

Heurística basada en un indicador de demanda y potencial para diseñar sistemas de electrificación

Heuristics based on a potential and demand indicator for the design of electrification projects

Ranaboldo M¹, Ferrer-Martí L, García-Villoria A, Pastor R

Abstract (English) Electrification Systems based on renewable energies that consider micro-grid utilization are a reliable solution in order to supply energy to isolated communities. A new method based on a heuristic for design optimization of off-grid electrification projects at community scale through the use of wind and solar energy is proposed in this study. The heuristic considers the spatial variability of the wind resource and is based on the definition of an index that values the selection of a grid generation point. The performance of the algorithm is evaluated in real and fictitious communities; the proposed algorithm reduces the costs obtained by the model encountered in literature in all analyzed cases.

Resumen (Castellano) Los sistemas basados en el uso de energías renovables que contemplan el uso de microrredes son una opción adecuada para proveer electricidad a comunidades aisladas. En este estudio² se propone un nuevo procedimiento heurístico para el diseño de proyectos de electrificación autónomos a escala comunitaria mediante energías eólica y solar. La heurística considera la variabilidad espacial del recurso eólico y se basa en la definición de un indicador que valora la selección del punto de generación de una microrred. El algoritmo se aplica a casos reales y generados aleatoriamente y los resultados se comparan con un programa publicado en la literatura: el algoritmo propuesto reduce el coste de las soluciones obtenidas en todos los casos probados.

Keywords: rural electrification, design optimization, renewable energy, heuristics, off-grid generation; **Palabras clave:** electrificación rural, optimización del diseño, energías renovables, heurísticas, generación autónoma

¹ Matteo Ranaboldo (✉)

Departamento de Ingeniería Mecánica. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC),
Avda. Diagonal 647, 08028, Barcelona. e-mail: matteo.ranaboldo@upc.edu

² Proyecto financiado por la beca FPU AP2009-0738 del MEC y cofinanciado por el proyecto ENE2010-15509 del MICINN, FEDER y el Centro de Cooperación al Desarrollo de la UPC.

1. Introducción

Los sistemas de electrificación basados en el uso de energías renovables, tales como la solar y la eólica, han demostrado ser adecuados para proveer de forma autónoma electricidad a comunidades aisladas: estos sistemas producen electricidad de forma limpia y respetuosa al medio-ambiente y su coste es muchas veces inferior al de extender la red eléctrica nacional (Chaurey et al, 2004). Además, utilizando recursos disponibles localmente, estos sistemas no dependen de recursos externos, aumentando así su sostenibilidad a largo plazo (Baños et al, 2011). Por otro lado, una de las grandes problemáticas de los recursos renovables es su elevada dispersión y variabilidad. En ese contexto, la implementación de sistemas híbridos que combinen diferentes recursos y el uso de microrredes son opciones que han resultado ser muy útiles para disminuir los costes de instalación, aumentar la eficiencia del sistema y la seguridad de suministro (Ashok, 2007).

En las últimas décadas se han desarrollado diferentes procedimientos para la optimización del diseño de sistemas híbridos (Baños et al, 2011); la mayoría de estos estudios optimizan los equipos de generación, control y almacenamiento de la energía en un único punto de generación y no consideran la variabilidad espacial del recurso eólico que puede ser muy importante en pequeña escala sobretodo en sitios montañosos (Ferrer-Martí et al, 2009). El único algoritmo heurístico conocido que considere la variabilidad del recurso, sistemas híbridos y admita puntos de generación independientes y la creación de microrredes es VIPOR (Lambert y Hittle (2000)). El algoritmo utiliza una heurística greedy para encontrar una solución inicial y luego aplica un recocido simulado (Kirkpatrick et al., 1983) para mejorarla. Las principales limitaciones de VIPOR son: el limitado número de posibles puntos de generación de microrred considerados, la no-consideración de los equipos eléctricos a instalar (baterías, inversores, reguladores) y el hecho de considerar constante el recurso para la generación individual.

Recientemente, (Ferrer-Martí et al, 2011; Capo, 2009) han desarrollado un modelo matemático que optimiza la localización de las microrredes y equipos de generación eólica y solar tomando en cuenta las caídas de tensión a lo largo de los cables, definiendo los diferentes equipos eléctricos a instalar y considerando todos los puntos de consumo como puntos de posible generación de una microrred, con diferente potencial eólico en cada punto. El modelo ha sido implementado con buenos resultados para el diseño de proyectos de electrificación en el Perú aunque al aumentar el número de puntos de consumo considerados, los tiempos de cálculo del modelo matemático exacto aumentan exponencialmente.

En este estudio se describe un nuevo procedimiento heurístico para el diseño de proyectos de electrificación autónomos a escala comunitaria mediante energías eólica y solar. En el apartado 2 se describe la heurística propuesta basada en un indicador para la selección de los puntos de generación de microrredes; en el apartado 3 se analizan los resultados obtenidos comparándolos con los de VIPOR y finalmente se resumen las conclusiones.

2. Descripción del indicador y de la heurística propuesta

El diseño de un sistema autónomo, i.e. aislado de la red nacional, de electrificación de un área mediante recursos locales es un problema de optimización combinatoria (Ferrer-Martí et al, 2011). El problema básico trata de decidir el número y la localización de los generadores y demás equipos eléctricos para cubrir la demanda de energía y potencia de un cierto número de usuarios en un área, utilizando una combinación de microrredes y puntos independientes de generación (Capo, 2009). Un sistema de generación autónoma está compuesto por: equipos de generación (paneles solares y aerogeneradores), almacenamiento (baterías), control (reguladores, inversores y medidores) y transporte (cables) de la electricidad. Los datos de entrada del algoritmo heurístico son: localización y demanda diaria de energía de las casas/usuarios, mapas del recurso eólico y solar del área (el recurso solar generalmente se considera constante), características de los generadores eólicos y solares disponibles (coste y producción diaria de energía estimada) y características de los demás equipos eléctricos (coste y capacidad/potencia).

La heurística que se propone (descrita en el apartado 2.2) se basa en un indicador, descrito en el apartado 2.1, para la selección del punto de generación de una microrred e incorpora ideas de los procedimientos GRASP (Feo y Resende, 1995) y del recocido simulado (SA; Kirkpatrick, 1983) para escapar de óptimos locales.

2.1 Indicador propuesto

Para que un punto sea de generación de microrred tiene que tener 2 características principales: tener un buen potencial con respecto a los puntos que tiene alrededor y tener una elevada concentración de demanda alrededor suyo. Se proponen, entonces, 2 indicadores, uno de densidad de potencial (apartado 2.1.1) y uno de densidad de demanda (apartado 2.1.2), que valoren estas 2 características. Finalmente, el indicador de generación de microrred se calcula combinando estos 2 indicadores, tal como está descrito en el apartado 2.1.3. Estos indicadores son dinámicos y se van calculando en cada ciclo del algoritmo, como descrito en el apartado 2.2.

2.1.1 Densidad de Potencial (TPD)

Para considerar ambos recursos (eólico y solar) se propone utilizar un indicador de potencial P (ecuación (2.1)) que relacione la demanda de energía ED con el coste mínimo de generación CG para cubrir la demanda ED .

$$P(ED) = \frac{ED}{CG(ED)} \quad (2.1)$$

Generalmente, el incremento del indicador P va disminuyendo al aumentar la demanda de energía considerada, hasta alcanzar el ratio (Demanda de energía cubierta / Coste Generación) del aerogenerador de mayor potencia. Cabe destacar que esta tendencia no es constante y puede haber varios escalones debido a las diferentes combinaciones óptimas de generación (combinaciones híbridas de aerogeneradores y paneles) que se obtienen al variar la demanda de energía. Para evitar estos escalones y como no se conoce de entrada cuál va a ser la demanda de energía (cuántos puntos se van a conectar desde un posible punto de generación), se propone utilizar un indicador que considere el promedio del ratio P para diferentes demandas. Las diferentes demandas considerarían los diferentes números de puntos de consumo que se supone se puedan conectar a la microrred. Así, el indicador TP_i (Total Potential) del punto i es el promedio de P al variar la demanda de energía que se cubre (ecuación 2.2): ED_j es la demanda de energía del punto j , $PP_i(k)$ es el conjunto de los k puntos más próximos a i , N_i es el nº de puntos alrededor de i en un radio L_{ref} (tamaño máximo indicativo de una microrred).

$$TP_i = \frac{\sum_{k=1}^{N_i} P \left(\sum_{j \in PP_i(k)} ED_j \right)}{N_i} \quad (2.2)$$

$$TPD_i = \sum_{j \in P0} \frac{TP_i - TP_j}{L_{ij}} L_{ij} \leq L_{ref} \quad (2.3)$$

El indicador de densidad de potencial de un punto i (TPD_i , ecuación (2.3)) es la suma de las diferencias de potencial entre el potencial del punto i (TP_i) y los potenciales de los puntos de consumo $P0$ en un radio L_{ref} alrededor de i (TP_j), ponderados por la distancia L_{ij} entre el punto i y el punto j . $P0$ es el conjunto de puntos de consumo que aún no se han conectado a ninguna microrred. Finalmente, la densidad de potencial TPD_i se normaliza según el máximo TPD_i de la comunidad, si TPD_i del punto es positivo, o según el mínimo, si TPD_i es negativo (para que varíe entre -1 y 1).

2.1.2 Densidad de Demanda (EDD)

La densidad de demanda EDD_i se calcula según (2.4). Para su cálculo, se consideran todos los puntos de consumo j en un radio inferior a L_{ref} . Para no dar demasiada importancia a los puntos de consumo muy cercanos a i se establece que la distancia considerada L_{ij} no puede ser inferior a una distancia mínima L_{min} , que es un dato de entrada. Finalmente, para que el valor del indicador de densidad de demanda varíe entre 0 y 1, el EDD_i se normaliza según el mínimo y el máximo EDD_i de la comunidad.

$$EDD_i = \sum_{j \in P0} \frac{ED_j}{L_{ij}} \quad L_{ij} \leq L_{ref}. \text{ Si } L_{ij} < L_{min} \text{ entonces } L_{ij} = L_{min} \quad (2.4)$$

2.1.3 Grid Generation Score (GGS)

Con el fin de seleccionar el punto de generación de una microrred se propone utilizar un indicador, definido *GGS* (Grid Generation Score), que relacione los indicadores *TPD* y *EDD* de la siguiente forma (ecuación (2.5)).

$$GGS_i = (1 + TPD_i) * (1 + EDD_i) \quad (2.5)$$

De esta forma cuando el potencial de una comunidad es constante y el *TPD* es nulo (las diferencia de potencial alrededor de un punto son muy pequeñas) la probabilidad de seleccionar un punto como punto de generación dependerá únicamente de su densidad de demanda; mientras cuando la densidad de demanda de todos los puntos es constante el *GGS* depende solo de su densidad de potencial.

2.2 Descripción del algoritmo heurístico

El algoritmo heurístico que se describe a continuación, pretende minimizar el coste de instalación del sistema de electrificación cumpliendo con las demandas mínimas de energía y potencia de los usuarios. La heurística propuesta se basa en un algoritmo Multi-start en el se incorporan conceptos típicos del GRASP (Feo & Resende, 1995) y del recocido simulado (Kirkpatrick et al., 1983) para escapar de óptimos locales. El algoritmo utiliza el indicador *GGS* (apartado 2.1.3) para la selección del punto de generación de una microrred. Sucesivamente se van conectando puntos a la microrred, aceptando la conexión según el criterio de Metropolis, típico del recocido simulado. Los pasos de una iteración del algoritmo son:

- 1) Cálculo de la solución *S* con todos puntos de generación independiente (cada usuario genera la energía que consume). $P0 := P$ (conjunto total de puntos). $S_{min} := S$. Sea $C(S)$ el coste de la solución *S*
- 2) $PI := P$; $M := \emptyset$ es la microrred en construcción. Se calcula el indicador *GGS* para los puntos en *P0*. Se selecciona el punto de generación de una microrred (*X*) de forma aleatoria (con probabilidad proporcional al *GGS*) entre los primeros FI_1 puntos de *P0* ordenados de forma decreciente por su *GGS*. $M := M \cup \{X\}$; $P0 = P0 \setminus \{X\}$; $PI = PI \setminus \{X\}$; $T = T0$; $S0 := S1 := S_{min}$
- 3) Si quedan puntos a probar ($P0 \neq \emptyset$) se va al paso 4, si no se va al 6.
- 4) Se selecciona el punto *Y* a conectar a *M* de forma aleatoria (con probabilidad inversamente proporcional a la distancia mínima a la microrred) en-

tre los primeros FI_2 puntos de PI ordenados de forma no decreciente por la distancia mínima a M . El punto de generación se pone en el punto que minimiza el coste de M . Sea $M(Y)$ la microrred a la cual pertenece Y . Se actualiza la solución $S0$ de la cual ahora es parte $M(Y)$.

- 5) Criterio de aceptación: $C(S0) < C(SI)$ o con $Prob = \exp((C(SI) - C(S0))/T)$
En caso de aceptación: $M := M \cup M(Y)$; $PI := PI \setminus M(Y)$; $SI := S0$; $T := T * \alpha$.
 Si $C(SI) < C(S_{min})$ entonces $S_{min} := SI$; $P0 := P0 \setminus M(Y)$. Se vuelve al paso 3.
En caso contrario: se vuelve al paso 2.
- 6) Devuelve la solución de menor coste encontrada.

El algoritmo depende de unos parámetros típicos del GRASP y del Criterio de aceptación de Metrópolis que introducen aleatoriedad en el mismo (Tabla 1); el algoritmo completo consta de un Multi-start el cual lanza varias veces el algoritmo descrito anteriormente y finalmente devuelve la solución de menor coste entre las obtenidas por los diferentes lanzamientos. El número de iteraciones se limita dándole el tiempo de cálculo en entrada. Se propone que los 4 parámetros varíen durante el Multi-start en un rango (columna 4) previamente establecido que se introduce en entrada (entre paréntesis se muestra el incremento considerado).

Tabla 1 Parámetros que introducen aleatoriedad en el algoritmo

Heurística	Parámetro	Descripción	Rango
GRASP	FI_1	Tamaño de la lista de puntos candidatos para la selección del punto de generación de una microrred en función del GGS	2–4 (1)
	FI_2	Tamaño de la lista de puntos candidatos para la selección del punto a conectar a la microrred en función de la distancia	3 (constante)
Criterio de Metrópolis	T0	T0 es la temperatura (T) inicial	8–12 (2)
	α	α es el factor de disminución de la T en cada ciclo	0.8–1 (0.05)

3. Resultados

En este apartado se muestran las soluciones obtenidas por la heurística propuesta; se comparan los resultados de la heurística con los de VIPOR (Lambert y Hitfle, 2000). Se estudian 2 comunidades reales, El Alumbre y Alto Perú (Ferrer-Martí et al, 2009) de 26 y 33 puntos de consumo respectivamente y 4 ficticias: 2 de 30 puntos de consumo (CF1 y CF2) y 2 de 40 puntos de consumo (CF3 y CF4). Las comunidades ficticias se ha generado seleccionando puntos aleatorios en una cuadrícula de 50 x 50 m del mapa del recurso de la comunidad de El Alumbre; se han considerado 2 configuraciones de dispersión de las casas: 25% (CF1, CF3) y 50% (CF2, CF4) de las casas en el 20% del área. En cada comunidad se consideran 2 tipos de demanda de energía y potencia: demanda baja (280 Wh/día de energía y 200 W de potencia) y alta (560 Wh/día de energía y 400 W de potencia).

Los resultados con la heurística desarrollada son las mejores soluciones obtenidas con un tiempo de cálculo de 900 segundos (menos en el caso de El Alumbre demanda alta se obtienen más de 100 soluciones, ver la Tabla 2). Los parámetros del GRASP – Criterio de Metropolis se han hecho variar entre el rango de valores de Tabla 1. Los parámetros L_{min} y L_{ref} (apartado 2.1) se han considerado de 50 m y 2 Km. respectivamente. Con VIPOR se ha considerado la máxima precisión posible de los cálculos, con un tiempo de cálculo de pocos minutos; debido al carácter estocástico de su algoritmo la solución encontrada es variable: se ha lanzado el programa tantas veces cuantas caben en 900 s, guardando la solución mejor. Para que los resultados sean comparables se han hecho las siguientes asunciones:

- VIPOR limita a 10 el número de puntos de posible generación de microrredes, por lo que se han considerado los 10 puntos con mayor recurso de cada comunidad. En la heurística se han considerado como puntos de posible generación solo los puntos de consumo.
- VIPOR considera solamente una curva generación-coste por cada punto de posible generación de una microrred. Para conseguir la máxima precisión en los datos de entrada, esta curva se ha obtenido calculando el coste de la instalación al considerar una demanda de energía variable al conectar al punto de generación uno por uno todos los puntos de consumo de la comunidad.
- A partir de la configuración de la solución encontrada por VIPOR, el número de equipos de generación/almacenamiento/trasporte de la electricidad a instalar se define según Capó (2009), tal como lo hace la heurística propuesta.

En la Tabla 2 se muestran el número de soluciones obtenidas por la heurística y el coste de la mejor solución obtenida con la heurística propuesta y con VIPOR.

Tabla 2 N° de soluciones encontradas y costes obtenidos con la heurística y con VIPOR.

		Heurística - n° soluciones encontradas	Heurística – Coste mínimo [\$]	VIPOR – Coste mínimo [\$]	Mejoras
El Alumbre	D. baja	102	53295	53409.3	0.2%
	D. alta	82	85728.6	85748.9	0.02%
Alto Perú	D. baja	313	32146.5	32146.5	0%
	D. alta	112	57108.5	57694.2	1.0%
CF1	D. baja	291	40900.1	41944.6	2.6%
	D. alta	295	63349.4	64433.8	1.7%
CF2	D. baja	275	42387.4	43371.1	2.3%
	D. alta	347	63006.2	64421	2.2%
CF3	D. baja	155	54154	56771.3	4.8%
	D. alta	136	81545.2	86754.2	6.4%
CF4	D. baja	164	54116.3	55627.8	2.8%
	D. alta	225	77437.6	80952.2	4.5%

La heurística mejora las soluciones de VIPOR en la mayoría de las comunidades analizadas con una mejora promedio del 2.5 %; en la comunidad CF3 las mejoras llegan a más del 6%. En ningún caso VIPOR encuentra una solución mejor que la de la heurística.

4. Conclusiones

En este estudio se propone un nuevo procedimiento heurístico para el diseño de sistemas de electrificación autónomos mediante energía eólica y solar. La heurística multi-start propuesta utiliza como criterio heurístico para seleccionar el punto de generación de una microrred un indicador definido *GGs* que depende de la concentración de demanda alrededor del punto y de cuanto destaca su potencial con respecto a los puntos alrededor.

Los resultados del algoritmo se han evaluado en 6 comunidades de entre 26 y 40 puntos de consumo, considerando 2 niveles de demanda en cada una. En todos los casos la heurística propuesta encuentra una solución igual o, mejor con reducciones de coste de hasta 6.5%, a la de VIPOR. Futuros trabajos se llevarán a cabo para analizar los parámetros del GRASP – Criterio de Metrópolis que optimicen las prestaciones del algoritmo y al introducir otro indicador para la selección del punto a conectar a la microrred en construcción.

Bibliografía

- Ashok S (2007) Optimised model for community-based hybrid energy system. *Renewable Energy* 32: 1155–1164
- Baños R, Manzano-Agugliaro F, Montoya FG, Gil C, Alcayde A, Gómez J (2011) Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: a review. *Renew Sustain Energy Rev* 15: 1753–1766
- Capo Plaza M (2009) Modelo para la ubicación de aerogeneradores y paneles fotovoltaicos en proyectos de electrificación rural con microrredes. Proyecto Final de Carrera, UPC.
- Chaurey A, Ranganathan M, Mohanty P (2004) Electricity access for geographically disadvantaged rural communities—technology and policy insights. *Energy Policy* 32: 1693–1705
- Feo TA., Resende MGC (1995) Greedy Randomized Adaptive Search Procedures. *Journal of Global Optimization* 6:109–133.
- Ferrer-Martí L, Pastor R, Capo M, Velo E (2011) Optimizing microwind rural electrification projects. A case study in Peru. *Journal of global optimisation* 50(1): 127-143
- Ferrer-Martí L, Pastor R, Ranaboldo M, Capó GM, Velo E (2009) Optimización del diseño de sistemas microeólicos para la electrificación rural. IX International Seminar in Optimization and Related Areas, Lima, Perú.
- Kirkpatrick S, Gelatt CD Jr, Vecchi MP (1983) Optimization by Simulated Annealing. *Science* 220: 671–680
- Lambert TW, Hittle DC (2000) Optimization of autonomous village electrification systems by simulated annealing. *Solar Energy*, 68(1):121–132