

Diseño de sistemas autónomos de electrificación rural con consideraciones técnicas y sociales

Design of autonomous rural electrification systems with technical and social considerations,

Doménech B, Ferrer-Martí L¹, Pastor R

Abstract (English) Electrification systems based on the use of wind-PV energies, and combining microgrids and individual distribution, are suitable to electrify isolated communities autonomously. To its design, models considering technical and economic constraints exist. Among the possible solutions, some of them may have problems related to the supply's continuity or may be difficult to manage. This work aims to analyze these factors and proposes improvements to be incorporated in the models, which are validated through the application to the community of Alto Peru (Cajamarca, Peru). The conclusion is that the improvements allow obtaining solutions with social benefits that outweigh the small cost increases.

Resumen (Castellano) Los sistemas de electrificación basados en el uso de energía eólica y solar, y que combinan la distribución en microrred e individual, son adecuados para electrificar comunidades aisladas de forma autónoma. Para diseñarlos existen modelos que consideran restricciones técnicas y económicas. Entre las diferentes soluciones posibles, algunas pueden tener problemas en la continuidad del suministro o resultan difíciles de gestionar. Este trabajo analiza estos condicionantes y propone mejoras a incorporar en los modelos, que se validan mediante la aplicación a la comunidad de Alto Perú (Cajamarca, Perú). Se demuestra que las mejoras propuestas permiten obtener unas soluciones con unos beneficios sociales que compensan ampliamente los pequeños incrementos de coste.

Keywords: Rural electrification, wind energy, solar energy, microgrids; **Palabras clave:** Electrificación rural, energía eólica, energía solar, microrredes

¹ Laia Ferrer-Martí (✉)

Instituto de Organización y Control (IOC). Departamento de Ingeniería Mecánica (DEM).
Departamento de Organización de Empresas (DOE). Universitat Politècnica de Catalunya
(UPC), Avda. Diagonal 647, 08028 Barcelona, Spain
e-mail: laia.ferrer@upc.edu

1 Introducción

La estrategia convencional para dar acceso a la electricidad consiste en extender el interconectado, pero esto presenta limitaciones al llegar a zonas de difícil acceso y con gran dispersión de viviendas. Los sistemas de electrificación basados en el uso de energía híbrida (eólica y solar) son adecuados para electrificar comunidades aisladas de forma autónoma (Chaureya *et al.*, 2004). Dada la dispersión entre viviendas, la solución más frecuente consiste en la implementación de sistemas individuales (generación, acumulación y distribución en cada usuario, como viviendas, escuelas o centros de salud). Sin embargo, esta solución presenta numerosas limitaciones. Como alternativa se propone el uso de microrredes (un único punto de generación para abastecer a varios usuarios), que conllevan numerosas ventajas (Kirubi *et al.*, 2009). En primer lugar no se condiciona el consumo de un usuario al potencial energético de su ubicación. En segundo lugar se favorece la igualdad en el consumo entre usuarios (al depender de los mismos generadores). En tercer lugar se pueden ahorrar costes por economías de escala (al concentrar los puntos de generación se utilizan equipos de mayor potencia y menor ratio coste/energía producida). Finalmente, se permite mayor flexibilidad en el consumo (se puede incrementar puntualmente el consumo por motivo de días especiales, adhesión de nuevos usuarios o desarrollo de actividades productivas). Sin embargo, las microrredes dificultan el diseño de los sistemas al ser necesario un compromiso entre la extensión de microrredes (y la subsiguiente mejora en la calidad del servicio) y el posible incremento del coste.

Hasta la fecha, existen modelos matemáticos de programación lineal entera y mixta que consideran la tecnología eólica (Ferrer-Martí *et al.*, 2011) o la tecnología híbrida (Ferrer-Martí *et al.*, en revisión). Estos consideran el detalle de los recursos energéticos, la demanda en cada usuario, el almacenamiento en baterías y la distribución con microrredes y sistemas individuales. Los modelos minimizan el coste de la inversión inicial (Ashok, 2007) 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 rural han permitido identificar que es necesario que el diseño de los sistemas de electrificación considere, además, aspectos sociales para facilitar la integración de los sistemas por parte de los usuarios y, así, asegurar la sostenibilidad de los proyectos. En este trabajo² se proponen ampliaciones al modelo matemático desarrollado por Ferrer-Martí *et al.* (en revisión) con el objetivo de mejorar la continuidad del suministro energético y facilitar la gestión de los sistemas de electrificación (Domenech, 2011). La pertinencia de las mejoras propuestas se valida mediante la aplicación a dos partes de la comunidad real de Alto Perú (Cajamarca, Perú).

² Proyecto financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España, proyecto ENE2010-15509, cofinanciado por FEDER y el Centro de Cooperación al Desarrollo de la Universitat Politècnica de Catalunya. Los autores agradecen el apoyo brindado por Soluciones Prácticas (Perú) e Ingeniería Sin Fronteras (Cataluña y Valencia, España).

2 Descripción de los Sistemas de Electrificación Rural

El diseño de sistemas autónomos de electrificación rural (Ferrer-Martí *et al.*, 2011) se inicia en los *aerogeneradores* y *paneles fotovoltaicos* que producen electricidad que se almacena en *baterías*. Los *reguladores* protegen las baterías de sobrecargas y descargas profundas. Los *inversores* transforman la corriente continua que sale de las baterías en alterna, más adecuada para la mayoría de aparatos eléctricos. La energía se distribuye a través de los *conductores* en forma de microrred radial (forma de árbol). Los *medidores* controlan el consumo de los usuarios.

Diversas experiencias en electrificación rural han permitido identificar ciertas debilidades en los sistemas: falta de continuidad en el suministro energético y dificultades en la gestión. A continuación se presentan estas debilidades y soluciones de diseño adecuadas para mitigarlas.

- *Falta de energía por averías.* Muchas comunidades rurales están alejadas de los centros poblados donde reparar equipos averiados, ralentizando la reparación. Es recomendable que el suministro no dependa de un único equipo de generación; así, en caso de avería de un equipo, los demás siguen suministrando.
- *Falta de energía por falta de recurso energético.* Pese a la existencia de baterías para suplir períodos sin generación, existe el riesgo de quedarse sin energía si el periodo sin generación supera lo previsto. Es recomendable que un mínimo de la energía provenga del recurso solar, menos variable que el eólico.
- *Calidad de suministro.* El suministro energético con microrredes presenta ventajas respecto al individual: equidad en el suministro, flexibilidad en el consumo, etc. Es conveniente extender las microrredes al máximo posible.
- *Gestión y pago de la tarifa.* La dificultad de la gestión del sistema se incrementa al combinar varias microrredes y puntos individuales. Es recomendable evitar proyectos con muchas microrredes pequeñas. Además, es interesante estudiar el instalar medidores en todos los usuarios (para un control del consumo de cada usuario y un pago en relación al consumo) o únicamente en los puntos en microrred (para ahorrar costes y un mismo pago en usuarios sin medidor).

3 Modelo Matemático

Para la modelización y resolución del problema se propone ampliar el modelo de Ferrer-Martí *et al.* (en revisión), tal y como se puede ver en Domenech (2011). Se incorporan directamente al modelo 2 mejoras para aumentar la continuidad del suministro y se estudia la incorporación (o no) de 4 mejoras para facilitar la gestión de los sistemas de electrificación. La modelización de estas mejoras se realiza con la máxima modularidad posible en las restricciones, de modo que cada restricción se pueda utilizar en más de una mejora. A continuación se presentan los parámetros, variables y restricciones relacionados las mejoras propuestas.

3.1 Parámetros

D	Usuarios (viviendas, escuelas, postas de salud, etc.).
L_{pd}	Distancia [m] entre los usuarios p y d ; $p = 1, \dots, D$; $d = 1, \dots, D$.
L_{max}	Distancia máxima [m] con que pueden unirse 2 usuarios.
Q_p	Conjunto de usuarios d con que el usuario p puede unirse; $p = 1, \dots, D$; $d = 1, \dots, D$; $p \neq d$; $L_{pd} \leq L_{max}$.
ED_d	Demanda de energía [Wh/día] del usuario d ; $d = 1, \dots, D$.
A	Tipos de aerogeneradores; $a = 1, \dots, A$.
S	Tipos de paneles fotovoltaicos; $s = 1, \dots, S$.
C	Tipos de conductores; $c = 1, \dots, C$.
EA_{da}	Energía generada [Wh/día] por un aerogenerador de tipo a situado en el usuario d ; $d = 1, \dots, D$; $a = 1, \dots, A$.
ES_{ds}	Energía generada [Wh/día] por un panel fotovoltaico de tipo s situado en el usuario d ; $d = 1, \dots, D$; $s = 1, \dots, S$.
η_b	Rendimiento de las baterías [fracción de unidad].
η_i	Rendimiento de los inversores [fracción de unidad].
η_c	Rendimiento de los conductores [fracción de unidad].
E_{min}	Número mínimo de equipos de generación en cada punto de generación.
SOL	Mínimo porcentaje de energía proveniente de paneles fotovoltaicos.
U_{indep}	Número máximo de usuarios individuales.
N_{max}	Número máximo de microrredes.
U_{min}	Número mínimo de usuarios por microrred.

3.2 Variables

xa_{da}	Variable entera que indica el número de aerogeneradores de tipo a instalados en el usuario d ; $d = 1, \dots, D$; $a = 1, \dots, A$.
xs_{ds}	Variable entera que indica el número de paneles fotovoltaicos de tipo s instalados en el usuario d ; $d = 1, \dots, D$; $s = 1, \dots, S$.
z_d	Variable binaria que vale 1 si el usuario d es de generación; $d = 1, \dots, D$.
xc_{pdc}	Variable binaria que vale 1 si el usuario p se une con el usuario d con un conductor de tipo c ; $p = 1, \dots, D$; $d \in Q_p$; $c = 1, \dots, C$.
fe_{pd}	Variable real que indica el flujo de energía [Wh/día] que circula entre los usuarios p y d ; $p = 1, \dots, D$; $d \in Q_p$.
xm_d	Variable binaria que vale 1 si el punto d es de microrred; $d = 1, \dots, D$.
xmg_d	Variable binaria que vale 1 si el usuario d es de microrred y además es de generación; $d = 1, \dots, D$.
xf_{pdf}	Variable binaria que vale 1 si entre los usuarios p y d existe un flujo de energía con destino al usuario f ; $p = 1, \dots, D$; $d \in Q_p$; $f = 1, \dots, D$.

3.3 Restricciones

Número mínimo de equipos de generación. La restricción (1) se incorpora directamente al modelo de partida y establece que cada usuario sea abastecido con, al menos, un cierto número E_{min} de equipos de generación.

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

Mínimo porcentaje de energía generada con paneles fotovoltaicos. La restricción (2) se incorpora directamente al modelo y establece que la demanda energética de cada usuario sea cubierta con un mínimo porcentaje SOL de paneles.

$$\sum_{p=1|d \in Q_p}^D f e_{pd} + \sum_{s=1}^S E s_{ds} \cdot x s_{ds} \geq SOL \cdot \left(\sum_{q \in Q_d} f e_{dq} + \frac{E D_d}{\eta_b \eta_l} \left(\frac{1}{\eta_c} + \left(1 - \frac{1}{\eta_c}\right) \cdot z_d \right) \right) \quad d = 1, \dots, D \quad (2)$$

Número máximo de usuarios individuales. Las restricciones (3), (4) y (5) establecen que los medidores se instalan únicamente en usuarios de microrred (con algún conductor de entrada o salida). La restricción (6) limita los usuarios individuales: debe haber más usuarios con medidor (en microrred), que la diferencia entre el total de usuarios y el número máximo U_{indep} de usuarios individuales.

$$\sum_{q \in Q_d} \sum_{c=1}^C x c_{dq_c} \leq (D - 1) \cdot x m_d \quad d = 1, \dots, D \quad (3)$$

$$\sum_{p=1|d \in Q_p}^D \sum_{c=1}^C x c_{pdc} \leq x m_d \quad d = 1, \dots, D \quad (4)$$

$$\sum_{p=1|d \in Q_p}^D \sum_{c=1}^C x c_{pdc} + \sum_{q \in Q_d} \sum_{c=1}^C x c_{dq_c} \geq x m_d \quad d = 1, \dots, D \quad (5)$$

$$\sum_{d=1}^D x m_d \geq D - U_{indep} \quad (6)$$

Número máximo de microrredes. Se utilizan las restricciones (3), (4) y (5). Las restricciones (7) y (8) establecen que si un usuario es de microrred (tiene medidor) y genera, la variable xmg_d vale 1. La restricción (9) limita el número de usuarios de generación y pertenecientes a microrredes, es decir, el número de microrredes.

$$z_d + x m_d - 1 \leq x m g_d \quad d = 1, \dots, D \quad (7)$$

$$z_d + x m_d - 2 \geq \frac{D}{2} (x m g_d - 1) \quad d = 1, \dots, D \quad (8)$$

$$\sum_{d=1}^D x m g_d \geq N_{max} \quad (9)$$

Número mínimo de usuarios por microrred. Se utilizan las restricciones (3), (4), (5), (7) y (8). La restricción (10) establece que entre dos usuarios, el flujo de

energía es la suma de los flujos de energía con destino a los distintos usuarios que se abastecen. La restricción (11) establece que para cada usuario d debe existir, al menos, un flujo de energía que provenga de otro usuario p y con destino al propio d , salvo que d genere. Las restricciones (12) y (13) añaden que si un flujo entra a un punto con destino a otro, debe salir del primer punto. La restricción (14) limita el mínimo de flujos de energía que salen de un punto de generación de microrred: los usuarios abastecidos por ese punto menos uno (el propio punto de generación).

$$fe_{pd} \geq \sum_{f=1}^D xf_{pdf} \cdot \frac{ED_f}{\eta_b \cdot \eta_i \cdot \eta_c} \quad p = 1, \dots, D; d \in Q_p \quad (10)$$

$$\sum_{p=1|d \in Q_p}^D xf_{pdd} + z_d \geq 1 \quad d = 1, \dots, D \quad (11)$$

$$\sum_{p=1|d \in Q_p}^D xf_{pdf} + z_d \geq \sum_{q \in Q_d} xf_{dqf} \quad d = 1, \dots, D; f = 1, \dots, D; d \neq f \quad (12)$$

$$\sum_{p=1|d \in Q_p}^D xf_{pdf} \leq \sum_{q \in Q_d} xf_{dqf} \quad d = 1, \dots, D; f = 1, \dots, D; d \neq f \quad (13)$$

$$\sum_{q \in Q_d} \sum_{f=1}^D xf_{dqf} \geq xmg_d \cdot (U_{min} - 1) \quad d = 1, \dots, D \quad (14)$$

Medidores en todos los usuarios. La función objetivo minimiza el coste de la inversión inicial: suma del coste de aerogeneradores, paneles, conductores, baterías, inversores, reguladores y medidores. Según si se desea instalar un medidor en cada usuario o únicamente en microrredes, el coste de los medidores se multiplica por el número de usuarios o por el número de usuarios en microrred, respectivamente. En el segundo caso, además, se añaden las restricciones (3), (4) y (5).

4 Resultados y Análisis de la Experimentación

Para estudiar la influencia de las mejoras propuestas sobre las soluciones, se realiza una experimentación en 2 partes de la comunidad de Alto Perú en Cajamarca, Perú (Ramírez & Mantilla, 2009). Se trata de la parte Norte (13 viviendas) y la parte Sur (9 viviendas), electrificadas con sistemas solares individuales por Soluciones Prácticas (Perú) e Ingeniería Sin Fronteras (España). Ambas partes están a unos 3.650 m.s.n.m, con una temperatura anual media de 8°C, recurso solar medio-alto y recurso eólico bajo. Se consideran 2 escenarios de demanda: baja (energía: 280Wh/día; potencia: 200W) para cubrir necesidades energéticas básicas y alta (energía: 420Wh/día; potencia: 300W) para favorecer actividades productivas.

Al aplicar el modelo de Ferrer-Martí *et al.* (en revisión) en ambas partes de la comunidad, las soluciones obtenidas sólo utilizan la tecnología solar debido al bajo recurso eólico y a que los paneles son muy adaptables a los pequeños consumos con que se trabaja. Además, en los usuarios individuales se utiliza un único equipo

mientras que en algunas microrredes existe un excedente de generación. Así, imponer un mínimo porcentaje de energía generada con paneles fotovoltaicos no tiene una influencia significativa en las soluciones. Por su parte, imponer un número mínimo de equipos de generación implica que electrificar en microrred permita aprovechar excedentes de generación mientras que electrificar individualmente requiere utilizar más equipos de menor potencia (lo que resulta más costoso). El coste aumenta entorno un 4,5% en demanda baja y un 13,3% en demanda alta.

Para estudiar la pertinencia de las mejoras propuestas para facilitar la gestión de los sistemas, se proponen unos valores para cada mejora. Así, se estudia instalar medidores en todos los usuarios o únicamente en microrredes, limitar (o no) a un máximo del 25% de usuarios individuales, limitar (o no) a un máximo de 1 microrred y limitar (o no) a un mínimo del 25% de usuarios por microrred.

Incorporando (o no) cada mejora, se obtienen 16 ejemplares, de los que 2 se descartan por ser repeticiones. Así, en total se tienen 4 casos (2 zonas de la comunidad con 2 escenarios de demanda) y 14 ejemplares para cada caso. Cada uno de los 56 cálculos se resuelve con un PC Intel Core Duo T5870 con 2,87 Gb de RAM y un tiempo máximo de cálculo de 18000 segundos. En la Tabla 4.1 se exponen, a modo de ejemplo, las soluciones para Alto Perú parte Norte con demanda baja.

Tabla 4.1 Resultados de la experimentación en Alto Perú parte Norte con demanda baja

		Us. indep. libre		Máx. 25% us. indep.	
		Us./mred libre	Mín 25% us./mred	Us./mred libre	Mín 25% us./mred
Medidor en usuarios de mred	Nº mred libre	Coste [\$]	20705	20717	21452
		Tiempo [s]	18000,0	18000,0	16014,0
	Máx. 1 mred	Nº mredes	1	1	3
		Us. indep	10	10	4
Medidor en todos los usuarios	Nº mred libre	Coste [\$]	20705	20705	22820
		Tiempo [s]	489,0	6610,5	414,6
	Máx. 1 mred	Nº mredes	1	1	1
		Us. indep	10	10	4
	Nº mred libre	Coste [\$]	21115	21217	21652
		Tiempo [s]	16687,4	18000,0	18000,0
	Máx. 1 mred	Nº mredes	2	1	3
		Us. indep	8	10	4
	Nº mred libre	Coste [\$]	21205	21217	23020
		Tiempo [s]	392,4	18000,0	698,4
	Máx. 1 mred	Nº mredes	1	1	1
		Us. indep	10	10	4

Todos los usuarios con medidor. El coste de electrificar un usuario individual se incrementa respecto a la electrificación en microrred, pero de forma poco significativa (el coste del medidor es muy pequeño frente a los demás componentes). En consecuencia se incrementa el coste de las soluciones de forma proporcional al número de usuarios individuales y sin que se modifique el resto de la solución.

Número máximo de usuarios individuales. Disminuye el número de usuarios individuales, por adhesión a microrredes existentes o por formación de nuevas mi-

corredes, según la cercanía entre usuarios y la existencia de otras restricciones. El coste se incrementa (aunque de forma poco significativa) puesto que por la dispersión entre usuarios, resulta más económico electrificar individualmente.

Número máximo de microrredes. Al combinar esta restricción con la de *Número máximo de usuarios individuales* (que tiende a aumentar el número de microrredes), se limita el número de microrredes a cambio de aumentar el tamaño de las mismas. El coste se incrementa ligeramente al unir usuarios dispersos.

Número mínimo de usuarios por microrred. Se incrementa el tamaño de las microrredes o bien éstas desaparecen, según lo que resulte menos costoso. El coste se incrementa de forma poco significativa frente al coste total de las soluciones.

5 Conclusiones

Este trabajo busca mejorar el diseño de sistemas autónomos de electrificación rural para adecuarlo a las características sociales de cada comunidad a electrificar. Para ello se amplían modelos matemáticos previamente existentes. En concreto se incorporan directamente al modelo 2 restricciones para mejorar la continuidad del suministro energético y se proponen 4 restricciones para facilitar la gestión de los sistemas.

Mediante una experimentación aplicada a la comunidad de Alto Perú (Cajamarca, Perú), se estudia la pertinencia de las restricciones propuestas. Los resultados obtenidos muestran que las mejoras permiten obtener unas soluciones con unos beneficios sociales que compensan ampliamente los incrementos de coste.

6 Referencias

- Ashok S (2007) Optimized model for community-based hybrid energy system. *Renewable Energy*, 32:1155–1164
- Chauvrey A, Ranganathana M, Mohanty P (2004) Electricity access for geographically disadvantaged rural communities – Technology and policy insights. *Energy Policy*, 32:1693–1705
- Domenech B (2011) Modelo para el diseño de proyectos de electrificación rural con consideraciones técnicas y sociales. Proyecto Final de Carrera de Ingeniería Industrial, Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona – Universitat Politècnica de Catalunya. Tutores: Ferrer-Martí L, Pastor R
- Ferrer-Martí L, Pastor R, Capó GM, Velo E (2011) Optimizing microwind rural electrification projects. A case study in Peru. *Journal of Global Optimization* 50:127-143
- Ferrer-Martí L, Domenech B, García-Villoria A, Pastor R (en revisión) A MILP model to design hybridphotovoltaic isolated rural electrification projects in developing countries. *European Journal of Operational Research*
- Kirubi C, Jacobson A, Kammen DM, Mills A (2009) Community-based electric micro-grids can contribute to rural development: Evidence from Kenya. *World Development* 37:1208–1221
- Ramirez B, Mantilla W (2009) Diagnóstico socioeconómico del caserío de Alto Perú. Soluciones Prácticas, Cajamarca, Perú