

Heurística basada en PLEM para resolver proyectos de electrificación rural

MILP based heuristics to solve rural electrification projects,

Triadó-Aymerich J¹, Ferrer-Martí L, Garcia-Villoria A, Pastor R

Abstract (English) In the literature a mathematical model has been proposed for rural electrification design with wind and solar generation used to decide the location of each of the generation and electricity distribution components. When the amount of houses to electrify exceeds certain number, solving the mathematical model requires a computational time that may be infeasible in practice. A heuristic method based on mixed integer linear programming for solving instances with many houses is presented in this paper. We propose a two step procedure. In the first stage, the model is solved with some variables relaxed. In the second stage some integer variables are fixed resulting from the first stage and the model not relaxed is solved. Extensive computational experiences are carried out in order to evaluate our heuristic and we state the improvement in the obtained solutions.

Resumen En la literatura se ha propuesto un modelo matemático para diseños de electrificación rural con generación eólica y solar en el que tiene que decidirse la localización de cada uno de los componentes de generación y distribución de energía eléctrica. Cuando la cantidad de viviendas a electrificar excede de un cierto número, la resolución del modelo matemático requiere un tiempo computacional que puede ser inviable en la práctica. En este artículo se presenta un método heurístico basado en programación lineal entera y mixta para la resolución de ejemplares con gran número de viviendas. Para ello proponemos un proceso en dos etapas. En la primera etapa se resuelve el modelo con algunas de las variables relajadas. En la segunda etapa se fijan algunas variables enteras resultado de la etapa 1 y se resuelve el modelo sin relajar. En este artículo se presenta una extensa experiencia computacional para evaluar la heurística propuesta y se constata una mejora de las soluciones obtenidas.

¹ Joan Triadó Aymerich (✉)
Escola Universitària Politècnica de Mataró (EUPMt, UPC)
C/ Ernest Lluch s/n, 08302 Mataró, Spain
e-mail: triado@eupmt.cat

Keywords: MILP, Heuristics, Stand-alone, Electrification; **Palabras clave:** PLEM, Heurísticas, Autónoma, Electrificación

1.1 Introducción

Actualmente, sobre todo en áreas rurales de los países en desarrollo, más de 1500 millones de personas en el mundo no tienen acceso a la electricidad (AIE 2009) (Kanagawa y Nakata 2008). En algunas regiones el acceso a la red eléctrica convencional es muy difícil por la complejidad del terreno y la dispersión de las poblaciones. En estos casos, una alternativa adecuada son los sistemas de electrificación autónomos que utilizan fuentes de energía renovable (Charueya *et al.* 2004, El Bassam 2001) puesto que promueven la perdurabilidad de los proyectos debido al uso de fuentes locales con lo cual se evitan dependencias externas, y suelen ser más baratas que la extensión de la red convencional.

Estos sistemas autónomos de electrificación pueden estar formados por microrredes de puntos alimentados por generadores situados en uno de ellos que aprovechan energías renovables, y pueden contener también puntos aislados que se alimentan de forma individual. Los componentes de estas microrredes son: cables; aerogeneradores y placas solares para la generación eléctrica; una serie de componentes auxiliares como son reguladores para la carga de las baterías, baterías para acumular la energía, inversores para convertir la corriente continua acumulada en las baterías en corriente alterna necesaria para el consumo, y medidores para medir la energía y potencia consumidas por las viviendas. Además, existen diferentes tipos posibles de cada uno de los componentes. El problema, pues, consiste en definir qué viviendas formarán microrred entre ellas, dónde se situarán los generadores y el resto de componentes, qué viviendas se alimentarán mediante microrred de distribución, y de qué tipo deben ser estos componentes.

Los sistemas fotovoltaicos (SF) se han usado ampliamente en las últimas décadas para electrificar comunidades rurales. Por otra parte, los sistemas eólicos se han usado en algunos proyectos realizados en Cajamarca, región de los altiplanos del Perú. El Alumbre fue el primer proyecto de electrificación eólica del Perú (Ferrer-Martí *et al.* 2010); usaba aerogeneradores individuales para cada vivienda. Comparando con los SF, en regiones ventosas puede ser más rentable el uso eólico, sobre todo si la demanda aumenta y se usan turbinas de gran potencia. En cualquier caso, combinar pequeñas microrredes y sistemas individuales puede ser la mejor solución en comunidades dispersas (Ferrer-Martí *et al.* 2011).

Hasta donde sabemos, el único modelo de programación lineal entera mixta (PLEM) para el diseño de proyectos de electrificación de viento combinando ambos sistemas, el individual y el de microrredes, ha sido recientemente presentado por Ferrer-Martí *et al.* (2011). Por otro lado, Domenech (Domenech, 2010) ha desarrollado también un modelo con la posibilidad de combinar microrredes y ge-

neración aislada con generación eólica, pero que también incorpora generación solar.

En este trabajo se presenta un método heurístico de resolución en dos etapas que hace uso del modelo de PLEM para sistemas de electrificación rural desarrollado por Domenech (Domenech, 2010) para su uso en ejemplares con alto número de viviendas. La experiencia computacional se realiza sobre ejemplares generados aleatoriamente pero bajo la base de casos reales. En la sección 2 se expone la heurística propuesta. En la sección 3, la experiencia computacional es mostrada. Por último, la sección 4 está dedicada a las conclusiones y trabajos futuros.

1.2 Heurística Basada en PLEM Mediante Relajación y Fijación

Muchos modelos de programación lineal tienen, en la práctica, problemas debido al tiempo necesario para hallar la solución óptima, sobre todo a la hora de resolver ejemplares no pequeños. En estas situaciones son ampliamente usados los métodos heurísticos. En la literatura existe un modelo matemático (Domenech, 2010) para resolver proyectos de electrificación autónoma rural con generación eólica y solar. Este artículo presenta una heurística basada en este modelo para resolver ejemplares con gran número de viviendas.

De este modelo mostramos algunos de los parámetros: D es el número de puntos de consumo (domicilios, centros de salud, escuelas, etc), A es el número de tipos de generadores ($a=1, \dots, A$); S es el número de tipos de generadores solares ($s=1, \dots, S$); B , el número de tipos de baterías ($b=1, \dots, B$); C , el número de tipos de conductores ($c=1, \dots, C$); I es el número de tipos de inversores ($i=1, \dots, I$); finalmente, R es el número de tipos de reguladores solares ($r=1, \dots, R$).

Las principales variables del modelo son las siguientes:

x_p , Variable binaria que indica si en el punto p se instala algún generador. Toma valor 1 en cas afirmativo y valor 0 en caso contrario; $p=1, \dots, D$

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

xs_{ps} , Variable entera que indica el número de paneles solares que se instalan en el punto p del tipo s ; $p=1, \dots, D$; $s=1, \dots, S$.

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

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

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

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

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

La función objetivo a minimizar es la suma de todos los costes de la inversión para la compra e instalación de los componentes, y las restricciones se refieren a la generación y acumulación de energía, a la definición de la red y a los equipos presentes en la red.

Como heurística basada en PLEM, pasamos a describir la que llamamos *Heurística basada en PLEM mediante relajación y fijación*, que consta de 2 etapas. En la primera etapa se resuelve el modelo relajando algunas de las variables y en la segunda etapa se resuelve el modelo una vez fijados algunos resultados producto de la primera etapa.

1.2.1 Primera Etapa

En esta *etapa 1* se relaja el modelo de manera que algunas variables enteras del modelo son declaradas como variables reales: xb_{pb} , xc_{pdc} , xi_{pi} , xrs_{pr} y xm_d . La razón por la cual en ningún caso se relajan las variables referidas a los generadores (xa_{pa} , xs_{ps} , x_p) es debido a que se hicieron unas primeras pruebas y se comprobó que, si se relajaban, la solución de esta primera etapa colocaba fracciones de generadores en cada punto, de tal forma que no se creaban redes entre los puntos y se obtenían soluciones no representativas. Algo parecido ocurría, aunque en sentido contrario, si se relajaba la existencia de cables, se creaban conexiones entre puntos nada representativas, puesto que se permitía la existencia de fracciones de conexiones. Por este motivo, dado que nuestra intención es la de reducir variables enteras pero no podemos relajar las conexiones, en el modelo (Domenech, 2010) hemos definido una nueva variable auxiliar binaria xcc_{pd} que representa la existencia de cableado que no distingue el tipo de cableado entre dos puntos y que expresamos como

$$xcc_{pdc} = \sum_{c=1}^c xc_{pdc}, p, d = 1, \dots, D, p \neq d$$

Tabla 1.1 Relajaciones realizadas en la *Etapa 1*. Con un *Sí* señalamos las variables que se relajan, con un *No*, las variables que no se relajan

Número Relajación	x_p	xa_{pa}	xs_{ps}	xb_{pb}	xi_{pi}	xrs_{prs}	xc_{pdc}	xcc_{pd}	xm_d
1	No	No	No	Sí	Sí	Sí	Sí	No	Sí
2	No	No	No	Sí	Sí	Sí	No	No	Sí
3	No	No	No	No	Sí	Sí	Sí	No	Sí
4	No	No	No	Sí	No	Sí	Sí	No	Sí

Con estas relajaciones se espera conseguir que la resolución del modelo de PLEM sea mucho más rápida.

Proponemos las 4 opciones de relajamiento que se recogen en la Tabla 1.1

Una vez resuelta esta primera etapa, se tiene una solución en base a la cual fijaremos el valor de algunas variables en la segunda etapa.

1.2.2 Segunda Etapa

En la *etapa 2* se resuelve el modelo de PLEM (Domenech, 2010) fijando algunas de las variables enteras con valores obtenidos de la solución de la etapa 1. Proponemos 6 diferentes tipos de fijaciones sobre las variables binarias $x_{cc_{pd}}$ y x_p :

- a. Se fija la existencia de conexión entre dos puntos p y d resultado de la etapa 1, con cualquiera de los distintos tipos de cable existentes.
- b. Se fija la ausencia de conexión, resultado de la etapa 1, entre dos puntos p y d .
- c. Se fija la existencia de conexiones, resultado de la etapa 1, entre dos puntos p y d , y la no existencia de conexión entre los puntos p y d .
- d. Se fijan los puntos donde debe haber generadores, resultado de la etapa 1.
- e. Se fijan los puntos donde no debe haber generadores, resultado de la etapa 1.
- f. Se fijan tanto los puntos en que debe haber generadores como en los que no debe haber, resultado de la etapa 1.

Después de esta etapa se obtendrá la solución final.

Con el fin de simplificar la forma de hacer referencia a las 24 heurísticas posibles (obtenidas al combinar las 4 de la primera etapa y las seis de la segunda etapa) se codificarán de la siguiente manera: se pondrá una letra H al inicio del código seguido de una cifra y de una letra, la cifra corresponderá al número de relajación realizado en la etapa 1, y que puede consultarse en la Tabla 1.1, y la letra corresponderá al tipo de fijación realizado. Así por ejemplo, $H1d$ corresponde a la heurística con la relajación en la primera etapa que presenta la primera fila de la Tabla 1.1 y el fijado de los puntos donde debe haber generadores para la etapa 2.

1.3 Experiencia Computacional

Los ejemplares del experimento computacional se generaron de forma aleatoria sobre la base de las características de un proyecto real desarrollado en la comunidad peruana de El Alumbre (Ferrer-Martí *et al.*, 2011), en un área de 3,5x3,5 km y del cual se tomó el mapa de viento. Este mapa del recurso viento y la energía generada con cada tipo de aerogenerador se calculó usando WasP (Mortensen and Peterson 1998).

Equipamiento: los datos técnicos y de coste de los generadores y otros equipos incluyen los tipos que estaban en el proyecto real y los más potentes dispositivos. Aerogeneradores (4 tipos): máxima potencia: de 300 a 3500 W; coste: de \$974 a \$5132. Paneles solares (4 tipos) de 210Wh/día a 629Wh/día; coste desde 451\$ a 1000\$. Reguladores solares (4 tipos), máxima potencia desde 50W a 200W; coste: desde 67\$ a 125\$. Baterías (4 tipos): capacidad: de 1500 a 3000 Wh; coste: de \$225 a \$325; eficiencia 85%. Inversores (4 tipos): máxima potencia: de 300 a 3000 W; coste: de \$377 a \$2700; eficiencia 85%. Cables de la red (2 tipos): costes de \$4.9/m a \$5.1/m; resistencia: de 2.71 a 2.1 Ω /km.

En base a estas características se generó el conjunto de ejemplares de testeo, de los que se generó al azar la localización de los puntos. Para cada combinación de los parámetros (número de viviendas, concentración, demanda y potencial eólico), se generaron 5 ejemplares, dando un total de $9 \times 2 \times 2 \times 2 \times 5 = 360$ ejemplares. Otras características de los ejemplares son:

- Número de viviendas: 10, 20, 30, ..., 90.
- Concentraciones: 1) 25% de las viviendas concentradas en el 20% del área; 2) 50% de las viviendas concentradas en el 20% del área.
- Demanda (Energía/Potencia) por vivienda: 1) 280Wh/día (200W); 2) 420Wh/día (300W).
- Potencial eólico: 1) normal (según mapa de viento); 2) alto (multiplicando por 1,5 los valores del mapa de viento).

Con el fin de poder evaluar nuestra propuesta de método heurístico, se realizó una sencilla heurística, a la que llamamos *H0*, que consistió en lanzar el modelo (Domenech, 2010) durante un tiempo máximo de 1 hora y del cual nos quedamos con la mejor solución hallada. Los tiempos de computación promedio alcanzados fueron de 1162 segundos para 10 viviendas y de 3600 segundos a partir de las 20 viviendas. Las 24 heurísticas propuestas tuvieron un tiempo de computación total máxima también de 1 hora: 2.700 segundos para la etapa 1 y 900 segundos para la etapa 2 (puesto que por experiencia se comprobó que era más corta que la primera etapa).

Se usó IBM ILOG CPLEX 12.2 Optimizer, en un PC de 3.16 GHz Intel Core 2 Duo E8500 con 3.46 GB de RAM para resolver los programas matemáticos.

Los mejores resultados se obtuvieron con las heurísticas H1b, H1c, H1d y H1f. En la Tabla 1.2 se resumen sus resultados, en los que se muestran los valores de la media de mejora en % (*MM%*) agrupados por cada número de viviendas, respecto a los resultados de la heurística H0. También hallamos la mejora máxima en % (*Mx%*), la mejora mínima en % (*Mn%*) y el tiempo medio (*TM*), en segundos, de computación.

Como puede observarse consultando, en la Tabla 1.2, el valor de la media de mejora, *MM%*, hasta 40 viviendas las heurísticas propuestas dan resultados parecidos a H0. Para las heurísticas propuestas, a partir de 50 hasta 90 viviendas se observa una significativa mejora de los resultados y a partir de las 80 viviendas continúan obteniéndose mejores soluciones aunque su calidad es más cercana a las de

H0. La media de mejora en %, en comparación a la heurística H0, para cada una de las cuatro heurísticas H1b, H1c, H1d y H1f ha sido de 2.41, 1.69, 2.04 y 2.24 respectivamente.

Tabla 1.2 Resultados de la experiencia computacional, obtenidos una vez realizadas la *etapa 1* y la *etapa 2* sobre las cuatro heurísticas H1b, H1c, H1d y H1f

Heurística	NV	MM%	Mx%	Mn %	TM	Heurística	NV	NM%	Mx%	Mn%	TM
H1b	10	-0,63	0,26	-7,27	6	H1c	10	-0,51	1,06	-7,72	6
	20	-0,98	1,27	-5,81	1527		20	-1,25	0,93	-5,81	1527
	30	-0,72	4,17	-8,00	2555		30	-1,09	4,17	-8,38	2554
	40	0,37	8,46	-5,44	2703		40	-0,87	8,46	-11,75	2665
	50	5,17	16,87	-1,72	2870		50	4,52	13,33	-1,72	2702
	60	5,18	12,77	-0,13	3000		60	4,32	12,60	-3,81	2794
	70	6,52	18,21	0,00	3041		70	5,01	14,01	0,00	2753
	80	5,01	16,45	0,00	3025		80	3,44	14,08	-2,35	2704
	90	1,77	8,69	-3,27	2706		90	1,66	7,94	-3,27	2703
H1d	10	-0,22	0,26	-2,98	7	H1f	10	-0,54	0,19	-3,37	6
	20	-0,75	1,27	-5,81	1937		20	-1,18	0,49	-6,12	1769
	30	-0,39	4,17	-5,23	3158		30	-0,86	3,63	-6,20	3045
	40	0,83	8,32	-6,17	3496		40	0,51	9,15	-4,17	3375
	50	5,21	20,81	-1,72	3583		50	5,22	21,52	-1,76	3543
	60	4,46	12,70	-0,13	3600		60	4,84	11,92	-0,14	3525
	70	4,77	13,75	-0,51	3399		70	6,11	17,08	0,00	3369
	80	2,63	11,83	0,00	3200		80	4,22	16,46	0,00	3163
	90	1,84	9,70	-3,27	2912		90	1,84	10,07	-3,27	2907

1.4 Conclusiones

Este trabajo presenta un método heurístico basado en PLEM realizado en dos etapas para hallar mejores soluciones para modelos de sistemas autónomos de electrificación rural con generación eólica y solar, para ejemplares a partir de un cierto número de viviendas. El modelo sobre el que se ha propuesto el método heurístico es el presentado en Domenech (2010), se trata de un modelo de PLEM basado en características reales. El tiempo límite de computación es de 1 hora. Los resultados nos permiten concluir que el método heurístico está especialmente indicado para ejemplares con un número elevado de viviendas. Lo mejores resultados de las

heurísticas propuestas han resultado ser para H1b que consigue hasta un 6,52% de mejora media para los ejemplares de 70 viviendas.

Como futuras investigaciones estamos trabajando en nuevas heurísticas basadas en PLEM, como son la aplicación del Corridor Method, de Local Branching y Dive and Fix.

1.5 Agradecimientos

Este trabajo ha recibido el apoyo del Ministerio de Ciencia e Innovación de España (en el proyecto ENE2010-15509) y FEDER.

1.6 Referencias

- Domenech B (2010) Modelo para el diseño de proyectos de electrificación rural con consideraciones técnicas y sociales, (Trabajo fin de carrera), Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona. Disponible en <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/10664/1/Proyecto.pdf>
- Chaureya A, Ranganathana M, Mohanty P (2004) Electricity access for geographically disadvantaged rural communities—technology and policy insights. *Energy Policy*, 32, 1693–1705
- El Bassam N (2001) Renewable energy for rural communities, *Renewable Energy*, 24, 401-408
- Ferrer-Martí L, Garwood A, Chiroque J, Escobar R, Coello J, Castro M (2010) A community small-scale wind generation Project in Peru. *Wind Engineering. Special Issue on Small Wind Energy for Developing Countries*, 277-288
- Ferrer-Martí L, Pastor R, Capó G M, Velo E (2011) Optimizing microwind rural electrification projects. A case study in Peru. *Journal of Global Optimization*, 50 (1), 127-143
- Kanagawa M, Nakata T (2008) Assessment of access to electricity and the socio-economic impacts in rural areas of developing countries. *Energy Policy*, 36 (6), 2016-2029
- Mortensen N G, Peterson E L (1998) Influence of topographical input data on the accuracy of wind flow modelling in complex terrain. *European Wind Energy Conference & Exhibition*, Dublin (Ireland)