

# AVALUACIÓ DE RECURS I DISSENY DE SISTEMES MICRO-EÒLICS PER A LA ELECTRIFICACIÓ RURAL

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

Grup de Recerca en Cooperació i Desenvolupament Humà (GRECDH)  
Grup de Recerca en Enginyeria en Organització i Logística Industrial (EOLI)  
Av. Diagonal 647  
08028 - Barcelona, Spain  
Phone: +34 93 401 65 79

Pàgina web: <http://www.upc.edu/grecdh>; <https://www.ioc.upc.edu/recerca/eol>

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

**Tema/es del congrés:** Sistema energètic: energia eòlica. Temes transversals: modelització numèrica

**Tòpic/s transversals:** Recerca low-cost. Tecnologies per a la sostenibilitat.

## RESUM

Els sistemes d'electrificació basats en l'aprofitament de fonts d'energia renovables disponibles localment, han demostrat ser adequats per a proveir d'electricitat a comunitats aïllades de forma autònoma, i contribuir així a la sostenibilitat de les formes de vida rurals en països en desenvolupament. En concret, l'electrificació mitjançant energia eòlica és una de les opcions tecnològiques emprades recentment en projectes implementats en la serra andina de Perú. Fins ara, aquests projectes s'han dissenyat sota el concepte d'instal·lació d'un micro-aerogenerador individual per a cada punt de consum, especialment per a comunitats amb una dispersió moderada. Tot i haver demostrat la seva idoneïtat, aquest tipus de disseny és millorable des del punt de vista d'augment de la sostenibilitat econòmica, social i ambiental dels projectes d'electrificació amb energia micro-eòlica.

Com a alternativa, es proposa un nou concepte de disseny per a comunitats disperses que considera la combinació d'equips individuals aïllats amb la generació i distribució d'electricitat mitjançant una o diverses micro-xarxes de distribució elèctrica. La localització dels diferents tipus d'aerogeneradors i el disseny de la micro-xarxa es decideixen considerant el recurs eòlic de cada punt i la localització i la demanda dels punts de consum. Aquesta alternativa de disseny incorpora l'opció d'utilitzar equips de generació més grans, proporcionalment més barats i de menor impacte ambiental, i evita condicionar el consum d'una família al recurs eòlic disponible a casa seva, augmentant l'impacte i el benefici econòmic i social sobre les persones beneficiàries, al temps que disminueix els requeriments i les despeses de manteniment.

En aquest treball es presenta un procés d'avaluació de recurs eòlic i un model matemàtic de programació lineal entera i mixta per al disseny de sistemes eòlics amb possibles micro-xarxes. El procés d'avaluació de recurs i els resultats del model del model es validen mitjançant l'aplicació a un cas real implementat en la serra nord de Perú. Els resultats obtinguts redueixen els costos d'inversió inicial i utilitzen petites micro-xarxes, tot i la dispersió de la comunitat i la distància entre vivendes.

## INTRODUCCIÓ

Els sistemes de electrificació basats en fonts d'energia renovables han demostrat ser adequats per proveir d'energia elèctrica a comunitats aïllades de forma autònoma [1]. En concret, la electrificació mitjançant energia eòlica és una de les opcions tècniques que s'ha utilitzat recentment en projectes implementats en la serra nord de Perú [2]. A causa de la característica dispersió entre domicilis en les comunitats, fins ara aquests projectes han instal·lat micro-aerogeneradors individuals per punt de consum. Com a alternativa es proposa considerar tant els equips individuals aïllats com la generació i distribució d'electricitat mitjançant una o diverses micro-xarxes. La localització dels diferents tipus de aerogeneradors i el disseny de les micro-xarxes es defineix considerant el recurs eòlic de cada punt de generació i la localització i la demanda dels punts de consum. Aquesta alternativa de disseny incorpora l'opció d'utilitzar equips de generació més grans, més barats per KW instal·lat i evita condicionar la possibilitat de consum d'una família al recurs eòlic disponible en la ubicació del seu domicili.

En l'actualitat existeixen eines d'ajuda a la presa de decisions que defineixen una xarxa elèctrica autònoma, però considerant un nombre molt reduït dels punts de generació, i que entren en més o menys detall en diferents aspectes. Per exemple, [3] presenta una eina de simulació que decideix una combinació de fonts de generació, però limita a un els punts de generació per a cada tipus d'energia considerada, i només proporciona un esquema general de la xarxa. VIPOR de NREL [4], en canvi, considera el detall dels punts de consum però limita els punts de localització de fonts i les xarxes per distància (sense seleccionar-los i sense calcular caigudes de tensió); s'utilitza un algorisme heurístic de solució (recuit simulat). Paral·lelament s'han desenvolupat estudis per al disseny i optimització de la distribució alguns basats en models de programació lineal sencera mixta (PLEM) per a l'obtenció de la solució òptima. La majoria d'aquests treballs es desenvolupen per a entorns urbans, en els quals la definició de la xarxa ve condicionada per les quadricules de les vies. El detall i les consideracions dels diferents estudis varia, es destaca [5] que incorpora la consideració, entre uns altres, de la caiguda de tensió.

En aquest treball es desenvolupa un model de PLEM per al disseny òptim de sistemes de electrificació rural basats en la utilització d'energia eòlica. La solució ha de proporcionar la ubicació dels punts de generació dintre de tota la comunitat i el disseny de la micro-xarxa, seleccionant els conductors i considerant les caigudes de tensió. El model també proporciona la ubicació i el dimensionament dels equips, per exemple, bateries, inversors i reguladors. Aquest model àmplia el problema presentat en [6], incorporant, entre uns altres, la instal·lació de limitadors d'energia en els punts de consum alimentats per micro-xarxes. El criteri de resolució bàsic que es considera és la minimització dels costos econòmics per a cobrir la demanda present.

Com dada d'entrada es parteix de l'energia que podria generar cada tipus de aerogenerador en cada punt. Per això, i previ a la aplicació del model, es realitza un estudi i avaluació de recurs eòlic a micro-escala. S'utilitza un programari especialitzat que estima el recurs eòlic a partir de la topografia i de les dades registrades per un anemòmetre.

La validació del treball, tant de l'estimació de recurs com del model de disseny del sistema, s'ha realitzat amb l'aplicació a un cas real ja implementat en la regió de la serra nord del Perú, promogut per les ONGs Soluciones Prácticas – ITDG (Perú) i Enginyeria Sense Fronteres – Catalunya (Espanya), [7]. Aquest projecte ha electrificat la comunitat de El Alumbre; la solució actualment implementada es basa a instal·lar equips individuals per punt de consum. En total s'han instal·lat dos aerogeneradors de 500W, en l'escola i en el centre de salut, i 33 aerogeneradors de 100W en domicilis

particulars. La instal·lació, en els domicilis, cobreix entre 3 i 5 hores diàries d'il·luminació i l'ús de petits electrodomèstics (ràdios i equips de so), però en alguns punts no s'arriba a cobrir aquesta demanda per falta de recurs.



**Figura 1.** Vista general de la comunitat i dels aerogeneradors instal·lats.

## **AVALUACIÓ DE RECURS EÒLIC**

### **Models d'avaluació**

Per a l'avaluació del recurs eòlic a micro-escala en les últimes dècades s'han desenvolupat diferents programes que estimen el recurs en una àrea a partir de les dades preses en un punt per un anemòmetre. Es poden distingir tres tipus de models: models computacionals de dinàmica dels fluids (CFD), més complets i complexos, models linealitzats de flux potencial i models de conservació de massa. Els resultats de la comparació dels resultats dels 3 tipus de models, no conclouen que els models CFD siguin més exactes, sobretot en terrenys moderadament complexos [8]. Per tant, per a l'avaluació del vent en aquest estudi ha decidit utilitzar un model comercial de flux potencial linealitzat. En s'utilitza el WAsP, desenvolupat per Risoe, àmpliament utilitzat tant per a estudis de recurs eòlic a micro-escala com a escales superiors.

### **Metodologia utilitzada**

El programa WAsP utilitza com a dades d'entrada: les dades de vent d'un emplaçament (velocitat i adreça), el mapa topogràfic de la zona, el mapa de rugositat de la zona, i els obstacles. Existeix molta literatura respecte a les característiques de WAsP i els seus límits [9]. En general, es considera que un dels factors clau que condiciona l'exactitud de les estimacions és la disponibilitat de dades topogràfiques detallades i l'accidentalitat i pendent del terreny.

Com a índex per a avaluar l'accidentalitat del terreny s'utilitza usualment el RIX (Roughness Index), que estima la fracció de terreny amb pendent per sobre d'un valor límit, per defecte  $17^\circ$ . La condició ideal és un RIX igual a zero en tota l'àrea; en general, el programa simula bé el camp de vent en terrenys amb pendents suaus en els que el RIX és baix [9]. La qualitat del mapa topogràfic té un efecte determinant en les estimacions en terrenys muntanyencs, tant en relació a la grandària del mapa com a la precisió de les corbes de nivell. S'aconsella utilitzar un mapa que s'estengui, com a mínim, 5 km des de qualsevol punt d'avaluació i que les corbes de nivell tinguin un interval inferior a 20m, i 2m en l'àrea d'estudi [10]. El mapa de rugositat ha de cobrir tot el mapa de topogràfic utilitzat.

Considerant que la zona de treball d'aquest projecte és una area muntanyosa de terreny complex, i no es disposa del detall topogràfic recomanat, s'ha dut a terme un procés de validació de les estimacions amb el WASP.

### Validació de l'avaluació de recurs

Per a la validació de les estimacions de WASP, s'han col·locat dos anemòmetres en la comunitat de El Alumbre. Els dos anemòmetres estan a la mateixa altura que els aerogeneradors utilitzats, 10m sobre el nivell del terra,. Un anemòmetre s'ha situat al costat de l'escola, en el centre de la comunitat, a 3830m; l'altre anemòmetre s'ha instal·lat en una zona més baixa, a 3650m, a una distància de 1950m del primer.



Figura 2 – Posició i imatge del anemòmetres instal·lats

La corbes de nivell disponibles de la zona estan a 25m pel que s'han interpolat fins a 10m per a obtenir major detall. En el mapa s'han detallat també zones característiques com, per exemple, els pics de les muntanyes i les zones planes com els camps de futbol, especialment en les àrees més properes als anemòmetres i a les cases de la comunitat. L'àrea estudiada té una escassa cobertura vegetal pel que s'ha considerat una rugositat constant de 0,03m; s'han modelitzat els petits boscos existents amb una rugositat de 0,8m. Les cases, molt disperses, tenen una altura inferior a la meitat de la dels anemòmetres i no ha calgut introduir-les com a obstacles. El RIX de l'àrea varia entre el 6% i el 17%; la major part de la comunitat té valors inferiors al 10%.

Es disposa de dades de vent dels dos anemòmetres des del 18 de desembre 2008 fins al 25 de març 2009. S'ha considerat com anemòmetre de referència el de la part alta i s'han fet estimacions del vent en el anemòmetre en la part baixa. Les dades s'han dividit per mesos i s'han comparat els valors mesurat amb el anemòmetre amb les estimacions obtingudes amb el WASP. Els resultats obtinguts es mostren en la taula 1.

Taula 1 Resultats de l'avaluació de recurs

	Mitjanes de les dades [m/s]		Estimació [m/s]	Error [%]
	Anem. part alta	Anem. part baixa		
Decembre2008	2,71	2,49	2,64	6,02
Gener 2009	3,01	2,65	2,48	-6,42
Febrer 2009	3,37	2,58	2,46	-4,65
Març 2009	2,94	2,54	2,42	-4,72
Mitjana	3,05	2,58	2,50	5,50

Els errors d'estimació de diferents mesos varien entre el 6 i el -6%, amb tendència general a infraestimar el recurs. Els errors obtinguts són sempre inferiors al 7%, l'error mitjà és d'un 5,5%. Considerant que l'error de mesura d'un anemòmetre estàndard, com els utilitzats, és del 5% [6], les estimacions es poden considerar fiables i es poden esperar els errors màxims de estimació de l'ordre dels mostrats a la taula..

### Mapa de recurs eòlic

El mapa del recurs, a utilitzar en el model matemàtic de disseny, es calcula a partir de les dades de vent registrades en el període de menys vent de l'any (desembre - març). S'utilitzen les dades de l'anemòmetre situat al costat de l'escola. El mapa de recurs obtingut es mostra en la Figura 3. En general, els valors més alts de la velocitat del vent es troben en les zones més altes, mentre en les valls la velocitat és menor.

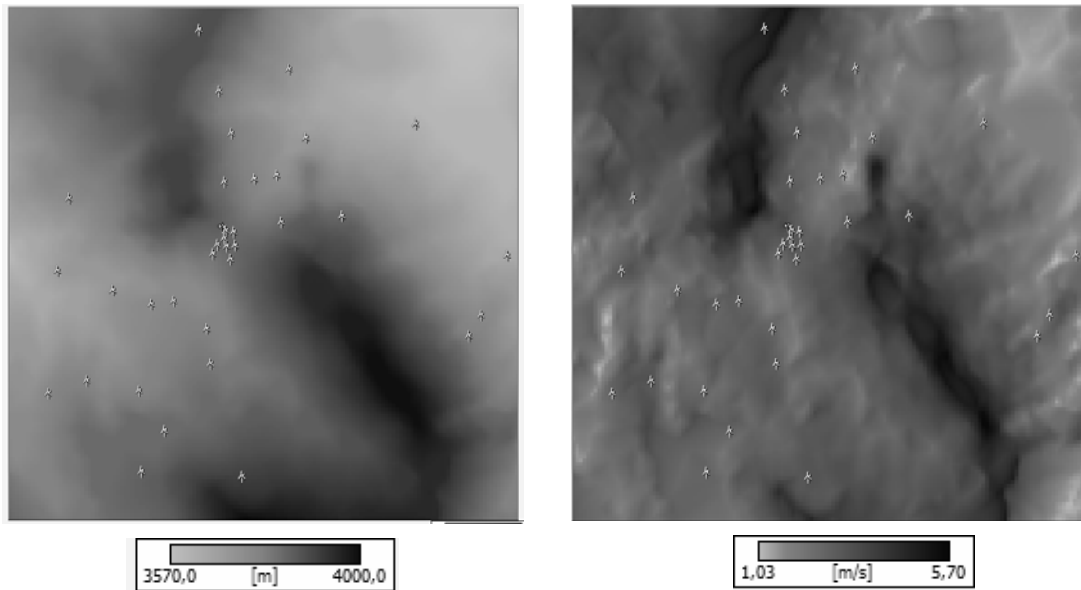


Fig 3. Mapa d'altures i mapa de vent de la comunitat, amb els punts de consum

## MODEL MATEMÀTIC DE DISSENY

### Definició del problema

El problema a resoldre considera les següents especificacions:

- Per a cada punt de consum es considera una demanda mitja d'energia diària i de potència elèctrica. Els punts de consum que no tenen un equip individual i que, per tant, s'alimenten amb una micro-xarxa disposen d'un limitador de consum.
- L'energia generada pels aerogeneradors es considera en l'època de menor potencial eòlic (mínima energia generada). Els aerogeneradors generen en corrent alterna monofàsica.
- L'energia s'emmagatzema en bateries situades en el mateix punt de generació. La capacitat mínima de les bateries ve determinada per la demanda dels punts de consum als quals serveix, per l'autonomia requerida i pel percentatge de descàrrega recomanat. En cada banc de bateries s'instal·la un regulador de càrrega.
- S'assumeix que tots els punts de consum requereixen la mateixa autonomia. Si algun punt requereix més temps d'autonomia, per exemple un centre de salut, aquest es complementaria amb un sistema de recolzament individual. Aquesta possibilitat es tractaria una vegada resolt el model sense afectar a la seva validesa.

- La distribució d'electricitat des de les bateries als punts de consum es realitza en corrent alterna monofàsica a la tensió de consum. Després de cada banc de bateries es col·loquen inversors, que transformen el corrent continu de la sortida de les bateries a corrent altern a la tensió de consum. Els trams de conductor sempre es consideren des d'un punt qualsevol (de consum o de generació) fins a un punt de consum i es limita la màxima longitud d'un conductor. Un punt (de consum o de generació) si té un aerogenerador no pot tenir un conductor d'entrada, no pot haver cap punt amb diversos conductors d'entrada.

- Les pèrdues d'energia en els equips (inversors i reguladors) i conductors s'incorporen com un factor multiplicador que augmenta la demanda, per a aquells punts de demanda que no s'alimentin d'un aerogenerador situat en el seu mateix punt. Les pèrdues de potència es consideren compensades en l'estimació del factor de simultaneïtat; un valor entre 0 i 1 que estableix la proporció màxima de potència elèctrica que pot ser demandada alhora, considerant que no tots els usuaris es connectaran simultàniament.

## **Formulació**

El problema que aquí es planteja és un problema combinatori que ha de decidir la localització de cada tipus i quantitat de aerogeneradors, la ubicació dels punts de generació dintre de tota la comunitat i el disseny de la micro-xarxa, seleccionant els conductors i considerant les caigudes de tensió. El model també proporciona la ubicació i el dimensionament dels equips, per exemple, bateries, inversors, reguladors i limitadors. El criteri de resolució que es considera és la minimització dels costos econòmics per a cobrir la demanda. Per a resoldre el problema es proposa un model de programació lineal entera i mixta, que es resol de forma òptima amb programari especialitzat. La formulació del model es basa en la definició de paràmetres, variables, funció objectiu i restriccions, com es detalla a continuació:

**Paràmetres:** Són les dades d'entrada del model. Defineixen les característiques de la comunitat a electrificar (punts de consum, demanda, recurs eòlic) i dels components que formaran part de la instal·lació (característiques dels aerogeneradors, bateries, inversors, reguladors i components de la micro-xarxa).

**Variables:** Són els resultats del model. Determinen la configuració de la solució, la localització dels punts de generació, de la resta de components i de les micro-xarxes.

**Funció objectiu:** Concreta el criteri de resolució del model, en aquest cas la minimització de la inversió inicial considerant la suma dels costos dels components.

**Restriccions:** Determinen les condicions a complir per tal que la solució sigui factible.

1. Generació i acumulació d'energia: cadascun dels usuaris han de rebre l'energia i la potència demandades i les bateries han d'emmagatzemar energia suficient.

2. Definició de la xarxa: limiten les caigudes de tensió i les possibles configuracions.

3. Dimensionament i col·locació d'equips. Determinen que els components han de tenir capacitat suficient han i d'estar situats en punts factibles.

## **RESULTATS**

La validació del model es realitza mitjançant l'aplicació al cas real de El Alumbre. Com a equips de generació disponible es consideren els del projecte real ampliat amb equips de més capacitat, pensant en la seva utilització en micro-xarxes. Els aerogeneradors s'han ampliat fins a 2000W i en la resta d'equips (inversors, reguladors, bateries) també s'han ampliat amb equips de més capacitat. Per a la micro-xarxa es considera una distribució a una tensió nominal de 220v. Com punts de possible ubicació dels aerogeneradors es consideren els 35 punts de consum. El mapa

de vent i el potencial d'energia utilitzat és el presentat en l'apartat anterior. En quant a la demanda es plantegen dos escenaris: en el primer es considera la demanda del projecte real (demanda actual) i en el segon la demanda s'amplia al doble de la actual (demanda alta), pensant el nous futurs usos de l'energia.

El model matemàtic plantejat es resol amb el programari d'optimització OPL 5.5, que executa CPLEX 11.0, en un PC Intel(R) Core(T)2 Duo CPU T5870 a 2.00GHz, amb 1,87Gb de RAM. Es limita el temps màxim de càlcul a 5h. La Taula 2 compara els casos base (equips individuals assegurant la cobertura de demanda) amb les solucions obtingudes per als escenaris de demanda actual i alta.

Taula 2. Comparació dels casos base amb les solucions obtingudes.

Solució	Solución (\$)	Demanda actual		Demanda alta	
		Cas base	Model	Cas base	Model
	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

Com mostra la taula, totes les solucions obtingudes redueixen els costos d'inversió inicial en relació als casos base i combinen la utilització d'equips individuals i de micro-xarxes alimentades amb els aerogeneradors de més potència. La comparació de les solucions en els dos escenaris de demanda mostra que en els casos de demanda alta es tendeix a utilitzar aerogeneradors de més potència i més micro-xarxes. En el cas base, l'augment de demanda suposa un increment del cost del 72,1% (\$76651 vs. \$131893). En les solucions obtingudes amb el model l'augment de demanda suposa un increment del cost del 58,7% (\$643271 vs. \$64327). Per tant, l'esquema de solució que combina aerogeneradors individuals amb micro-xarxes permet augmentar la demanda a cobrir amb increment de cost significativament inferior (58,7% vs. 72,1%).

La Figura 4 mostra el esquema de las soluciones obtingudes.

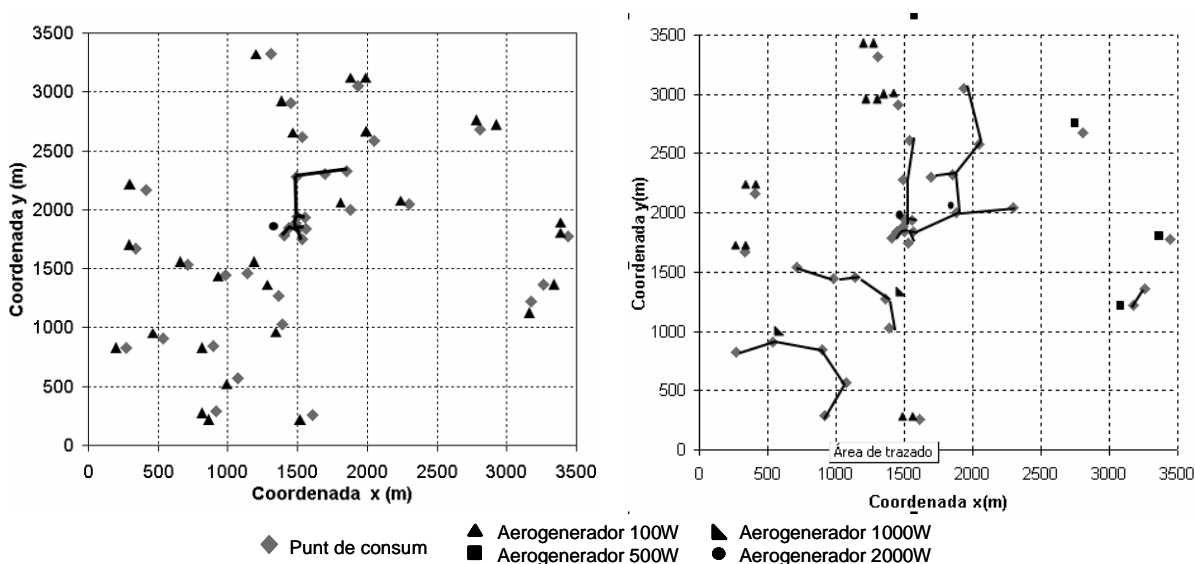


Figura 4. Solucions obtingudes (demanda actual i demanda alta).

## CONCLUSIONS

En aquest treball es presenta un procés d'avaluació de recurs eòlic i un model matemàtic de programació lineal entera i mixta per al disseny de sistemes de electrificació rural basats en la utilització d'energia eòlica. El model proporciona la ubicació dels aerogeneradors i el disseny de les possibles micro-xarxes i considerant els resultats de l'avaluació de recurs eòlic a micro-escala, que es desenvolupa amb un programari especialitzat. El procés d'avaluació de recurs i els resultats del model han estat validats mitjançant la seva aplicació a un cas real implementat en la comunitat de El Alumbre (Perú). Tot i la dispersió de la comunitat i de la gran distància existent entre domicilis, les solucions obtingudes proposen utilitzar micro-aerogeneradors de major potència i petites micro-xarxes independents per a subministrar energia a diversos punts de consum. Els resultats obtinguts asseguren cobrir la demanda i redueixen els costos d'inversió inicial. Les solucions proposades utilitzen petites micro-xarxes, tot i la dispersió de la comunitat i la distància entre vivendes.

## AGRAÏMENTS

Aquest treball ha comptat amb el finançament, entre altres entitats, de la Agència Catalana de Cooperació al Desenvolupament i del Centre de Cooperació per al Desenvolupament de la UPC. Els autors agraïen molt especialment tota la col·laboració i el suport de Solucions Pràctiques – ITDG proporcionant informació i assessorant durant el desenvolupament d'aquest estudi.

## REFERENCIES

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. Williams, A.; Maher, P. (2008). Mini-grid design for rural electrification: optimisation and applications. In: *Universitas 21 Energy Conference*, Birmingham, 8-10 Sept. 2008.
5. Sempértégui, R.; Bautista, J.; Griño, R.; Pereira, J. (2002). Models and procedures for electric energy distribution planning. A review, *IFAC 2002*, Barcelona.
6. 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.
7. Chiroque, J. (2008). Microaerogeneradores para la electrificación rural. Caso de El Alumbre, Cajamarca. *I Seminario Internacional de energía eólica*, Lima (Peru).
8. Berge E., Gravdahl A. R., Schelling J., Tallhaug L., Undheim O. (2006) Wind in complex terrain: a comparison of WasP and two CFD-models. *Proceedings EWECE 2006*
9. Bowen, A.J.; N.G. Mortensen (2004). WASP prediction errors due to site orography. *Risø-R-995(EN)*. Risø National Laboratory, Roskilde. 65 pp.
10. Mortensen, N.G.; Rathmann, O.; Tindal, A.; Landberg, L. (2008). Field validation of the ΔRIX performance indicator for flow in complex terrain, *2008 European Union Wind Energy Conference*, Bruxelles, Belgium, 31 March - 3 April 2008