

Resumen

En la casi totalidad de los países del mundo, la estrategia más utilizada para dar acceso a la electricidad es la extensión de la red eléctrica. Sin embargo, esta estrategia es poco factible cuando se trata de llegar a zonas alejadas, de difícil acceso y con baja densidad de población. Una buena alternativa, son los sistemas autónomos y descentralizados, basados en energías renovables. Los sistemas eólicos y fotovoltaicos son una de las opciones técnicas posibles. Para diseñar estos sistemas, existen modelos matemáticos que consideran criterios técnicos y económicos pero se ha visto que es necesario incorporar criterios sociales para facilitar la integración de los sistemas de electrificación en el día a día de los beneficiarios. Este trabajo tiene como objetivo analizar las características sociales a incluir, incorporar éstas en los modelos matemáticos y estudiar la influencia de cada una sobre las soluciones de electrificación.

Con este trabajo se obtiene un modelo matemático de programación lineal entera y mixta que minimiza costes a la vez que cumple con las exigencias técnicas de los equipos e incorpora consideraciones sociales para mejorar la calidad y la seguridad del suministro energético así como facilitar la gestión de los sistemas de electrificación. Para ello, en primer lugar se analizan problemas sociales hallados en diferentes experiencias de electrificación y se determinan posibles soluciones o mejoras. En segundo lugar, se proponen y validan distintas modelizaciones para cada mejora, con el objetivo determinar la modelización más eficiente e incorporarla a los modelos. Finalmente, en tercer lugar, se estudia la influencia de cada mejora sobre las soluciones de electrificación, para comprobar el aporte de cada una al bienestar social de las comunidades.

La experimentación se valida en 5 comunidades de la sierra andina peruana (Cajamarca, Perú); 3 de ellas ya electrificadas (El Alumbre, Alto Perú parte carretera y Campo Alegre) y 2 por electrificar (Alto Perú parte Norte y Alto Perú parte Sur). Como resultado de la experimentación, las mejoras sociales aportadas en este trabajo logran generar sistemas de electrificación que mejoran la seguridad del suministro energético y facilitan la gestión de los sistemas de electrificación, con unos incrementos de coste muy pequeños.





Tabla de contenido

1. Introducción	5
1.1. Introducción y justificación	5
1.2. Objetivos	6
1.3. Alcance del proyecto.....	6
2. Descripción del sistema	7
2.1. Sistemas híbridos de generación eléctrica para zonas rurales	7
2.2. Recursos energéticos	8
2.3. Componentes de generación.....	9
2.3.1. Aerogeneradores.....	9
2.3.2. Paneles fotovoltaicos.....	10
2.4. Componentes de la instalación.....	11
2.5. Análisis de la continuidad del suministro energético	13
2.6. Análisis del sistema de gestión.....	14
2.7. Relación entre componentes.....	15
2.8. Evaluación de los recursos eólico y solar	16
3. Modelización matemática del sistema	17
3.1. Consideraciones de los modelos matemáticos.....	17
3.2. Modelos de programación lineal.....	18
3.3. Formulación matemática planteada	18
3.3.1. Parámetros de entrada	19
3.3.2. Modelo de partida.....	20
3.3.3. Consideración 1: Todos los usuarios tienen medidor.....	25
3.3.4. Consideración 2: Número máximo de usuarios independientes.....	25
3.3.5. Consideración 3: Número máximo de microrredes.....	28
3.3.6. Consideración 4: Número mínimo de usuarios por microrred.....	32
4. Resultados y análisis de la experimentación preliminar	37
4.1. Experimentación realizada	37
4.2. Resultados de la experimentación preliminar	38
4.3. Análisis de la experimentación preliminar	42
5. Resultados y análisis de las restricciones sociales	43
5.1. Descripción de comunidades.....	43
5.2. Experimentación realizada	45
5.3. Resultados y análisis	46
5.3.1. Resultados para Alto Perú parte Norte	47
5.3.2. Resultados para Alto Perú parte Sur.....	57
5.3.3. Análisis.....	63
6. Estudio del impacto ambiental y socio-económico.....	67
6.1. Impacto ambiental.....	67



6.1.1. Impactos ambientales negativos	67
6.1.2. Impactos ambientales positivos	67
6.2. Impacto socio-económico	67
7. Presupuesto.....	69
Conclusiones	71
Agradecimientos	73
Bibliografía.....	73



1. Introducción

En este capítulo se introduce a la problemática al origen del trabajo, justificando la necesidad de este proyecto, se exponen los objetivos que se quieren lograr y se explica el alcance del mismo.

1.1. Introducción y justificación

En la actualidad, cerca de una cuarta parte de la población mundial carece de acceso a la energía, realidad que afecta principalmente a comunidades rurales de países en desarrollo. La estrategia convencional para dar acceso a la electricidad consiste en extender la red eléctrica, pero esta solución se ve limitada cuando se trata de llegar a comunidades rurales dispersas y en zonas de difícil acceso. Los sistemas de electrificación basados en fuentes de energía renovables han demostrado ser adecuados para proveer de energía a comunidades aisladas de forma autónoma. En concreto, las tecnologías eólica y solar son una de las opciones técnicas posibles y el diseño de sistemas que combina la distribución en microrred con puntos aislados de generación se ha demostrado adecuada para comunidades dispersas.

El diseño de estos sistemas de electrificación debe considerar la localización exacta y la demanda de los puntos de consumo y el detalle del recurso energético (eólico y solar) disponible en cada punto. Como solución de electrificación se debe definir la situación de los tipos disponibles de generadores (eólicos y solares) y el diseño de la microrred, seleccionando los conductores y considerando las caídas de tensión. La solución debe también proporcionar la ubicación y el dimensionado de los equipos, por ejemplo, baterías, inversores, reguladores y medidores.

Hasta la fecha, para la generación de opciones de electrificación, existen modelos matemáticos de programación lineal entera y mixta que consideran criterios y restricciones técnicas y económicas. Estos plantean variaciones sobre los usos energéticos cubiertos, la tecnología utilizada y la configuración de los sistemas (electrificación individual o en microrred). Los modelos minimizan el coste de la inversión inicial y tienen en cuenta criterios técnicos propios de los equipos de la instalación y de la configuración de los sistemas. Sin embargo, diferentes experiencias de electrificación permiten ver que es necesario que el diseño de los sistemas de electrificación considere además criterios sociales para facilitar la integración de los sistemas por parte de los beneficiarios y asegurar así la sostenibilidad de los proyectos. En primer lugar, se quiere mejorar la seguridad y la calidad del suministro energético y en segundo lugar, se quiere facilitar la gestión de los sistemas de electrificación.



1.2. Objetivos

Este trabajo tiene 3 objetivos principales:

- Analizar sistemas reales de electrificación autónomos con energía eólica y solar, detectar qué problemas sociales existen y proponer soluciones o variaciones de diseño para mejorar cada problemática.
- Desarrollar modelos matemáticos de programación lineal entera y mixta para diseñar sistemas de electrificación autónomos con energía eólica y solar, que incluyan las mejoras sociales propuestas y desarrollar procesos de resolución de los modelos.
- Validar los modelos en casos reales y analizar el impacto de las mejoras sobre las soluciones de electrificación.

1.3. Alcance del proyecto

La validación se realiza en base a casos reales implementados por las ONG Soluciones Prácticas – ITDG (Perú), Ingeniería Sin Fronteras (España) y Green Empowerment (EEUU) en la zona norte de la sierra andina peruana. En concreto, se han escogido 5 comunidades de la región de Cajamarca: El Alumbre (28 viviendas, una escuela y una posta médica), Alto Perú (26 viviendas), Campo Alegre (20 viviendas), Alto Perú parte Norte (13 viviendas) y Alto Perú parte Sur (9 viviendas). Las 3 primeras comunidades han sido ya electrificadas y sirven para validar los modelos planteados. Las 2 últimas comunidades están identificadas y son los próximos proyectos de electrificación a realizar por las ONGs promotoras; las soluciones obtenidas sirven además para estudiar la influencia de las mejoras propuestas sobre el bienestar social de las comunidades, valorando si el incremento de la inversión inicial merece o no la pena.

Las comunidades han sido escogidas por su variabilidad en cuanto a número de viviendas y dispersión de las mismas, obteniendo así una muestra representativa de las comunidades de la zona. De esta forma se quiere obtener una herramienta de generación de alternativas de electrificación válida para toda la sierra andina.



2. Descripción del sistema

En este capítulo se describe la configuración de los sistemas de electrificación rural, la evaluación de recursos (tanto eólico como solar), los equipos de generación, los componentes de la instalación y las consideraciones sociales. Se exponen así las características técnicas y sociales que se modelizan en el capítulo siguiente. Para más información, trabajos previos contienen una extensa información al respecto¹.

2.1. Sistemas híbridos de generación eléctrica para zonas rurales

Los sistemas hidráulicos son una opción tecnológica eficiente y económica para la electrificación rural. Sin embargo, en ausencia de recurso hídrico, es cada vez más frecuente el uso de la tecnología híbrida, que combina las tecnologías eólica y solar. Cada una de estas 2 tecnologías por separado tiene el problema de generar de forma intermitente, al ser las fuentes (viento y sol) no constantes en el tiempo. Sin embargo, combinadas, sus limitaciones se reducen, dando lugar a un abastecimiento energético mucho más constante y fiable.

Los sistemas eólicos y solares tienen una parte diferenciada (equipo de generación) y una parte común (componentes de la instalación). En este trabajo se consideran tres casos para la opción de electrificación: tecnología eólica (equipos de generación eólicos), tecnología solar (equipos de generación solares) y tecnología híbrida (equipos de generación eólicos y solares). Todos los componentes utilizados se describen en los subcapítulos, 2.3. *Componentes de generación* y 2.4. *Componentes de instalación*.

En la imagen 2.1, se puede ver la distribución esquemática de un sistema de solución híbrida. En el caso de la solución eólica el esquema sería el mismo sin la rama de captación con paneles fotovoltaicos. En el caso de la solución solar el esquema sería el mismo sin la rama captación con aerogeneradores. La energía que se genera en los aerogeneradores y los paneles fotovoltaicos, es controlada por los reguladores. Al ser la generación intermitente, existe la necesidad de instalar las baterías; dispositivos capaces de almacenar la energía en los momentos de máxima generación para poder seguir abasteciendo a los usuarios en los momentos de mínima generación. Finalmente, los inversores pasan la corriente continua con que se almacena en las baterías a corriente alterna con que se distribuye y suministra a los puntos de consumo.

La distribución de la energía generada se realiza con una microrred. Esto es una generación y una acumulación energética concentradas en unos pocos puntos de generación y que abastecen al resto de puntos de consumo, interconectando entre sí dos o más puntos mediante una red de distribución. La energía así generada es común para todos los usuarios, conllevando una gestión y una repartición comunitaria de la misma.

¹ Véase el Proyecto Final de Carrera de Gregorio Miquel Capó Plaza, "Modelo para la ubicación de aerogeneradores y paneles fotovoltaicos en proyectos de electrificación rural con microrredes.



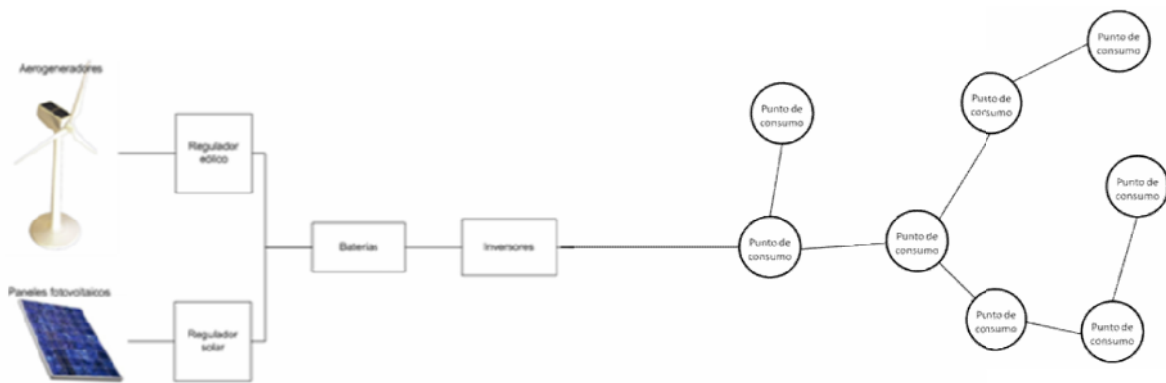


Imagen 2.1. Esquema de un sistema híbrido de generación eléctrica con distribución en microrred

La distribución en microrred tiene notables ventajas frente a la distribución individual. Una de las principales ventajas es que ya no se depende de la posición geográfica para disponer de más o menos energía. Al interconectarse entre sí varios usuarios, los equipos se ubican en la zona con mejor potencial energético y distribuyen uniformemente a todos los usuarios. Esto se hace más notable en el caso eólico que en el solar, por la gran variabilidad del viento en una misma zona.

Otro punto a favor de las microrredes es que por una cuestión de economías de escala, estas configuraciones resultan más económicas que la electrificación individual; los equipos de generación se concentran en unos pocos puntos, a costa de incrementar la potencia de los mismos y reducir la relación entre coste y energía generada. Esto es válido tanto en equipos de generación solares como eólicos, aunque en el segundo caso la reducción de costes es mayor.

2.2. Recursos energéticos

Tanto la tecnología eólica como la solar requieren de fuentes energéticas como lo son el viento y el sol, respectivamente.

El recurso eólico es una fuente energética de gran variabilidad. El potencial energético de este recurso en cada zona depende de factores espaciales como la zona del globo terráqueo, la orografía y la altura respecto al suelo, y de factores temporales como la variabilidad horaria, diaria y estacional. La consideración de estos aspectos es imprescindible para escoger el emplazamiento de los sistemas de generación en puntos con un buen potencial energético.

El recurso solar se define como la radiación que incide en un punto o superficie. Igual que el recurso eólico es una fuente energética de gran variabilidad y depende de factores espaciales como la zona del globo terráqueo y factores temporales como la variabilidad horaria (nula radiación por la noche), diaria (según la nebulosidad) y estacional (condiciones meteorológicas y de temperatura).



2.3. Componentes de generación

Los componentes de generación transforman un recurso energético en energía eléctrica. En el caso de la tecnología eólica se utilizan aerogeneradores y en el caso de la tecnología solar se utilizan paneles fotovoltaicos.

2.3.1. Aerogeneradores

Un aerogenerador es un generador eléctrico con 2 etapas de transformación energética. La primera de ellas consiste en la conversión de la energía cinética del viento en energía mecánica, por medio de las palas o álabes. La segunda consiste en la conversión de la energía mecánica en energía eléctrica, por medio de una transmisión y un generador. Los aerogeneradores con que se trabaja son equipos de baja potencia. Sus parámetros característicos son:

Velocidad de arranque: Velocidad [m/s] del viento a partir de la cual el aerogenerador empieza a generar.

Potencia máxima: Potencia máxima [W] a la que el aerogenerador puede llegar a trabajar.

Velocidad de corte: Velocidad máxima [m/s] del viento a partir de la cual el aerogenerador deja de generar.

Voltaje: Voltaje [V] al que el aerogenerador genera la electricidad.

Número de aerogeneradores por punto de generación: Número máximo de aerogeneradores que se pueden instalar en un punto de generación.

La ecuación que determina la **energía generada** en un punto a partir de la potencia de la turbina, la densidad del aire, la velocidad del viento en el punto y el área dibujada por la rotación de los álabes de la turbina es:

$$E = \int_0^t \frac{1}{2} \rho v_t^3 D^2 dt \quad \left\{ \begin{array}{l} E = \text{Energía [W} \cdot \text{h]} \\ \rho = \text{Densidad aire [kg / m}^3\text{]} \\ v = \text{Velocidad del viento [m / s]} \\ D = \text{Diametro de la superficie [m]} \\ t = \text{Tiem po [h]} \end{array} \right. \quad (2.1)$$

La **curva de potencia** (imagen 2.2) indica la potencia generada por un aerogenerador en función de la velocidad del viento, en condiciones estándar (25°C y 0 m.s.n.m.). Al analizar el recurso eólico de comunidades a mayor altura, la densidad del aire disminuye y se debe extrapolar la curva en acorde a ello. Con la curva de potencia, se puede determinar la energía generada idealmente, lo que resulta una buena aproximación a la realidad en sistemas de baja potencia.

Los aerogeneradores son obstáculos para el viento, creando turbulencias en su trayectoria, lo que puede afectar al rendimiento de otros aerogeneradores cercanos. Por ello es recomendable que exista una mínima separación entre estos dispositivos y se limita el número instalado en un punto.



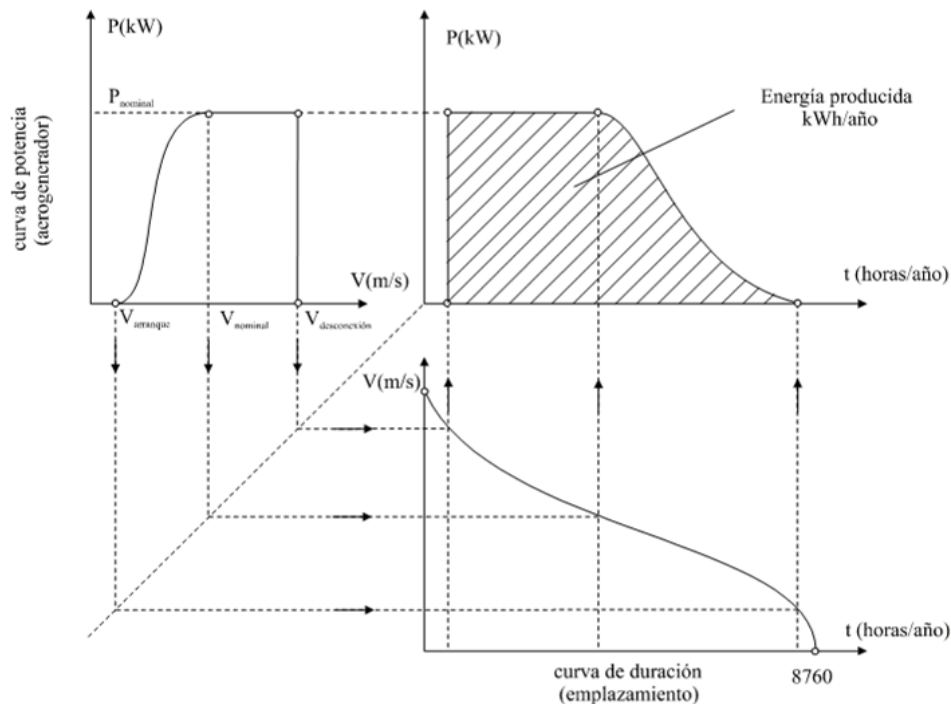


Imagen 2.2. Curva de potencia de un aerogenerador (fuente: Crespo, 2003)

2.3.2. Paneles fotovoltaicos

Un panel fotovoltaico es un generador eléctrico con una etapa de transformación energética. Al incidir la luz sobre las células fotovoltaicas que componen los paneles, se acumulan los electrones en el lado iluminado, creando así una polaridad. Al conectar un conductor a ambos lados del panel, se genera una corriente eléctrica que intenta igualar las cargas de ambos lados de la célula. Los paneles considerados en el presente trabajo son policristalinos y de baja potencia. Éstos presentan un mejor rendimiento que otros tipos de paneles. Los parámetros característicos son:

Voltaje: Voltaje [V] al que genera el panel.

Potencia nominal: Potencia máxima [W] que puede dar el panel en unas condiciones estandarizadas (radiación solar de 1000W/m² y temperatura de 25°C).

El **rendimiento** de los paneles fotovoltaicos se ve afectado por la temperatura: a menor temperatura, mayor rendimiento. La ecuación que relaciona rendimiento del panel y la temperatura ambiente es:

$$\eta = \frac{100 \cdot \frac{T^a_{Amb} + 15 - 25}{2}}{100} \quad \left\{ \begin{array}{l} \eta = \text{Rendimiento} \\ T^a_{Amb} = \text{Temperatura ambiente} [^\circ\text{C}] \end{array} \right. \quad (2.2)$$



Con los datos de potencial solar y rendimiento de los paneles, se calcula la **energía generada** por cada panel, teniendo en cuenta la potencia de los mismos según la ecuación:

$$E = P \cdot HSP \frac{\eta}{100} \quad \left\{ \begin{array}{l} E = \text{Energía generada [W} \cdot h] \\ P = \text{Potencia panel [W]} \\ HSP = \text{Horas Solar Pico [h]} \\ \eta = \text{Rendimiento} \end{array} \right. \quad (2.3)$$

2.4. Componentes de la instalación

Una vez generada la energía eléctrica, se requiere una instalación que permita su almacenamiento y distribución hasta los puntos de consumo. Dicha instalación está formada por los siguientes componentes (detallados según el orden en que pasa la electricidad): regulador eólico, regulador solar, batería, inversor, conductor, microrred y medidor.

Regulador eólico

Las 2 funciones principales del regulador eólico son proteger a las baterías de sobrecargas y descargas profundas y pasar de la corriente alterna generada por el aerogenerador a corriente continua con que se almacena la energía en las baterías. La característica principal de estos componentes es la **potencia máxima** [W] que pueden soportar. Ésta se obtiene del producto de la intensidad máxima [A] por la tensión nominal [V]. Al tratarse de electrónica de potencia, las pérdidas son despreciables.

Regulador solar

El regulador solar protege a las baterías de sobrecargas y descargas profundas y controla la tensión de salida de los paneles fotovoltaicos para que ésta entre en las baterías con el valor adecuado. A diferencia del caso eólico, aquí el equipo de generación ya produce en corriente continua y no es necesaria ninguna transformación de corriente. La característica principal de los reguladores solares es la **potencia máxima** [W] que pueden soportar, obtenida de como en los reguladores eólicos. Al tratarse de electrónica de potencia, las pérdidas son despreciables.

Batería

Las baterías o acumuladores son equipos capaces de almacenar energía eléctrica mediante procesos electroquímicos. Los parámetros característicos de estos dispositivos son:

Tensión: Tensión [V] de trabajo.

Capacidad: Cantidad de energía [Wh] que se puede almacenar, para ser suministrada.

Factor de descarga: Máximo porcentaje de energía que se permite descargar. La descarga profunda o completa daña al equipo, perdiendo éste sus propiedades y debiéndose sustituir.

Rendimiento: Cociente entre la energía útil aprovechable y la energía que ha sido suministrada.



Inversor

Los inversores u onduladores transforman la corriente continua que sale de las baterías en corriente alterna para abastecer a los puntos de consumo. Son necesarios cuando la distribución se quiere en corriente alterna. Sus parámetros característicos son:

Potencia nominal: Potencia [W] a la que el inversor puede trabajar toda su vida útil sin estropearse. Se diseña para que a esta potencia se minimicen las pérdidas.

Rendimiento: El rendimiento [%] se da cuando el inversor está trabajando a potencia nominal. Dicho rendimiento disminuye cuando el inversor se aleja de esta potencia llegándose a producir grandes pérdidas en este componente.

El **factor de simultaneidad** estima el porcentaje de equipos que pueden llegar a estar conectados al mismo tiempo, entendiendo que no todos los usuarios conectaran en un mismo instante todos sus equipos eléctricos.

Conductor

Los conductores son componentes a través de los cuales se distribuye la energía desde los puntos de generación a los puntos de consumo. Sus parámetros característicos son:

Sección: Área [mm²] de la sección transversal del conductor, teniendo en cuenta que es de ida y vuelta. A menudo se asocian los conductores a calibres, los cuales mediante una tabla se pueden pasar a la sección correspondiente.

Resistividad [Ω/mm²]: Oposición al paso de la corriente, teniendo en cuenta que el conductor es de ida y vuelta.

Cuando dos puntos están conectados por un conductor, existen pérdidas en el mismo por efecto Joule, causando una **caída de tensión entre los dos puntos**. Ésta viene dada por la resistividad del conductor, su sección y la distancia entre los dos puntos, según la ecuación:

$$V_1 - V_2 = \frac{\rho L_{12} I \cos\varphi}{S} \quad \left\{ \begin{array}{l} V_1 = \text{Voltaje en 1 [V]} \\ V_2 = \text{Voltaje en 2 [V]} \\ \rho = \text{Resistividad [W} \cdot \text{m}^2/\text{m]} \\ L_{12} = \text{Longitud entre 1 y 2 [m]} \\ I = \text{Intensidad [A]} \\ S = \text{Seccion [mm}^2\text{]} \\ \cos\varphi = \text{factor de potencia} \end{array} \right. \quad (2.4)$$

El **factor de potencia** es la cantidad de energía convertida en trabajo. Como en el tipo de instalaciones con que se trabaja no se utilizan equipos como motores o transformadores (causantes de pérdidas de trabajo), se considera un factor de potencia con valor 1.



En el **coste** de los conductores [\$/m] se considera el coste del cableado de ida y vuelta, así como de la infraestructura para su sujeción (postes, retenidas, pernos y acometidas). En los puntos terminales de microrred (aquellos donde una de las ramas del árbol finaliza), se debe instalar un poste adicional por cuestiones técnicas, lo que no se contempla en el coste de los conductores.

Microrred

Las microrredes pueden ser en anillo o radiales. Las microrredes en anillo presentan diferentes puntos de generación interconectados formando una línea cerrada de la que parten las líneas de distribución. Su principal ventaja es la seguridad (asegurando el suministro aún en el caso de alguna avería) pero su costo es muy elevado. Las microrredes radiales presentan un único punto de generación del que parten las líneas de distribución en forma de árbol, no formando uniones entre ramas del árbol. Cada punto de la microrred tiene un único conductor de entrada y varios de salida. Pese a la baja seguridad (al interrumpirse el suministro energético en caso de avería) se utiliza esta configuración por su bajo coste, más apropiado para el tipo de proyectos con que se trabaja. Puede darse el caso de que el la microrred abastezca a un único punto de consumo, en cuyo caso se considera al punto como independiente o individual. La extensión de las microrredes no se limita, pero sí se limita la longitud máxima con que se pueden interconectar dos puntos.

Los **medidores** son dispositivos que cumplen la función de medir y controlar el consumo, con el fin de informar a los gestores del proyecto del consumo de cada beneficiario. Para ahorrar costes, estos dispositivos se instalan únicamente en usuarios en microrred, dado que es cuando más necesario se hace un control del consumo. En el caso de usuarios individuales, su consumo queda determinado por los equipos de generación que abastecen al propio punto de consumo.

Los equipos de generación y los componentes de la instalación que los acompañan (reguladores, baterías e inversores) se instalan únicamente en puntos de consumo. Con esto, se evita el posible robo de estos componentes al estar continuamente vigilados.

2.5. Análisis de la continuidad del suministro energético

La continuidad del suministro energético es fundamental cuando se quieren conseguir instalaciones eléctricas fiables y de calidad. Este factor es vital para lograr que los beneficiarios de un proyecto resulten satisfechos con el mismo, lo integren en su cotidianeidad y se garantice así la sostenibilidad del proyecto. Dos factores clave en la continuidad del suministro energético son la variabilidad en los recursos energéticos y las averías de los equipos de generación.

El presente proyecto considera las tecnologías eólica y solar, cuyos recursos energéticos (sol y viento) son variables en el tiempo. Aunque existen las baterías como dispositivos de acumulación energética para abastecer en los períodos sin generación, estos períodos pueden extenderse más de lo previsto. Según la región en que se trabaje, un recurso tendrá menor variabilidad que el otro. Para las regiones de estudio, el recurso solar es mucho más uniforme que el recurso eólico. Los sistemas eólicos son fiables en situaciones muy concretas; comunidades con un gran potencial



eólico a lo largo de todo el año y en muchos de los puntos de la misma. Por tanto es interesante que los puntos no se alimenten únicamente de equipos de generación eólicos.

Por otra parte, los medios de que se dispone en muchas comunidades rurales no son suficientes como para poder reparar un equipo averiado. Pese a capacitarse en todos los proyectos a una persona para la supervisión de los equipos, las herramientas y la tecnología son escasas para realizar ciertas operaciones in situ. Además, las comunidades acostumbran a quedar muy alejadas de los centros poblados mayores, ralentizando, dificultando y encareciendo enormemente las reparaciones. En consecuencia se debe intentar que cada punto de consumo no se abastezca de un único equipo de generación. Así, si un equipo falla, al menos existirá otro que genere y abastezca energéticamente al punto o puntos de consumo. Eso sí, la cantidad de energía que recibirá cada usuario abastecido por esos equipos de generación, se verá inevitablemente reducida durante la reparación.

2.6. Análisis del sistema de gestión

El modelo de gestión de un proyecto de electrificación rural es el modo en que se organiza la comunidad beneficiaria para lograr sustentar el mismo a lo largo de su vida útil.

La tarifa de pago es el monto mensual a pagar por los beneficiarios de un proyecto. Se establece en base a lo que, previo a la instalación de los sistemas de electrificación, pagaban los beneficiarios en concepto de iluminación y suministro energético (velas, keroseno, pilas, etc.). En los proyectos con que se trabaja, los medidores se instalan en los puntos en microrred, adecuando la tarifa al consumo indicado por los medidores. En los puntos individuales, no se instalan medidores para ahorrar costos y la tarifa es la misma para cada usuario. De este modo puede darse el caso de usuarios con distintos consumos pero que pagan una misma tarifa. Para facilitar la gestión de los sistemas, se debe por tanto lograr que todos los usuarios tengan un seguimiento de su consumo, pudiendo así hacer pagar a todo el mundo conforme a su consumo.

Las microrredes ofrecen ciertas ventajas sociales frente a los sistemas individuales. En primer lugar, estas configuraciones ofrecen un suministro energético mucho más equitativo entre usuarios; si un usuario tiene energía, los demás también al ser abastecidos por los mismos equipos. En segundo lugar, favorecen la extensión del alcance energético de las comunidades, pudiendo adherirse nuevos usuarios a un coste más reducido que con la electrificación individual. Por último, estas configuraciones permiten el incremento puntual del consumo en algún usuario, favoreciendo así los usos productivos de la energía y/o micro industrias de escala local (procesado de leche, restaurantes, etc.). En consecuencia, favorecer que el máximo posible de usuarios estén conectados a alguna microrred mejora el entorno social de la comunidad. Esto sin embargo debe realizarse con precaución dado que en algunas comunidades, existe gran dispersión de puntos de consumo, e interconectar algunos usuarios entre sí puede encarecer enormemente el proyecto.



La gestión de los sistemas de electrificación es uno de los elementos más complejos de todo proyecto. En ocasiones, existen conflictos entre vecinos motivados por herencias, límites de terrenos mal definidos, etc. llegando a veces al extremo de boicoteos de los sistemas de electrificación del vecino. En consecuencia, la gestión de microrredes donde vecinos deben coordinarse entre sí, no siempre es evidente. Si se combinan varias microrredes de tamaños muy variados y usuarios independientes, los problemas sociales pueden hacer fracasar el proyecto. Es por tanto muy recomendable evitar proyectos con muchas microrredes pequeñas.

2.7. Relación entre componentes

En los sistemas de electrificación, ciertas exigencias técnicas y/o sociales obligan a tener en cuenta algunas relaciones entre los componentes. En el origen de todas las relaciones, se encuentra la demanda (tanto de energía como de potencia). Ésta va directamente relacionada con el dimensionado de los equipos de generación. El número equipos de componentes de la instalación, viene determinado por el número y tipo de equipos de generación utilizados.

En la estimación de las demandas de energía y potencia, se debe tener en cuenta la variabilidad en el consumo entre usuarios. Ésta se refiere a que existen múltiples tipos de usuarios como viviendas, escuelas y postas de salud.

Se deben cumplir las demandas, tanto de energía como de potencia. Para ello, la suma de las energías generadas por aerogeneradores y/o paneles fotovoltaicos instalados en un punto de generación debe ser mayor o igual que la suma de los consumos de los puntos que se abastecen de ese punto más el consumo del propio punto. Se deben tener en cuenta las pérdidas en baterías, inversores y conductores. No se consideran pérdidas en los equipos de generación dado que la energía generada es directamente la de salida.

En la instalación eólica, la suma de las potencias máximas de los aerogeneradores no debe superar la suma de las potencias máximas de los reguladores eólicos instalados en ese mismo punto. A su vez, la suma de las potencias máximas de los paneles fotovoltaicos no debe superar la suma de las potencias máximas de los reguladores solares instalados en ese mismo punto. No se consideran pérdidas en los reguladores. Las soluciones así obtenidas no son exactas, son aproximaciones para la ayuda en la toma de decisiones de la opción de electrificación para una comunidad.

La capacidad de las baterías instaladas en un punto debe ser mayor o igual que el consumo de los puntos que se abastecen de ese punto más el consumo del propio punto. El dimensionado debe tener en cuenta los días de autonomía y el factor de descarga. El rendimiento de las baterías se considera igual para los distintos tipos de baterías utilizadas. Las pérdidas son de energía.



La potencia de los inversores instalados en un punto debe ser mayor que la suma de consumos de potencias de los puntos que se abastecen de ese punto más el consumo de potencia del propio punto. Se debe tener en cuenta el factor de simultaneidad. El rendimiento de los inversores se considera igual para los distintos tipos de inversores utilizados. Las pérdidas son de energía.

La caída de tensión entre dos puntos debe ser menor o igual que la caída de tensión máxima admisible, definida por el ejecutor del proyecto. La intensidad que circula por el conductor debe ser menor o igual a la máxima admisible. Se consideran pérdidas de energía y potencia únicamente para los puntos conectados a alguna microrred.

2.8. Evaluación de los recursos eólico y solar

Con el fin de asegurar un nivel mínimo de suministro energético a lo largo de todo el año, el potencial eólico se calcula para el mes de menor viento. Previamente, se realiza un trabajo de campo para medir la velocidad del viento, instalando un anemómetro en un punto céntrico y elevado de la comunidad a electrificar. Se mide la velocidad y la dirección del viento. Con esto, se escoge el mes de peor viento. Paralelamente, para cada uno de los aerogeneradores disponibles, se toma la curva de potencia dada por el fabricante o por experimentación en un túnel de viento.

Los datos anteriores son introducidos en un software especializado. Este, con los datos y el mapa geográfico de la zona calcula la distribución del viento en toda la región, asociando a cada punto un potencial eólico y una energía generada con cada tipo de aerogenerador.

El potencial solar de cada punto es la radiación solar, que se considera uniforme en todos los puntos de una comunidad. En consecuencia, la energía generada por cada punto es la misma. El dato de hora solar pico, se saca del programa HWO (Velo et al, 2005), el cual no se da para cada comunidad específica, sino para el centro urbano más cercano, en el presente caso Cajamarca. El programa facilita un dato para cada mes del año, y del mismo modo que para el recurso eólico, con el fin de garantizar un potencial mínimo, se escoge el dato del mes de menor irradiación solar.



3. Modelización matemática del sistema

El presente capítulo se divide en 3 partes. En primer lugar se detallan las consideraciones del modelo matemático de partida y las 4 variaciones planteadas. A continuación se explica brevemente la teoría de la programación matemática y su resolución. Finalmente, se exponen los modelos matemáticos desarrollados para la posterior experimentación.

3.1. Consideraciones de los modelos matemáticos

En el presente trabajo se expone un modelo matemático de partida. En él se permite el uso de las tecnologías eólica y solar, donde únicamente los puntos de consumo pueden ser de generación. Este modelo considera variaciones sobre la configuración de los sistemas, permitiendo abastecer a los puntos mediante microrredes o individualmente. Se tienen en cuenta restricciones de tipo técnico para adecuar los componentes a exigencias de la realidad. Adicionalmente, se añaden dos restricciones de tipo social que mejoran la continuidad del suministro energético.

En primer lugar, debido a la menor continuidad del recurso eólico frente al recurso solar en la región donde se trabaja, se opta por asegurar un mínimo porcentaje de abastecimiento energético producido con paneles fotovoltaicos para cada punto de consumo. Se mejora así la calidad del suministro. En segundo lugar, para compensar las posibles fallas por averías de los equipos de generación, se establece un mínimo número de equipos de generación para abastecer a cada punto de consumo.

Posteriormente, se proponen 4 alternativas que pretenden mejorar la gestión de las soluciones de electrificación obtenidas en el modelo de partida. Lo que aquí se quiere no es solucionar las problemáticas sociales referentes a la gestión de los sistemas, sino ayudar con herramientas técnicas al trabajo de los sociólogos.

En primer lugar, para lograr una mayor equidad entre usuarios y establecer una tarifa de pago que vaya en acorde al consumo de cada beneficiario (ya sea individual o en microrred), se propone instalar 1 medidor en cada punto de consumo. En segundo lugar, para dar alcance a la electrificación con microrred al máximo número de usuarios posible sin que ello encarezca demasiado en coste por extensión de red, se propone imponer un número máximo de usuarios independientes. En tercer lugar, para facilitar la gestión de las microrredes y evitar que aparezcan demasiadas, se propone limitar el número de microrredes de la solución de electrificación. En cuarto lugar, para lograr que el esfuerzo por la gestión de cada microrred valga la pena alcanzando a un número suficiente de usuarios, se propone establecer un número mínimo de usuarios por microrred.



3.2. Modelos de programación lineal

La programación lineal es un procedimiento matemático que sirve para resolver problemas, formulándolos mediante ecuaciones lineales. El objetivo es siempre optimizar una función objetivo de dos o más variables, con unos datos de entrada y unas restricciones que las variables de la función objetivo deben cumplir. La estructura del programa matemático es:

Datos de entrada: Son los datos que se pueden conocer de la realidad y que son necesarios para la posterior resolución del modelo matemático.

Variables: Son los elementos que definen la solución y en consecuencia su valor es al principio desconocido. En el caso del presente trabajo, se trata con variables enteras y reales, de modo que se trata de problemas de programación lineal entera y mixta (PLEM).

Función objetivo: Es el objetivo del problema, es decir aquello que se quiere maximizar o minimizar. Se trata de una función lineal.

Restricciones: Son las exigencias de la realidad que limitan y definen el valor de las variables. Son funciones lineales.

El enorme número de variables y restricciones utilizadas obliga a que se deban utilizar metodologías derivadas del procedimiento de *branch and bound* para resolver los modelos en un período razonable de tiempo. Este procedimiento de *ramificar y acotar* sin calcular el total de soluciones posibles, es capaz de alcanzar soluciones muy válidas, que mejoran cuanto más tiempo de cálculo le es permitido e incluso. Con el tiempo suficiente, se alcanza el valor óptimo de la solución.

Los problemas tratados se resuelven con un software especializado: ILOG. Éste combina dos programas conectados entre sí: CPLEX (motor de resolución que ejecuta el código desarrollado en el OPL y resuelve el modelo) y OPL (en el que se escribe el modelo con el lenguaje de programación).

3.3. Formulación matemática planteada

La implementación de modelos consta de 6 apartados. En primer lugar, se detallan los datos de entrada que se utilizan en todos los modelos posteriormente implementados. En el segundo apartado, se expone el modelo de partida que ha sido elaborado en base a modificaciones sobre un modelo previo², teniendo en cuenta restricciones sociales además de las ya existentes técnicas y económicas. En los apartados siguientes, se añaden 4 restricciones de carácter social y, para tres de ellas, se consideran dos vertientes en la implementación.

² Véase “Modelo para la ubicación de aerogeneradores y paneles fotovoltaicos en proyectos de electrificación rural con microrredes” de Gregorio Miguel Capó Plaza.



3.3.1. Parámetros de entrada

Los parámetros de entrada recogen diferentes aspectos de la realidad característicos de la comunidad que se desea estudiar. Se dividen en seis grupos.

Demanda

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

L_{pd} , Distancia [m] entre el punto de consumo p y el punto de consumo d ;
 $p = 1, \dots, D; d = 1, \dots, D$.

L_{max} , Distancia máxima [m] 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 mediante un conductor; $p = 1, \dots, D; d = 1, \dots, D; p \neq d, L_{pd} \leq L_{max}$.

PD_d, ED_d , Demanda de potencia [W] y energía [Wh/día] del punto de consumo d ; $d = 1, \dots, D$.

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

E_{min} , Número mínimo de equipos a instalar en cada punto de generación.

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 la infraestructura y teniendo en cuenta que es de ida y vuelta; $c = 1, \dots, C$.

RC_c, IC_c , Resistencia e intensidad máxima admisibles del conductor tipo c [Ω/m], teniendo en cuenta que el cable es de ida y vuelta; $c = 1, \dots, C$.

V_n, V_{min}, V_{max} , Voltaje nominal, mínimo y máximo a satisfacer [V].

C_{poste} , Coste de un poste de microrred.

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

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

N_{max} , Límite superior en el número de microrredes.

U_{indep} , Número máximo de usuarios independientes.



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

Componentes

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 [\\$].

$\eta b, \eta i$, Rendimiento [%] de las baterías y de los inversores.

Generación eólica

A, NA , Tipos de aerogeneradores ($a = 1, \dots, A$) y número máximo de aerogeneradores que se pueden instalar en un mismo punto.

EA_{da} , Energía generada [Wh/día] por un aerogenerador situado en el punto d del tipo a ; $d = 1, \dots, D; a = 1, \dots, A$.

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 un tipo que se pueden instalar en un mismo punto.

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

EOL , Mínimo porcentaje de energía proveniente de aerogeneradores.

Generación solar

S, NS , Tipos de paneles ($s = 1, \dots, S$) 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 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 ; $z = 1, \dots, Z$.

SOL , Mínimo porcentaje de energía proveniente de placas solares.

3.3.2. Modelo de partida

A continuación se presenta el modelo de partida. Este es el modelo básico a partir del cual se realizan las posteriores modificaciones en los subcapítulos siguientes.



Variables

xa_{da} , Variable entera que indica el número de aerogeneradores que se instalan en el punto d del tipo a ; $d = 1, \dots, D$; $a = 1, \dots, A$.

xb_{db} , Variable entera que indica el número de baterías que se instalan del tipo b en el punto d ; $d = 1, \dots, D$; $b = 1, \dots, B$.

xi_{di} , Variable entera que indica el número de inversores que se instalan del tipo i en el punto d ; $d = 1, \dots, D$; $i = 1, \dots, I$.

xr_{dr} , Variable entera que indica el número de reguladores que se instalan del tipo r en el punto d ; $d = 1, \dots, D$; $r = 1, \dots, R$.

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; $p = 1, \dots, D$; $d \in Q_p$; $c = 1, \dots, C$.

fe_{pd} , Variable real que indica el flujo de energía [Wh/día] entre los puntos p y d ; $p = 1, \dots, D$; $d \in Q_p$.

fp_{pd} , Variable real que indica el flujo de potencia [W] entre los puntos p y d ; $p = 1, \dots, D$; $d \in Q_p$.

v_d , Variable real que indica la tensión [v] en el punto d ; $v_d \in [V_{min}, V_{max}]$; $d = 1, \dots, D$.

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; $d = 1, \dots, D$.

xs_{ds} , Variable binaria que indica si se instala un panel de tipo s en el punto p . Toma valor 1 en caso afirmativo, 0 en caso contrario; $p = 1, \dots, D$; $s = 1, \dots, S$.

xrs_{dz} , Variable entera que indica el número de reguladores de tipo z que se instalan en el punto d ; $d = 1, \dots, D$; $z = 1, \dots, Z$.

z_d , Variable binaria que indica si en el punto d se instala algún panel fotovoltaico o algún aerogenerador. Toma valor 1 en caso afirmativo, 0 en caso contrario; $d = 1, \dots, D$.

xfr_d , Variable binaria que indica si el punto d es el alguno de los extremos finales de alguna microrred. Toma valor 1 en caso afirmativo, 0 en caso contrario; $d = 1, \dots, D$.

Función objetivo

La función objetivo minimiza el coste total de la inversión, sea la suma de los costes de aerogeneradores, conductores, baterías, inversores, reguladores eólicos, medidores, paneles fotovoltaicos, reguladores solares y postes de final de microrred.



$$\begin{aligned}
[MIN]Z = & \sum_{d=1}^D \sum_{a=1}^A CA_a \cdot xa_{da} + \sum_{p=1}^D \sum_{d \in Q_p} \sum_{c=1}^C L_{pd} \cdot CC_c \cdot xc_{pdc} + \sum_{d=1}^D \sum_{b=1}^B CB_b \cdot xb_{db} + \sum_{d=1}^D \sum_{i=1}^I CI_i \cdot xi_{di} + \\
& \sum_{d=1}^D \sum_{r=1}^R CR_r \cdot xr_{dr} + \sum_{d=1}^D CM \cdot xm_d + \sum_{d=1}^D \sum_{s=1}^S CS_s \cdot xs_{ds} + \sum_{d=1}^D \sum_{z=1}^Z CZ_z \cdot xrs_{dz} + \sum_{d=1}^D C_{poste} \cdot xfr_d
\end{aligned} \quad (1)$$

Restricciones

- **Generación y acumulación de energía**

Las restricciones (2) y (3) determinan respectivamente el número máximo de aerogeneradores y paneles fotovoltaicos que se pueden instalar en un punto. La restricción (4) obliga a que cada punto de consumo sea abastecido por, al menos, un cierto número (especificado por el usuario) de equipos de generación, ya sean eólicos o solares.

La restricción (5) impone las condiciones de conservación y satisfacción de la demanda de energía. Se trata de un balance de energía en el punto d ; 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 y los paneles fotovoltaicos 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 en forma de calor en un banco de resistencias. 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. La restricción (6) es equivalente a la (5), para la conservación y satisfacción de la demanda de potencia. Se determina aquí la ubicación, el tipo y la cantidad de inversores a instalar. Los inversores no suministran la potencia a los usuarios sino que la potencia que es demandada por los usuarios debe de poder ser soportada por el inversor para que éste no se queme. En cuanto a las pérdidas, esta restricción sólo se ve influenciada por las pérdidas en los conductores.

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

La restricción (8) establece que la demanda energética de cada punto de consumo sea suministrada, como mínimo, con un cierto porcentaje *SOL* de tecnología solar. Se trata de un balance de energía en el punto d que afecta a los paneles fotovoltaicos. La restricción (9) es análoga a la (8), pero para los aerogeneradores, con un mínimo *EOL* de tecnología eólica.

$$\sum_{a=1}^A xa_{da} \leq NA \cdot z_d \quad d = 1, \dots, D \quad (2)$$



$$\sum_{s=1}^S x s_{ds} \leq N S \cdot z_d \quad d = 1, \dots, D \quad (3)$$

$$\sum_{a=1}^A x a_{da} + \sum_{s=1}^S x s_{ds} \geq E_{min} \cdot z_d \quad d = 1, \dots, D \quad (4)$$

$$\sum_{p=1|d \in Q_p}^D f e_{pd} + \sum_{a=1}^A E A_{da} \cdot x a_{da} + \sum_{s=1}^S E S_s \cdot x s_{ds} \geq \frac{E D_d}{\eta b \cdot \eta i} \left(\frac{1}{\eta c} + \left(1 - \frac{1}{\eta c} \right) z_d \right) + \sum_{q \in Q_d} f e_{dq} \quad d = 1, \dots, D \quad (5)$$

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

$$\sum_{b=1}^B E B_b \cdot x b_{db} + \left(\frac{V B}{D B} \sum_{j=1}^D \frac{E D_j}{\eta b \cdot \eta i \cdot \eta c} \right) (1 - x_d) \geq \frac{V B}{D B} \left(\sum_{q \in Q_d} f e_{dq} + E D_d \right) \quad d = 1, \dots, D \quad (7)$$

$$\sum_{p=1|d \in Q_p}^D f e_{pd} + \sum_{s=1}^S E S_s \cdot x s_{ds} \geq S O L \cdot \left(\sum_{q \in Q_d} f e_{dq} + \frac{E D_d}{\eta b \cdot \eta i} \left(\frac{1}{\eta c} + \left(1 - \frac{1}{\eta c} \right) z_d \right) \right) \quad d = 1, \dots, D \quad (8)$$

$$\sum_{p=1|d \in Q_p}^D f e_{pd} + \sum_{a=1}^A E A_{da} \cdot x a_{da} \geq E O L \cdot \left(\sum_{q \in Q_d} f e_{dq} + \frac{E D_d}{\eta b \cdot \eta i} \left(\frac{1}{\eta c} + \left(1 - \frac{1}{\eta c} \right) z_d \right) \right) \quad d = 1, \dots, D \quad (9)$$

• **Definición de la red**

Las restricciones (10) y (11) relacionan los flujos de energía y potencia con la existencia de conductores. Únicamente puede existir un flujo de energía o potencia entre dos puntos si existe un conductor entre dichos puntos. La restricción (12) impone la condición de radialidad (estructura de las microrredes en forma de árbol). Un punto puede tener como máximo un conductor de entrada, a menos que el punto sea de generación, en cuyo caso no puede existir ningún conductor de entrada.

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). Se determina el tipo de conductor a instalar entre cada par de puntos. En la definición de la variable de tensión se fija un voltaje máximo y mínimo, definiendo así la caída de tensión máxima entre dos puntos. La restricción (14) define que



la intensidad que circula por un conductor que conecta dos puntos debe ser menor a la máxima intensidad admisible según el tipo de conductor instalado. En caso contrario el conductor se quemaría dañando la instalación.

$$f e_{pd} \leq \left(\sum_{j=1}^D \frac{ED_j}{\eta b \cdot \eta i \cdot \eta c} \right) \sum_{c=1}^C x c_{pdc} \quad p = 1, \dots, D; d \in Q_p \quad (10)$$

$$f p_{pd} \leq \left(\sum_{j=1}^D \frac{PD_j}{\eta c} \right) \sum_{c=1}^C x c_{pdc} \quad p = 1, \dots, D; d \in Q_p \quad (11)$$

$$\sum_{p=1}^D \sum_{d \in Q_p} \sum_{c=1}^C x c_{pdc} + z_d \leq 1 \quad d = 1, \dots, D \quad (12)$$

$$v_p - v_d \geq \frac{L_{pd} \cdot RC_c \cdot f p_{pd}}{V_n} - (V_{max} - V_{min}) (1 - x c_{pdc}) \quad p = 1, \dots, D; d \in Q_p; c = 1, \dots, C \quad (13)$$

$$\frac{f p_{pd}}{V_n} - \left(\sum_{j=1}^D \frac{PD_j}{V_{min} \cdot \eta c} \right) (1 - x c_{pdc}) \leq IC_c \quad p = 1, \dots, D; d \in Q_p; c = 1, \dots, C \quad (14)$$

- **Equipos**

La restricción (15) establece que los reguladores eólicos instalados en un punto deben ser de la potencia adecuada, es decir mayor o igual a la de los aerogeneradores instalados en el mismo punto. La restricción (16) es análoga a la (15), para los reguladores solares, cuya potencia viene determinada en función de los paneles fotovoltaicos. Se determina la dimensión y la cantidad de reguladores a colocar en cada punto.

La restricción (17) define que los inversores sólo se pueden colocar en los puntos donde existe generación, ya sea eólica o solar.

La restricción (18) obliga a que los medidores se instalen en los puntos de consumo pertenecientes a microrred, es decir aquellos puntos con algún conductor de entrada o de salida.

La restricción (20) determina los puntos de final de microrred, que son aquellos donde se instala un poste adicional para la microrred. Estos puntos son los que tienen un conductor de entrada, pero ninguno de salida.

$$\sum_{r=1}^R P R_r \cdot x r_{dr} \geq \sum_{a=1}^A P A_a \cdot x a_{da} \quad d = 1, \dots, D \quad (15)$$

$$\sum_{z=1}^Z P Z_z \cdot x r s_{dz} \geq \sum_{s=1}^S P S_s \cdot x s_{ds} \quad d = 1, \dots, D \quad (16)$$



$$xi_{di} \leq NI \cdot z_d \quad d=1,\dots,D; i=1,\dots,I \quad (17)$$

$$\sum_{q \in Q_d} \sum_{c=1}^C xc_{dq} + \sum_{p=1}^D \sum_{d \in Q_p} \sum_{c=1}^C xc_{pdc} \leq (D-1) xm_d \quad d=1,\dots,D \quad (18)$$

$$z_d + \sum_{q \in Q_d} xc_{dq} \geq 1 - xfr_d \quad d=1,\dots,D \quad (19)$$

3.3.3. Consideración 1: Todos los usuarios tienen medidor

A continuación se plantea una restricción que establece que todos los usuarios tengan medidor.

Todos los cambios realizados en este apartado se refieren al “Modelo de partida”. Si se modifica la función objetivo o alguna restricción se indica con el mismo número asociado y una marca (Xⁱ) y si se añade una nueva restricción se le asignará el número siguiente al último utilizado.

Variables

Se elimina la variable xm_d .

Función objetivo

La nueva función objetivo es:

$$[MIN]Z = \sum_{d=1}^D \sum_{a=1}^A CA_a \cdot xa_{da} + \sum_{p=1}^D \sum_{d \in Q_p} \sum_{c=1}^C L_{pd} \cdot CC_c \cdot xc_{pdc} + \sum_{d=1}^D \sum_{b=1}^B CB_b \cdot xb_{db} + \sum_{d=1}^D \sum_{i=1}^I CI_i \cdot xi_{di} + \sum_{d=1}^D \sum_{r=1}^R CR_r \cdot xr_{dr} + CM \cdot Q + \sum_{d=1}^D \sum_{s=1}^S CS_s \cdot xs_{ds} + \sum_{d=1}^D \sum_{z=1}^Z CR_z \cdot xrs_{dz} + \sum_{d=1}^D C_{poste} \cdot xfr_d \quad (1')$$

Restricciones

- Equipos

Se elimina la restricción (18).

3.3.4. Consideración 2: Número máximo de usuarios independientes

A continuación se plantea una restricción que impone un número máximo de usuarios independientes. Esta restricción considera dos vertientes posibles.

Todos los cambios realizados en este apartado se refieren al “Modelo de partida”. Si se modifica la función objetivo o alguna restricción se indica con el mismo número y una marca (Xⁱⁱ) y si se añade una nueva restricción se le asigna el número siguiente al último utilizado. Adicionalmente, a las restricciones de la primera vertiente se les asigna la letra a (Xa) y a las de la segunda vertiente se les asigna la letra b (Xb).



Vertiente 1

Esta primera vertiente modeliza el conjunto de usuarios que conforma cada microrred, asociando cada usuario conectado en microrred a su propia microrred. Para ello, se utiliza la *linealización de monomios binarios*. Esto es transformar a ecuaciones lineales el producto de dos variables binarias. El producto vale 1 únicamente cuando las dos variables toman por valor 1.

Se tienen dos variables binarias x_1 y x_2 . El producto $x_1 \cdot x_2$ se linealiza sustituyéndolo por una nueva variable real y , acotada entre 0 y 1 ($0 \leq y \leq 1$) y cuyo valor se vincula con las variables de partida con las siguientes restricciones:

$$\begin{aligned} x_1 + x_2 &\leq 1 + y \\ x_1 &\geq y \\ x_2 &\geq y \end{aligned} \tag{3.1}$$

Variables

xg_{dg} , Variable entera que indica si el punto d pertenece a la microrred g . Toma valor 1 en caso afirmativo y 0 en caso contrario; $d = 1, \dots, D$.

a_{dqcg} , Variable real auxiliar que indica si el producto $xc_{dq} \cdot xg_{dg}$ vale 1. Toma valor 1 en caso afirmativo, 0 en caso contrario; $d = 1, \dots, D; q \in Q_d; c \in RC; g = 1, \dots, D$.

b_{pdcg} , Variable real auxiliar que indica si el producto $xc_{pdc} \cdot xg_{dg}$ vale 1. Toma valor 1 en caso afirmativo, 0 en caso contrario; $p = 1, \dots, D; d \in Q_p; c \in RC; g = 1, \dots, D$.

c_{dg} , Variable real auxiliar que indica si el producto $xg_{dg} \cdot z_d$ vale 1. Toma valor 1 en caso afirmativo, 0 en caso contrario; $d = 1, \dots, D; g = 1, \dots, D$.

Restricciones

- **Definición de la red**

Las restricciones (20a) y (21a) acotan y definen la variable xg_{dg} . Cada punto d , pertenece a la microrred g si está conectado a otro punto que pertenece a la misma microrred.

Las restricciones (22a) y (23a) obligan a que si un punto d tiene medidor, pertenezca a alguna microrred g . De este modo un punto de consumo o bien pertenece a una microrred o bien es independiente.

La restricción (24a) establece que en cada microrred g únicamente puede existir un punto de generación, en caso de que dicha microrred exista.



La restricción (25a) impone un número máximo de usuarios independientes en la solución. En otras palabras, el número de usuarios que no pertenecen a ninguna microrred debe ser inferior al valor máximo de usuarios independientes, establecido en los parámetros de entrada.

El grupo de restricciones (LM1) linealiza las restricciones (20a) y (21a). El grupo de restricciones (LM2) linealiza la restricción (24a). En la modelización del problema, no se escriben las restricciones (20a), (21a) y (24a) sino los grupos de restricciones (LM1) y (LM2).

$$xg_{dg} \leq \sum_{q \in Q_d} \sum_{c=1}^{RC} xc_{dq c} \cdot xg_{qg} + \sum_{p=1|d \in Q_p}^D \sum_{c=1}^{RC} xc_{pdc} \cdot xg_{pg} \quad d = 1, \dots, D ; g = 1, \dots, D \quad (20a)$$

$$M \cdot xg_{dg} \geq \sum_{q \in Q_d} \sum_{c=1}^{RC} xc_{dq c} \cdot xg_{qg} + \sum_{p=1|d \in Q_p}^D \sum_{c=1}^{RC} xc_{pdc} \cdot xg_{pg} \quad d = 1, \dots, D ; g = 1, \dots, D \quad (21a)$$

$$\sum_{g=1}^D xg_{dg} \leq xm_d \quad d = 1, \dots, D \quad (22a)$$

$$\sum_{g=1}^D xg_{dg} \geq xm_d \quad d = 1, \dots, D \quad (23a)$$

$$\sum_{d=1}^D xg_{dg} \cdot z_d \leq 1 \quad g = 1, \dots, D \quad (24a)$$

$$Q - \sum_{d=1}^D \sum_{g=1}^D xg_{dg} \leq U_{indep} \quad (25a)$$

$$xg_{dg} \leq \sum_{q \in Q_d} \sum_{c=1}^{RC} a_{dqcg} + \sum_{p=1|d \in Q_p}^D \sum_{c=1}^{RC} b_{pdcg} \quad d = 1, \dots, D ; g = 1, \dots, D$$

$$M \cdot xg_{dg} \geq \sum_{q \in Q_d} \sum_{c=1}^{RC} a_{dqcg} + \sum_{p=1|d \in Q_p}^D \sum_{c=1}^{RC} b_{pdcg} \quad d = 1, \dots, D ; g = 1, \dots, D$$

$$\left. \begin{array}{l} xc_{dq c} + xg_{qg} \leq 1 + a_{dqcg} \\ xc_{dq c} \geq a_{dqcg} \\ xg_{qg} \geq a_{dqcg} \end{array} \right\} \quad d = 1, \dots, D ; q \in Q_d ; c = 1, \dots, RC ; g = 1, \dots, D \quad (LM1)$$

$$\left. \begin{array}{l} xc_{pdc} + xg_{pg} \leq 1 + b_{pdcg} \\ xc_{pdc} \geq b_{pdcg} \\ xg_{pg} \geq b_{pdcg} \end{array} \right\} \quad d = 1, \dots, D ; p = 1, \dots, D ; c = 1, \dots, RC ; g = 1, \dots, D \mid d \in Q_p$$

$$\sum_{d=1}^D c_{dg} \leq 1 \quad g = 1, \dots, D$$

$$\left. \begin{array}{l} xg_{dg} + z_d \leq 1 + c_{dg} \\ xg_{dg} \geq c_{pg} \\ z_d \geq c_{dg} \end{array} \right\} \quad d = 1, \dots, D ; g = 1, \dots, D \quad (LM2)$$



Vertiente 2

Esta segunda vertiente refleja todas las posibles situaciones de cada punto de consumo según si es un punto individual, en microrred y de generación, intermedio de microrred o terminal de microrred.

Restricciones

- **Definición de la red**

La restricción (21b) obliga a que como máximo haya los usuarios independientes especificados. En consecuencia, los usuarios con medidor (y por tanto pertenecientes a alguna microrred) son mayores o igual a la diferencia entre el total de usuarios y el máximo número de usuarios independientes.

$$\sum_{d=1}^D xmr_d \geq D - U_{indep} \quad (20b)$$

La variable xm_d define los puntos con medidor (pertenecientes a microrred) y aparece en la función objetivo. Ello obliga a que sea minimizada y, en consecuencia, en caso de no definirse el valor de la misma a través de las restricciones, toma por defecto valor 0. En caso de querer combinar las restricciones de *Todos los usuarios con medidor* y *Número máximo de usuarios independientes* (ya sea con la vertiente 1 o 2), desaparece la presencia de la variable xm_d en la función objetivo mientras que permanecen restricciones que afectan a dicha variable. Esto puede provocar que al modelo le resulte más económico asignar valor 1 a la variable xm_d para cumplir con las especificaciones en un punto concreto, aún y no perteneciendo susodicho punto a ninguna microrred. Es por tanto necesario realizar algunas modificaciones a los modelos.

Restricciones

- **Definición de red**

La restricción (26a / 21b) obliga a que si para un punto d no existen conductores de entrada ni de salida, la variable xm_d valga 0.

$$\sum_{q \in Q_d} \sum_{c=1}^C xc_{dq} + \sum_{p=1}^D \sum_{d \in Q_p} \sum_{c=1}^C xc_{pd} \geq xm_d \quad d = 1, \dots, D \quad (26a / 21b)$$

3.3.5. Consideración 3: Número máximo de microrredes

A continuación se plantea una restricción que impone un número máximo de microrredes. Esta restricción considera dos vertientes posibles.



Todos los cambios realizados en este apartado se refieren al “Modelo de partida”. Si se modifica la función objetivo o alguna restricción se indica con el mismo número y una marca (X^{iii}) y si se añade una nueva restricción se le asigna el número siguiente al último utilizado. Adicionalmente, a las restricciones de la primera vertiente se les asigna la letra a (Xa) y a las de la segunda vertiente se les asigna la letra b (Xb).

Vertiente 1

Esta primera vertiente modeliza el conjunto de usuarios que conforma cada microrred, asociando cada usuario conectado en microrred a su propia microrred. Para ello, se utiliza la *linealización de monomios binarios*. Esto es transformar a ecuaciones lineales el producto de dos variables binarias. El producto vale 1 únicamente cuando las dos variables toman por valor 1.

Se tienen dos variables binarias x_1 y x_2 . El producto $x_1 \cdot x_2$ se linealiza substituyéndolo por una nueva variable real y , acotada entre 0 y 1 ($0 \leq y \leq 1$) y cuyo valor se vincula con las variables de partida con las siguientes restricciones:

$$\begin{aligned} x_1 + x_2 &\leq 1 + y \\ x_1 &\geq y \\ x_2 &\geq y \end{aligned} \tag{3.1}$$

Variables

xg_{dg} , Variable entera que indica si el punto d pertenece a la microrred d . Toma valor 1 en caso afirmativo, 0 en caso contrario; $d = 1, \dots, D$.

a_{dqcg} , Variable real auxiliar que indica si el producto $xc_{dq} \cdot xg_{dg}$ vale 1. Toma valor 1 en caso afirmativo, 0 en caso contrario; $d = 1, \dots, D; q \in Q_d; c \in RC; g = 1, \dots, D$.

b_{pdcg} , Variable real auxiliar que indica si el producto $xc_{pc} \cdot xg_{dg}$ vale 1. Toma valor 1 en caso afirmativo, 0 en caso contrario; $p = 1, \dots, D; d \in Q_p; c \in RC; g = 1, \dots, D$.

c_{dg} , Variable real auxiliar que indica si el producto $xg_{dg} \cdot z_d$ vale 1. Toma valor 1 en caso afirmativo, 0 en caso contrario; $d = 1, \dots, D; g = 1, \dots, D$.

nx , Variable entera que indica el número de microrredes obtenido en la solución del modelo.

Restricciones

- **Definición de la red**

Las restricciones (20a) y (21a) acotan y definen la variable xg_{dg} . Cada punto d , pertenece a la microrred g si está conectado a otro punto que pertenece a la misma microrred.



Las restricciones (22a) y (23a) obligan a que si un punto d tiene medidor, pertenezca a alguna microrred g . De este modo un punto de consumo o bien pertenece a una microrred o bien es independiente.

La restricción (24a) establece que en cada microrred g únicamente puede existir un punto de generación, en caso de que dicha microrred exista.

La restricción (27a) realiza un seguimiento punto por punto de cada microrred y se queda con el número de microrredes existentes. La restricción (28a) acota la variable nx , limitando así el número de microrredes.

El grupo de restricciones (LM1) linealiza las restricciones (21a) y (22a). El grupo de restricciones (LM2) linealiza la restricción (25a). En la modelización del problema, no se escriben las restricciones (21a), (22a) y (25a) sino los grupos de restricciones (LM1) y (LM2).

$$xg_{dg} \leq \sum_{q \in Q_d} \sum_{c=1}^{RC} xc_{dq c} \cdot xg_{qg} + \sum_{p=1|d \in Q_p}^D \sum_{c=1}^{RC} xc_{pdc} \cdot xg_{pg} \quad d = 1, \dots, D; g = 1, \dots, D \quad (20a)$$

$$M \cdot xg_{dg} \geq \sum_{q \in Q_d} \sum_{c=1}^{RC} xc_{dq c} \cdot xg_{qg} + \sum_{p=1|d \in Q_p}^D \sum_{c=1}^{RC} xc_{pdc} \cdot xg_{pg} \quad d = 1, \dots, D; g = 1, \dots, D \quad (21a)$$

$$\sum_{g=1}^D xg_{dg} \leq xm_d \quad d = 1, \dots, D \quad (22a)$$

$$\sum_{g=1}^D xg_{dg} \geq xm_d \quad d = 1, \dots, D \quad (23a)$$

$$\sum_{d=1}^D xg_{dg} \cdot z_d \leq 1 \quad g = 1, \dots, D \quad (24a)$$

$$nx \geq \sum_{g=1}^D g \cdot xg_{dg} \quad d = 1, \dots, D \quad (27a)$$

$$nx \leq N_{max} \quad d = 1, \dots, D \quad (28a)$$



$$\begin{aligned}
 x g_{dg} &\leq \sum_{q \in Q_d} \sum_{c=1}^{RC} a_{dqcg} + \sum_{p=1|d \in Q_p}^D \sum_{c=1}^{RC} b_{pdcg} & d = 1, \dots, D; g = 1, \dots, D \\
 M \cdot x g_{dg} &\geq \sum_{q \in Q_d} \sum_{c=1}^{RC} a_{dqcg} + \sum_{p=1|d \in Q_p}^D \sum_{c=1}^{RC} b_{pdcg} & d = 1, \dots, D; g = 1, \dots, D \\
 \left. \begin{aligned}
 x c_{dqg} + x g_{qg} &\leq 1 + a_{dqcg} \\
 x c_{dqg} &\geq a_{dqcg} \\
 x g_{qg} &\geq a_{dqcg}
 \end{aligned} \right\} & d = 1, \dots, D; q \in Q_d; c = 1, \dots, RC; g = 1, \dots, D \quad (LM1) \\
 \left. \begin{aligned}
 x c_{pdc} + x g_{pg} &\leq 1 + b_{pdcg} \\
 x c_{pdc} &\geq b_{pdcg} \\
 x g_{pg} &\geq b_{pdcg}
 \end{aligned} \right\} & d = 1, \dots, D; p = 1, \dots, D; c = 1, \dots, RC; g = 1, \dots, D \mid d \in Q_p
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \sum_{d=1}^D c_{dg} &\leq 1 & g = 1, \dots, D \\
 \left. \begin{aligned}
 x g_{dg} + z_d &\leq 1 + c_{dg} \\
 x g_{dg} &\geq c_{pg} \\
 z_d &\geq c_{dg}
 \end{aligned} \right\} & d = 1, \dots, D; g = 1, \dots, D \quad (LM2)
 \end{aligned}$$

Vertiente 2

Esta segunda vertiente refleja todas las posibles situaciones de cada punto de consumo según si es un punto individual, en microrred y de generación, intermedio de microrred o terminal de microrred.

Variables

nmr_d , Variable entera que indica si el punto d es a la vez de generación y perteneciente a microrred. Toma valor 1 en caso afirmativo, 0 en caso contrario; $d = 1, \dots, D$.

Restricciones

- **Definición de red**

Las restricciones (22b) y (23b) acotan y definen la variable nmr_d , que toma por valor 1 cuando el punto d genera y tiene medidor (y por tanto es de microrred). La restricción (24b) limita el número de puntos de generación y pertenecientes a microrredes, sea el número de microrredes.

$$z_p + xm_d - 1 \leq nmr_d \quad d = 1, \dots, D \quad (22b)$$

$$z_d + xm_d - 2 \geq \frac{Q}{2}(nmr_d - 1) \quad d = 1, \dots, D \quad (23b)$$



$$\sum_{d=1}^D nmr_d \leq N_{max} \quad (24b)$$

La variable xm_d define los puntos con medidor (pertenecientes a microrred) y aparece en la función objetivo. Ello obliga a que sea minimizada y, en consecuencia, en caso de no definirse el valor de la misma a través de las restricciones, toma por defecto valor 0. En caso de querer combinar las restricciones de *Todos los usuarios con medidor* y *Número máximo de microrredes* (ya sea con la vertiente 1 o 2), desaparece la presencia de la variable xm_d en la función objetivo mientras que permanecen restricciones que afectan a dicha variable. Esto puede provocar que al modelo le resulte más económico asignar valor 1 a la variable xm_d para cumplir con las especificaciones en un punto concreto, aún y no perteneciendo susodicho punto a ninguna microrred. Es por tanto necesario realizar algunas modificaciones a los modelos.

Restricciones

- **Definición de red**

La restricción (26a / 21b) obliga a que si para un punto d no existen conductores de entrada ni de salida, la variable xm_d valga 0.

$$\sum_{q \in Q_d} \sum_{c=1}^C xc_{dq} + \sum_{p=1}^D \sum_{d \in Q_p} \sum_{c=1}^C xc_{pdc} \geq xm_d \quad d=1, \dots, D \quad (26a / 21b)$$

3.3.6. Consideración 4: Número mínimo de usuarios por microrred

A continuación se plantea una restricción que impone un número mínimo de usuarios por microrred. Esta restricción considera dos vertientes posibles.

Todos los cambios realizados en este apartado se refieren al “Modelo de partida”. Si se modifica la función objetivo o alguna restricción se indica con el mismo número y una marca (X^{iv}) y si se añade una nueva restricción se le asigna el número siguiente al último utilizado. Adicionalmente, a las restricciones de la primera vertiente se les asigna la letra a (Xa) y a las de la segunda vertiente se les asigna la letra b (Xb).

Vertiente 1

Esta primera vertiente modeliza el conjunto de usuarios que conforma cada microrred, asociando cada usuario conectado en microrred a su propia microrred. Para ello, se utiliza la *linealización de monomios binarios*. Esto es transformar a ecuaciones lineales el producto de dos variables binarias. El producto vale 1 únicamente cuando las dos variables toman por valor 1.



Se tienen dos variables binarias x_1 y x_2 . El producto $x_1 \cdot x_2$ se linealiza substituyéndolo por una nueva variable real y , acotada entre 0 y 1 ($0 \leq y \leq 1$) y cuyo valor se vincula con las variables de partida con las siguientes restricciones:

$$\begin{aligned}x_1 + x_2 &\leq 1 + y \\x_1 &\geq y \\x_2 &\geq y\end{aligned}\tag{3.1}$$

Variables

xg_{dg} , Variable entera que indica si el punto d pertenece a la microrred d . Toma valor 1 en caso afirmativo, 0 en caso contrario; $d = 1, \dots, D$.

a_{dqcg} , Variable real auxiliar que indica si el producto $xc_{dq} \cdot xg_{dg}$ vale 1. Toma valor 1 en caso afirmativo, 0 en caso contrario; $d = 1, \dots, D; q \in Q_d; c \in RC; g = 1, \dots, D$.

b_{pdcg} , Variable real auxiliar que indica si el producto $xc_{pc} \cdot xg_{dg}$ vale 1. Toma valor 1 en caso afirmativo, 0 en caso contrario; $p = 1, \dots, D; d \in Q_p; c \in RC; g = 1, \dots, D$.

c_{dg} , Variable real auxiliar que indica si el producto $xg_{dg} \cdot z_d$ vale 1. Toma valor 1 en caso afirmativo, 0 en caso contrario; $d = 1, \dots, D; g = 1, \dots, D$.

eg_g , Variable entera que indica si existe el grupo g . Toma valor 1 en caso afirmativo, 0 en caso contrario; $g = 1, \dots, D$.

Restricciones

- **Definición de la red**

Las restricciones (20a) y (21a) acotan y definen la variable xg_{dg} . Cada punto d , pertenece a la microrred g si está conectado a otro punto que pertenece a la misma microrred.

Las restricciones (22a) y (23a) obligan a que si un punto d tiene medidor, pertenezca a alguna microrred g . De este modo un punto de consumo o bien pertenece a una microrred o bien es independiente.

La restricción (24a) establece que en cada microrred g únicamente puede existir un punto de generación, en caso de que dicha microrred exista.

Las restricciones (29a) y (30a) obligan a que cuando existen uno o más puntos pertenecientes a una microrred, ésta existe, y si no existe ningún punto que pertenezca, ésta no existe. La restricción (39a) fuerza a que en cada microrred exista un mínimo número de usuarios.



El grupo de restricciones (LM1) linealiza las restricciones (21a) y (22a). El grupo de restricciones (LM2) linealiza la restricción (25a). En la modelización del problema, no se escriben las restricciones (21a), (22a) y (25a) sino los grupos de restricciones (LM1) y (LM2).

$$xg_{dg} \leq \sum_{q \in Q_d} \sum_{c=1}^{RC} xc_{dq c} \cdot xg_{qg} + \sum_{p=1|d \in Q_p}^D \sum_{c=1}^{RC} xc_{pdc} \cdot xg_{pg} \quad d = 1, \dots, D ; g = 1, \dots, D \quad (20a)$$

$$M \cdot xg_{dg} \geq \sum_{q \in Q_d} \sum_{c=1}^{RC} xc_{dq c} \cdot xg_{qg} + \sum_{p=1|d \in Q_p}^D \sum_{c=1}^{RC} xc_{pdc} \cdot xg_{pg} \quad d = 1, \dots, D ; g = 1, \dots, D \quad (21a)$$

$$\sum_{g=1}^D xg_{dg} \leq xm_d \quad d = 1, \dots, D \quad (22a)$$

$$\sum_{g=1}^D xg_{dg} \geq xm_d \quad d = 1, \dots, D \quad (23a)$$

$$\sum_{d=1}^D xg_{dg} \cdot z_d \leq 1 \quad g = 1, \dots, D \quad (24a)$$

$$\sum_{d=1}^D xg_{dg} \geq eg_g \quad g = 1, \dots, D \quad (29a)$$

$$\sum_{d=1}^D xg_{dg} \leq \frac{Q}{2} eg_g \quad d = 1, \dots, D \quad (30a)$$

$$\sum_{d=1}^D xg_{dg} \geq U_{min} \cdot eg_g \quad g = 1, \dots, D \quad (31a)$$

$$xg_{dg} \leq \sum_{q \in Q_d} \sum_{c=1}^{RC} a_{dqcg} + \sum_{p=1|d \in Q_p}^D \sum_{c=1}^{RC} b_{pdcg} \quad d = 1, \dots, D ; g = 1, \dots, D$$

$$M \cdot xg_{dg} \geq \sum_{q \in Q_d} \sum_{c=1}^{RC} a_{dqcg} + \sum_{p=1|d \in Q_p}^D \sum_{c=1}^{RC} b_{pdcg} \quad d = 1, \dots, D ; g = 1, \dots, D$$

$$\left. \begin{array}{l} xc_{dq c} + xg_{qg} \leq 1 + a_{dqcg} \\ xc_{dq c} \geq a_{dqcg} \\ xg_{qg} \geq a_{dqcg} \end{array} \right\} \quad d = 1, \dots, D ; q \in Q_d ; c = 1, \dots, RC ; g = 1, \dots, D \quad (LM1)$$

$$\left. \begin{array}{l} xc_{pdc} + xg_{pg} \leq 1 + b_{pdcg} \\ xc_{pdc} \geq b_{pdcg} \\ xg_{pg} \geq b_{pdcg} \end{array} \right\}$$

$$d = 1, \dots, D ; p = 1, \dots, D ; c = 1, \dots, RC ; g = 1, \dots, D \mid d \in Q_p$$



$$\sum_{d=1}^D c_{dg} \leq 1 \quad g = 1, \dots, D$$

$$\left. \begin{array}{l} x g_{dg} + z_d \leq 1 + c_{dg} \\ x g_{dg} \geq c_{pg} \\ z_d \geq c_{dg} \end{array} \right\} \quad d = 1, \dots, D ; g = 1, \dots, D \quad (\text{LM2})$$

Vertiente 2

Esta segunda vertiente refleja todas las posibles situaciones de cada punto de consumo según si es un punto individual, en microrred y de generación, intermedio de microrred o terminal de microrred.

Variables

$n m r_d$, Variable entera que indica si el punto d es a la vez de generación y perteneciente a microrred. Toma valor 1 en caso afirmativo, 0 en caso contrario; $d = 1, \dots, D$.

$x f_{pdf}$, Variable entera que indica si del usuario p al usuario d existe un flujo de energía que vaya con destino al usuario f . Toma valor 1 en caso afirmativo, 0 en caso contrario; $p = 1, \dots, D; d \in Q_p; f = 1, \dots, D$.

Restricciones

- **Generación y acumulación de energía**

La restricción (25b) relaciona la variable que indica si existe flujo energético entre dos puntos con destino a un tercer punto con la variable de flujo de energía. Entre cada dos puntos, el flujo de energía es mayor o igual que la suma de los flujos de energía con destino a cada punto que se abastece.

$$f e_{pd} \geq \sum_{f=1}^D x f_{pdf} \cdot \frac{E D}{\eta_c \cdot \eta_i \cdot \eta_b} \quad p = 1, \dots, D; d \in Q_p \quad (25b)$$

- **Definición de la red**

Las restricciones (22b) y (23b) acotan y definen la variable $n m r_d$, que toma por valor 1 cuando el punto d genera y tiene medidor (y por tanto es de microrred).

La restricción (26b), establece que para cada punto d de consumo debe de existir al menos un flujo energético que provenga de p y que vaya con destino al propio d , a menos, eso sí, que d sea de generación. Las restricciones (27b) y (28b) añaden si un flujo entra a un punto con destino a un segundo punto, debe salir de ese primer punto.



La restricción (29b) limita los flujos energéticos que salen de un punto de generación de microrred, sea los usuarios que se abastecen y por tanto los usuarios que componen la microrred menos uno (el propio punto de generación).

$$z_p + xm_d - 1 \leq nmr_d \quad d = 1, \dots, D \quad (22b)$$

$$z_d + xm_d - 2 \geq \frac{Q}{2}(nmr_d - 1) \quad d = 1, \dots, D \quad (23b)$$

$$\sum_{p=1|d \in Q_p}^D xf_{pdd} + x_d \geq 1 \quad d = 1, \dots, D \quad (26b)$$

$$\sum_{p=1|d \in Q_p}^D xf_{pdf} + x_d \geq \sum_{q \in Q_d} xf_{dqf} \quad d = 1, \dots, D; f = 1, \dots, D | d \neq f \quad (27b)$$

$$\sum_{p=1|d \in Q_p}^D xf_{pdf} \leq \sum_{q \in Q_d} xf_{dqf} \quad d = 1, \dots, D; f = 1, \dots, D | d \neq f \quad (28b)$$

$$\sum_{q \in Q_d} \sum_{f=1}^D xf_{dqf} \geq nmr_d (U_{\min} - 1) \quad d = 1, \dots, D \quad (29b)$$

La variable xm_d define los puntos con medidor (pertenecientes a microrred) y aparece en la función objetivo. Ello obliga a que sea minimizada y, en consecuencia, en caso de no definirse el valor de la misma a través de las restricciones, toma por defecto valor 0. En caso de querer combinar las restricciones de *Todos los usuarios con medidor* y *Número mínimo de usuarios por microrred* (ya sea con la vertiente 1 o 2), desaparece la presencia de la variable xm_d en la función objetivo mientras que permanecen restricciones que afectan a dicha variable. Esto puede provocar que al modelo le resulte más económico asignar valor 1 a la variable xm_d para cumplir con las especificaciones en un punto concreto, aún y no perteneciendo susodicho punto a ninguna microrred. Es por tanto necesario realizar algunas modificaciones a los modelos.

Restricciones

- **Definición de red**

La restricción (26a / 21b) obliga a que si para un punto d no existen conductores de entrada ni de salida, la variable xm_d valga 0.

$$\sum_{q \in Q_d} \sum_{c=1}^C xc_{dqc} + \sum_{p=1|d \in Q_p}^D \sum_{c=1}^C xc_{pdc} \geq xm_d \quad d = 1, \dots, D \quad (26a / 21b)$$



4. Resultados y análisis de la experimentación preliminar

Tal y como se ha visto en el capítulo anterior, tres de las restricciones planteadas contemplan dos posibles maneras de formular. En este capítulo, se realiza una experimentación preliminar para poder escoger qué vertiente es más eficiente (encuentra mejores resultados en menor tiempo de cálculo). El capítulo se divide en 3 partes. En primer lugar se expone la experimentación realizada. A continuación se muestran los resultados obtenidos. Finalmente se detallan las conclusiones que se deducen de la experimentación.

4.1. Experimentación realizada

En esta experimentación preliminar se realiza un total de 90 ejemplares, fruto de la combinación de los siguientes elementos:

- **3 escenarios de oferta energética**
 - **Escenario de oferta energética baja:** se limita a cubrir las necesidades básicas de una vivienda, 280Wh/día de energía y 200W de potencia para viviendas, y 975Wh/día de energía y 600W de potencia para escuelas y centros de salud.
 - **Escenario de oferta energética media:** 25% mayor que la oferta energética baja, permite la ayuda a pequeñas actividades domiciliarias (cocina, artesanías, etc.).
 - **Escenario de oferta energética alta:** 50% mayor que la oferta energética baja, permite pequeñas comodidades en las viviendas o incluso la apertura de micro empresas productivas.
- **5 comunidades³**
 - **El Alumbre:** gran dispersión y gran número de viviendas.
 - **Alto Perú parte carretera:** dispersión media y número medio alto de viviendas.
 - **Campo Alegre:** baja dispersión y número medio de viviendas.
 - **Alto Perú parte Norte:** dispersión media y bajo número de viviendas.
 - **Alto Perú parte Sur:** dispersión medio baja y muy bajo número de viviendas.
- **3 modelos de restricciones**
 - **Número máximo de usuarios independientes:** véase apartado 3.3.4. Se establece un máximo del 25% de usuarios independientes.
 - **Número máximo de microrredes:** véase apartado 3.3.5. Se establece un máximo de 1 microrred.
 - **Número mínimo de usuarios por microrred:** véase 3.3.6. Se establece un mínimo del 25% de usuarios por microrred.
- **2 vertientes:** véanse las dos vertientes utilizadas en los apartados 3.3.4., 3.3.5. y 3.3.6.

³ Únicamente se detalla la información imprescindible para la experimentación preliminar. Si se desea más información, véase el Proyecto Final de Carrera de Gregorio Miguel Capó Plaza, para las comunidades de El Alumbre, Alto Perú y Campo Alegre y véase el apartado 5.1. *Descripción de comunidades* del presente documento para las comunidades de Alto Perú parte Norte y parte Sur.



En cada uno de los cálculos se permite un tiempo máximo de 18000 segundos. En todos los casos, se utiliza para la computación un PC Intel Core Duo T5870 con 2,87 Gb de RAM.

Los detalles técnicos de todos los componentes se especifican en el anexo A.

4.2. Resultados de la experimentación preliminar

Los resultados de la experimentación preliminar se exponen en las tablas 4.1, 4.2 y 4.3. Cada una de ellas va asociada a una de las tres restricciones estudiadas. En cada caso, se expone el tiempo de cálculo, el valor de la solución obtenida, la cota (valor interesante únicamente cuando la solución no es óptima), la diferencia entre los dos valores anteriores, el número de variables y el número de restricciones. En todo momento se comparan los resultados de una y otra vertiente, indicando en grisáceo la vertiente más eficiente. Esta elección se realiza siguiendo los cuatro pasos expuestos a continuación:

1. Se escoge la vertiente que encuentra solución; se indica en negrita las filas de tiempo, coste, cota y diferencia.
2. Si ambas vertientes encuentran solución, se escoge la que encuentra el óptimo; se indica en negrita las filas de coste y cota. Si ninguna vertiente encuentra solución, no se escoge ninguna vertiente; no se indica en negrita ninguna solución.
3. Si ambas vertientes encuentran el óptimo, se escoge la de menor tiempo de cálculo; se indica en negrita la fila del tiempo. Si ninguna vertiente encuentra el óptimo, se escoge la de menor valor de coste; se indica en negrita la fila de coste.
4. Si ambas vertientes encuentran el mismo coste, se escoge la que encuentra menor diferencia entre coste y cota; se indica en negrita la fila de diferencia.

En algunos casos, sucede que uno de los cuatro pasos hace decantar la decisión por una u otra vertiente y sin embargo no se indica la fila correspondiente en negrita. Esto es debido a que las diferencias no siempre son suficientemente significativas. Puede también suceder que ninguno de los pasos sea decisivo, en cuyo caso no se escoge ninguna de las vertientes, no indicando ninguna fila en negrita ni ninguna vertiente en grisáceo.



Comunidad	Característica	Oferta energética baja		Oferta energética media		Oferta energética alta	
		Vertiente 1	Vertiente 2	Vertiente 1	Vertiente 2	Vertiente 1	Vertiente 2
El Alumbre	Tiempo	18000	18000	18000	18000	18000	18000
	Coste	-	66529	-	76562	-	84005
	Cota	-	49898	-	54222	-	59523
	Diferencia	-	25,00%	-	29,18%	-	29,14%
	Variables	66721	2671	66721	2671	66721	2671
	Restricciones	194266	3271	194266	3271	194266	3271
Alto Perú parte carretera	Tiempo	18000	18000	18000	18000	18000	18000
	Coste	-	36458	-	42722	-	49195
	Cota	-	30736	-	35312	-	40957
	Diferencia	-	15,69%	-	17,34%	-	16,75%
	Variables	44581	2253	44581	2253	44581	2253
	Restricciones	129193	2833	129193	2833	129193	2833
Campo Alegre	Tiempo	18000	18000	18000	18000	18000	18000
	Coste	41445	41416	48256	48244	53247	53171
	Cota	39237	40844	44040	46227	48289	51116
	Diferencia	5,33%	1,38%	8,74%	4,18%	10,27%	3,86%
	Variables	7201	801	7201	801	7201	801
	Restricciones	19621	781	19621	781	19621	781
Alto Perú parte Norte	Tiempo	18000	18000	18000	18000	18000	18000
	Coste	24943	22621	28274	27370	31022	30438
	Cota	18496	21849	21758	25032	25147	28787
	Diferencia	25,85%	3,41%	23,05%	8,54%	18,94%	5,42%
	Variables	9301	955	9301	955	9301	955
	Restricciones	26054	1159	26054	1159	26054	1159
Alto Perú parte Sur	Tiempo	18000	22,20	18000	433,38	18000	674,69
	Coste	14805	14672	18042	17795	20114	20114
	Cota	14116	14672	16730	17795	19364	20114
	Diferencia	4,65%	0,00%	7,27%	0,00%	3,73%	0,00%
	Variables	3197	515	3197	515	3197	515
	Restricciones	8566	583	8566	583	8566	583

Tabla 4.1. Resultados de la experimentación preliminar para la restricción de número máximo de usuarios independientes, con 5h de tiempo máximo de cálculo



Comunidad	Característica	Oferta energética baja		Oferta energética media		Oferta energética alta	
		Vertiente 1	Vertiente 2	Vertiente 1	Vertiente 2	Vertiente 1	Vertiente 2
El Alumbre	Tiempo	18000	18000	18000	18000	18000	18000
	Coste	57341	56877	67036	67036	76675	76242
	Cota	46550	44608	51056	50937	55813	55991
	Diferencia	18,82%	21,57%	23,84%	24,02%	27,21%	26,56%
	Variables	66722	2706	66722	2706	66722	2706
	Restricciones	194301	3341	194301	3341	194301	3341
Alto Perú parte carretera	Tiempo	18000	18000	18000	18000	18000	18000
	Coste	35839	35839	41849	42205	47465	47699
	Cota	31384	31001	35436	35772	41027	40535
	Diferencia	12,43%	13,50%	15,32%	15,24%	13,56%	15,02%
	Variables	44582	2279	44582	2279	44582	2279
	Restricciones	129219	2885	129219	2885	129219	2885
Campo Alegre	Tiempo	52,95	31,31	18000	18000	18000	18000
	Coste	30360	30360	37160	37160	42061	42061
	Cota	30360	30360	36061	36784	40110	40154
	Diferencia	0,00%	0,00%	2,96%	1,01%	4,64%	4,53%
	Variables	7202	821	7202	821	7202	821
	Restricciones	19641	821	19641	821	19641	821
Alto Perú parte Norte	Tiempo	82,91	120,14	9691,27	4410,03	18000	18000
	Coste	19734	19734	24154	24154	27340	27340
	Cota	19734	19734	24154	24154	26539	26820
	Diferencia	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	2,93%	1,90%
	Variables	9302	968	9302	968	9302	968
	Restricciones	26067	1185	26067	1185	26067	1185
Alto Perú parte Sur	Tiempo	12,23	8,42	134,84	93,88	11981,20	9324,81
	Coste	13662	13662	16722	16722	18928	18928
	Cota	13662	13662	16722	16722	18928	18928
	Diferencia	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	Variables	3198	524	3198	524	3198	524
	Restricciones	8575	601	8575	601	8575	601

Tabla 4.2. Resultados de la experimentación preliminar para la restricción de número máximo de microrredes, con 5h de tiempo máximo de cálculo



Comunidad	Característica	Oferta energética baja		Oferta energética media		Oferta energética alta	
		Vertiente 1	Vertiente 2	Vertiente 1	Vertiente 2	Vertiente 1	Vertiente 2
El Alumbre	Tiempo	18000	18000	18000	18000	18000	18000
	Coste	-	60247	-	-	-	-
	Cota	-	41427	-	-	-	-
	Diferencia	-	31,24%	-	-	-	-
	Variables	66756	18106	66756	18106	66756	18106
	Restricciones	194370	6230	194370	6230	194370	6230
Alto Perú parte carretera	Tiempo	18000	18000	18000	18000	18000	18000
	Coste	-	38280	-	43796	-	55733
	Cota	-	28917	-	31789	-	36394
	Diferencia	-	24,46%	-	27,42%	-	34,70%
	Variables	44607	12523	44607	12523	44607	12523
	Restricciones	129270	4630	129270	4630	129270	4630
Campo Alegre	Tiempo	18000	58,64	18000	18000	18000	18000
	Coste	30360	30360	37160	37160	42061	42061
	Cota	29855	30360	34207	36156	38107	40146
	Diferencia	1,66%	0,00%	7,95%	2,70%	9,40%	4,55%
	Variables	7221	2221	7221	2970	7221	2221
	Restricciones	19680	1690	19680	1676	19680	1690
Alto Perú parte Norte	Tiempo	18000	2742,77	18000	18000	18000	18000
	Coste	20058	19734	25960	24154	27340	27340
	Cota	17313	19734	20485	22848	23608	26083
	Diferencia	13,69%	0,00%	21,09%	5,41%	13,65%	4,60%
	Variables	9314	2970	9314	2970	9314	2970
	Restricciones	26092	1676	26092	1676	26092	1676
Alto Perú parte Sur	Tiempo	4542,84	897,81	18000	91,83	18000	7608,53
	Coste	13662	16722	16722	13662	18928	18928
	Cota	13662	16722	16142	13662	18336	18928
	Diferencia	0,00%	0,00%	3,47%	0,00%	3,13%	0,00%
	Variables	3206	1154	3206	1154	3206	1154
	Restricciones	8592	832	8592	832	8592	832

Tabla 4.3. Resultados de la experimentación preliminar para la restricción de número mínimo de usuarios por microrred, con 5h de tiempo máximo de cálculo



En la tabla 4.4 se resumen los resultados obtenidos en la experimentación.

Modelo		V1 más eficiente	V2 más eficiente	Indecisos
Usuarios independientes	Absoluto	0	15	0
	Porcentaje	0,0%	100,0%	0,0%
Número de microrredes	Absoluto	1	6	8
	Porcentaje	6,7%	40,0%	53,3%
Usuarios por microrred	Absoluto	0	13	2
	Porcentaje	0,0%	86,7%	13,3%
TOTAL	Absoluto	1	34	10
	Porcentaje	2,2%	75,6%	22,2%

Tabla 4.4. Resumen de los resultados obtenidos en la experimentación preliminar

4.3. Análisis de la experimentación preliminar

A continuación se analizan los resultados del apartado anterior para poder escoger la vertiente más eficiente.

Restricción de máximo número de usuarios independientes: los resultados muestran una clara mayor eficiencia de la vertiente 2 frente a la vertiente 1 en todos los casos.

Restricción de máximo número de microrredes: los resultados muestran una ligera mayor eficiencia de la vertiente 2 frente a la vertiente 1. Si bien existe un gran número de casos en que hay indecisión (53,3%), en un 40% de los casos los resultados se decantan por la vertiente 2 mientras que solamente en un 6,7% de los casos se decantan por la vertiente 1.

Restricción de mínimo número de usuarios por microrred: los resultados muestran una clarísima mayor eficiencia de la vertiente 2 frente a la vertiente 1. Únicamente en un 13,3% de los casos existe indecisión, decantándose los resultados por la vertiente 2 en el resto de casos.

Total: en un 2,2% de los casos es más eficiente la vertiente 1, en un 75,6% de los casos es más eficiente la vertiente 2 y en un 22,2% de los casos no importa la vertiente en cuanto a la eficiencia.

Con lo dicho hasta aquí, se concluye que **la vertiente 2 es más eficiente que la vertiente 1**. De ahora en adelante, se utiliza la vertiente 2 para la posterior experimentación.



5. Resultados y análisis de las restricciones sociales

En este capítulo se explica la experimentación realizada. Del capítulo anterior se ha escogido la vertiente por la cual decantarse. Ahora se trata de ver la influencia de cada una de las restricciones planteadas en el capítulo 3 sobre la solución de electrificación obtenida, y ver así las mejoras aportadas por cada una de ellas. El capítulo se divide en tres partes. En primer lugar se detallan las dos comunidades con las cuáles se realiza la experimentación. A continuación se explica la experimentación realizada. Finalmente, se muestran y analizan los resultados obtenidos.

5.1. Descripción de comunidades

Alto Perú se encuentra en el distrito de Tumbadén, provincia de San Pablo, región de Cajamarca, Perú (Ramírez et al, 2009). La comunidad es muy extensa y dispersa, con un total de 85 viviendas donde viven todo el año. Existen tanto propietarios como mitayos (arrendatarios que trabajan los campos a cambio de un tributo). Para la electrificación, se ha dividido la comunidad en distintas partes que quedan medianamente concentradas, existiendo así distintas fases, con diferentes tecnologías y configuraciones implementadas. Hasta la fecha se ha electrificado la parte carretera (número 2, imagen 5.1) de 14 viviendas con 2 microrredes y tecnología eólica, la escuela y 4 viviendas (número 4, imagen 5.1) con 1 microrred y tecnología hidráulica y la posta médica y 3 viviendas (número 1, imagen 5.1) con 1 microrred y tecnología solar. Ahora se quieren electrificar dos zonas cercanas a la escuela, parte Norte (número 3, imagen 5.1) y parte Sur (número 5, imagen 5.1). Éstas son el foco de atención de la presente experimentación.

Ambas zonas se encuentran a una altura que oscila entre los 3.600 y los 3.720 m.s.n.m. La temperatura media ronda los 8°C. El PSH de Cajamarca (estación meteorológica más cercana) es de 4,3⁴. El recurso eólico de la comunidad se muestra en la imagen 5.1.

La parte Norte consta de 13 familias de los cuales 5 son mitayos. La población queda dispersa en una zona de 1,1x0,4km. El recurso eólico es bajo, aunque existe una zona con mayor potencial (imagen 5.2).

La parte Sur consta de 9 familias de los cuales 2 son mitayos. La población queda dispersa en una zona de 0,8x0,5km. El recurso eólico es muy bajo (imagen 5.3).

⁴ Ver datos del programa HWO, <http://www.tiendaelektron.com/software/hwo.exe>.



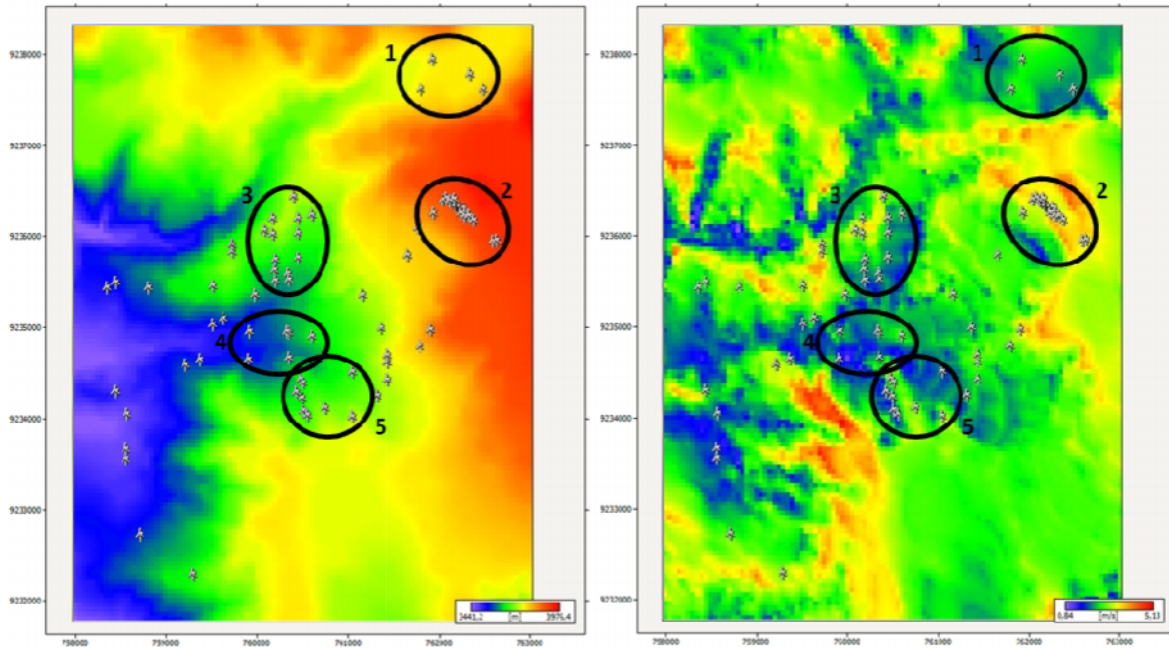


Imagen 5.1. Alto Perú mapa de elevación y recurso eólico; 1 – posta de salud y 3 viviendas; 2 – parte carretera; 3 - parte Norte; 4 – escuela y 4 viviendas; 5 – parte Sur

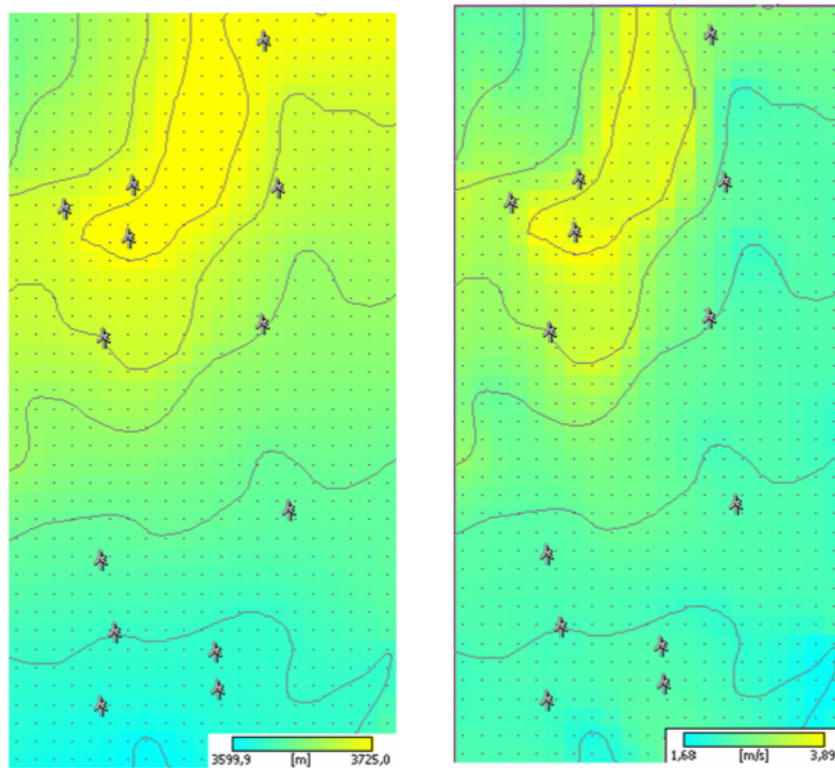


Imagen 5.2. Alto Perú parte Norte, mapa de elevación y recurso eólico, con la ubicación de los puntos de consumo



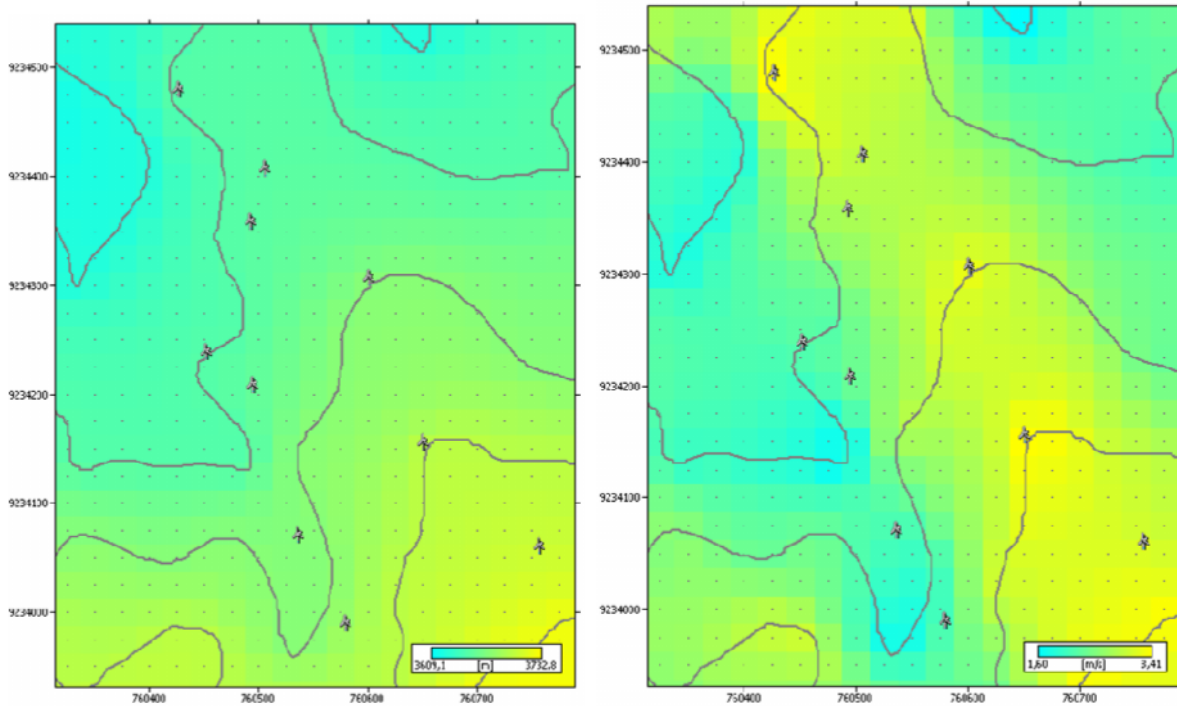


Imagen 5.3. Alto Perú parte Sur, mapa de elevación y recurso eólico, con la ubicación de los puntos de consumo

5.2. Experimentación realizada

En la presente experimentación se realiza un total de 14 ejemplares, fruto de la combinación de las cuatro restricciones planteadas en el capítulo 3.3. Para ello, se asigna a cada restricción dos posibles valores:

- Restricción *Todos los usuarios tienen medidor*: se deja libre (únicamente los usuarios de microrred tienen medidor) o se fuerza a que todos los usuarios tengan medidor.
- Restricción *Número máximo de usuarios independientes*: se deja libre o se fuerza a que como máximo el 25% de usuarios sean independientes.
- Restricción *Número máximo de microrredes*: se deja libre o se fuerza a que como máximo haya 1 microrred.
- Restricción *Número mínimo de usuarios por microrred*: se deja libre o se fuerza a que como mínimo haya un 25% de usuarios en cada microrred.

En la tabla 5.1 se detalla en mayor medida las combinaciones con que se trabaja. Dos de ellas han sido marcadas en rojo debido a que se trata de repeticiones con otras combinaciones.



		Usuarios independientes libre		Máximo 25% usuarios independientes	
		Usuarios por microrred libre	Mínimo 25% usuarios por microrred	Usuarios por microrred libre	Mínimo 25% usuarios por microrred
Medidor en microrred	Número microrredes libre	01 - Libre	03 - Mínimo 25% por microrred	05 - Máximo 25% independientes	07 - Mínimo 25% por microrred y máximo 25% independientes
	Máximo 1 microrred	02 - Máximo 1 microrred	04 - Máximo 1 microrred de mínimo 25%	06 - Máximo 1 microrred y 25% independientes	08 - Máximo 1 microrred de mínimo 25% y máximo 25% independientes
Medidor en todos los puntos	Número microrredes libre	09 - Libre y todos medidor	11 - Mínimo 25% por microrred y todos medidor	13 - Máximo 25% independientes y todos medidor	15 - Mínimo 25% por microrred, máximo 25% independientes y todos medidor
	Máximo 1 microrred	10 - Máximo 1 microrred y todos medidor	12 - Máximo 1 microrred de 25% y todos medidor	14 - Máximo 1 microrred, 25% independientes y todos medidor	16 - Máximo 1 microrred de mínimo 25%, máximo 25% independientes y todos medidor

Tabla 5.1. Combinaciones de modelos para la experimentación

Tal y como se puede apreciar, salen un total de 14 ejemplares a resolver. En el anexo B, se detalla para cada posible combinación las variables, función objetivo y restricciones que se han utilizado.

En cada uno de los cálculos se permite un tiempo máximo de 18000 segundos. En todos los casos, se utiliza para la computación un PC Intel Core Duo T5870 con 2,87 Gb de RAM.

Los detalles técnicos y económicos de los componentes, y las exigencias sociales de partida se especifican en el anexo A.

5.3. Resultados y análisis

A continuación se analizan los resultados obtenidos en la experimentación para las comunidades de Alto Perú parte Norte y Alto Perú parte Sur, tanto en el escenario de oferta energética baja como alta. Para cada uno de los 4 casos, se da una tabla resumen de las soluciones obtenidas en cada una de las 14 combinaciones y un análisis de los resultados comparando las combinaciones entre sí. En último lugar, se exponen las conclusiones del global de la experimentación.



En relación a las tablas resumen, existen algunas filas de características de cada solución que pueden llevar a confusión. A continuación se explica cada una de ellas:

Tiempo: tiempo en segundos que tarda el modelo en resolver cada combinación. En los casos en que pone *18000*, significa que el modelo tarda más de los 18000 segundos permitidos como máximo y en consecuencia la solución no es óptima.

Coste: coste en dólares de la solución obtenida.

Cota: mejor solución que se podría obtener. Si la solución es óptima el coste y la cota son iguales, si no es óptima el coste siempre es mayor que la cota dado que se está minimizando la función objetivo.

Diferencia: diferencia entre el coste y la cota en porcentaje.

Variables: número de variables.

Restricciones: número de restricciones.

Número de microrredes: número de microrredes que se obtienen en la solución.

Número mínimo de usuarios por microrred: mínimo número de usuarios que existen en una microrred. En caso de existir en la solución más de una microrred, se escoge siempre el menor valor de usuarios.

Número de usuarios independientes: total de usuarios no pertenecientes a ninguna microrred.

Usuarios con medidor: usuarios en los que se ha instalado medidor. Si pone *microrred* significa que únicamente los usuarios de microrred tienen medidor. Si pone *todos* significa que todos los usuarios disponen de medidor.

Número de aerogeneradores (tipo): número de aerogeneradores de cada tipo de los 4 posibles.

Número de paneles fotovoltaicos (potencia en [W]): número de paneles fotovoltaicos de cada uno de los 4 tipos que se permite usar al modelo. Los paneles se distinguen entre sí por la potencia.

Número de baterías (capacidad en [Wh]): número de baterías de cada uno de los 4 tipos que se permite usar al modelo. Las baterías se distinguen entre sí por su capacidad de almacenamiento.

Energía generada [Wh]: energía total generada por los equipos de generación.

5.3.1. Resultados para Alto Perú parte Norte

A continuación se detallan las soluciones obtenidas en cada una de las 14 posibles combinaciones de modelos para la comunidad de Alto Perú parte Norte. En primer lugar se trata el escenario de oferta energética baja y a continuación el escenario de oferta energética alta.

Oferta energética baja

En la tabla 5.2, se expone el detalle de las soluciones obtenidas en la experimentación de la comunidad de Alto Perú parte Norte con un escenario de oferta energética baja. Como se puede ver, cada columna lleva asociado un número. Éste va asociado a la tabla 5.1 de del apartado 5.2. *Experimentación realizada*. A continuación se analiza la influencia en las soluciones de electrificación de cada una de las 4 restricciones planteadas en el presente trabajo.



		Usuarios independientes libre		Máximo 25% usuarios independientes		
		Usuarios por microrred libre	Mínimo 25% usuarios por microrred	Usuarios por microrred libre	Mínimo 25% usuarios por microrred	
Medidor en microrred	Número microrredes libre	Ejemplar	01 - Libre	03 - Mínimo 25% por microrred	05 - Máximo 25% independientes	07 - Mínimo 25% por microrred y máximo 25% independientes
		Var. / Rest. / Tiempo [s]	1135 / 1453 / 18000	3150 / 1984 / 18000	1135 / 1467 / 16013,97	3150 / 1985 / 18000
		Coste / Cota / Dif.	20705 / 20429 / 1,33%	20717 / 19758 / 4,63%	21452 / 21452 / 0,00%	21476 / 20069 / 6,55%
		Microrredes	1	1	3	3
		Usuarios indep.	10	10	4	4
		Aeros. (tipo)	0	0	0	0
		Paneles (pot. [W])	20(50) / 2(150)	20(50) / 2(150)	8(50) / 6(150)	8(50) / 6(150)
	Baterías (cap. [Wh])	10(1500) / 1(1800) / 1(2400)	11(1500) / 1(3000)	4(1500) / 3(1800) / 3(2400)	6(1500) / 1(1800) / 1(2400) / 3(3000)	
	Máximo 1 microrred	Ejemplar	02 - Máximo 1 microrred	04 - Máximo 1 microrred de mínimo 25%	06 - Máximo 1 microrred y 25% independientes	08 - Máximo 1 microrred de mínimo 25% y máximo 25% independientes
		Var. / Rest. / Tiempo [s]	1148 / 1493 / 488,97	3150 / 1985 / 6610,49	1148 / 1494 / 414,56	-
		Coste / Cota / Dif.	20705 / 20705 / 0,00%	20705 / 20705 / 0,00%	22820 / 22820 / 0,00%	-
		Microrredes	1	1	1	-
		Usuarios indep.	10	10	4	-
		Aeros. (tipo)	0	0	0	-
Paneles (pot. [W])		20(50) / 2(150)	20(50) / 2(150)	8(50) / 6(150)	-	
Baterías (cap. [Wh])	10(1500) / 1(1800) / 1(2400)	10(1500) / 1(1800) / 1(2400)	5(1500) / 1(2400) / 3(3000)	-		
Medidor en todos los puntos	Número microrredes libre	Ejemplar	09 - Libre y todos medidor	11 - Mínimo 25% por microrred y todos medidor	13 - Máximo 25% independientes y todos medidor	15 - Mínimo 25% por microrred, máximo 25% independientes y todos medidor
		Var. / Rest. / Tiempo [s]	1122 / 1440 / 16687,38	3150 / 1984 / 18000	1135 / 1467 / 18000	3150 / 1985 / 18000
		Coste / Cota / Dif.	21115 / 21115 / 0,00%	21217 / 20526 / 3,26%	21652 / 21632 / 0,09%	21722 / 20276 / 6,66%
		Microrredes	2	1	3	3
		Usuarios indep.	8	10	4	4
		Aeros. (tipo)	0	0	0	0
		Paneles (pot. [W])	17(50) / 2(150)	20(50) / 2(150)	8(50) / 6(150)	8(50) / 6(150)
	Baterías (cap. [Wh])	10(1500) / 1(1800) / 1(2400)	11(1500) / 1(3000)	4(1500) / 3(1800) / 3(2400)	6(1500) / 2(1800) / 2(3000)	
	Máximo 1 microrred	Ejemplar	10 - Máximo 1 microrred y todos medidor	12 - Máximo 1 microrred de 25% y todos medidor	14 - Máximo 1 microrred, 25% independientes y todos medidor	16 - Máximo 1 microrred de mínimo 25%, máximo 25% independientes y todos medidor
		Var. / Rest. / Tiempo [s]	1148 / 1493 / 392,41	3150 / 1985 / 18000	1148 / 1494 / 698,42	-
		Coste / Cota / Dif.	21205 / 21205 / 0,00%	21217 / 20693 / 2,47%	23020 / 23020 / 0,00%	-
		Microrredes	1	1	1	-
		Usuarios indep.	10	10	4	-
		Aeros. (tipo)	0	0	0	-
Paneles (pot. [W])		20(50) / 2(150)	20(50) / 2(150)	8(50) / 6(150)	-	
Baterías (cap. [Wh])	10(1500) / 1(1800) / 1(2400)	11(1500) / 1(3000)	5(1500) / 1(2400) / 3(3000)	-		

Tabla 5.2. Resultados de la experimentación para la comunidad de Alto Perú parte Norte con oferta energética baja



- *Todos los usuarios con medidor*

Esta restricción se analiza comparando cuando la restricción no existe frente a cuando sí existe. Se comparan los modelos 01 vs 09, 02 vs 10, 03 vs 11, 04 vs 12, 05 vs 13, 06 vs 14 y 07 vs 15.

		Usuarios independientes libre		Máximo 25% usuarios independientes	
		Usuarios por microrred libre	Mínimo 25% usuarios por microrred	Usuarios por microrred libre	Mínimo 25% usuarios por microrred
Medidor en microrred	Número microrredes libre	01 - Libre	03 - Mínimo 25% por microrred	05 - Máximo 25% independientes	07 - Mínimo 25% por microrred y máximo 25% independientes
	Máximo 1 microrred	02 - Máximo 1 microrred	04 - Máximo 1 microrred de mínimo 25%	06 - Máximo 1 microrred y 25% independientes	
Medidor en todos los puntos	Número microrredes libre	09 - Libre y todos medidor	11 - Mínimo 25% por microrred y todos medidor	13 - Máximo 25% independientes y todos medidor	15 - Mínimo 25% por microrred, máximo 25% independientes y todos medidor
	Máximo 1 microrred	10 - Máximo 1 microrred y todos medidor	12 - Máximo 1 microrred de 25% y todos medidor	14 - Máximo 1 microrred, 25% independientes y todos medidor	

Tabla 5.3. Comparación de cuando no existe la restricción de medidores frente a cuando sí existe

El único cambio notable con la implementación de esta restricción se ve en la comparación 01 vs 09, con una disminución del número de usuarios independientes. Al instalar medidor en todos los usuarios, aumenta el coste relativo de electrificar individualmente frente a electrificar en microrred. Para el resto de comparaciones no hay cambios destacables.

Respecto al coste de las soluciones, esta restricción incrementa el valor final puesto que con idéntica solución (comparaciones 02 vs 10, 03 vs 11, 05 vs 13 y 06 vs 14) se tienen más medidores instalados, uno adicional por cada usuario independiente. El coste de un medidor (anexo A.3.5.) es muy pequeño frente a los costes de los demás componentes, por tanto resulta más rentable seguir electrificando de forma independiente a los usuarios que ya lo eran e instalar un medidor en ellos, que no extender la microrred.

La influencia de esta restricción sobre los tiempos de cálculo es muy variable.

- *Número máximo de usuarios independientes*

Esta restricción se analiza comparando cuando la restricción no existe frente a cuando sí existe. Se comparan los modelos 01 vs 05, 02 vs 06, 03 vs 07, 09 vs 13, 10 vs 14 y 11 vs 15.

		Usuarios independientes libre		Máximo 25% usuarios independientes	
		Usuarios por microrred libre	Mínimo 25% usuarios por microrred	Usuarios por microrred libre	Mínimo 25% usuarios por microrred
Medidor en microrred	Número microrredes libre	01 - Libre	03 - Mínimo 25% por microrred	05 - Máximo 25% independientes	07 - Mínimo 25% por microrred y máximo 25% independientes
	Máximo 1 microrred	02 - Máximo 1 microrred	04 - Máximo 1 microrred de mínimo 25%	06 - Máximo 1 microrred y 25% independientes	
Medidor en todos los puntos	Número microrredes libre	09 - Libre y todos medidor	11 - Mínimo 25% por microrred y todos medidor	13 - Máximo 25% independientes y todos medidor	15 - Mínimo 25% por microrred, máximo 25% independientes y todos medidor
	Máximo 1 microrred	10 - Máximo 1 microrred y todos medidor	12 - Máximo 1 microrred de 25% y todos medidor	14 - Máximo 1 microrred, 25% independientes y todos medidor	

Tabla 5.4. Comparación de cuando no existe la restricción de usuarios independientes frente a cuando sí existe



Para cumplir con esta restricción, las microrredes deben aumentar su tamaño o su número. Para ello, si no existe ninguna restricción que lo impida, los usuarios independientes se agrupan entre sí formando pequeñas microrredes (comparaciones 01 vs 05, 03 vs 07 y 11 vs 15) y se unen a las microrredes ya existentes (comparación 09 vs 13). Si alguna restricción lo impide (limitando el número de microrredes), los usuarios únicamente se unen a las microrredes existentes (comparaciones 02 vs 06 y 10 vs 14). Dado que aumentan las microrredes y/o el tamaño de las mismas, los equipos de generación y almacenamiento tienden a concentrarse, disminuyendo el número total de los mismos pero aumentando su potencia y su capacidad, respectivamente.

La implementación de esta restricción incrementa el coste, aunque de manera poco significativa en comparación con los costes totales de las soluciones. Este incremento es mayor cuando existe además la restricción que limita el número de microrredes. Usuarios antiguamente independientes pasan de unirse entre sí formando microrredes relativamente compactas a adherirse a la microrred existente que queda más lejos. El coste por extensión de red aumenta.

Si existe la restricción que instala medidor en todos los usuarios el tiempo de cálculo aumenta al implementar la restricción de los usuarios independientes (comparaciones 09 vs 13 y 10 vs 14). Si en cambio se implementa la restricción de usuarios independientes sin la de medidores (comparaciones 01 vs 05 y 02 vs 06), el tiempo de cálculo disminuye. En el caso de las comparaciones 03 vs 07 y 11 vs 15, no se puede concluir nada.

- *Número máximo de microrredes*

Esta restricción se analiza comparando cuando la restricción no existe frente a cuando sí existe. Se comparan los modelos 01 vs 02, 03 vs 04, 05 vs 06, 09 vs 10, 11 vs 12 y 13 vs 14.

		Usuarios independientes libre		Máximo 25% usuarios independientes	
		Usuarios por microrred libre	Mínimo 25% usuarios por microrred	Usuarios por microrred libre	Mínimo 25% usuarios por microrred
Medidor en microrred	Número microrredes libre	01 - Libre	03 - Mínimo 25% por microrred	05 - Máximo 25% independientes	07 - Mínimo 25% por microrred y máximo 25% independientes
	Máximo 1 microrred	02 - Máximo 1 microrred	04 - Máximo 1 microrred de mínimo 25%	06 - Máximo 1 microrred y 25% independientes	
Medidor en todos los puntos	Número microrredes libre	09 - Libre y todos medidor	11 - Mínimo 25% por microrred y todos medidor	13 - Máximo 25% independientes y todos medidor	15 - Mínimo 25% por microrred, máximo 25% independientes y todos medidor
	Máximo 1 microrred	10 - Máximo 1 microrred y todos medidor	12 - Máximo 1 microrred de 25% y todos medidor	14 - Máximo 1 microrred, 25% independientes y todos medidor	

Tabla 5.5. Comparación de cuando no existe la restricción de número de microrredes frente a cuando sí existe

En el caso de las comparaciones 01 vs 02, 03 vs 04 y 11 vs 12, las soluciones sin la presente restricción cumplen con la misma, de modo que su implementación no influye en las soluciones.

En el caso de las comparaciones 05 vs 06 y 13 vs 14, la restricción va acompañada de una limitación en el número de usuarios independientes, de modo que disminuye el número de microrredes aumentando el tamaño de las mismas. Los componentes de generación se mantienen; los equipos de generación se ajustan a los consumos y al existir los mismos usuarios



conectados en microrred (aunque distribuidos de diferente manera), no existe variación. Los componentes de almacenamiento, por su parte, aumentan su capacidad reduciendo a la vez el número total; se puede apostar, a diferencia de en el caso de los equipos de generación, por equipos de mayor envergadura. El coste de las soluciones se incrementa puesto que se pasa de poder unir usuarios que queden cercanos entre sí con pequeñas microrredes a unirlos con la microrred existente que queda más alejada.

La solución al modelo 09 no cumple con la restricción de modo que la solución al modelo 10 trata de cumplirla. Disminuye el número de microrredes y aumenta el coste de la solución. Los equipos de generación y almacenamiento se adecuan a cada configuración.

El tiempo de cálculo disminuye con la implementación de esta restricción.

- *Número mínimo de usuarios por microrred*

Esta restricción se analiza comparando cuando la restricción no existe frente a cuando sí existe. Se comparan los modelos 01 vs 03, 02 vs 04, 05 vs 07, 09 vs 11, 10 vs 12 y 13 vs 15.

		Usuarios independientes libre		Máximo 25% usuarios independientes	
		Usuarios por microrred libre	Mínimo 25% usuarios por microrred	Usuarios por microrred libre	Mínimo 25% usuarios por microrred
Medidor en microrred	Número microrredes libre	01 - Libre	03 - Mínimo 25% por microrred	05 - Máximo 25% independientes	07 - Mínimo 25% por microrred y máximo 25% independientes
	Máximo 1 microrred	02 - Máximo 1 microrred	04 - Máximo 1 microrred de mínimo 25%	06 - Máximo 1 microrred y 25% independientes	
Medidor en todos los puntos	Número microrredes libre	09 - Libre y todos medidor	11 - Mínimo 25% por microrred y todos medidor	13 - Máximo 25% independientes y todos medidor	15 - Mínimo 25% por microrred, máximo 25% independientes y todos medidor
	Máximo 1 microrred	10 - Máximo 1 microrred y todos medidor	12 - Máximo 1 microrred de 25% y todos medidor	14 - Máximo 1 microrred, 25% independientes y todos medidor	

Tabla 5.6. Comparación de cuando no existe la restricción de usuarios por microrredes frente a cuando sí existe

A excepción de la comparación 09 vs 11, todas cumplen con la restricción de número mínimo de usuarios por microrred, previo a que sea implementada, y por tanto la restricción no influye en las soluciones. Los únicos cambios que se observan, se encuentran en los equipos de almacenamiento y se deben a que las soluciones no siempre son óptimas.

En la comparación 09 vs 11, disminuye el número de microrredes al implementar esta restricción, aumentando el tamaño de las mismas. Esto provoca que se utilicen equipos de generación y almacenamiento de mayor potencia y capacidad, respectivamente, mientras que el coste se incrementa ligeramente.

El tiempo de cálculo aumenta con la implementación de esta restricción.



		Usuarios independientes libre		Máximo 25% usuarios independientes		
		Usuarios por microrred libre	Mínimo 25% usuarios por microrred	Usuarios por microrred libre	Mínimo 25% usuarios por microrred	
Medidor en microrred	Número microrredes libre	Ejemplar	01 - Libre	03 - Mínimo 25% por microrred	05 - Máximo 25% independientes	07 - Mínimo 25% por microrred y máximo 25% independientes
		Var. / Rest. / Tiempo [s]	1135 / 1453 / 18000	3150 / 1984 / 18000	1135 / 1467 / 18000	3150 / 1985 / 18000
		Coste / Cota / Dif.	26718 / 24617 / 7,86%	26861 / 24299 / 9,54%	27914 / 25899 / 7,22%	28529 / 25318 / 11,26%
		Microrredes	1	1	4	2
		Usuarios indep.	11	9	4	4
		Aeros. (tipo)	0	0	0	0
		Paneles (pot. [W])	10(50) / 2(75) / 10(100) / 2(150)	6(50) / 6(75) / 6(100) / 4(150)	3(50) / 2(75) / 3(100) / 9(150)	4(50) / 4(100) / 9(150)
	Baterías (cap. [Wh])	1(1800) / 12(2400)	10(2400) / 2(3000)	3(1500) / 1(1800) / 7(2400) / 2(3000)	1(1500) / 5(2400) / 5(3000)	
	Máximo 1 microrred	Ejemplar	02 - Máximo 1 microrred	04 - Máximo 1 microrred de mínimo 25%	06 - Máximo 1 microrred y 25% independientes	08 - Máximo 1 microrred de mínimo 25% y máximo 25% independientes
		Var. / Rest. / Tiempo [s]	1148 / 1493 / 18000	3150 / 1985 / 18000	1148 / 1494 / 6955,91	
		Coste / Cota / Dif.	26718 / 26172 / 2,04%	26859 / 25184 / 6,24%	29273 / 29273 / 0,00%	
		Microrredes	1	0	1	
		Usuarios indep.	11	13	4	
		Aeros. (tipo)	0	0	0	
Paneles (pot. [W])		6(50) / 10(75) / 6(100) / 2(150)	11(50) / 4(75) / 11(100)	3(50) / 2(75) / 3(100) / 9(150)		
Baterías (cap. [Wh])	1(1800) / 12(2400)	13(2400)	3(1800) / 6(2400) / 3(3000)			
Medidor en todos los puntos	Número microrredes libre	Ejemplar	09 - Libre y todos medidor	11 - Mínimo 25% por microrred y todos medidor	13 - Máximo 25% independientes y todos medidor	15 - Mínimo 25% por microrred, máximo 25% independientes y todos medidor
		Var. / Rest. / Tiempo [s]	1122 / 1440 / 18000	3150 / 1984 / 18000	1135 / 1467 / 18000	3150 / 1985 / 18000
		Coste / Cota / Dif.	27311 / 25314 / 7,31%	27311 / 25057 / 8,25%	28101 / 26401 / 6,05%	28444 / 25236 / 11,28%
		Microrredes	1	1	4	2
		Usuarios indep.	9	9	4	4
		Aeros. (tipo)	0	0	0	0
		Paneles (pot. [W])	5(50) / 8(75) / 5(100) / 4(150)	9(50) / 9(100) / 4(150)	3(50) / 2(75) / 3(100) / 9(150)	4(50) / 4(100) / 9(150)
	Baterías (cap. [Wh])	10(2400) / 2(3000)	10(2400) / 2(3000)	3(1500) / 2(1800) / 5(2400) / 3(3000)	1(1500) / 5(2400) / 5(3000)	
	Máximo 1 microrred	Ejemplar	10 - Máximo 1 microrred y todos medidor	12 - Máximo 1 microrred de 25% y todos medidor	14 - Máximo 1 microrred, 25% independientes y todos medidor	16 - Máximo 1 microrred de mínimo 25%, máximo 25% independientes y todos medidor
		Var. / Rest. / Tiempo [s]	1148 / 1493 / 18000	3150 / 1985 / 18000	1148 / 1494 / 3732,64	
		Coste / Cota / Dif.	27268 / 26768 / 1,83%	27311 / 24897 / 8,84%	29473 / 29473 / 0,00%	
		Microrredes	1	1	1	
		Usuarios indep.	11	9	4	
		Aeros. (tipo)	0	0	0	
Paneles (pot. [W])		6(50) / 10(75) / 6(100) / 2(150)	7(50) / 4(75) / 7(100) / 4(150)	4(50) / 4(100) / 9(150)		
Baterías (cap. [Wh])	1(1800) / 12(2400)	10(2400) / 2(3000)	3(1800) / 6(2400) / 3(3000)			

Tabla 5.7. Resultados de la experimentación para la comunidad de Alto Perú parte Norte con oferta energética alta



Oferta energética alta

En la tabla 5.7, se expone el detalle de las soluciones obtenidas en la experimentación de la comunidad de Alto Perú parte Norte con un escenario de oferta energética alta. Como se puede ver, cada columna lleva asociado un número. Éste va asociado a la tabla 5.1 de del apartado 5.2. *Experimentación realizada*. A continuación se analiza la influencia en las soluciones de electrificación de cada una de las 4 restricciones planteadas en el presente trabajo.

- *Todos los usuarios con medidor*

Esta restricción se analiza comparando cuando la restricción no existe frente a cuando sí existe. Se comparan los modelos 01 vs 09, 02 vs 10, 03 vs 11, 04 vs 12, 05 vs 13, 06 vs 14 y 07 vs 15.

		Usuarios independientes libre		Máximo 25% usuarios independientes	
		Usuarios por microrred libre	Mínimo 25% usuarios por microrred	Usuarios por microrred libre	Mínimo 25% usuarios por microrred
Medidor en microrred	Número microrredes libre	01 - Libre	03 - Mínimo 25% por microrred	05 - Máximo 25% independientes	07 - Mínimo 25% por microrred y máximo 25% independientes
	Máximo 1 microrred	02 - Máximo 1 microrred	04 - Máximo 1 microrred de mínimo 25%	06 - Máximo 1 microrred y 25% independientes	
Medidor en todos los puntos	Número microrredes libre	09 - Libre y todos medidor	11 - Mínimo 25% por microrred y todos medidor	13 - Máximo 25% independientes y todos medidor	15 - Mínimo 25% por microrred, máximo 25% independientes y todos medidor
	Máximo 1 microrred	10 - Máximo 1 microrred y todos medidor	12 - Máximo 1 microrred de 25% y todos medidor	14 - Máximo 1 microrred, 25% independientes y todos medidor	

Tabla 5.8. Comparación de cuando no existe la restricción de medidores frente a cuando sí existe

Con la implementación de esta restricción, la configuración de las soluciones de los modelos 10, 11, 14 y 15 no varían respecto a las configuraciones de los modelos 02, 03, 06 y 07, respectivamente. La única diferencia, cuando existe (comparaciones 03 vs 11 y 06 vs 14), consiste en la sustitución de unos paneles por otros de potencia y coste análogos. En estos casos la diferencia de coste es igual al número de medidores instalados en los puntos individuales.

En el caso de la comparación 06 vs 14, la configuración es la misma, lo mismo que los equipos de generación utilizados. Sin embargo, la capacidad total de las baterías y el coste total no son los mismos. Esto provoca que la diferencia de costes entre el modelo 06 y el modelo 14 no se corresponda con el número de usuarios independientes con medidor adicional.

En la comparación 01 vs 09, la única microrred existente incrementa su tamaño con la implementación de esta restricción. En la comparación 04 vs 12, se pasa de electrificar a todas las viviendas de forma independiente, a formar una microrred de 4 usuarios. En ambos casos, los equipos de generación y almacenamiento adecuan su tamaño a las necesidades de cada configuración. Las dos diferencias de costes, no se corresponden con el número de medidores adicionales instalados debido a la diferencia de costes de los componentes utilizados en cada caso.

En la mayoría de casos, el tiempo de cálculo llega a los 18000 segundos máximos permitidos. En la comparación 06 vs 14 el tiempo de cálculo disminuye con esta restricción.



- *Número máximo de usuarios independientes*

Esta restricción se analiza comparando cuando la restricción no existe frente a cuando sí existe. Se comparan los modelos 01 vs 05, 02 vs 06, 03 vs 07, 09 vs 13, 10 vs 14 y 11 vs 15.

		Usuarios independientes libre		Máximo 25% usuarios independientes	
		Usuarios por microrred libre	Mínimo 25% usuarios por microrred	Usuarios por microrred libre	Mínimo 25% usuarios por microrred
Medidor en microrred	Número microrredes libre	01 - Libre	03 - Mínimo 25% por microrred	05 - Máximo 25% independientes	07 - Mínimo 25% por microrred y máximo 25% independientes
	Máximo 1 microrred	02 - Máximo 1 microrred	04 - Máximo 1 microrred de mínimo 25%	06 - Máximo 1 microrred y 25% independientes	
Medidor en todos los puntos	Número microrredes libre	09 - Libre y todos medidor	11 - Mínimo 25% por microrred y todos medidor	13 - Máximo 25% independientes y todos medidor	15 - Mínimo 25% por microrred, máximo 25% independientes y todos medidor
	Máximo 1 microrred	10 - Máximo 1 microrred y todos medidor	12 - Máximo 1 microrred de 25% y todos medidor	14 - Máximo 1 microrred, 25% independientes y todos medidor	

Tabla 5.9. Comparación de cuando no existe la restricción de usuarios independientes frente a cuando sí existe

Al implementar la presente restricción en ausencia de otras restricciones, los usuarios se agrupan formando pequeñas microrredes hasta cumplir con el número máximo de usuarios independientes (comparaciones 01 vs 05 y 09 vs 13). Los equipos de generación y almacenamiento se adecuan a cada microrred y cada usuario independiente. El coste aumenta ligeramente puesto que la dispersión de la comunidad favorece la electrificación individual en vez de con microrredes.

Si además de la presente restricción se impone un máximo en el número de microrredes, el modelo se ve obligado a unir los usuarios en una microrred (comparaciones 02 vs 06 y 10 vs 14). Ya no pueden unirse entre sí usuarios cercanos formando su propia microrred, y se adhieren a la microrred existente. Esto provoca que los equipos de generación y almacenamiento se concentren, reduciendo el número total pero aumentando la potencia y la capacidad, respectivamente. El coste se incrementa y en mayor medida que en el caso anterior, debido a la extensión de red. Se unen usuarios que pueden llegar a estar bastante alejados entre sí.

Si además de la presente restricción se impone un mínimo en el número de usuarios por microrred (comparaciones 03 vs 07 y 11 vs 15), se tiene una situación intermedia. Se incrementa el número de microrredes pero sin llegar al caso en que no existen otras imposiciones. Se incrementa también el tamaño de las mismas pero sin llegar al caso con una imposición en el número de microrredes. Los equipos de generación y almacenamiento se concentran. El coste se incrementa de forma intermedia respecto a los dos casos anteriormente comentados.

En la mayoría de casos el tiempo de cálculo supera los 18000 segundos máximos permitidos. En las comparaciones 02 vs 06 y 10 vs 14, el tiempo de cálculo disminuye con esta restricción.



- *Número máximo de microrredes*

Esta restricción se analiza comparando cuando la restricción no existe frente a cuando sí existe. Se comparan los modelos 01 vs 02, 03 vs 04, 05 vs 06, 09 vs 10, 11 vs 12 y 13 vs 14.

		Usuarios Independientes libre		Máximo 25% usuarios Independientes	
		Usuarios por microrred libre	Mínimo 25% usuarios por microrred	Usuarios por microrred libre	Mínimo 25% usuarios por microrred
Medidor en microrred	Número microrredes libre	01 - Libre	03 - Mínimo 25% por microrred	05 - Máximo 25% independientes	07 - Mínimo 25% por microrred y máximo 25% independientes
	Máximo 1 microrred	02 - Máximo 1 microrred	04 - Máximo 1 microrred de mínimo 25%	06 - Máximo 1 microrred y 25% independientes	
Medidor en todos los puntos	Número microrredes libre	09 - Libre y todos medidor	11 - Mínimo 25% por microrred y todos medidor	13 - Máximo 25% independientes y todos medidor	15 - Mínimo 25% por microrred, máximo 25% independientes y todos medidor
	Máximo 1 microrred	10 - Máximo 1 microrred y todos medidor	12 - Máximo 1 microrred de 25% y todos medidor	14 - Máximo 1 microrred, 25% independientes y todos medidor	

Tabla 5.10. Comparación de cuando no existe la restricción de número de microrredes frente a cuando sí existe

En las comparaciones 01 vs 02 y 11 vs 12 no se modifica la configuración de la solución con la inclusión de esta restricción, la solución sin restricción ya cumple con la misma. Las modificaciones que se observan en los equipos de generación se deben a la sustitución de paneles fotovoltaicos por otros de potencia y coste análogos.

En las comparaciones 05 vs 06 y 13 vs 14, se pasa de tener numerosas microrredes de pequeño tamaño a una única de gran tamaño, manteniéndose igual el número de usuarios independientes. Los equipos de generación y almacenamiento aumentan su potencia y capacidad, respectivamente, y reducen su número total; se concentran los puntos de generación para unos mismos puntos de consumo. El coste se incrementa al unirse usuarios muy separados entre sí.

En las comparaciones 03 vs 04 y 09 vs 10 existe, con la implementación de la presente restricción, una disminución del tamaño de la única microrred existente, llegando a desaparecer totalmente en el caso 03 vs 04. Aunque las soluciones 03 y 09 ya cumplen con la restricción, las nuevas soluciones obtenidas son diferentes. Los equipos de generación y almacenamiento se adecuan a cada realidad. El coste se mantiene casi igual en ambas comparaciones.

En la mayoría de casos el tiempo de cálculo supera los 18000 segundos máximos permitidos. En las comparaciones 05 vs 06 y 13 vs 14, el tiempo de cálculo disminuye con esta restricción.



		Usuarios independientes libre		Máximo 25% usuarios independientes		
		Usuarios por microrred libre	Mínimo 25% usuarios por microrred	Usuarios por microrred libre	Mínimo 25% usuarios por microrred	
Medidor en microrred	Número microrredes libre	Ejemplar	01 - Libre	03 - Mínimo 25% por microrred	05 - Máximo 25% independientes	07 - Mínimo 25% por microrred y máximo 25% independientes
		Var. / Rest. / Tiempo [s]	603 / 713 / 153,31	1242 / 972 / 726	603 / 723 / 23,14	1242 / 973 / 114,52
		Coste / Cota / Dif.	13794 / 13794 / 0,00%	13794 / 13794 / 0,00%	13794 / 13794 / 0,00%	13794 / 13794 / 0,00%
		Microrredes	1	1	1	1
		Usuarios indep.	3	3	3	3
		Aeros. (tipo)	0	0	0	0
		Paneles (pot. [W])	6(50) / 4(150)	6(50) / 4(150)	6(50) / 4(150)	6(50) / 4(150)
	Baterías (cap. [Wh])	3(1500) / 1(2400) / 2(3000)	3(1500) / 1(2400) / 2(3000)	3(1500) / 1(2400) / 2(3000)	3(1500) / 1(2400) / 2(3000)	
	Máximo 1 microrred	Ejemplar	02 - Máximo 1 microrred	04 - Máximo 1 microrred de mínimo 25%	06 - Máximo 1 microrred y 25% independientes	08 - Máximo 1 microrred de mínimo 25% y máximo 25% independientes
		Var. / Rest. / Tiempo [s]	612 / 741 / 11,14	1242 / 973 / 191,73	612 / 742 / 9,81	
		Coste / Cota / Dif.	13794 / 13794 / 0,00%	13794 / 13794 / 0,00%	13794 / 13794 / 0,00%	
		Microrredes	1	1	1	
		Usuarios indep.	3	3	3	
		Aeros. (tipo)	0	0	0	
Paneles (pot. [W])		6(50) / 4(150)	6(50) / 4(150)	6(50) / 4(150)		
Baterías (cap. [Wh])	3(1500) / 1(2400) / 2(3000)	3(1500) / 1(2400) / 2(3000)	3(1500) / 1(2400) / 2(3000)			
Medidor en todos los puntos	Número microrredes libre	Ejemplar	09 - Libre y todos medidor	11 - Mínimo 25% por microrred y todos medidor	13 - Máximo 25% independientes y todos medidor	15 - Mínimo 25% por microrred, máximo 25% independientes y todos medidor
		Var. / Rest. / Tiempo [s]	594 / 704 / 103,97	1242 / 972 / 335,27	603 / 723 / 29,66	1242 / 973 / 222,34
		Coste / Cota / Dif.	13944 / 13944 / 0,00%	13944 / 13944 / 0,00%	13944 / 13944 / 0,00%	13944 / 13944 / 0,00%
		Microrredes	1	1	1	1
		Usuarios indep.	3	3	3	3
		Aeros. (tipo)	0	0	0	0
		Paneles (pot. [W])	6(50) / 4(150)	6(50) / 4(150)	6(50) / 4(150)	6(50) / 4(150)
	Baterías (cap. [Wh])	3(1500) / 1(2400) / 2(3000)	3(1500) / 1(2400) / 2(3000)	3(1500) / 1(2400) / 2(3000)	3(1500) / 1(2400) / 2(3000)	
	Máximo 1 microrred	Ejemplar	10 - Máximo 1 microrred y todos medidor	12 - Máximo 1 microrred de 25% y todos medidor	14 - Máximo 1 microrred, 25% independientes y todos medidor	16 - Máximo 1 microrred de mínimo 25%, máximo 25% independientes y todos medidor
		Var. / Rest. / Tiempo [s]	612 / 741 / 29,36	1242 / 973 / 131,17	612 / 742 / 9,19	
		Coste / Cota / Dif.	13944 / 13944 / 0,00%	13944 / 13944 / 0,00%	13944 / 13944 / 0,00%	
		Microrredes	1	1	1	
		Usuarios indep.	3	3	3	
		Aeros. (tipo)	0	0	0	
Paneles (pot. [W])		6(50) / 4(150)	6(50) / 4(150)	6(50) / 4(150)		
Baterías (cap. [Wh])	3(1500) / 1(2400) / 2(3000)	3(1500) / 1(2400) / 2(3000)	3(1500) / 1(2400) / 2(3000)			

Tabla 5.12. Resultados de la experimentación para la comunidad de Alto Perú parte Norte con oferta energética alta



- *Número mínimo de usuarios por microrred*

Esta restricción se analiza comparando cuando la restricción no existe frente a cuando sí existe. Se comparan los modelos 01 vs 03, 02 vs 04, 05 vs 07, 09 vs 11, 10 vs 12 y 13 vs 15.

		Usuarios independientes libre		Máximo 25% usuarios independientes	
		Usuarios por microrred libre	Mínimo 25% usuarios por microrred	Usuarios por microrred libre	Mínimo 25% usuarios por microrred
Medidor en microrred	Número microrredes libre	01 - Libre	03 - Mínimo 25% por microrred	05 - Máximo 25% independientes	07 - Mínimo 25% por microrred y máximo 25% independientes
	Máximo 1 microrred	02 - Máximo 1 microrred	04 - Máximo 1 microrred de mínimo 25%	06 - Máximo 1 microrred y 25% independientes	
Medidor en todos los puntos	Número microrredes libre	09 - Libre y todos medidor	11 - Mínimo 25% por microrred y todos medidor	13 - Máximo 25% independientes y todos medidor	15 - Mínimo 25% por microrred, máximo 25% independientes y todos medidor
	Máximo 1 microrred	10 - Máximo 1 microrred y todos medidor	12 - Máximo 1 microrred de 25% y todos medidor	14 - Máximo 1 microrred, 25% independientes y todos medidor	

Tabla 5.11. Comparación de cuando no existe la restricción de usuarios por microrredes frente a cuando sí existe

Esta restricción tiende a modificar la solución de dos maneras. En primer lugar, las microrredes existentes incrementan su tamaño hasta alcanzar las especificaciones, ya sea por inclusión de usuarios antiguamente independientes (comparaciones 01 vs 03 y 10 vs 12) o por unión de las microrredes existentes (comparaciones 05 vs 07 y 13 vs 15). En segundo lugar, desaparecen las microrredes, electrificando a todos los usuarios de forma individual (comparación 02 vs 04).

En el primer caso los equipos de generación y almacenamiento incrementan su potencia y capacidad, respectivamente, al concentrarse los puntos de generación. En el segundo caso, sucede lo contrario, dimensionándose equipos de generación y almacenamiento para un único usuario. Los costes en todos los casos se incrementan ligeramente. En el primer caso, usuarios demasiado dispersos se unen a microrredes alejadas o microrredes dispersas entre sí se unen, aumentando así el coste por extensión de red. En el segundo caso sucede lo contrario. Usuarios cercanos entre sí se separan, electrificándolos de forma independiente, lo que por su cercanía resulta más caro.

En todas las comparaciones, el tiempo de cálculo supera los 18000 segundos máximos permitidos.

5.3.2. Resultados para Alto Perú parte Sur

A continuación se detallan las soluciones obtenidas en cada una de las 14 posibles combinaciones de modelos para la comunidad de Alto Perú parte Sur. En primer lugar se trata el escenario de oferta energética baja y a continuación el escenario de oferta energética alta.

Oferta energética baja

En la tabla 5.12, se expone el detalle de las soluciones obtenidas en la experimentación de la comunidad de Alto Perú parte Sur con un escenario de oferta energética baja. Como se puede ver, cada columna lleva asociado un número. Éste va asociado a la tabla 5.1 de del apartado 5.2. *Experimentación realizada*. A continuación se analiza la influencia en las soluciones de electrificación de cada una de las 4 restricciones planteadas en el presente trabajo.



- *Todos los usuarios con medidor*

Esta restricción se analiza comparando cuando la restricción no existe frente a cuando sí existe. Se comparan los modelos 01 vs 09, 02 vs 10, 03 vs 11, 04 vs 12, 05 vs 13, 06 vs 14 y 07 vs 15.

		Usuarios independientes libre		Máximo 25% usuarios independientes	
		Usuarios por microrred libre	Mínimo 25% usuarios por microrred	Usuarios por microrred libre	Mínimo 25% usuarios por microrred
Medidor en microrred	Número microrredes libre	01 - Libre	03 - Mínimo 25% por microrred	05 - Máximo 25% independientes	07 - Mínimo 25% por microrred y máximo 25% independientes
	Máximo 1 microrred	02 - Máximo 1 microrred	04 - Máximo 1 microrred de mínimo 25%	06 - Máximo 1 microrred y 25% independientes	
Medidor en todos los puntos	Número microrredes libre	09 - Libre y todos medidor	11 - Mínimo 25% por microrred y todos medidor	13 - Máximo 25% independientes y todos medidor	15 - Mínimo 25% por microrred, máximo 25% independientes y todos medidor
	Máximo 1 microrred	10 - Máximo 1 microrred y todos medidor	12 - Máximo 1 microrred de 25% y todos medidor	14 - Máximo 1 microrred, 25% independientes y todos medidor	

Tabla 5.13. Comparación de cuando no existe la restricción de medidores frente a cuando sí existe

Las soluciones obtenidas en todos los modelos son idénticas, tanto en la configuración del sistema, como en número y tipo de equipos de generación y almacenamiento utilizados. La única diferencia reside en el coste total de las soluciones. Se pasa de un coste de 13794\$ cuando no se implementa esta restricción (modelos 01, 02, 03, 04, 05, 06 y 07) a un coste de 13944\$ cuando se implementa la restricción (modelos 09, 10, 11, 12, 13, 14 y 15). La diferencia de 150\$ se corresponde con el número adicional de medidores instalados, 1 por cada usuario independiente y 3 en total a un coste de 50\$/medidor.

Las diferencias en el tiempo de cálculo son muy variables según la comparación que se analiza.

- *Número máximo de usuarios independientes*

Esta restricción se analiza comparando cuando la restricción no existe frente a cuando sí existe. Se comparan los modelos 01 vs 05, 02 vs 06, 03 vs 07, 09 vs 13, 10 vs 14 y 11 vs 15.

		Usuarios independientes libre		Máximo 25% usuarios independientes	
		Usuarios por microrred libre	Mínimo 25% usuarios por microrred	Usuarios por microrred libre	Mínimo 25% usuarios por microrred
Medidor en microrred	Número microrredes libre	01 - Libre	03 - Mínimo 25% por microrred	05 - Máximo 25% independientes	07 - Mínimo 25% por microrred y máximo 25% independientes
	Máximo 1 microrred	02 - Máximo 1 microrred	04 - Máximo 1 microrred de mínimo 25%	06 - Máximo 1 microrred y 25% independientes	
Medidor en todos los puntos	Número microrredes libre	09 - Libre y todos medidor	11 - Mínimo 25% por microrred y todos medidor	13 - Máximo 25% independientes y todos medidor	15 - Mínimo 25% por microrred, máximo 25% independientes y todos medidor
	Máximo 1 microrred	10 - Máximo 1 microrred y todos medidor	12 - Máximo 1 microrred de 25% y todos medidor	14 - Máximo 1 microrred, 25% independientes y todos medidor	

Tabla 5.14. Comparación de cuando no existe la restricción de usuarios independientes frente a cuando sí existe



Las soluciones de los modelos sin incorporar esta restricción cumplen con la misma. Existen 3 usuarios independientes, lo que no supera el máximo de un 25% del total de usuarios. En consecuencia la implementación de esta restricción no modifica las soluciones, ni en la configuración de los sistemas ni en los equipos de generación y almacenamiento de la energía.

El tiempo de cálculo disminuye con la implementación de esta restricción.

- *Número máximo de microrredes*

Esta restricción se analiza comparando cuando la restricción no existe frente a cuando sí existe. Se comparan los modelos 01 vs 02, 03 vs 04, 05 vs 06, 09 vs 10, 11 vs 12 y 13 vs 14.

		Usuarios independientes libre		Máximo 25% usuarios independientes	
		Usuarios por microrred libre	Mínimo 25% usuarios por microrred	Usuarios por microrred libre	Mínimo 25% usuarios por microrred
Medidor en microrred	Número microrredes libre	01 - Libre	03 - Mínimo 25% por microrred	05 - Máximo 25% independientes	07 - Mínimo 25% por microrred y máximo 25% independientes
	Máximo 1 microrred	02 - Máximo 1 microrred	04 - Máximo 1 microrred de mínimo 25%	06 - Máximo 1 microrred y 25% independientes	
Medidor en todos los puntos	Número microrredes libre	09 - Libre y todos medidor	11 - Mínimo 25% por microrred y todos medidor	13 - Máximo 25% independientes y todos medidor	15 - Mínimo 25% por microrred, máximo 25% independientes y todos medidor
	Máximo 1 microrred	10 - Máximo 1 microrred y todos medidor	12 - Máximo 1 microrred de 25% y todos medidor	14 - Máximo 1 microrred, 25% independientes y todos medidor	

Tabla 5.15. Comparación de cuando no existe la restricción de número de microrredes frente a cuando sí existe

Las soluciones de los modelos sin incorporar esta restricción cumplen con la misma. Únicamente existe una microrred. En consecuencia no se percibe de esta restricción en las soluciones, ni en la configuración de los sistemas de electrificación ni en los equipos de generación y almacenamiento.

El tiempo de cálculo disminuye con la implementación de esta restricción.

- *Número mínimo de usuarios por microrred*

Esta restricción se analiza comparando cuando la restricción no existe frente a cuando sí existe. Se comparan los modelos 01 vs 03, 02 vs 04, 05 vs 07, 09 vs 11, 10 vs 12 y 13 vs 15.

		Usuarios independientes libre		Máximo 25% usuarios independientes	
		Usuarios por microrred libre	Mínimo 25% usuarios por microrred	Usuarios por microrred libre	Mínimo 25% usuarios por microrred
Medidor en microrred	Número microrredes libre	01 - Libre	03 - Mínimo 25% por microrred	05 - Máximo 25% independientes	07 - Mínimo 25% por microrred y máximo 25% independientes
	Máximo 1 microrred	02 - Máximo 1 microrred	04 - Máximo 1 microrred de mínimo 25%	06 - Máximo 1 microrred y 25% independientes	
Medidor en todos los puntos	Número microrredes libre	09 - Libre y todos medidor	11 - Mínimo 25% por microrred y todos medidor	13 - Máximo 25% independientes y todos medidor	15 - Mínimo 25% por microrred, máximo 25% independientes y todos medidor
	Máximo 1 microrred	10 - Máximo 1 microrred y todos medidor	12 - Máximo 1 microrred de 25% y todos medidor	14 - Máximo 1 microrred, 25% independientes y todos medidor	

Tabla 5.16. Comparación de cuando no existe la restricción de usuarios por microrredes frente a cuando sí existe



		Usuarios independientes libre		Máximo 25% usuarios independientes		
		Usuarios por microrred libre	Mínimo 25% usuarios por microrred	Usuarios por microrred libre	Mínimo 25% usuarios por microrred	
Medidor en microrred	Número microrredes libre	Ejemplar	01 - Libre	03 - Mínimo 25% por microrred	05 - Máximo 25% independientes	07 - Mínimo 25% por microrred y máximo 25% independientes
		Var. / Rest. / Tiempo [s]	603 / 713 / 153,31	1242 / 972 / 726	603 / 723 / 23,14	1242 / 973 / 114,52
		Coste / Cota / Dif.	18150 / 18150 / 0,00%	18150 / 18150 / 0,00%	18553 / 18553 / 0,00%	18553 / 18553 / 0,00%
		Microrredes	1	1	1	1
		Usuarios indep.	3	3	3	3
		Aeros. (tipo)	0	0	0	0
		Paneles (pot. [W])	4(50) / 2(75) / 4(100) / 4(150)	2(50) / 6(75) / 2(100) / 4(150)	3(50) / 3(100) / 6(150)	4(50) / 2(75) / 4(100) / 4(150)
	Baterías (cap. [Wh])	6(2400) / 2(3000)	6(2400) / 2(3000)	1(1800) / 5(2400) / 2(3000)	1(1800) / 5(2400) / 2(3000)	
	Máximo 1 microrred	Ejemplar	02 - Máximo 1 microrred	04 - Máximo 1 microrred de mínimo 25%	06 - Máximo 1 microrred y 25% independientes	08 - Máximo 1 microrred de mínimo 25% y máximo 25% independientes
		Var. / Rest. / Tiempo [s]	612 / 741 / 11,14	1242 / 973 / 191,73	612 / 742 / 9,81	-
		Coste / Cota / Dif.	18150 / 18150 / 0,00%	18150 / 18150 / 0,00%	18553 / 18553 / 0,00%	-
		Microrredes	1	1	1	-
		Usuarios indep.	3	3	3	-
		Aeros. (tipo)	0	0	0	-
Paneles (pot. [W])		5(50) / 5(100) / 4(150)	3(50) / 4(75) / 3(100) / 4(150)	4(50) / 2(75) / 4(100) / 4(150)	-	
Baterías (cap. [Wh])	6(2400) / 2(3000)	6(2400) / 2(3000)	1(1800) / 5(2400) / 2(3000)	-		
Medidor en todos los puntos	Número microrredes libre	Ejemplar	09 - Libre y todos medidor	11 - Mínimo 25% por microrred y todos medidor	13 - Máximo 25% independientes y todos medidor	15 - Mínimo 25% por microrred, máximo 25% independientes y todos medidor
		Var. / Rest. / Tiempo [s]	594 / 704 / 103,97	1242 / 972 / 335,27	603 / 723 / 29,66	1242 / 973 / 222,34
		Coste / Cota / Dif.	18400 / 18400 / 0,00%	18400 / 18400 / 0,00%	18703 / 18703 / 0,00%	18703 / 18703 / 0,00%
		Microrredes	1	1	1	1
		Usuarios indep.	3	3	3	3
		Aeros. (tipo)	0	0	0	0
		Paneles (pot. [W])	2(50) / 6(75) / 2(100) / 4(150)	5(50) / 5(100) / 4(150)	3(50) / 3(100) / 6(150)	3(50) / 3(100) / 6(150)
	Baterías (cap. [Wh])	6(2400) / 2(3000)	6(2400) / 2(3000)	1(1800) / 5(2400) / 2(3000)	1(1800) / 5(2400) / 2(3000)	
	Máximo 1 microrred	Ejemplar	10 - Máximo 1 microrred y todos medidor	12 - Máximo 1 microrred de 25% y todos medidor	14 - Máximo 1 microrred, 25% independientes y todos medidor	16 - Máximo 1 microrred de mínimo 25%, máximo 25% independientes y todos medidor
		Var. / Rest. / Tiempo [s]	612 / 741 / 29,36	1242 / 973 / 131,17	612 / 742 / 9,19	-
		Coste / Cota / Dif.	18400 / 18400 / 0,00%	18400 / 18400 / 0,00%	18703 / 18703 / 0,00%	-
		Microrredes	1	1	1	-
		Usuarios indep.	3	3	3	-
		Aeros. (tipo)	0	0	0	-
Paneles (pot. [W])		3(50) / 4(75) / 3(100) / 4(150)	3(50) / 4(75) / 3(100) / 4(150)	2(50) / 2(75) / 2(100) / 6(150)	-	
Baterías (cap. [Wh])	6(2400) / 2(3000)	6(2400) / 2(3000)	1(1800) / 5(2400) / 2(3000)	-		

Tabla 5.17. Resultados de la experimentación para la comunidad de Alto Perú parte Norte con oferta energética alta



Las soluciones de los modelos sin incorporar esta restricción cumplen con la misma. La única microrred existente tiene 6 usuarios lo cual es más del mínimo de 25% del total de usuarios exigido. En consecuencia no se percibe el efecto de esta restricción en las soluciones, ni en la configuración de los sistemas de electrificación ni en los equipos de generación y almacenamiento de la energía.

El tiempo de cálculo aumenta con la implementación de esta restricción.

Oferta energética alta

En la tabla 5.17, se expone el detalle de las soluciones obtenidas en la experimentación de la comunidad de Alto Perú parte Sur con un escenario de oferta energética alta. Como se puede ver, cada columna lleva asociado un número. Éste va asociado a la tabla 5.1 de del apartado 5.2. *Experimentación realizada*. A continuación se analiza la influencia en las soluciones de electrificación de cada una de las 4 restricciones planteadas en el presente trabajo.

- *Todos los usuarios con medidor*

Esta restricción se analiza comparando cuando la restricción no existe frente a cuando sí existe. Se comparan los modelos 01 vs 09, 02 vs 10, 03 vs 11, 04 vs 12, 05 vs 13, 06 vs 14 y 07 vs 15.

		Usuarios independientes libre		Máximo 25% usuarios independientes	
		Usuarios por microrred libre	Mínimo 25% usuarios por microrred	Usuarios por microrred libre	Mínimo 25% usuarios por microrred
Medidor en microrred	Número microrredes libre	01 - Libre	03 - Mínimo 25% por microrred	05 - Máximo 25% independientes	07 - Mínimo 25% por microrred y máximo 25% independientes
	Máximo 1 microrred	02 - Máximo 1 microrred	04 - Máximo 1 microrred de mínimo 25%	06 - Máximo 1 microrred y 25% independientes	
Medidor en todos los puntos	Número microrredes libre	09 - Libre y todos medidor	11 - Mínimo 25% por microrred y todos medidor	13 - Máximo 25% independientes y todos medidor	15 - Mínimo 25% por microrred, máximo 25% independientes y todos medidor
	Máximo 1 microrred	10 - Máximo 1 microrred y todos medidor	12 - Máximo 1 microrred de 25% y todos medidor	14 - Máximo 1 microrred, 25% independientes y todos medidor	

Tabla 5.18. Comparación de cuando no existe la restricción de medidores frente a cuando sí existe

Las configuraciones de electrificación y los equipos de almacenamiento son idénticos al implementar esta restricción y no implementarla. En cuanto a los equipos de generación existen pequeñas diferencias debidas a la sustitución de paneles fotovoltaicos de una potencia, por otros de potencia y coste análogos.

El único cambio asociable a esta restricción, es un incremento en el coste cuando se implementa, proporcional al número adicional de medidores instalados, 5 en unos casos (comparaciones 01 vs 09, 02 vs 10, 03 vs 11, 04 vs 12) y 4 en otros (comparaciones 05 vs 13, 06 vs 14 y 07 vs 15).

Las diferencias en el tiempo de cálculo son muy variables según la comparación que se analiza.



- *Número máximo de usuarios independientes*

Esta restricción se analiza comparando cuando la restricción no existe frente a cuando sí existe. Se comparan los modelos 01 vs 05, 02 vs 06, 03 vs 07, 09 vs 13, 10 vs 14 y 11 vs 15.

		Usuarios independientes libre		Máximo 25% usuarios independientes	
		Usuarios por microrred libre	Mínimo 25% usuarios por microrred	Usuarios por microrred libre	Mínimo 25% usuarios por microrred
Medidor en microrred	Número microrredes libre	01 - Libre	03 - Mínimo 25% por microrred	05 - Máximo 25% independientes	07 - Mínimo 25% por microrred y máximo 25% independientes
	Máximo 1 microrred	02 - Máximo 1 microrred	04 - Máximo 1 microrred de mínimo 25%	06 - Máximo 1 microrred y 25% independientes	
Medidor en todos los puntos	Número microrredes libre	09 - Libre y todos medidor	11 - Mínimo 25% por microrred y todos medidor	13 - Máximo 25% independientes y todos medidor	15 - Mínimo 25% por microrred, máximo 25% independientes y todos medidor
	Máximo 1 microrred	10 - Máximo 1 microrred y todos medidor	12 - Máximo 1 microrred de 25% y todos medidor	14 - Máximo 1 microrred, 25% independientes y todos medidor	

Tabla 5.19. Comparación de cuando no existe la restricción de usuarios independientes frente a cuando sí existe

En todas las comparaciones estudiadas, la única microrred existente aumenta su tamaño hasta que la solución cumple con la imposición de usuarios independientes. El número y la potencia de los equipos de generación que abastecen a la microrred así como el número y la capacidad de las baterías aumentan. En los sistemas individuales existen modificaciones en los equipos de generación, al substituirse paneles por otros de potencia y coste análogos. El coste final aumenta.

El tiempo de cálculo disminuye con la implementación de esta restricción.

- *Número máximo de microrredes*

Esta restricción se analiza comparando cuando la restricción no existe frente a cuando sí existe. Se comparan los modelos 01 vs 02, 03 vs 04, 05 vs 06, 09 vs 10, 11 vs 12 y 13 vs 14.

		Usuarios independientes libre		Máximo 25% usuario independientes	
		Usuarios por microrred libre	Mínimo 25% usuarios por microrred	Usuarios por microrred libre	Mínimo 25% usuarios por microrred
Medidor en microrred	Número microrredes libre	01 - Libre	03 - Mínimo 25% por microrred	05 - Máximo 25% independientes	07 - Mínimo 25% por microrred y máximo 25% independientes
	Máximo 1 microrred	02 - Máximo 1 microrred	04 - Máximo 1 microrred de mínimo 25%	06 - Máximo 1 microrred y 25% independientes	
Medidor en todos los puntos	Número microrredes libre	09 - Libre y todos medidor	11 - Mínimo 25% por microrred y todos medidor	13 - Máximo 25% independientes y todos medidor	15 - Mínimo 25% por microrred, máximo 25% independientes y todos medidor
	Máximo 1 microrred	10 - Máximo 1 microrred y todos medidor	12 - Máximo 1 microrred de 25% y todos medidor	14 - Máximo 1 microrred, 25% independientes y todos medidor	

Tabla 5.20. Comparación de cuando no existe la restricción de número de microrredes frente a cuando sí existe

Las soluciones de los modelos sin incorporar esta restricción cumplen con la misma. Únicamente existe una microrred. En consecuencia no se percibe el efecto de esta restricción en las soluciones, ni en la configuración de los sistemas de electrificación ni en los equipos de almacenamiento. En los equipos de generación, existen pequeñas modificaciones de poca importancia al substituirse paneles fotovoltaicos por otros de potencia y coste análogos.



El tiempo de cálculo disminuye con la implementación de esta restricción.

- *Número mínimo de usuarios por microrred*

Esta restricción se analiza comparando cuando la restricción no existe frente a cuando sí existe. Se comparan los modelos 01 vs 03, 02 vs 04, 05 vs 07, 09 vs 11, 10 vs 12 y 13 vs 15.

		Usuarios independientes libre		Máximo 25% usuarios independientes	
		Usuarios por microrred libre	Mínimo 25% usuarios por microrred	Usuarios por microrred libre	Mínimo 25% usuarios por microrred
Medidor en microrred	Número microrredes libre	01 - Libre	03 - Mínimo 25% por microrred	05 - Máximo 25% independientes	07 - Mínimo 25% por microrred y máximo 25% independientes
	Máximo 1 microrred	02 - Máximo 1 microrred	04 - Máximo 1 microrred de mínimo 25%	06 - Máximo 1 microrred y 25% independientes	
Medidor en todos los puntos	Número microrredes libre	09 - Libre y todos medidor	11 - Mínimo 25% por microrred y todos medidor	13 - Máximo 25% independientes y todos medidor	15 - Mínimo 25% por microrred, máximo 25% independientes y todos medidor
	Máximo 1 microrred	10 - Máximo 1 microrred y todos medidor	12 - Máximo 1 microrred de 25% y todos medidor	14 - Máximo 1 microrred, 25% independientes y todos medidor	

Tabla 5.21. Comparación de cuando no existe la restricción de usuarios por microrredes frente a cuando sí existe

Las soluciones de los modelos sin incorporar esta restricción cumplen con la misma. La única microrred existente tiene 4 usuarios (comparaciones 01 vs 03, 02 vs 04, 09 vs 11 y 10 vs 12) lo cual es más del mínimo de 25% del total de usuarios exigido. En consecuencia el efecto de la implementación de esta restricción no modifica las soluciones, ni en la configuración de los sistemas de electrificación ni en los equipos de almacenamiento. En los equipos de generación, existen pequeñas modificaciones de poca importancia al sustituirse paneles fotovoltaicos por otros de potencia y coste análogos.

El tiempo de cálculo disminuye con la implementación de esta restricción.

5.3.3. Análisis

En la presente experimentación, se analiza la influencia de cada una de las 4 restricciones planteadas en los 4 modelos de la experimentación (2 comunidades con 2 escenarios de oferta energética). De este modo se puede ver cómo la implementación de cada restricción influye en las configuraciones de electrificación, los equipos de generación y almacenamiento, los costes de las soluciones y los tiempos de cálculo. A continuación, se realiza el análisis final, resumiendo primero las características generales del conjunto de modelos y posteriormente extrayendo la influencia de cada restricción sobre las soluciones de electrificación.

En primer lugar, se fuerza a que al menos el 25% de la energía suministrada provenga de equipos solares. Al observar las soluciones, se constata que en ningún caso se utiliza la tecnología eólica, pese a que ésta sea permitida en todos los modelos. El primer motivo es que de la evaluación de recursos, se deducía que el potencial eólico de ambas comunidades es muy bajo. Son por tanto necesarios aerogeneradores de gran potencia para generar poca energía, encareciendo así el coste por kWh. Se añade el hecho de que mientras que los aerogeneradores disponibles tienen unos rangos de potencia y energía muy escalonados, los paneles fotovoltaicos son mucho más



adaptables a pequeños consumos como con los que se trabaja. La energía eólica (por una cuestión de economías de escala) resulta más económica a mayores demandas de energía y potencia.

El segundo motivo es que al forzar que al menos un 25% de la energía provenga de fuente solar, favorece el uso de esta tecnología en aras de la tecnología eólica. Con esto, las soluciones obtenidas en todos los casos resultan con la ventaja de tener un abastecimiento energético mucho más constante que si la tecnología usada fuese eólica.

En segundo lugar, se fuerza que cada punto de consumo sea abastecido por, al menos, 2 equipos de generación. Esto provoca que si un punto de consumo tiene su demanda cubierta con un panel fotovoltaico de 100W, éste es substituido por 2 paneles de 50W, logrando así numerosas mejoras sociales y técnicas anteriormente comentadas. Por otra parte, se tiende a sobredimensionar la producción de energía, lo que podría favorecer usos no previstos en el diagnóstico socioeconómico (productivos, etc.). El incremento de coste no es, sin embargo, muy significativo puesto que en el peor de los casos, el modelo puede añadir un panel fotovoltaico de 50W para cumplir con las especificaciones lo que no resulta muy caro.

La implementación de la restricción “Todos los usuarios con medidor” influye poco sobre las soluciones de electrificación. Con su implementación, el coste de electrificar un usuario independiente se incrementa en relación a electrificar el mismo usuario con una microrred. Sin embargo ese incremento es poco elevado al ser el monto adicional (coste del medidor) muy bajo en comparación al resto de componentes de la instalación. En consecuencia la influencia principal de esta restricción sobre las soluciones es un incremento en el coste, proporcional al número de usuarios independientes y sin que ello modifique el resto de la solución. La influencia de esta restricción sobre el tiempo de cálculo es variable.

La dispersión de las comunidades con las que se ha realizado la experimentación es tal que tiende a haber un gran número de usuarios independientes en las soluciones de electrificación, a menos que se imponga alguna limitación. La restricción de “Número máximo de usuarios independientes” tiende a incrementar el número de usuarios pertenecientes a microrred. Esto se realiza adhiriendo estos usuarios a microrredes ya existentes o formando microrredes con usuarios cercanos entre sí. El tamaño y número de las mismas depende de la existencia de otras imposiciones, como un número máximo de microrredes o un número mínimo de usuarios por microrred. El coste de las soluciones aumenta, fruto de la dispersión entre puntos de consumo. Resulta más económico electrificar de forma independiente que electrificar con microrredes. Sin embargo, el incremento de costes es poco significativo frente al coste de las soluciones. El tiempo de cálculo de los modelos disminuye. Aunque aumenta el número de variables y restricciones y la complejidad del modelo de programación lineal, ésta es una restricción que acota las posibles soluciones, descartando toda aquella que tenga un número de usuarios independientes mayor al permitido.

La restricción de “Número máximo de microrredes” tiende a influir muy poco en las soluciones si se implementa sola. En la casi totalidad de los casos, debido a la ubicación de los puntos de consumo, las soluciones obtenidas sin que esta restricción intervenga cumplen con la misma. Sin



embargo, si se combina con la restricción de “Número máximo de usuarios independientes”, la cual tiende a aumentar el número de microrredes, la presente restricción hace efecto, limitando el número de microrredes a cambio de aumentar el tamaño de las mismas. Por otra parte, cuando tiene efecto, esta restricción hace que aumente ligeramente el coste de los sistemas de electrificación, dado que se deben juntar más usuarios en una misma microrred, lo que para la dispersión de las comunidades con que se trabaja no es tan rentable económicamente. El tiempo de cálculo disminuye puesto que, aunque aumenta el número de variables y restricciones, disminuyen las posibilidades de electrificación, quedando descartada toda solución que contemple más de las microrredes máximas impuestas.

Respecto a la restricción de “Número mínimo de usuarios por microrred”, en muchos casos la solución de los modelos sin la restricción ya cumple con la misma. Cuando sí influye, esta restricción tiende a incrementar el tamaño de las microrredes o bien a hacerlas desaparecer del todo, dependiendo del incremento de costo que cada opción suponga. El tiempo de cálculo se incrementa en la inmensa mayoría de casos, dado que si bien se limita en cierto modo el número de posibles soluciones, no compensa el aumento de complejidad que éstas suponen por el aumento de variables y restricciones.

Tal y como se ha visto a lo largo de todo el trabajo, la implementación de las restricciones de carácter social, modifica las soluciones de electrificación obtenidas. Por una parte, la configuración de los sistemas se ve alterada para adecuarse a las distintas imposiciones, mientras que los equipos de generación se ajustan a cada configuración. Por otra parte, el coste de las soluciones se incrementa. Sin embargo, este incremento es muy pequeño en comparación a los costes totales con los que se trata. Por último, con la implementación de estas restricciones, se obtienen unas mejoras sociales muy notables, tanto en la calidad del suministro, como en la gestión de los sistemas.





6. Estudio del impacto ambiental y socio-económico

A continuación se explican los impactos ambientales y socio-económicos de la electrificación rural con energías renovables en la sierra andina peruana.

6.1. Impacto ambiental

En relación al medio ambiente, existen impactos positivos e impactos negativos.

6.1.1. Impactos ambientales negativos

Todo sistema tiene su ciclo de vida, y al acabar éste los equipos deben ser sustituidos por nuevos. Los que ya no sirven deben ser reciclados para que no queden en estado de descomposición en medio de la comunidad, como ha sido el caso de muchos proyectos. El caso más relevante en los sistemas de electrificación estudiados es el de las baterías, las cuáles contienen sustancias tóxicas muy a tener en cuenta y más si se dejan en medio de la comunidad al alcance de niños y animales. Para ello, el modelo de gestión es básico a la hora de reducir los riesgos derivados del reciclaje.

Otro daño, aunque de importancia relativa es la ocupación del suelo, principalmente en el caso de los aerogeneradores. Éstos como es lógico requieren de un espacio (lo mismo que los paneles fotovoltaicos aunque el espacio ocupado por éstos es pequeño e incluso pueden ubicarse en los tejados de las viviendas) el cuál podría tener utilidades para la agricultura o la ganadería.

6.1.2. Impactos ambientales positivos

Previo a la implementación de energías renovables, la iluminación se realizaba con velas de keroseno o pilas secas, ambos elementos contaminantes. Su substitución por energías renovables es por tanto muy beneficiosa en cuanto a emisiones de CO₂, otros gases secundarios, etc.

Si bien es cierto que las tecnologías aplicadas (solar y eólica) requieren del uso de baterías, el número de éstas es bastante reducido de modo que la implementación de estas tecnologías elimina las mini baterías anteriormente utilizadas y que en finalizar su uso eran desechadas al suelo sin ningún tipo de prevención ambiental.

6.2. Impacto socio-económico

En cuanto a los impactos socio-económicos, no se destacan impactos negativos, únicamente positivos.

En primer lugar, el mayor beneficio a destacar es el dar acceso a la energía eléctrica a comunidades rurales que a las cuales la red eléctrica del país tardará mucho en llegar. Con esto se



permiten ciertas comodidades como el no paro de todas las actividades por las noches, el uso de televisores, radios o pequeños electrodomésticos.

Así mismo, son muy interesantes los beneficios que se aportan a escuelas y centros de salud, los cuales mejoran exponencialmente con el acceso a la electricidad. En el caso de las escuelas, se da un mayor acercamiento a los estudiantes a las nuevas tecnologías, preparándolos mejor para su futuro. En cuanto a los centros de salud, se permite una mejora en la calidad de vida, dando acceso a vacunas o pequeñas operaciones que no se podrían realizar sin electricidad.

Se favorece también el aumento de los ingresos económicos de las familias con la aparición de micro industrias o comercios a escala local.

Por último, con la incorporación de las numerosas restricciones de tipo social en los modelos, se consigue un ajuste de los sistemas de electrificación a las realidades de cada comunidad. La herramienta generada, permite seleccionar numerosas variaciones en las configuraciones con el objetivo de facilitar los modelos de gestión y la sostenibilidad de los proyectos, además de asegurar un suministro de calidad, facilitando así la integración de los proyectos en los beneficiarios.



7. Presupuesto

Aquí se expone el presupuesto para el proyecto realizado. Se considera que el autor del proyecto pertenece a una ingeniería a la cual le encargan el proyecto. La duración del mismo es de 5 meses, febrero a junio 2010. En la siguiente tabla, se desglosan por partidas los distintos costes del proyecto, añadiendo al final imprevistos, beneficios e impuestos.

Presupuesto		
Personal	860h*20€/h	17200 €
Desplazamientos y dietas	8 salidas de 1 día 100km/visita*0,4€/km + 2€/visita	336 €
Hardware	1 ordenador de trabajo 350€*80%uso 1 ordenador de cálculos 1000€*50%uso	780 €
Software	Licencia ILOG 3000€*60%uso	1800 €
Fungibles	Electricidad, Internet, consumibles de oficina	100 €
Presupuesto de ejecución		20216 €
Imprevistos (5%)		1011 €
Beneficio industrial (10%)		2022 €
Presupuesto sin IVA		23248 €
IVA (16%)		3720 €
Presupuesto total		26968 €

Tabla 7.1. Presupuesto para la realización del proyecto

De las citadas horas de Ingeniería, a continuación se realiza un desglose de las actividades a las cuales el autor del presente trabajo ha dedicado sus horas.

Desglose de horas de Ingeniería	Horas	Coste
Planificación y definición de objetivos	20h	500€
Documentación y formación del ingeniero	20h	2000€
Formación del ingeniero para usar ILOG	30h	1000€
Diseño de modelos matemáticos	260h	8400€
Implementación en ILOG	140h	3600€
Visitas a Campo	60h	3000€
Experimentación preliminar	120h	3000€
Experimentación detallada	90h	4000€
Análisis de resultados	70h	2000€
Generación de la documentación	50h	1000€
Total	860h	28500€

Tabla 7.2. Desglose de las horas de Ingeniería





Conclusiones

El presente trabajo tiene como objetivo mejorar modelos matemáticos de programación lineal que optimizan la electrificación rural con tecnologías eólica y solar y que permiten la implementación de microrredes como alternativa a los sistemas de electrificación individual. Manteniendo como función objetivo la minimización del coste final, se incorporan hasta 6 restricciones de tipo social que suponen una mejora en la seguridad y calidad del suministro energético y una ayuda a la gestión de los sistemas de electrificación.

Para mejorar la continuidad del suministro energético, se propone imponer un mínimo de la energía producida con aerogeneradores o con paneles fotovoltaicos, según si en la región existe menor variabilidad del recurso solar o eólico, respectivamente. Se propone también establecer que cada punto de consumo sea abastecido por un número mínimo de equipos de generación, consiguiendo que, si un equipo se avería, el suministro energético no sea totalmente interrumpido. Estas restricciones son directamente incorporadas al modelo de partida.

Para facilitar la gestión de los sistemas de electrificación, se proponen 4 variaciones al modelo de partida. En primer lugar, se propone que todos los usuarios dispongan de medidor (en vez de únicamente los pertenecientes a microrred), logrando mayor equidad en la tarifa de pago de cada usuario. En segundo lugar, se propone imponer un número máximo de usuarios independientes favoreciendo así las microrredes y sus ventajas. En tercer lugar se propone imponer un número máximo de microrredes, limitando así los problemas de gestión comunitaria derivados del exceso de microrredes. Finalmente, se propone imponer un número mínimo de usuarios por microrred, de modo que si se realiza un esfuerzo en la gestión de una microrred, ésta alcance a un número suficiente de usuarios.

Para las restricciones que afectan a la gestión de los sistemas de electrificación se realizan dos experimentaciones. En primer lugar se realiza una experimentación preliminar con el fin de decantarse por la manera más eficiente de modelizar las restricciones. Para ello, se plantean dos vertientes, ya sea modelizando el conjunto de usuarios que conforman cada microrred (vertiente 1) o reflejando todas las configuraciones posibles para cada punto de consumo (vertiente 2). Este proceso se valida en 5 comunidades de la sierra andina peruana, cuyos proyectos ha llevado a cabo o está llevando a cabo la ONG *Soluciones Prácticas – ITDG* (Perú) en colaboración con las ONG *Ingeniería Sin Fronteras* (España, Cataluña) y *Green Empowerment* (EEUU), y la universidad *Universitat Politècnica de Catalunya* (España, Cataluña). 3 de las comunidades han sido ya electrificadas (El Alumbre, Alto Perú y Cerro Alto) y 2 están por electrificar (Alto Perú parte Norte y Alto Perú parte Sur). Se consideran para cada comunidad 3 escenarios de oferta energética. Tras analizar los resultados, se obtiene que la manera más eficiente, es decir con menores tiempos de cálculo, es reflejando todas la situaciones posibles para cada punto de consumo (vertiente 2).

Obtenida la mejor forma de implementación de las restricciones, se pasa, en segundo lugar, a la experimentación propiamente dicha, la cual analiza la influencia de las restricciones en las soluciones de electrificación del problema. Para ello, se experimenta con las 2 partes de las



comunidad de Alto Perú por electrificar y 2 escenarios de oferta energética para cada comunidad. La experimentación consiste en la combinación de las 4 restricciones entre sí, asignando 2 posibles valores a cada una de ellas: o bien que no se implemente o bien que se implemente con un valor dado. Esto da un total de 14 modelos por cada uno de los 4 casos de comunidad y escenario de oferta energética. Las soluciones a estos modelos son posteriormente contrastadas entre sí.

La comparación de las soluciones permite ver si el incremento del costo que supone la aplicación de cada una de las restricciones es compensado por los beneficios de cada una de ellas. La restricción de los medidores, provoca un ligero aumento de los costes a cambio de una mejora en la gestión de los sistemas de electrificación, sin que ello afecte a las soluciones obtenidas. La restricción del máximo número de usuarios, tiende a incrementar el número de usuarios que pertenecen a microrred, incrementando los beneficiarios que disponen de las mejoras que implica una microrred, a costa de un incremento del coste total muy bajo. La restricción de máximo número de microrredes, limita el número de microrredes que puede haber en una comunidad, con un pequeño incremento de coste pero ayudando notablemente a la mejora del modelo de gestión de la comunidad. Finalmente, la restricción del mínimo número de usuarios por microrred tiende a incrementar el número de usuarios que componen cada microrred a costa de un incremento relativamente bajo en el coste, haciendo que si se realiza un esfuerzo en gestionar una microrred, éste valga la pena al dar alcance a un gran número de beneficiarios. En cualquier caso, la inclusión de las restricciones que facilitan la gestión de las microrredes permite obtener unos beneficios sociales que compensan ampliamente los incrementos de coste.

En conclusión, con este trabajo se da la posibilidad a modelos de programación lineal ya existentes en cuanto a la electrificación rural, de incorporar para cada comunidad específica, componentes sociales que ayuden en la gestión de los sistemas de electrificación, con pequeñas mejoras técnicas. Se obtiene una herramienta de ayuda a la toma de decisiones por parte de los expertos en electrificación rural.



Agradecimientos

El autor del trabajo agradece el apoyo dado a lo largo de todo el proyecto a *ITDG Soluciones Prácticas* así como *Ingeniería Sin Fronteras* en el suministro de información, el asesoramiento de los avances del trabajo y el soporte logístico tanto en el trabajo de oficina como en las salidas a campo.

Bibliografía

Bautista, J.; Sempértégui, R.; Griñó, 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.

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.

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

Sempértégui, 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.

