaciones de tecnologías de Cerro Alto



6.2 Resultados de Alto Perú

La tabla 6.2 tiene la misma estructura que la tabla 6.1 expuesta en la experimentación de Cerro Alto.

Dem.	Energía	Tipo	Coste(\$)	NºAerog.				NºPan.			Nºred
				100W	500W	1000W	2000W	50W	75W	100W	
DB	Eólica	Ind.	76282	34	6	1	0	-	-	-	0
		Mred.	39567	2	1	1	1	-	-	-	4
	Solar	Ind.	39468	-	-	-	-	26	0	0	0
		Mred.	39239	-	-	-	-	0	0	26	3
	Híbrido	Ind.	39468	0	0	0	0	0	0	26	0
		Mred.	32087	0	0	0	1	0	0	11	1
DA	Eólica	Ind.	112431	10	18	3	1	-	-	-	0
		Mred.	59272	0	0	2	3	-	-	-	4
	Solar	Ind.	75686	-	-	-	-	0	0	52	0
		Mred.	72842	-	-	-	-	0	0	52	5
	Híbrido	Ind.	75686	0	0	0	0	0	0	52	2
		Mred.	53953	0	0	1	2	0	0	10	2

Tabla 6.2 Resultados de la experimentación tecnológica en Alto Perú.

A continuación se muestra los resultados en demanda baja y alta. Posteriormente se comparan las diferentes tecnologías y finalmente se describen las conclusiones.

Demanda Baja

Eólica: La solución de Mred reduce el coste de la solución Ind. un 48,13% (\$39567 vs \$76282). Esta solución utiliza cuatro microrredes que suministran energía a todos los domicilios de la comunidad (Figura 6.2a). Dos microrredes están en la parte central: una es de dos domicilios y la otra diecisiete domicilios, aprovechando un punto de cuadrícula. Las dos microrredes restantes están tanto en la parte alta y baja y están compuestas por tres domicilios. La diferencia de recurso eólico entre las diferentes zonas de la comunidad queda reflejada en la solución con el Ind. donde en la parte central coloca dos aerogeneradores de 100W por domicilios, en casi todos sus puntos, y en el resto de zonas, se necesita equipos de mayor potencia.

Solar: La solución de Mred reduce ligeramente el coste de la solución Ind (\$39468 vs \$39239). La solución de Ind instala un panel de 100W mientras que con Mred se crean tres microrredes en la zona central, donde los domicilios están muy agrupados, no ahorra en paneles fotovoltaicos pero si en número de otros equipos de la instalación.

Híbrida: La solución con el Mred (Figura 6.2c) reduce el coste de la solución Ind. un 18,70% (\$32087 vs \$39468). Esta solución utiliza una microrred en la parte central y en el resto de domicilios instala un panel fotovoltaico de 100W. La solución de Ind. utiliza un panel fotovoltaico de 100W para cada usuario.

Demanda Alta

Eólica: La solución con el Mred reduce el coste de la solución Ind. un 47,45% (\$59072 vs \$112431). Esta solución utiliza cuatro microrredes que suministran energía a todos los domicilios de la comunidad.

Solar: La solución con el Mred (Figura 6.2b) reduce el coste de la solución Ind. un 3,76% (\$72842 vs \$75686). La solución de Ind instala dos paneles fotovoltaicos de 100W mientras que en la solución de Mred se crean cuatro microrredes en la zona central que no ahorran paneles fotovoltaicos pero si en otros equipos de la instalación.

Híbrida: La solución con el Mred reduce el coste de la solución Ind. un 28,71% (\$53953 vs \$75686). Esta solución utiliza una microrred en la parte central, aprovechando un punto de cuadrícula, formada por dieciocho domicilios y una microrred en la parte baja de la comunidad de tres domicilios (Figura 6.2d); en resto de domicilios utiliza dos paneles de 100W individuales (como la solución Ind.).

Comparación de tecnologías

Existen diferencias considerables entre el uso de una tecnología u otra. La mejor solución en los dos tipos de demanda es la tecnología híbrida, reduce en el caso de demanda baja la solución un 18,90% respecto la tecnología eólica (\$32087 vs \$39567) y un 18,23% (\$32087 vs \$39239) con respecto la tecnología solar. En el caso de demanda alta estas diferencias en eólica se reducen significativamente hasta un 8,97% (\$53953 vs \$59272). Estas soluciones siempre utilizan microrredes en la parte central de la comunidad.

Hay que destacar que un aumento de demanda en un 100% (DA vs DB) genera un incremento de coste de un 49,80% en eólica (\$59272 vs \$39567), e incrementos superiores en las tecnologías de solar 85,64% (\$72842 vs \$39239) y híbrido 67,02% (\$53593 vs \$32087).

Conclusiones

- La utilización de solo equipos individuales en los dos escenarios de demanda obtiene soluciones muy desfavorables en comparación al uso de microrredes. Se crean microrredes cuando los domicilios se encuentran cercanos entre sí con las dos tecnologías, la electrificación con energía solar necesita menor dispersión que mediante energía eólica.
- En la zona alta de la comunidad, de escaso recurso eólico, siempre se utilizan paneles individuales. En la instalación de equipos individuales también se utiliza siempre energía solar (un panel de 100W para DB y dos para DA). Aún así, el uso de energía eólica y solar conjuntamente es la solución reduce costes en los dos escenarios de demanda respecto la opción solo solar.
- El aumento de demanda de los domicilios provoca el uso de equipos de generación de más potencia y tiende a la creación de más microrredes. El aumento de demanda incrementa las diferencias entre las soluciones mediante equipos individuales y la utilización de microrredes.



En Alto Perú la estructura de la comunidad (divida en 3 zonas) y el recurso eólico (escaso en general pero alto en el centro) hacen que tienda a utilizar microrredes con eólica en la zona central, de alta concentración de domicilios, y que los equipos individuales solares, sea la alternativa tecnológica más adecuada en el resto de domicilios aislados.

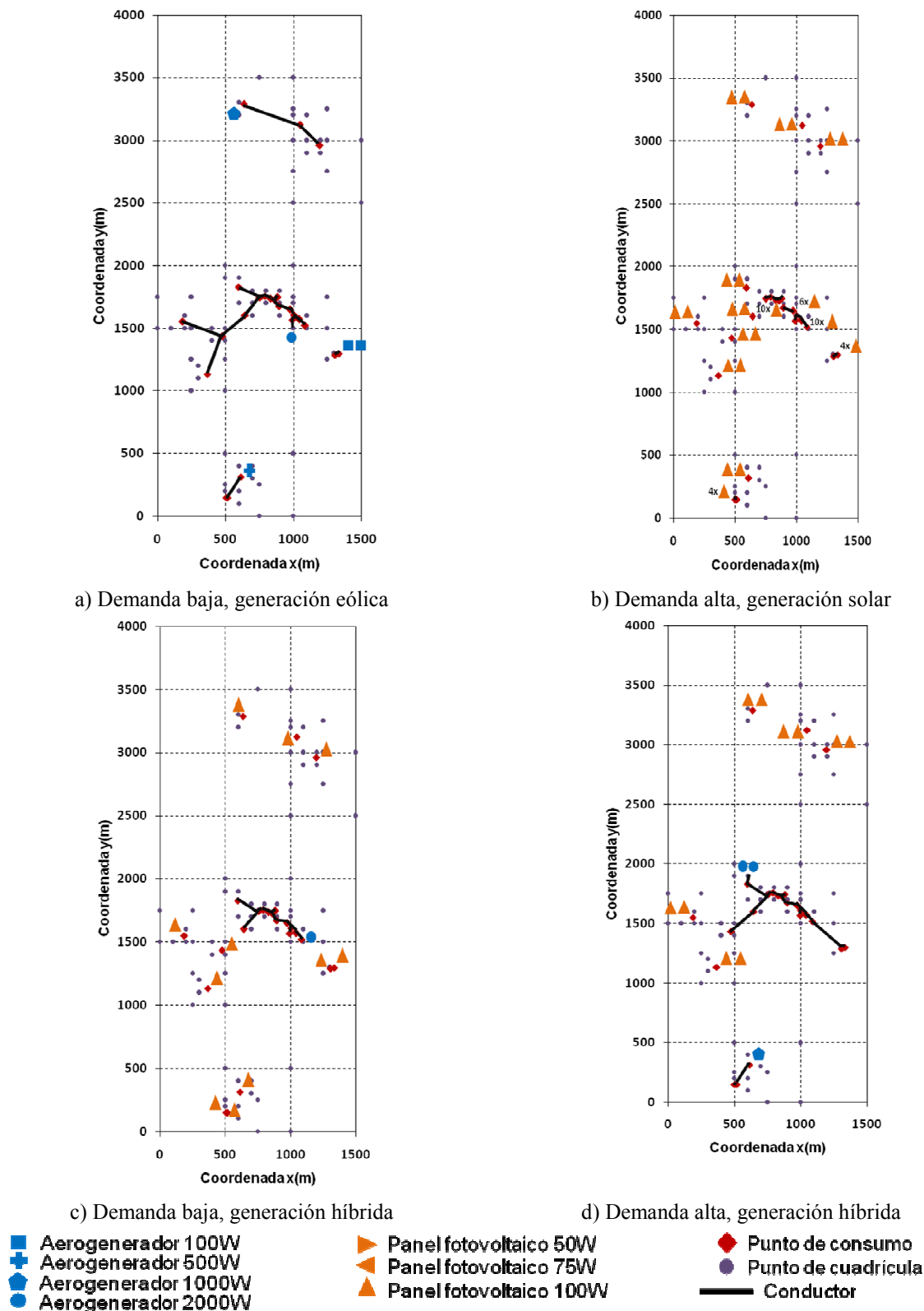


Figura 6.2. Soluciones de las comparaciones de tecnologías de Alto Perú

6.3 Resultados de El Alumbre

La tabla 6.3 tiene la misma estructura que la tabla 6.1 expuesta en la experimentación de Cerro Alto.

Dem	Energ.	Cuad.	Coste(\$)	NºAerog.				NºPan.			Nºred
				100W	500W	1000W	2000W	50W	75W	100W	
DB	Eólica	Ind.	73790	36	2	1	0	-	-	-	0
		Mred.	58530	24	0	0	1	-	-	-	1
	Solar	Ind.	58836	-	-	-	-	2	2	37	0
		Mred.	58836	-	-	-	-	2	2	37	0
	Híbrido	Ind.	58746	0	2	0	0	0	0	33	0
		Mred.	52912	0	0	1	0	0	0	26	1
DA	Eólica	Ind.	122545	50	4	2	1	-	-	-	0
		Mred.	89056	11	1	1	2	-	-	-	4
	Solar	Ind.	112043	-	-	-	-	2	2	76	0
		Mred.	111723	-	-	-	-	2	4	74	2
	Híbrido	Ind.	102525	21	0	2	0	15	0	24	0
		Mred.	87027	12	0	0	2	6	0	8	3

Tabla 6.3. Resultados de la experimentación tecnológica en El Alumbre.

A continuación se muestra los resultados en demanda baja y alta. Posteriormente se comparan las diferentes tecnologías y finalmente se describen las conclusiones.

Demanda Baja

Eólica: La solución con el Mred reduce el coste de la solución Ind. un 26,07% (\$58530 vs \$73790). Esta solución (Figura 6.3-a) utiliza una microrred en el centro de la comunidad, que aprovecha un punto de cuadrícula, y que está formada una microrred de nueve domicilios, la escuela y en centro de salud. Para el resto de domicilios se utilizan un aerogenerador individuales de 100W..

Solar: La solución con el Mred es igual al coste de la solución Ind. Esta solución utiliza un panel fotovoltaico de 100W en todos los domicilios; en la escuela y centro de salud utiliza cuatro paneles (dos de 100W, uno de 75W y uno de 50W).

Híbrida: La solución con el Mred reduce el coste de la solución Ind. un 9,93% (\$52912 vs \$58746). Esta solución (Figura 6.3-c) utiliza una microrred en el centro poblado de la comunidad, compuesta por siete domicilios, la escuela y el centro de salud. En el resto de domicilios utiliza un panel fotovoltaico de 100W.

Demanda Alta

Eólica: La solución con el Mred reduce el coste de la solución Ind. un 37,60% (\$89056 vs \$122545). Esta solución (Figura 6.3-b) utiliza cuatro microrredes, dos ellas en la zona central de la comunidad; una está compuesta una por siete domicilios y el centro de salud, y la otra por nueve domicilios y la escuela. Los domicilios, que utilizan equipos individuales, utilizan



uno o dos aerogeneradores en función del recurso eólico existente en la zona.

Solar: La solución con el Mred reduce el coste de la solución Ind. un 0,29% (\$11172 vs \$112043). Esta solución utiliza dos microrredes de dos domicilios cada una, estos domicilios entre sí se encuentran muy cercanos. El resto de domicilios utilizan dos paneles fotovoltaicos de 100W y tanto la escuela como el centro de salud utilizan siete paneles fotovoltaicos (uno de 100W, uno de 75W y cinco 50W).

Híbrida: La solución con el Mred (Figura 6.3-d) reduce el coste de la solución Ind. un 15,12% (\$87027 vs \$102525). Esta solución utiliza tres microrredes, dos de ellas en la parte central. El resto de domicilios utilizan equipos individuales, el tipo de tecnología y el número de equipos utilizados depende del recurso eólico del usuario; si hay mucho recurso se utiliza un aerogenerador de 100W, con recurso medio un aerogenerador de 100W y un panel de 50W y poco recurso dos paneles de 100W.

Comparación de tecnologías

Existen diferencias entre el uso de una tecnología u otra en el caso de demanda alta pero no tan destacadas en el caso de demanda baja. La mejor solución en los dos tipos de demanda es la tecnología híbrida, en el caso de demanda baja reduce la solución un 9,60% respecto eólica (\$52912 vs \$58530) y un 10,07% respecto solar (\$52912 vs \$58836). En el caso de demanda alta reduce un 2,28% (\$87027 vs \$89056) y un 22,10% (\$87027 vs \$111723), respectivamente.

Hay que destacar que un aumento de demanda en un 100% (DA vs DB) genera un incremento de coste en eólica de un solo 52,15% (\$89056 vs \$58530) y en híbrido de un 64,48% (\$87027 vs \$52912). En cambio en solar el aumento de demanda provoca un aumento de coste casi proporcional, de un 89,89% (\$111723 vs \$58836); se duplican los equipos instalados de demanda baja a demanda alta.

Conclusiones

- La utilización de equipos individuales para cada usuario en los dos escenarios de demanda obtiene soluciones muy desfavorables en comparación al uso de microrredes.
- El uso de energía eólica y solar conjuntamente es la solución más adecuada en los dos escenarios de demanda. Se utilizan microrredes con generación eólica, En la instalación de equipos individuales, en demanda baja, es más económico colocar un panel de 100W, y, en demanda alta, se utilizan aerogeneradores, paneles o ambos en función del recurso eólico del usuario.
- Como en Alto Perú, un aumento de demanda provoca el uso de equipos de generación de más potencia y tiende a la creación de más microrredes. El aumento de demanda incrementa las diferencias entre las soluciones mediante equipos individuales y la utilización de microrredes.

En El Alumbre la electrificación mediante energía eólica y solar parece ser la alternativa tecnológica más adecuada. En el centro poblado de la comunidad debido a la concentración de domicilios se electrifica mediante una microrred de generación eólica. El tipo y número de equipos aislados e individuales es función del recurso eólico.

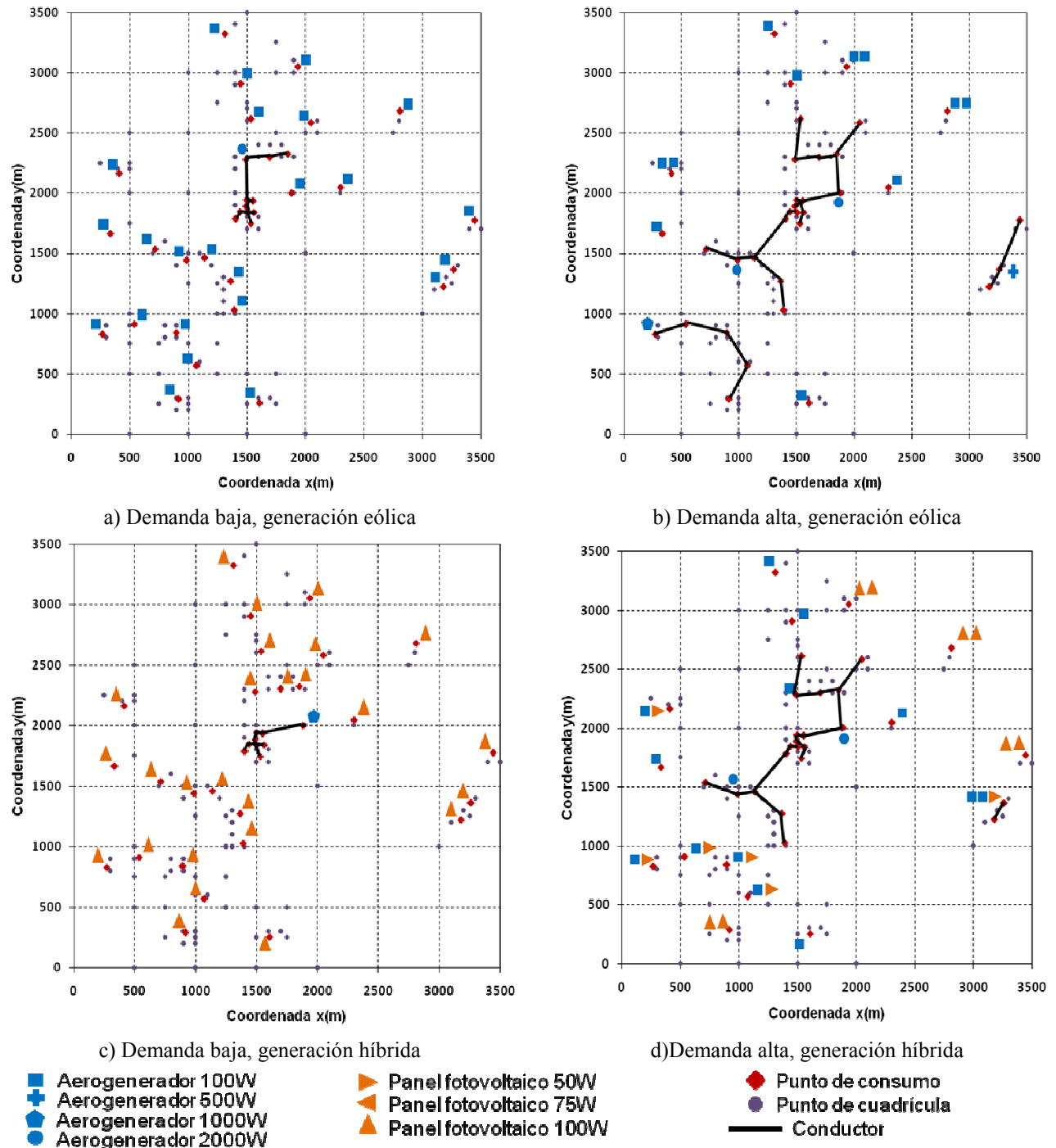


Figura 6.3. Soluciones de las comparaciones de tecnologías de El Alumbre



7 Estudio del impacto ambiental y socio-económico

En este apartado se exponen los diferentes impactos ambientales y socio económicos debido a la electrificación mediante energías renovables en comunidades rurales.

7.1 Impacto medioambiental

Impactos negativos

Los equipos utilizados en los sistemas de de generación eléctrica envejecen y han de ser sustituidos. El elemento de la instalación con una vida útil más baja es la batería. Su vida útil es de tres a cinco años, se debe reemplazar al acabar su vida. Para que las la baterías no contaminen se ha de asegurar su reciclaje y que estas no se dejen tiradas en la comunidad. Se crea un modelo de gestión y una tarifa con la finalidad de reemplazar realizar el mantenimiento y el reemplazo de equipos

Impactos positivos

Los habitantes de las comunidades rurales usan normalmente velas pilas secas o kerosene para iluminarse. Estos elementos suponen una aportación de CO_2 a la atmosfera debido a la combustión y además su fabricación no es sostenible en el tiempo. Dejar de emitir CO_2 , por la generación eléctrica mediante energías renovables, a la atmosfera evita el proceso de calentamiento global evitando consecuencia de la emisión de los gases de efecto invernadero

El uso de baterías es muy habitual y se llega a consumir un número elevado de estas, desechándolas al ambiente sin ningún tipo de preocupación. Usando aerogeneradores se disminuye considerablemente el consumo de baterías disminuyendo así los residuos tóxicos de difícil eliminación que estas comportan.

La generación mediante energías renovables supone no contribuir a la formación de lluvia ácida, ni a la formación de NO_x , no origina productos secundarios peligrosos y contaminantes y no produce ningún tipo de contaminación sobre los acuíferos ni siduos o vertidos

7.2 Impacto socio-económico

Impactos positivos

Suministro de energía a familias que carecen de acceso a la electricidad. Permitiéndoles un acceso a mayor información gracias al uso de televisores y radios.

El ahorro que las familias logran por el uso de esta tecnología ayuda a estabilizar la economía familiar.

Suministro de energía tanto a escuelas como centros de salud, mejorando la preparación de los estudiantes gracias a mayores facilidades por el uso de medios audiovisuales y computadoras. Mejorando la calidad de vida a las mejoras generadas en el centro de salud.

Concienciación de la importancia del uso racional de la energía mediante capacitaciones en las comunidades y concienciación por el desarrollo humano sostenible. La formación ofrecida durante las capacitaciones se basa en una cultura del respeto por el entorno natural.



8 Presupuesto

En primer lugar se presenta el presupuesto de realización del proyecto, y en segundo lugar se analiza la viabilidad económica del proyecto, en la que influye como un coste el presupuesto realizado previamente.

8.1 Presupuesto

El presupuesto se realiza bajo el supuesto de que el autor del presente proyecto forma parte de una ingeniería a la que encargan su realización (Tabla 8.1).

Presupuesto		
Partida	Concepto	Coste(€)
Coste de personal	Horas de Ingeniería 1440h*25€/h	28800
Gastos por desplazamientos/dietas	20 visitas 100km/visita *0,4€/km+2,5\$dieta/visita	850
Coste del hardware	Ordenador personal 2und.*1000€/und*20% de uso	400
Coste de software	Amortización licencia ILOG 3000€*10% de uso	300
Material fungible	Electricidad, internet, consumibles de oficina	200
Presupuesto de ejecución		30550
5%de imprevistos		1527,5
10% de beneficio industrial		3055
Presupuesto sin IVA		35132,5
16% IVA		5621,2
Presupuesto total		40753,7

8.1 Presupuesto de la realización del proyecto

(*) Desglose de horas de Ingeniería	Horas (h)	Coste (€)
Planificación y definición de objetivos	40	800
Documentación y formación del ingeniero	100	2000
Formación del ingeniero para usar ILOG	50	1000
Diseño de modelos matemáticos	420	8400
Implementación en ILOG	180	3600
Visitas a Campo	150	3000
Experimentación preliminar y validación de modelos	150	3000
Experimentación detallada	200	4000
Análisis de resultados	100	2000
Generación de la documentación	50	1000
Total	1440	28800

8.2 Desglose de horas de ingeniería

8.2 Viabilidad económica

La prestación de servicios de generación y desarrollo de proyectos empresariales bajo la actividad de capital-riesgo, requiere, entre otras cosas, un análisis de viabilidad de los mismos. A continuación se analizan los principales indicadores de la viabilidad del proyecto, tales como el VAN (Valor Actual Neto), la TIR (Tasa Interna de Rentabilidad) y el PAYBACK (Periodo de Retorno).

Para la valoración económica se ha optado por un horizonte de trabajo de 5 años, periodo en el que se pretende amortizar la inversión.

Se ha considerado una inflación del 4% para los próximos años.

Entre los ingresos del proyecto se encuentran:

- Se realiza el análisis en base al ahorro anual en costes de realización de proyectos de electrificación de comunidades utilizando el modelo matemático con tecnología híbrida, respecto a los costes de realizar el proyecto de electrificación mediante la instalación de equipos individuales también con tecnología híbrida. Se realiza la media de los ahorros en los proyectos de las tres comunidades estudiadas. Se considera que media se realizan dos proyectos de electrificación anuales.

Proyecto	CA		AP		A	
	DB	DA	DB	DA	DB	DA
C.Ind.	30360	58220	39468	75686	58746	102525
C:Mred.	30360	57048	32039	53953	53912	86658
Dif(\$)	0	1172	7429	21733	4834	15867
					Ahorro (\$)	8506
					Ahorro (€)	5671

Tabla 8.3 Cálculo de ahorro de proyecto.

- Se consideran una reducción de plantilla de medio empleado, esto se debe a que el modelo matemático facilita el trabajo al técnico reduciendo su trabajo a media jornada durante medio año. Se considera que un técnico en remunerado con €36000/anuales. Considerando un ingreso de €9000/anuales.

Entre los costes del proyecto se encuentran:

- Inversión inicial de la instalación se considera el coste de la ingeniería por la realización del proyecto (presupuesto, véase Tabla 8.1).
- Costes de implantación y de formación a los usuarios con un coste de 5000€.

El impuesto de sociedades es del 35%.

Para el cálculo del VAN se ha considerado un tipo de interés de un 10% ($r = 0,10$). Es un valor razonable considerando los bajos riesgos que conlleva este proyecto. A continuación se detalla mediante la Tabla 8.3 el cálculo sobre el análisis económico de la inversión.

Año	0	1	2	3	4	5
Ahorro (€)		11341	11795	12267	12757	13267
Personal (€)		9000	9360	9734	10124	10529
B.antes de impuestos (€)		20341	21155	22001	22881	23796
Impuesto de sociedad (€)		7119	7404	7700	8008	8329
Fondos generados (€)		13222	13751	14301	14873	15468



Año	0	1	2	3	4	5
C.Ingenieria(€)	40754					
C.impl. Y form. (€)	5000					
Fondos invertidos (€)	45754	0	0	0	0	0

Año	0	1	2	3	4	5
Fondos generados (€)	0	13222	13751	14301	14873	15468
Fondos invertidos (€)	45754	0	0	0	0	0
Flujo de caja (€)	-45754	13222	13751	14301	14873	15468
Suma de flujos de caja (€)	-45754	-32532	-18781	-4481	10392	25859
PAYBACK(años)						3,30
TIR(%)						16,55
VAN(€)						8137

Tabla 8.4 Análisis de la inversión

La Tabla 8.4 muestra que el VAN obtenido al final del horizonte de estudio es de 8137 €. La TIR, o lo que es lo mismo, el tipo de interés que hace que el VAN sea igual a 0, es un 16,55% y por último la inversión se recupera a inicios del tercer año, 3,30 años. La TIR obtenida es superior al tipo de interés aplicado, significa esto que el proyecto tiene una rentabilidad mínima requerida. El VAN es superior a cero o lo que es lo mismo el proyecto producirá ganancias sobre la rentabilidad exigida. Con estos indicativos se concluye que el proyecto es rentable.

Conclusiones

El presente trabajo tiene como objetivo el desarrollo de un modelo matemático para la optimización del diseño de proyectos de electrificación rural. En concreto, se considera la electrificación mediante tecnología eólica, solar e híbrida que son soluciones adecuadas para proveer de electricidad a comunidades rurales de forma autónoma. El modelo permite la instalación de equipos individuales y la creación de microrredes, que alimentan a varios usuarios con equipos de generación de mayor potencia. Así, se reducen los costes de inversión inicial y no se limita el consumo de un usuario al recurso energético disponible en su ubicación. Además, se propone que el usuario se alimente de la tecnología más adecuada en función de su demanda y del recurso energético de la zona.

Se plantea la formulación matemática del problema con variaciones en función del tipo de variables consideradas (variables enteras y variables binarias) y de las diferentes opciones tecnológicas (eólica, solar e híbrida). Estas formulaciones incorporan puntos de posible ubicación de generadores, creados mediante una cuadrícula, para que las soluciones aprovechen puntos de buen potencial energético. Se proponen dos variaciones de procesos de resolución: el primero resuelve el problema completo directamente y el segundo resuelve el problema por etapas y dividiendo el problema global en secciones. El modelo y los procesos de resolución se validan a través de su aplicación en tres casos reales de tres comunidades, Cerro Alto, Alto Perú y El Alumbre, situadas en la región norte de la sierra andina del Perú. Como datos de partida, se utiliza el recurso energético de la zona, tanto eólico como solar, y la demanda de energía y potencia de los usuarios, que se establece mediante una evaluación socioeconómica de la comunidad.

Mediante una experimentación preliminar se compara que modelo obtiene soluciones más satisfactorias, el de variables enteras o binarias. Los resultados muestran que el modelo de variables enteras obtiene mejor solución en más ejemplares que el modelo de variables binarias, y la suma total de las soluciones encontradas es mejor con el modelo de variables enteras. Cuando las soluciones de ambos modelos coinciden, el modelo de variables enteras garantiza en más ejemplares la solución óptima y obtiene cotas más altas, estando más cerca del óptimo. A partir de estos resultados, se concluye que la modelo más eficiente es el de variables enteras y es en este que se centrará la siguiente experimentación.

Mediante una experimentación más completa, se compara los resultados obtenidos por los dos procesos de resolución propuestos. Los resultados muestran que el proceso de resolución directa del modelo completo, obtiene peores resultados, en la mayoría de los casos obtiene soluciones de mayor coste, y en algunos casos no encuentra solución. En los casos que ambos procesos encuentran la misma solución, el proceso que soluciona el problema por etapas y secciones obtiene la solución con menor tiempo de cálculo. En las soluciones obtenidas por este proceso se confirma que se aprovechan puntos de cuadrícula de buen potencial energético y se reduce el coste de la solución.

En cuanto a las soluciones tecnológicas encontradas con los modelos, los resultados muestran que la creación de microrredes es factible con las tres tecnologías y que las soluciones



encontradas en la mayoría de los casos combinan la utilización de equipos individuales y de microrredes. Con una única excepción, las soluciones encontradas por el modelo reducen significativamente los costes de inversión inicial con respecto a la electrificación solo con equipos individuales, en todas las comunidades y para todas las combinaciones de tecnología y demanda. Un aumento de demanda de los domicilios provoca el uso de equipos de generación de más potencia y tiende a la creación de más microrredes; este aumento de demanda acentúa las diferencias de costes entre las soluciones mediante equipos individuales y la utilización de microrredes.

La comparación entre tecnologías muestra que, en la mayoría de los casos, la tecnología híbrida, es la solución más económica. El recurso eólico disponible y la dispersión de los domicilios de una comunidad condicionan el tipo de tecnología más adecuada y el número de microrredes a utilizar. Una alta dispersión, favorece la colocación de equipos individuales y, en general, en el escenario de demanda baja es más económico utilizar la tecnología solar. Al aumentar la demanda la mejor opción tecnológica depende ya del recurso eólico disponible. En las concentraciones de usuarios, la creación de microrredes con tecnología eólica permite reducir significativamente los costes.

El modelo matemático y el proceso de resolución desarrollado para el diseño de sistemas de electrificación rural es un proyecto viable y contribuye a disminuir los costes de inversión inicial de los proyectos, así como a facilitar la toma de decisiones de cómo y con qué tecnología es más adecuado utilizar para electrificar una comunidad.

Agradecimientos

El autor agradece toda la colaboración y el apoyo brindado por Soluciones Prácticas – ITDG, Ingeniería Sin Fronteras-Cataluña y GreenEmpowerment proporcionando información y asesorando durante el desarrollo de este trabajo.

Referencias bibliográficas

Bautista, J.; Sempértegui, R.; Griño, R.; Pereira, J. (2003). Un Modelo PLEM para planificar la distribución de energía eléctrica en entornos urbanos. V Congreso de Ingeniería de Organización, Valladolid, 4-5 Septiembre 2003.

Chiroque, J. (2008a). Microaerogeneradores de 100W y 500W. Modelos IT-PE-100, SP-500

Chiroque, J. (2008b). Microaerogeneradores para la electrificación rural. Caso de El Alumbre, Cajamarca. I Seminario Internacional de energía eólica, Lima (Peru).

Coello, J.; Chiroque, J. Soluciones Prácticas–ITDG. (2008). Aprovechamiento de la energía eólica para la electrificación rural en el Perú. Energía y Negocios, Vol 59.

Hirematha, R. B., Shikhab, S., Ravindranath, N. H. (2007). Decentralized energy planning; modeling and application: a review. Renewable and Sustainable Energy Review, Vol. 11, pp. 729-752.

Keller, S.; Naciri, S.; Nejmi, A.; Dos Ghali, J. (2007). Simulation-based decision support tool for electrification of isolated areas using a network with multiple renewable sources International Conference on Clean Electrical Power, ICCEP '07. 21-23 May, pp. 1 – 8.

Ferrer, L.; Pastor, R.; Sempertegui, R.; Velo, E. (2008). Un modelo para la ubicación de microaerogeneradores a escala comunal; Actas del XIII Congreso de Ingeniería de Organización (XIII CIO); Barcelona-Terrassa, 2-4 septiembre 2009.

Moya, M.J. (1994). Programación lineal de investigación de operaciones 1. Universidad politécnica de Valladolid.

Ramirez, B.; Mantilla, W. (2009). Diagnóstico socioeconómico del caserío de Alto Perú. ITDG-Soluciones Prácticas, Cajamarca, Perú.

Ramirez, B.; Mantilla, W. (2007a). Diagnóstico socioeconómico del caserío de El Alumbre. ITDG-Soluciones Prácticas, Cajamarca, Perú.

Ramirez, B.; Mantilla, W. (2007b). Diagnóstico socioeconómico del caserío de Cerro Alto. ITDG-Soluciones Prácticas, Cajamarca, Perú.

Sallán, J.M.; Suñé, A. (2002). Métodos cuantitativos de Organización Industrial I. Edicions UPC.

Sempértegui, R.; Bautista, J.; Griño, R.; Pereira, J. (2002). Models and procedures for electric



energy distribution planning. A review, IFAC 2002, Barcelona.

Velo E. (2005). Proyectos de abastecimientos de energía en zonas rurales. Curso de introducción de Ingenierías Sin Fronteras.

Williams, A.; Maher, P. (2008). Mini-grid design for rural electrification: optimisation and applications. *In*: Universitas 21 Energy Conference, Birmingham, 8-10 Sept. 2008.

Páginas web consultadas:

www.windpower.com

[www.bornay.com/es/descargas/Inclin 1500](http://www.bornay.com/es/descargas/Inclin%201500)

[www.bornay.com/es/descargas/Inclin 3000](http://www.bornay.com/es/descargas/Inclin%203000)