

# **PROCEDIMIENTO PARA LA EVALUACIÓN DEL RECURSO Y DISEÑO DE SISTEMAS MICROEÓLICOS**

**Laia Ferrer-Martí, Rafael Pastor, Matteo Ranaboldo, G. Miquel Capó, Enrique Velo**

Grupo de Investigación en Cooperación y Desarrollo Humano (GRECDH)  
Grupo de Investigación en Ingeniería de Organización y Logística Industrial (EOLI)  
Av. Diagonal 647, 08028 - Barcelona, Spain

laia.ferrer@upc.edu, rafael.pastor@upc.edu, matteo.ranaboldo@yahoo.it,  
gmiguel\_capo@hotmail.com, enrique.velo@upc.edu

## **RESUMEN**

Los sistemas de electrificación basados en el aprovechamiento de fuentes de energía renovables han demostrado ser adecuados para proveer de electricidad a comunidades aisladas de forma autónoma. En concreto, la electrificación mediante energía eólica es una de las opciones tecnológicas utilizadas recientemente en proyectos implementados en la sierra andina de Perú. Hasta ahora, estos proyectos se han diseñado bajo el concepto de instalaciones individuales en cada punto de consumo. Como alternativa, se propone un diseño que considera la combinación de equipos individuales aislados con 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 decide considerando el recurso eólico de cada punto y la localización y la demanda de los puntos de consumo. Esta alternativa de diseño incorpora la opción de utilizar equipos de generación de más potencia, proporcionalmente más baratos, y evita condicionar el consumo de una familia al recurso eólico disponible en su domicilio. En este trabajo se presenta un proceso de evaluación de recurso eólico y un modelo matemático de programación lineal entera y mixta para el diseño de sistemas eólicos. El proceso de evaluación de recurso y los resultados del modelo del modelo se validan mediante la aplicación a un caso real implementado en la sierra norte de Perú. Los resultados obtenidos reducen los costes de inversión inicial y utilizan pequeñas microrredes, a pesar de la dispersión de la comunidad y la distancia entre viviendas.

## **INTRODUCCIÓN**

Los sistemas de electrificación basados en fuentes de energía renovables han demostrado ser adecuados por 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 (Chiroque y Coello, 2008). Debido a la característica dispersión entre domicilios en las comunidades, hasta ahora estos proyectos han instalado 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 las microrredes 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 de más potencia,

más baratos por kW instalado y evita condicionar el posible 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) presenta 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, 2007), 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, 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 cuales la definición de la red viene condicionada por las 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 limitadores de energía en los puntos de consumo alimentados por microrredes. El criterio de resolución básico que se considera es la minimización de los costes económicos para cubrir la demanda presente.

Como dato de entrada se parte de la energía que podría generar cada tipo de aerogenerador en cada punto. Por esto, previo a la aplicación del modelo, se realiza un estudio y evaluación de recurso eólico a microescala. Se utiliza un software especializado que estima el recurso eólico a partir de la topografía y de los datos registrados por un anemómetro.

La validación del trabajo, tanto de la estimación de recurso como del modelo de diseño del sistema, se ha realizado con la aplicación a un caso real ya implementado en la región de la sierra norte del Perú (Chiroque 2008), que ha sido promovido por las ONGs Soluciones Prácticas – ITDG (Perú) e Ingeniería Sin Fronteras – Cataluña (España). Este proyecto ha electrificado la comunidad de El Alumbre; la solución actualmente implementada se basa en la instalación de 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). La instalación en los domicilios, en general, cubre entre 3 y 5 horas diarias de iluminación y de uso de pequeños electrodomésticos (radios y equipos de sonido).



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

## **EVALUACIÓN DE RECURSO EÓLICO**

### **Modelos de evaluación**

Para la evaluación del recurso eólico a microescala en las últimas décadas se han desarrollado diferentes programas que estiman el recurso de un área a partir de los datos medidos en un punto por un anemómetro. Se pueden distinguir tres tipos de modelos: modelos computacionales de dinámica de los fluidos (CFD), más completos y complejos, modelos linealizados de flujo potencial y modelos de conservación de masa. Los resultados de la comparación de los resultados de los 3 tipos de modelos, no concluyen que los modelos CFD sean más exactos, sobre todo en terrenos moderadamente complejos (Berge et al 2006). Por lo tanto, para la evaluación del viento en este estudio ha decidido utilizar un modelo comercial de flujo potencial linealizado. En concreto se utiliza WAsP, desarrollado por Risoe, ampliamente utilizado tanto para estudios de recurso eólico a microescala como a escalas superiores.

### **Metodología utilizada**

El programa WAsP utiliza como datos de entrada: los datos de viento de un emplazamiento (velocidad y dirección), el mapa topográfico de la zona, el mapa de rugosidad de la zona y la definición de los obstáculos. Existe mucha literatura respecto a las características de WAsP y sus límites (Bowen y Mortensen, 2004). En general, se considera que uno de los factores clave que condicionan la exactitud de las estimaciones son la disponibilidad de datos topográficos detallados y la accidentalidad y pendiente del terreno.

Como índice para evaluar la accidentalidad se utiliza usualmente el RIX (Roughness Index), que estima la fracción de terreno con pendiente por encima de un valor límite, por defecto  $17^\circ$ . La condición ideal es un RIX igual a cero en toda el área; en general, el programa simula bien el campo de viento en terrenos con pendientes suaves en los que el RIX es bajo (Bowen y Mortensen, 2004). La calidad del mapa topográfico tiene un efecto determinante en las estimaciones en terrenos montañosos, tanto en relación al tamaño del mapa como en la precisión de las curvas de nivel. Se aconseja utilizar un mapa que se extienda, como mínimo, 5 km desde cualquier punto de evaluación y que las curvas de nivel tengan un intervalo inferior a 20m, y 2m en el área de estudio (Mortensen et al, 2008). El mapa de rugosidad debe cubrir todo el mapa de topográfico utilizado.

Considerando que la zona de trabajo de este proyecto es un área montañosa de terreno complejo, y que no se dispone del detalle topográfico recomendado, se ha llevado a cabo un proceso de validación de las estimaciones del WAsP.

### **Validación de la evaluación de recurso**

Para la validación de las estimaciones de WAsP, se han colocado dos anemómetros en la comunidad de El Alumbre. Los dos anemómetros están a la misma altura que los aerogeneradores utilizados, 10m sobre el nivel del suelo. Un anemómetro se ha situado junto a la escuela, en el centro de la comunidad, a 3830m; el otro anemómetro se ha instalado en una zona más baja, a 3650m, a una distancia horizontal de 1950m del primero (Figura 2).



Figura 2 – Posición e imagen de los anemómetros instalados

Las curvas de nivel disponibles de la zona están a 25m por lo que se han interpolado hasta 10m para obtener mayor detalle. En el mapa se han detallado también zonas características como, por ejemplo, los picos de las montañas y las zonas planas como los campos de fútbol, especialmente en las áreas más próximas a los anemómetros y a las casas de la comunidad. El área estudiada tiene una escasa cobertura vegetal por lo que se ha considerado una rugosidad constante de 0,03m; se han modelizado los pequeños bosques existentes con una rugosidad de 0,8m. Las casas, muy dispersas, tienen una altura inferior en mitad de la de los anemómetros y no ha sido necesario introducirlas como obstáculos. El RIX del área varía entre el 6% y el 17%; la mayor parte de la comunidad tiene valores inferiores al 10%.

Se dispone de datos de viento de los dos anemómetros desde el 18 de diciembre 2008 hasta el 25 de marzo 2009. Se ha considerado como anemómetro de referencia el de la parte alta y se han hecho estimaciones del viento en el anemómetro en la parte baja. Los datos se han dividido por meses y se han comparado los valores medidos con el anemómetro con las estimaciones obtenidas con el WAsP. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 1.

Los errores de estimación de los diferentes meses varían entre el 6 y el -6%, con tendencia general a infraestimar el recurso. Los errores obtenidos son siempre inferiores al 7%; el error medio es de un 5,5%. Considerando que el error de medida de un anemómetro estándar, como los usados, es del 5% [6], las estimaciones se pueden considerar fiables y se pueden esperar errores máximos de estimación del orden de los mostrados a la tabla.

Tabla 1 Resultados de la evaluación de recurso

	Medias de los datos [m/s]		Estimación [m/s]	Error [%]
	Anemómetro parte alta	Anemómetro parte baja		
Diciembre 2008	2,71	2,49	2,64	6,02
Enero 2009	3,01	2,65	2,48	-6,42
Febrero 2009	3,37	2,58	2,46	-4,65
Marzo 2009	2,94	2,54	2,42	-4,72
lMedial	3,05	2,58	2,50	5,50

### Mapa de recurso eólico

El mapa del recurso, a utilizar en el modelo matemático de diseño, se calcula a partir de los datos de viento registrados en el período de menos viento del año (diciembre - marzo). Se utilizan los datos del anemómetro situado al lado de la escuela. El mapa de recurso obtenido se muestra en la Figura 3. En general, los valores más altos de la velocidad del viento se dan en las zonas más altas, mientras en los valles la velocidad es menor.

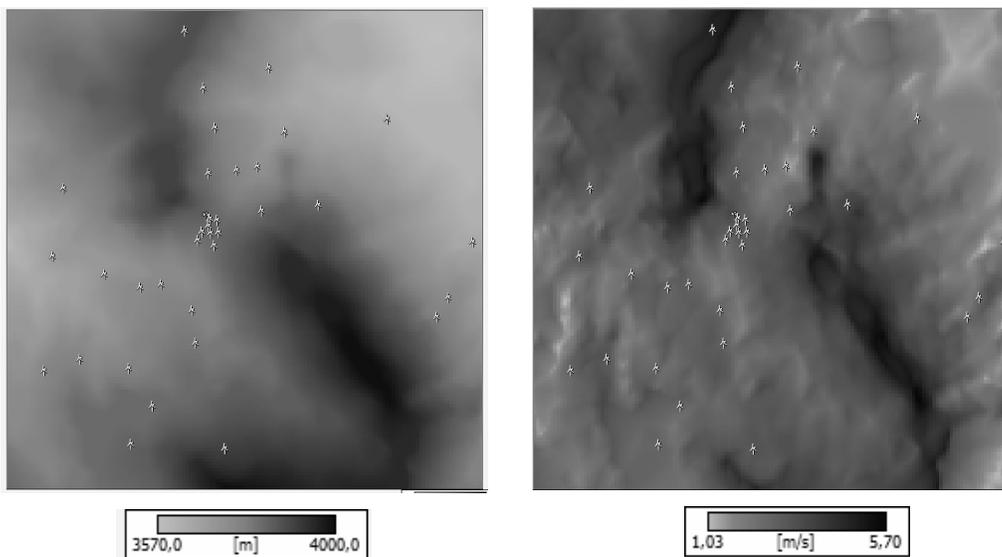


Fig 3. Mapa de alturas y mapa de viento de la comunidad, con los puntos de consumo

## MODELO MATEMÁTICO DE DISEÑO

### 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.

- 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. La capacidad mínima de las baterías viene determinada por la demanda de los puntos de consumo a los que abastece, por la autonomía requerida 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; 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.
- Las pérdidas de energía en los equipos (inversores y reguladores) y conductores se incorporan como un factor multiplicador que aumenta la demanda; el factor de las pérdidas en los conductores solo se aplica a 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.

## **Formulación**

El problema que aquí se plantea es un problema combinatorio que debe decidir la localización de cada tipo y cantidad de aerogeneradores, 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, reguladores y limitadores. El criterio de resolución que se considera es la minimización de los costes económicos para cubrir la demanda. Para resolver el problema se propone un modelo de programación lineal entera y mixta, que se resuelve de forma óptima con software especializado. La formulación del modelo se basa en la definición de parámetros, variables, función objetivo y restricciones, como se detalla a continuación:

- **Parámetros:** Son los datos de entrada del modelo. Definen las características de la comunidad a electrificar (puntos de consumo, demanda, recurso eólico) y de los componentes que formarán parte de la instalación (características de los aerogeneradores, baterías, inversores, reguladores y componentes de la microrred).
- **Variables:** Son los resultados del modelo. Determinan la configuración de la solución, la localización de los puntos de generación, del resto de componentes y de las microrredes.

- Función objetivo: Concreta el criterio de resolución del modelo, en este caso la minimización de la inversión inicial considerando la suma de los costes de los componentes.

- Restricciones: Determinan las condiciones a cumplir por tal que la solución sea factible.

1. Generación y acumulación de energía: cada uno de los usuarios debe recibir la energía y la potencia demandas y las baterías tienen que almacenar energía suficiente.

2. Definición de la red: limitan las caídas de tensión y las posibles configuraciones.

3. Dimensionado y colocación de los equipos. Determinan que los componentes deben tener capacidad suficiente y estar situados en puntos factibles.

## RESULTADOS

La validación del modelo se realiza mediante la aplicación al caso real de El Alumbre. Como equipos de generación disponible se consideran los del proyecto real ampliados con equipos de más capacidad, pensando en su utilización en microrredes. Los aerogeneradores se han ampliado hasta 2000W (a una velocidad de viento de 8m/s) y el resto de equipos (inversores, reguladores, baterías) también se han ampliado con equipos de más capacidad. Para las microrredes se considera una distribución a una tensión nominal de 220v. Como puntos de posible ubicación de los aerogeneradores se consideran los 35 puntos de consumo. El mapa de viento y el potencial de energía utilizado es el presentado en el apartado anterior. En cuanto a la demanda se plantean dos escenarios: en el primero se considera la demanda del proyecto real (demanda actual) y en el segundo la demanda se amplía al doble de la actual (demanda alta), pensando en futuros nuevos usos de la energía.

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(T)2 Dúo CPU T5870 a 2.00GHz, con 1,87Gb de RAM. Se limita el tiempo máximo de cálculo a 5h. La Tabla 2 compara los casos base (equipos individuales asegurando la cobertura de demanda) con las soluciones obtenidas para los escenarios de demanda actual y alta.

Taula 2. Comparación de los casos base con las soluciones obtenidas.

		Demanda actual		Demanda alta	
		Caso base	Modelo	Caso base	Modelo
Solución	Solución (\$)	76651	64327	131893	102678
	Cota (\$)	-	59356	-	84637
	Aerog.:100W, 500W, 1000W y 2000W	39, 3, 0, 0	28, 0, 0, 1	53, 6, 3, 0	10, 3, 2, 2
	Energía (Wh/día)	26967	26521	54915	52512

Como muestra la tabla, todas las soluciones obtenidas reducen los costes de inversión inicial en relación a los casos base y combinan la utilización de equipos individuales y de microrredes alimentadas con los aerogeneradores de más potencia. La comparación de las soluciones 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 la demanda supone un incremento del coste del 72,1% (\$76651 vs. \$131893). En las soluciones obtenidas con el modelo 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 permito aumentar la demanda a cubrir con incremento de coste significativamente inferior (58,7% vs. 72,1%).

La Figura 4 muestra el esquema de las soluciones obtenidas

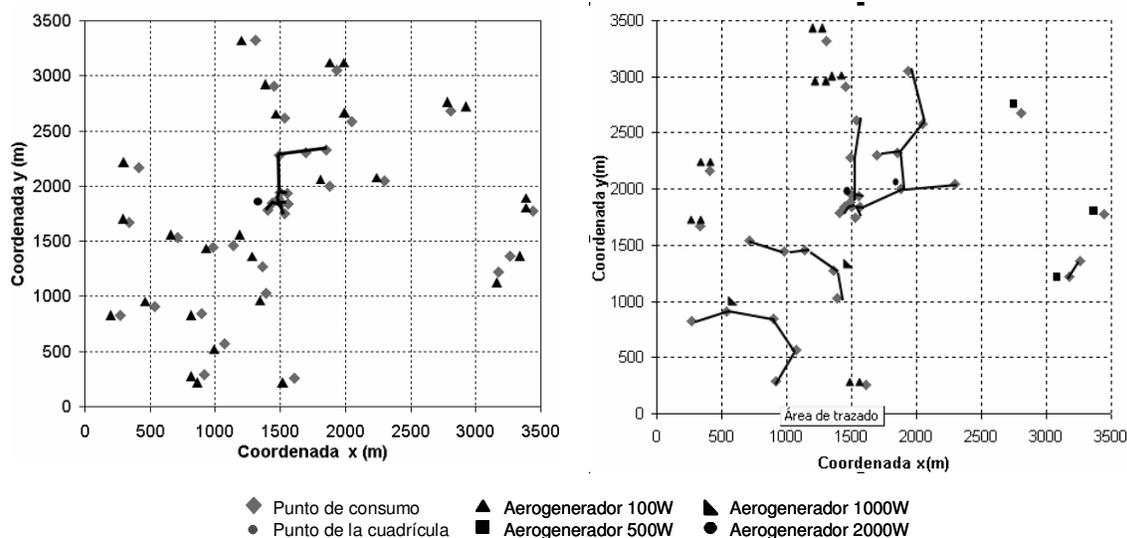


Figura 4. Soluciones obtenidas: demanda actual y demanda alta, respectivamente.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta un proceso de evaluación de recurso eólico y un modelo matemático de programación lineal entera y mixta para el diseño de sistemas de electrificación rural basados en la utilización de energía eólica. El modelo proporciona la ubicación de los aerogeneradores y el diseño de las posibles microrredes y considerando los resultados de la evaluación de recurso eólico a micro-escala, que se desarrolla con un software especializado. El proceso de evaluación de recurso y los resultados del modelo han sido validados mediante su aplicación a un caso real implementado en la comunidad del Alumbre (Perú). Todo y la dispersión de la comunidad y de la gran distancia existente entre domicilios, las soluciones obtenidas proponen utilizar micro-aerogeneradores de mayor potencia y pequeñas microrredes independientes para suministrar energía a varios puntos de consumo. Los resultados obtenidos aseguran cubrir la demanda y reducen los costes de inversión inicial. Las soluciones propuestas utilizan pequeñas microrredes, a pesar de la dispersión de la comunidad y la distancia entre viviendas.

## AGRADECIMIENTOS

El trabajo ha contado con la financiación, entre otras entidades, de la Agència Catalana de Cooperació al Desenvolupament y del Centre de Cooperació per al Desenvolupament de la UPC. Los autores agradecen muy especialmente 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

Berge E., Gravdahl A. R., Schelling J., Tallhaug L., Undheim O. "Wind in complex terrain: a comparison of WasP and two CFD-models". En: Proceedings EWEC. Año 2006

Bowen, A.J.; N.G. Mortensen "WAsP prediction errors due to site orography". EN: Risø-R-995(EN). Año 2004 Risø National Laboratory, Roskilde. 65 pp.

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

Coello, J.; Chiroque, J. "Aprovechamiento de la energía eólica para la electrificación rural en el Perú" En: Energía y Negocios. Año 2008, Vol 59.

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

Hirematha, R. B., Shikhab, S., Ravindranath, N. H. "Decentralized energy planning; modeling and application: a review". En: Renewable and Sustainable Energy Review. Año 2007, vol. 11, pp. 729-752.

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

Mortensen, N.G.; Rathmann, O.; Tindal, A.; Landberg, L. "Field validation of the  $\Delta$ RIX performance indicator for flow in complex terrain". En: European Union Wind Energy Conference, Bruxelles, Belgium. Año 2008, 31 March - 3 April.

Sempértegui, R.; Bautista, J.; Griño, R.; Pereira, J. "Models and procedures for electric energy distribution planning. A review". En: 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.