

## **Un modelo de ubicación de microaerogeneradores para el diseño de proyectos de electrificación rural con energía eólica \***

**Laia Ferrer-Martí<sup>1,2</sup>, Rafael Pastor<sup>1</sup>, G. Miquel Capó<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Instituto de Organización y Control, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona.

<sup>2</sup> Grupo de Investigación en Cooperación y Desarrollo Humano.

Universidad Politécnica de Catalunya. Av. Diagonal, 647, 08028. Barcelona. laia.ferrer@upc.edu, rafael.pastor@upc.edu, gmiguel\_capo@hotmail.com

**Palabras clave:** electrificación rural, energía eólica, microaerogeneradores, microrredes

### **1. Introducción**

Los sistemas de electrificación basados en fuentes de energía renovables han demostrado ser adecuados para proveer de energía eléctrica a comunidades aisladas de forma autónoma (Hirematha et al (2007)). En concreto, la electrificación mediante energía eólica es una de las opciones técnicas que se ha utilizado recientemente en proyectos implementados en la sierra norte de Perú, Coello y Chiroque (2008). Debido a la característica dispersión entre domicilios en las comunidades, hasta el momento estos proyectos han tendido a instalar microaerogeneradores individuales por punto de consumo. Como alternativa se propone considerar tanto los equipos individuales aislados como la generación y distribución de electricidad mediante una o varias microrredes. La localización de los diferentes tipos de aerogeneradores y el diseño de la(s) microrred(es) se define considerando el recurso eólico de cada punto de generación y la localización y la demanda de los puntos de consumo. Esta alternativa de diseño incorpora la opción de utilizar equipos de generación más grandes, más baratos por kW instalado y, por otro lado, evita condicionar la posibilidad de consumo de una familia al recurso eólico disponible en la ubicación de su domicilio.

En la actualidad existen herramientas de ayuda a la toma de decisiones que definen una red eléctrica autónoma, pero considerando un número muy reducido de los puntos de generación, y que entran en más o menos detalle en diferentes aspectos. Por ejemplo, Keler et al (2007) presentan una herramienta de simulación que decide una combinación de fuentes de generación, pero limita a uno los puntos de generación para cada tipo de energía considerada, y sólo proporciona un esquema general de la red. VIPOR de NREL (Williams y Maher (2008)), en cambio, considera el detalle de los puntos de consumo pero limita los puntos de localización de fuentes y las redes por distancia (sin seleccionarlos y sin calcular caídas de tensión); se utiliza un algoritmo heurístico de solución (recocido simulado). Paralelamente se han desarrollado estudios para el diseño y optimización de la distribución (Bautista et al (2003)), algunos basados en modelos de programación lineal entera mixta (PLEM) para la obtención de la solución óptima. La mayoría de estos trabajos se desarrollan para entornos urbanos, en los que la definición de la red viene condicionada por las

---

\* Este trabajo ha sido financiado, entre otras entidades, por la Agència Catalana de Cooperació al Desenvolupament con el proyecto "Programa de investigación aplicada para el impulso del desarrollo energético rural en Países en Desarrollo – PRIADER" y del Centre de Cooperació per al Desenvolupament de la UPC.

cuadrículas de las vías. El detalle y las consideraciones de los diferentes estudios varía, se destaca Sempertegui et al (2002) que incorpora la consideración, entre otros, de la caída de tensión.

En este trabajo se desarrolla un modelo de PLEM para el diseño óptimo de sistemas de electrificación rural basados en la utilización de energía eólica. La solución debe proporcionar la ubicación de los puntos de generación dentro de toda la comunidad y el diseño de la microrred, seleccionando los conductores y considerando las caídas de tensión. El modelo también proporciona la ubicación y el dimensionado de los equipos, por ejemplo, baterías, inversores y reguladores. Este modelo amplía el problema presentado en Ferrer et al (2008), incorporando, entre otros, la instalación de medidores de energía en los puntos de consumo alimentados por microrredes. Como dato de entrada se parte de la energía que podría generar cada tipo de aerogenerador en cada punto. El criterio de resolución considerado es la minimización de los costes económicos para cubrir la demanda. La validación del modelo se realiza mediante la aplicación a un caso real implementado en la sierra norte de Perú.

## **2. Definición del problema y modelo matemático**

Para la modelización y resolución del problema se propone un modelo matemático de Programación Lineal Entera Mixta (PLEM). A continuación se presenta la definición del problema y los parámetros, variables y restricciones con los que se formula matemáticamente.

### **2.1. Definición del problema**

El problema a resolver considera las siguientes especificaciones:

- Para cada punto de consumo se considera una demanda media de energía diaria y de potencia eléctrica. Los puntos de consumo que no tienen un equipo individual y que, por tanto, se alimentan con una microrred disponen de un medidor, que cuenta y limita la energía consumida; así se gestiona y distribuye la energía entre los diferentes usuarios que comparten de la misma microrred.
- Un tipo de aerogenerador es un modelo concreto de máquina instalado a una cierta altura. El mismo modelo de máquina instalado a una altura diferente se considera un tipo de aerogenerador distinto, ya que produce una cantidad de energía diferente. La energía generada por los aerogeneradores se considera en la época de menor potencial eólico (mínima energía generada). Los aerogeneradores generan corriente alterna monofásica.
- La energía se almacena en baterías situadas en el mismo punto de generación. Se asume que se usan baterías tipo plomo ácido. La capacidad mínima de las baterías viene determinada por la demanda de los puntos de consumo a los que abastece, por la autonomía requerida (número de días sin abastecimiento a cubrir) y el porcentaje de descarga recomendado. En cada banco de baterías se instala un regulador de carga.
- Se asume que todos los puntos de consumo requieren la misma autonomía. Si algún punto requiriera mayor tiempo de autonomía, por ejemplo un centro de salud, éste se complementaría con un sistema de respaldo individual, por ejemplo un grupo diesel. Esta posibilidad se trataría una vez resuelto el modelo sin afectar a su validez.
- La distribución de electricidad desde las baterías a los puntos de consumo se realiza en corriente alterna monofásica a la tensión de consumo. Después de cada banco de baterías se colocan inversores, que transforman la corriente continua de la salida de las baterías a corriente alterna a la tensión de consumo. Los tramos de conductor siempre se consideran desde un punto cualquiera (de consumo o de generación) hasta un punto de consumo y se limita la máxima longitud de un conductor. Un punto (de consumo o de generación) si

tiene un aerogenerador no puede tener un conductor de entrada, tampoco puede haber ningún punto con varios conductores de entrada (condición de radialidad).

- Las pérdidas de energía en los equipos (inversores y reguladores) y conductores se incorporan como un factor multiplicador que aumenta la demanda, para aquellos puntos de demanda que no se alimenten de un aerogenerador situado en su mismo punto. Las pérdidas de potencia se consideran compensadas en la estimación del factor de simultaneidad; un valor entre 0 y 1 que establece la proporción máxima de potencia eléctrica que puede ser demandada a la vez, considerando que no todos los usuarios conectarán simultáneamente.

## 2.2. Parámetros del modelo de PLEM

### Demanda

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

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

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

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

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

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

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

### Generación y acumulación

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

$EA_{pa}$ , Energía generada [Wh/día] por un aerogenerador tipo  $a$  situado en el punto  $p$ ;  $p \in P; a = 1, \dots, A$

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

$B, NB$ , 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 [\$] del conductor de tipo  $c$ , incluido el coste de infraestructura;  $c = 1, \dots, C$

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

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

### Equipos

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

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

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

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

$CM$ , Coste de un medidor [\$]

### 2.3. Variables

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

### 2.4. Restricciones

#### Función objetivo

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

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

### Generación y acumulación de energía

Las restricciones (2) y (3) determinan en qué puntos se colocan los aerogeneradores y limitan el número máximo de equipos que se pueden instalar en un mismo punto. La condición de conservación de energía y de satisfacción de la demanda se impone en las restricciones (4), para los puntos de consumo, y (5) para los puntos de no consumo. Las restricciones (6) y (7) son equivalentes a (4) y (5), para la potencia. Las baterías deben almacenar la energía suficiente para cubrir la demanda de sus puntos de consumo considerando la autonomía y el factor de descarga, en (8) y (9).

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

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

$$\sum_{p \in P | d \in Q_p} fe_{pd} + \sum_{a=1}^A \sum_{n=1}^{NA} EA_{da} xa_{dan} \geq ED_d \left( 1 - \frac{V_{max} - V_{min}}{V_n} x_d \right) + \sum_{q \in Q_d} fe_{dq}; \quad d \in D \tag{4}$$

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

$$\sum_{p \in P | d \in Q_p} fp_{pd} + \sum_{i=1}^I \sum_{n=1}^{NI} PI_i xi_{din} / FS \geq PD_d + \sum_{q \in Q_d} fp_{dq} \quad d \in D \tag{6}$$

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

$$\sum_{b=1}^B \sum_{n=1}^{NB} EB_b xb_{abn} + \left( \frac{VB}{DB} \sum_{j \in D} ED_j \right) (1 - x_d) \geq \frac{VB}{DB} \left( \sum_{q \in Q_d} fe_{dq} + \frac{V_{max} - V_{min}}{V_n} ED_d \right); \quad d \in D \tag{8}$$

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

### Definición de la red

Las restricciones (10) y (11) relacionan los flujos de potencia y energía con la existencia del conductor. La condición de radialidad se impone con la restricción (12). La restricción (13) calcula la caída de tensión entre dos puntos, considerando el tipo de conductor que los une. La restricción (14) define la intensidad máxima admisible en un conductor.

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

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

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

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

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

### Equipos

Los reguladores deben ser de la potencia adecuada (15), que viene fijada por los aerogeneradores instalados en el mismo punto. Las restricciones (16)-(18) definen la colocación de los medidores. En un primer caso se colocan medidores cuando hay dos puntos de consumo conectados por un conductor, tanto en el origen (16) como en el destino (17). La restricción (18) coloca un medidor en aquel punto de consumo que se alimenta de un punto de no consumo y este punto de no consumo a la vez alimenta a otro punto de consumo.

$$\sum_{r=1}^R \sum_{n=1}^{NR} PR_r xr_{prn} \geq \sum_{a=1}^A \sum_{n=1}^{NA} PA_a xa_{pan} \quad p \in P \quad (15)$$

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

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

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

### Adicionales

Se añaden restricciones que evitan las simetrías que pueden aparecer en las variables referentes a la colocación aerogeneradores, baterías, reguladores e inversores, del mismo tipo.

### 3. Resultados y análisis. Aplicación a un caso práctico

La validación del modelo diseñado se ha realizado con la aplicación a un caso real ya implementado en la región de la sierra norte del Perú, promovido por las ONGs Soluciones Prácticas – ITDG (Perú) e Ingeniería Sin Fronteras – Cataluña (España), Chiroque (2008). Este proyecto ha electrificado la comunidad de El Alumbre; la solución actualmente implementada se basa en instalar equipos individuales por punto de consumo. En total se han instalado dos aerogeneradores de 500W, en la escuela y en el centro de salud, y 33 aerogeneradores de 100W en domicilios particulares (Figura 1). El coste total de esta instalación (teniendo en cuenta los equipos considerados en el modelo) ha sido de \$67697; en épocas de viento bajo (estiaje) se genera un total de 23663Wh/día de energía. Esta energía, en los domicilios, debería cubrir entre 4-5 horas diarias de iluminación y el uso de pequeños electrodomésticos (radios y equipos de sonido), pero en algunos puntos no se llega a cubrir esta demanda, por falta de recurso.

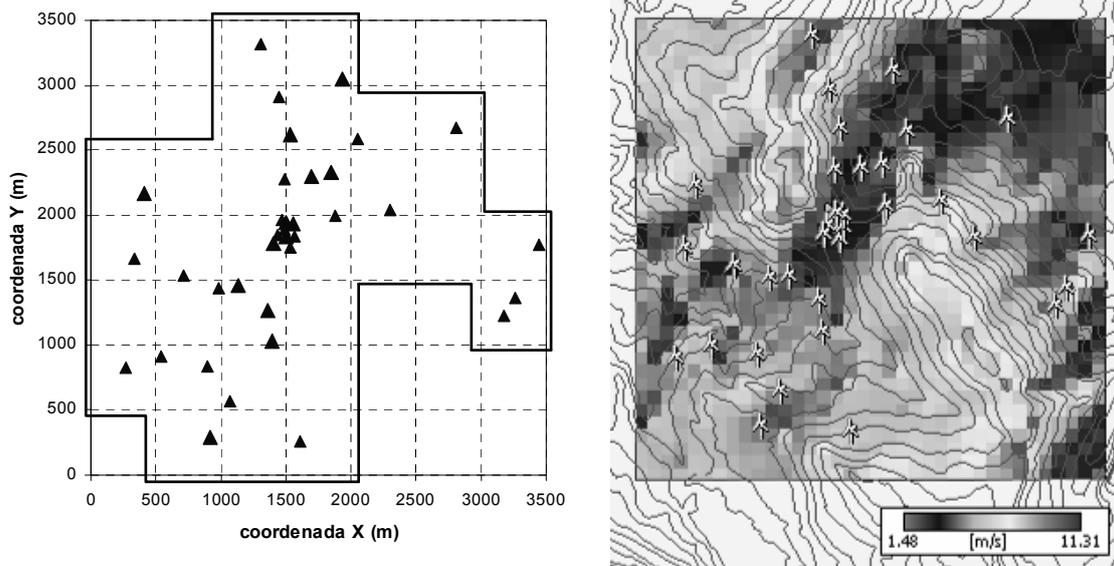


**Figura 1.** Vista general de la comunidad y de los aerogeneradores de 100W y 500W instalados.

Como dato de partida para validar el modelo, se han considerado los equipos de generación del proyecto real ampliados con equipos de más capacidad, pensado en su utilización en microrredes. Los aerogeneradores se han ampliado hasta 2000W y en el resto de equipos (inversores, reguladores, baterías) se han incorporado también tipos de más capacidad. Para la microrred se consideran conductores de aluminio autoportantes y una distribución a una tensión nominal de 220v.

En cuanto a la demanda, se consideran dos escenarios: un caso de demanda baja, en el que se toma la demanda actual del proyecto real, tanto de energía como de potencia; y otro de demanda alta, en el que se toma el doble del caso real, pensando en una cobertura de necesidades básicas más amplia y en los nuevos usos que se pueden dar en un futuro. Para comparar con las soluciones del modelo, se han calculado soluciones basadas en equipos individuales, como el proyecto real, pero que aseguren la cobertura de la demanda en todos los puntos. Para el caso de demanda actual, se instalarían 39 aerogeneradores de 100W y 3 de 500W, con un coste total de \$76651 y con una energía generada de 26967 Wh/día. Para el caso de demanda alta, instalarían 53 aerogeneradores de 100W, 6 de 500W y 3 de 1000W, con un coste total de \$131893 y con una energía generada de 54915 Wh/día.

Como puntos de posible ubicación de los aerogeneradores se consideran dos casos: un primero en que únicamente se consideran solo los 35 puntos de consumo, y un segundo caso en que se incorporan los puntos generados a partir de una cuadrícula de 500 m de resolución, que abarca toda la comunidad con un área de 3,5 km x 3,5 km. Cabe aclarar que algunos nodos de la malla no se han considerado por estar demasiado alejados de los puntos de consumo, utilizando así, en total, 82 puntos (Figura 2). El mapa de viento y el potencial de energía generada por los diferentes tipos de aerogeneradores se calculan mediante el programa WAsP, de RISO, Mortensen y Peterson (1998). El mapa de viento se genera a partir de la topografía del terreno y de los datos de un anemómetro (Figura 2).



**Figura 2.** Área considerada en el modelo y el mapa de viento de la comunidad, con los puntos de consumo.

El modelo matemático planteado se resuelve con el software de optimización OPL 5.5, que ejecuta CPLEX 11.0, en un PC Intel(R) Core(TM)2 Duo CPU T5870 a 2.00GHz, con 1,87Gb de RAM. Se limita el tiempo máximo de cálculo a 5h. La Tabla 1 compara los casos base (equipos individuales) con las soluciones calculadas para los escenarios de demanda alta y baja, con las soluciones obtenidas para el caso en que solo se pueden situar los aerogeneradores en los puntos de consumo (“Sin cuad.”) y el caso con la cuadrícula de puntos de ubicación añadida (“Con cuad.”). Como muestra la tabla, todas las soluciones obtenidas reducen los costes de inversión inicial frente a los casos base, y combinan la utilización de equipos individuales y de microrredes alimentadas con los aerogeneradores de más potencia. Además cabe destacar que esta a reducción de costes, en ninguno de los casos supone una reducción significativa en la energía generada, que se mantiene aproximadamente constante.

		Demanda actual			Demanda alta		
		Caso base	Sin cuad.	Con cuad.	Caso base	Sin cuad.	Con cuad.
Modelo	Puntos de ubicación	35	35	82	35	35	82
	Variables	-	5931	12993	-	5931	12993
	Restricciones	-	7740	16503	-	7740	16503
Solución	Solución (\$)	76651	64327	65726	131893	102678	102082
	Cota (\$)	-	59356	55434	-	84637	77286
	Aerog.: 100W, 500W, 1000W y 2000W	39, 3, 0, 0	28, 0, 0, 1	28, 0, 0, 1	53, 6, 3, 0	10, 3, 2, 2	6, 3, 2, 2
	Energía (Wh/día)	26967	26521	26856	54915	52512	54171

**Tabla 1.** Comparación del caso base con las soluciones obtenidas.

Para el escenario de demanda actual, el caso sin cuadrícula propone una solución que utiliza equipos de 100W y uno 2000W, y que reduce el coste del al caso base en un 16,1% (\$64327vs. \$76651). Para el escenario de demanda alta, el modelo caso sin cuadrícula reduce el coste del caso base en un 22,2% (1102678 vs. \$131893) combinando la utilización de aerogeneradores de los 4 tipos.

En los casos que incorporan los puntos de la cuadrícula, las soluciones obtenidas asignan aerogeneradores aprovechando puntos de buen potencial. Aun así, en el escenario de demanda actual (y con este tiempo de cálculo) el caso con cuadrícula no mejora la solución de sin cuadrícula, pero cabe destacar que la cota de la solución para el caso sin cuadrícula es significativamente inferior (\$55434 vs. \$59356). Para el escenario de demanda alta el caso con cuadrícula si que obtiene una solución ligeramente inferior al caso sin cuadrícula (\$102082 vs. \$102678) y además mantiene una cota muy inferior (\$77286 vs. \$84637). En este escenario de demanda alta la solución con cuadrícula reduce el coste del caso base en un 22,6% (\$102082 vs. \$131893).

La comparación de las soluciones encontradas en los dos escenarios de demanda muestra que en los casos de demanda alta se tiende a utilizar aerogeneradores de más potencia y más microrredes. En el caso base, el aumento de demanda supone un incremento del coste del 72,1% (\$76651 vs. \$131893). Comparando las mejores soluciones obtenidas con el modelo en cada uno de los escenarios, se calcula que el aumento de demanda supone un incremento del coste del 58,7% (\$643271 vs. \$64327). Por lo tanto, el esquema de solución que combina aerogeneradores individuales con microrredes permite aumentar la demanda a cubrir con incremento de coste significativamente inferior (58,7% vs. 72,1%).

A modo de ejemplo, la Figura 4 muestra el esquema de las soluciones obtenidas para el caso sin cuadrícula del escenario de demanda actual y para el caso con cuadrícula y demanda alta; en esta última se resaltan los puntos de la cuadrícula en que se sitúan aerogeneradores.

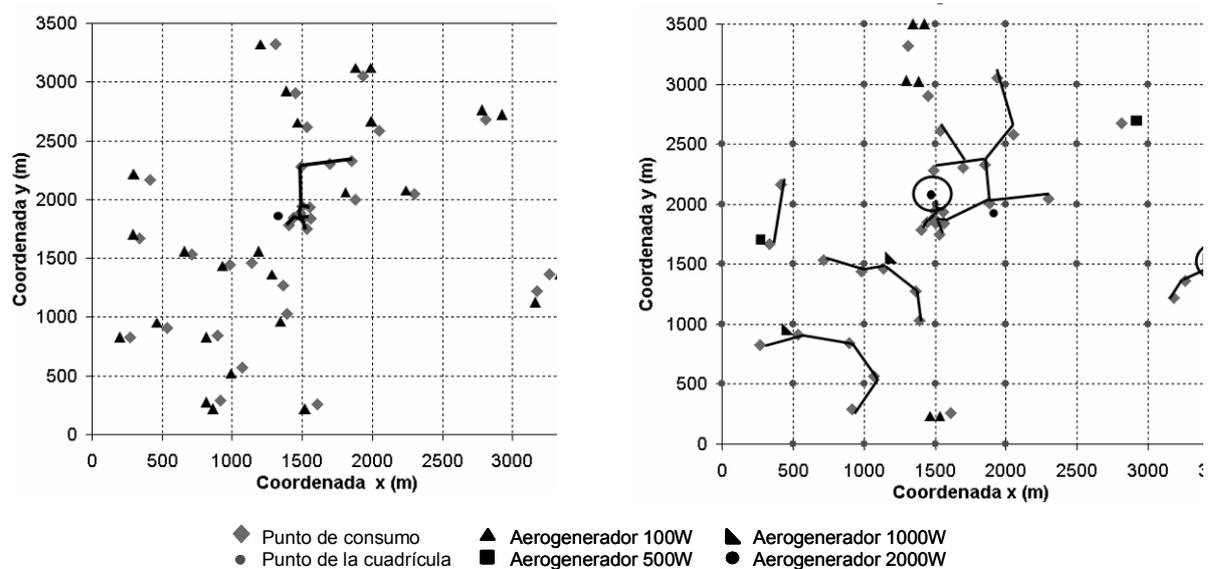


Figura 4. Soluciones obtenidas: demanda actual sin cuadrícula, demanda alta con cuadrícula.

#### 4. Conclusiones

En este trabajo se presenta un modelo matemático de programación lineal mixta para el diseño de sistemas de electrificación rural basados en la utilización de energía eólica, que proporciona la ubicación de los aerogeneradores y el diseño de las posibles microrredes. El modelo ha sido validado mediante su aplicación a un caso real implementado en la comunidad de El Alumbre (Perú). A pesar de la dispersión de la comunidad y de la gran distancia existente entre domicilios, las soluciones obtenidas proponen utilizar microaerogeneradores de mayor potencia y pequeñas microrredes independientes para suministrar energía a varios puntos de consumo. Los resultados se consideran muy satisfactorios: las soluciones obtenidas, en todos los casos, reducen los costes de inversión inicial y mantienen la energía generada

respecto la electrificación con aerogeneradores individuales. Además las soluciones obtenidas destacan que este esquema de solución permite cubrir escenarios de demanda superior con incrementos menores del coste de inversión.

Como posibles extensiones del presente trabajo se propone incorporar en la función objetivo los costes de mantenimiento y reemplazo de equipos a lo largo de la vida útil de la instalación, así como ponderar el coste con la energía total generada. Además, el modelo puede ampliarse a sistemas híbridos que combinen la generación de energía eólica y solar.

### **Agradecimientos**

Los autores agradecen toda la colaboración y el apoyo brindado por Soluciones Prácticas – ITDG e Ingeniería Sin Fronteras-Cataluña proporcionado información y asesorando durante el desarrollo de este trabajo.

### **Referencias**

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

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

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

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

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

Ferrer, L.; Pastor, R.; Sempertegui, R.; Velo, E. (2008). Un modelo para la ubicación de microaerogeneradores a escala comunal; Actas del XV Simposio Peruano de Energía Solar (XV SPES); Cajamarca, Perú, 10 al 14 de noviembre de 2008.

Mortensen, N. G., Peterson, E. L. (1998) Influence of topographical input data on the accuracy of wind flow modelling in complex terrain. Wind Energy and Atmospheric Physics Department, RISO Laboratory, Roskilde, Dinamarca.

Sempértegui, R.; Bautista, J.; Griño, R.; Pereira, J. (2002). Models and procedures for electric energy distribution planning. A review, IFAC 2002, Barcelona.

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