



Grupo de Investigación en Cooperación
y Desarrollo Humano - GRECDH

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Metodología para la ubicación de aerogeneradores y diseño de microrredes en proyectos eólicos

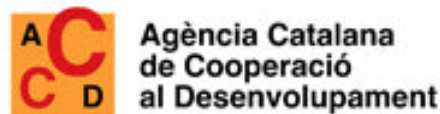
Dra. Laia Ferrer Martí

Universidad Politécnica de Cataluña

Grupo de Investigación en Cooperación y Desarrollo Humano (GRECDH)

Grupo de Investigación en Ingeniería en Organización y Logística Industrial (EOLI)

Con el apoyo de:



Centre de Cooperació per
al Desenvolupament. CCD

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

**XIII ELPAH, Taller: Evaluación de recursos, Diseño, Instalación y gestión de
sistemas eólicos de pequeña escala, 20-22 Julio 2009, Cajamarca, Perú.**

Índice

1. Introducción
2. Objetivos
3. Consideraciones de diseño
4. Modelo matemático de diseño
5. Resultados: El Alumbra
6. Resultados: Alto Perú
7. Resultados: Alto Perú (zona carretera)
8. Conclusiones

Introducción

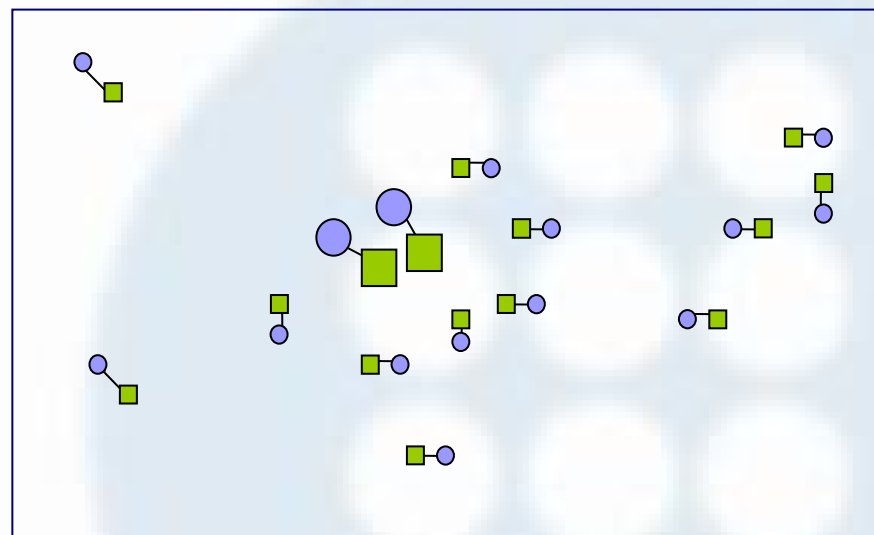
- Los sistemas de electrificación que utilizan energías renovables son una solución adecuada para proveer de electricidad a comunidades de forma autónoma.
 - Utilizan recursos locales
 - Coste menor que extender el interconectado

- Los sistemas microeólicos son una de las opciones técnicas posibles
 - Recientemente se han implementado sistemas microeólicos a Cajamarca, en la sierra norte de Perú.



Introducción

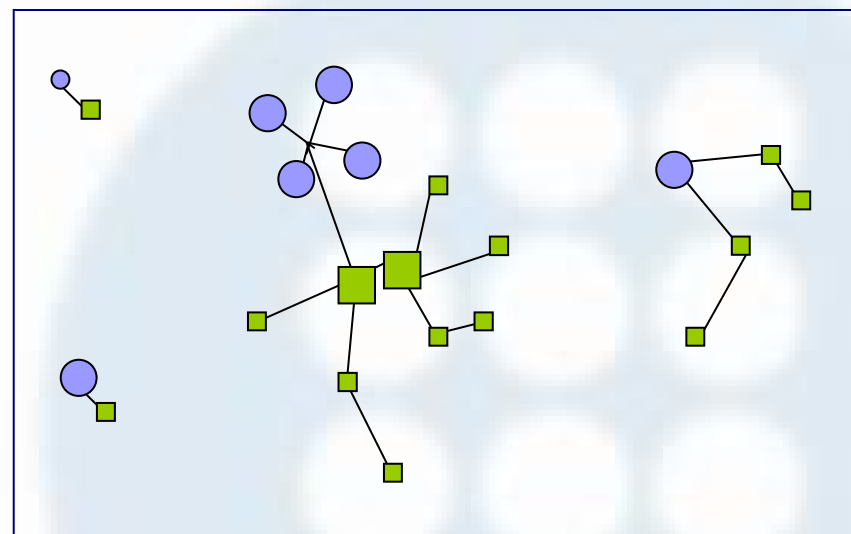
- Actualmente se están implementando proyectos de electrificación rural mediante energía eólica que se basan en la instalación microaerogeneradores individuales, por punto de consumo.
- Limitaciones
 - En algunos puntos de consumo la energía generada puede ser insuficiente por falta de recurso
 - No se considera utilizar aerogeneradores de mayor potencia para varios puntos de consumo
 - No considera puntos o familias de mayor/menor consumo
 - No es fácilmente adaptable a un incremento de la demanda



- ● Tipos de microaerogeneradores
- ■ Tipos de puntos de consumo

Introducción

- La definición de un proyecto que combine el suministro de electricidad en una o varias microrredes y de puntos asilados de generación, en la que se considere el viento en los distintos puntos y la demanda de cada consumidor
 - No condiciona el consumo de una familia al recurso eólico disponible en la ubicación de la casa
 - Puede ahorrar costes utilizando equipos grandes que distribuyan a varios puntos de consumo
 - Puede considerar demandas diferentes de diferentes puntos
 - Puede ser más fácilmente adaptable a incrementos de consumo



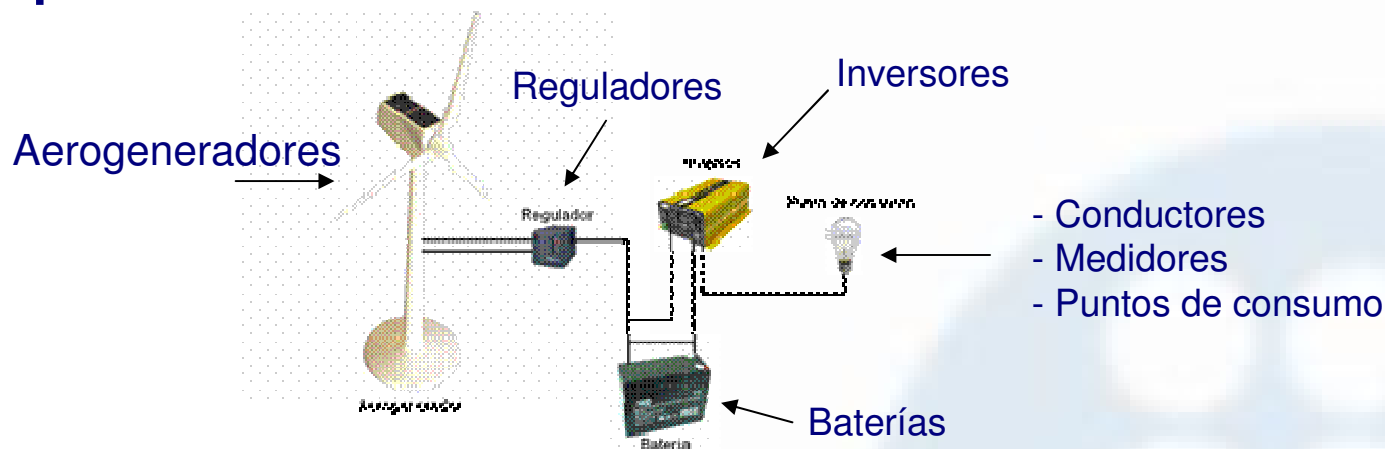
- ● Tipos de microaerogeneradores
- ■ Tipos de puntos de consumo

Objetivos

- Desarrollar un modelo de optimización para diseñar proyectos de electrificación rural con energía eólica
 - Decida:
 - qué aerogeneradores utilizar, dónde instalarlos
 - qué microrredes de distribución utilizar
 - Considere:
 - la situación y la demanda de los puntos de consumo
 - el recurso eólico en cada punto
 - Criterio:
 - Mínimo coste

Consideraciones de diseño

■ Esquema de elementos:



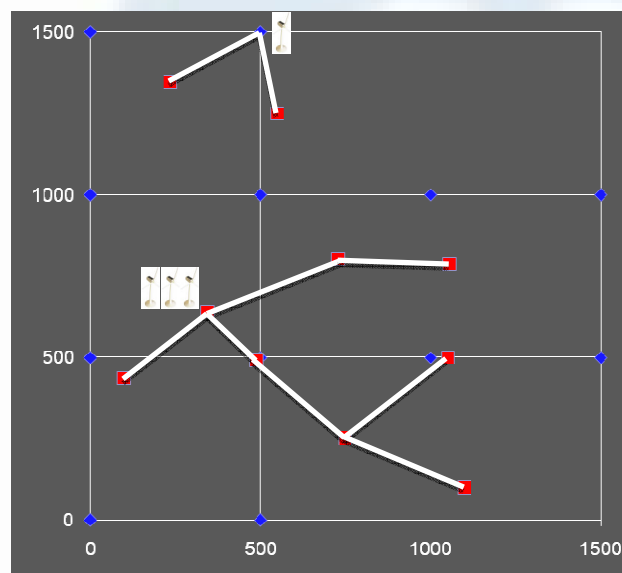
- Aerogeneradores, la energía generada depende del tipo y de la localización
- Reguladores, convierten AC/DC y controlan la carga/descarga de la batería
- Baterías, su capacidad tiene en cuenta la demanda y la autonomía, se sitúan en el mismo punto de generación.
- Inversores, convierten DC/AC al voltaje nominal de distribución.
- Conductores, configuran la microrred que distribuye la electricidad
- Medidores, miden la energía consumida en los puntos de las microrredes

Consideraciones de diseño

■ Esquema de la microrred

- La distribución de electricidad desde de las baterías a los puntos de consumo se realiza en AC monofásica, al voltaje de consumo.
- La microrred está compuesta de diferentes tramos
 - Imponemos que cada tramo acaba en un punto de consumo
- Los tramos se estructuran en un esquema radial:
 - Un punto puede tener varios conductores de salida, pero solo uno de entrada
 - No puede haber un conductor de entrada en un punto con generador

- Puntos de consumo
- ◆ Puntos de generación



Modelo matemático de diseño

- Modelo de programación lineal entera y mixta (PLEM)
 - Método para formular matemáticamente un problema de optimización combinatoria que permite su resolución óptima con software especializado
 - Evalúa y optimiza una función objetivo explorando todas las combinaciones de soluciones posibles
- Se basa en la definición de un conjunto de:
 - Parámetros: especifican los datos de entrada del problema
 - Variables: definen la configuración de la solución
 - Función Objetivo: define el criterio de resolución
 - Restricciones: especifican el conjunto de condiciones que deben cumplirse para que la solución sea factible

Modelo matemático de diseño

Entradas

Parámetros

Puntos de consumo:
Distancias, localización,
Demanda

Tipos de aerogeneradores:
Coste adquisición,
características técnicas

Recurso eólico disponible:
Energía generada por cada
aerogenerador en cada punto

Microrred: conductores,
postes, costes y
características

Baterías, inversores,
reguladores, características

Modelo de programación lineal

Función objetivo

Coste inicial

Coste reposición

Energía generada

Restricciones

Satisfacción de la
demanda

Especificaciones técnicas:
Caídas tensión,
inversores, reguladores,
baterías

Salidas

Variables

Aerogeneradores:
Localización y puntos de
consumo a los que
suministra energía

Microrred: diseño,
conductores utilizados

Resultados

Coste

Energía generada

Modelización matemática

- **Datos de entrada (parámetros):**
 - Comunidad
 - Puntos de consumo, puntos de posible ubicación de aerogeneradores y distancias entre ellos (D, P, L_{pd})
 - Demanda: energía y potencia (ED_d, PD_d)
 - Equipos
 - Aerogeneradores: tipos, coste, potencia máxima (A, CA_a, PA_a)
 - Reguladores: tipos, coste, potencia máxima (R, CR_r, PR_r)
 - Baterías: tipos, coste, capacidad, descarga máxima, autonomía (B, CB_b, EB_b, DB, VB)
 - Inversores: tipos, coste, potencia máxima (I, CI_i, PI_i)
 - Medidores: coste (CM)
 - Red
 - Conductores: tipos, precio, resistividad (C, CC_c, RC_c)
 - Voltaje y caída de tensión admisible (V_n, V_{min}, V_{max})

Modelización matemática

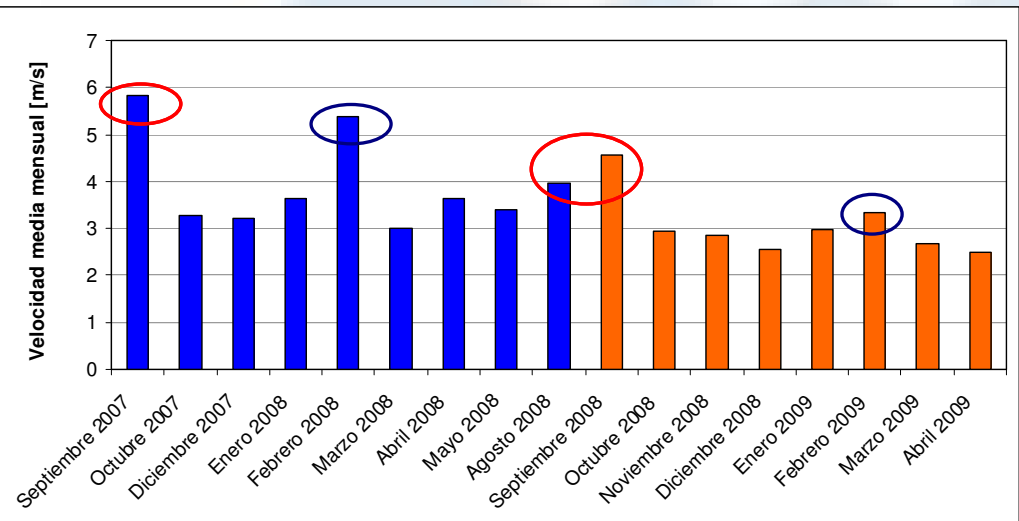
□ Datos de entrada (parámetros):

- **Recurso eólico:** Energía generada por cada tipo de aerogenerador en (EA_{pa}) cada punto de posible ubicación, calculado a partir del mapa de recurso
 - Modelo de evaluación de viento a microescala: Extrapola las medidas de un anemómetro en un punto en un área, a partir de el mapa topográfico.

Anemómetro



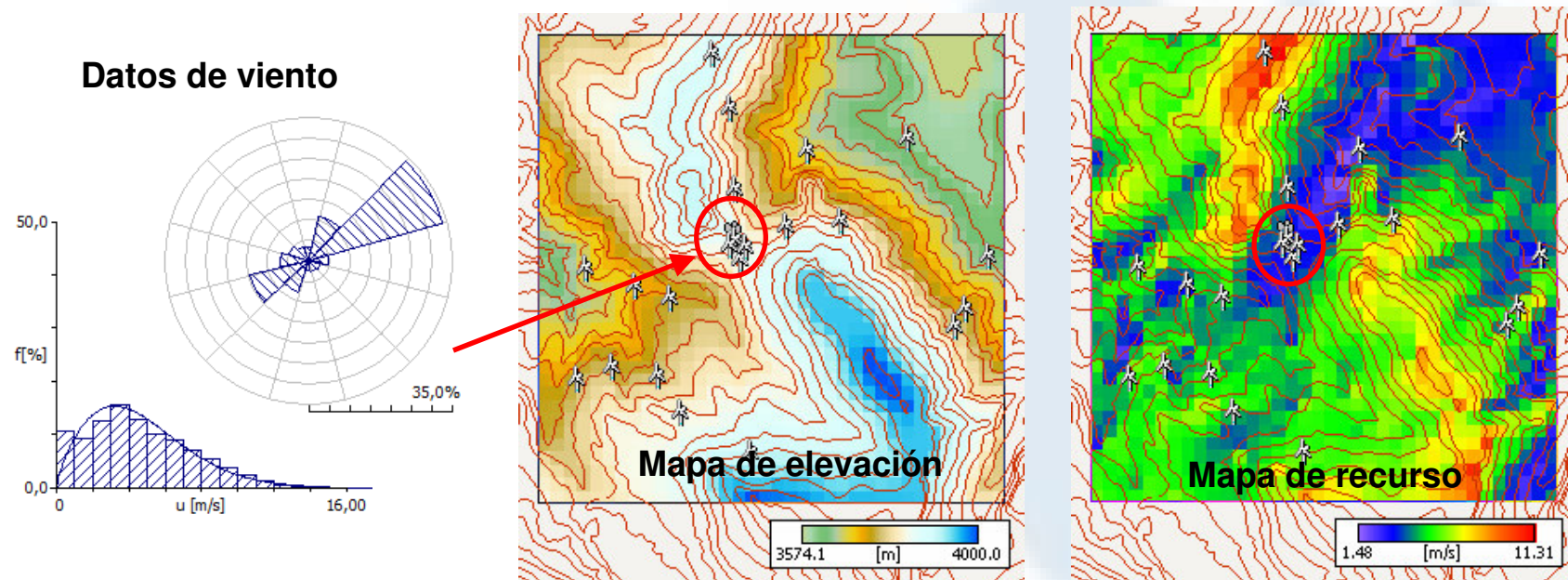
Velocidad media (m/s)



Modelización matemática

□ Datos de entrada (parámetros):

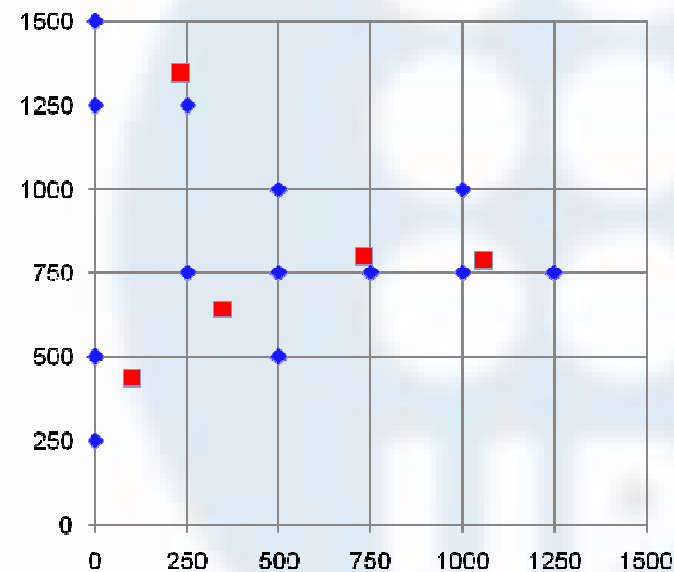
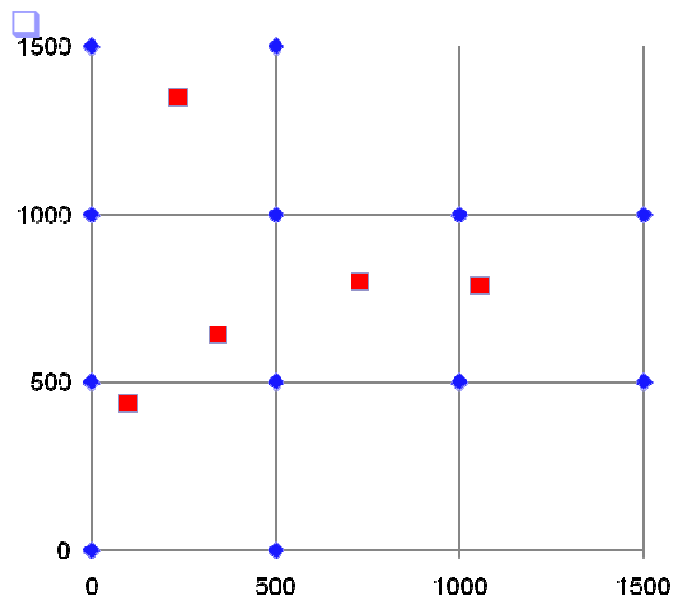
- **Recurso eólico:** Energía generada por cada tipo de aerogenerador en (EA_{pa}) cada punto de posible ubicación, calculado a partir del mapa de recurso
 - Modelo de evaluación de viento a microescala: Extrapola las medidas de un anemómetro en un punto en un área, a partir de el mapa topográfico.



Modelización matemática

■ Puntos de colocación de los aerogeneradores

- No se limita a los puntos de consumo. Se añaden puntos de generación mediante la creación de una malla.
- Opciones, creación de una malla:
 - 500x500m, se cogen los 4 puntos que alrededor de a un punto de consumo.
 - 250x250m, se cogen los puntos que alrededor de a un punto de consumo de si tienen con mayor recurso eólico.



Modelización matemática

□ Variables:

- **Equipos** ($x_{a_{pan}}, x_{b_{pbn}}, x_{i_{pin}}, x_{r_{prn}}$)
 - Variable binaria, indica si se coloca en un punto p el equipo número n , de un cierto tipo (aerog., baterías, inversores, reguladores).
- **Medidores** (x_{m_p})
 - Variable binaria, indica si se coloca un medidor en un punto p .
- **Conductores** ($x_{c_{pdc}}$)
 - Variable binaria, indica los puntos p y q están conectados con un conductor de tipo c
- **Red** ($f_{e_{pd}}, f_{p_{pd}}$)
 - Variable real, indica el flujo de energía/potencia entre 2 puntos.

Modelización matemática

□ Restricciones:

□ Demanda

- Demanda: energía y potencia

□ Equipos

- Equilibrio de potencia máxima entre aerogeneradores-reguladores
- Capacidad de las baterías, considerando la demanda, la autonomía requerida y la descarga máxima.
- Medidores: se sitúan en los puntos alimentados con una microrred
- N^o máximo de equipos por punto

□ Red

- Pérdidas en la red, se aplican como un factor que aumenta la demanda de energía, para aquellos puntos de una microrred.
- Máxima caída de tensión admisible, depende del flujo de potencia, de la distancia y de la resistividad del conductor
- Equilibrio de flujos de energía y potencia

Modelo matemático de diseño

■ Función Objetivo

$$[MIN]Z = \sum_{p \in P} \sum_{a=1}^A \sum_{n=1}^{NA} CA_a x_{pan} +$$

aerogeneradores

$$\sum_{p \in P} \sum_{d \in Q_p} \sum_{c=1}^C L_{pd} CC_c x_{pdc} +$$

conductores

$$\sum_{p \in P} \sum_{b=1}^B \sum_{n=1}^{NB} CB_b x_{pbn} +$$

baterías

$$\sum_{p \in P} \sum_{i=1}^I \sum_{n=1}^{NI} CI_i x_{pin} +$$

inversores

$$\sum_{p \in P} \sum_{r=1}^R \sum_{n=1}^{NR} CR_r x_{prn} +$$

reguladores

$$\sum_{d \in D} CM x_{md}$$

medidores

Modelo matemático de diseño

■ Restricciones

- **Demanda**
$$\sum_{a=1}^A \sum_{n=1}^{NA} EA_{pa} x_{pan} \geq \sum_{d \in Q_p} fe_{pd} \quad p \in P \mid p \notin D$$

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

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

- **Inversores**
$$\sum_{i=1}^I \sum_{n=1}^{NI} PI_i x_{pin} \geq FS \sum_{d \in Q_p} fp_{pd} \quad p \in P \mid p \notin D$$

- **Reguladores**
$$\sum_{r=1}^R \sum_{n=1}^{NR} PR_r x_{prn} \geq \sum_{a=1}^A \sum_{n=1}^{NA} PA_a x_{pan} \quad p \in P$$

Resultados: El Alumbre

- El Alumbre, Hualgayoc, Cajamarca (Perú).
 - El primer proyecto demostrativo de electrificación de una comunidad con un sistema microeólico en Perú.
 - Situado a 3800 msnm, escasa cobertura vegetal. Viven permanentemente 33 familias (155 pobladores). Población muy dispersa.
 - Proyecto: instalación de aerogeneradores individuales:
 - 33 aero. de 100W (IT-PE-100), en los domicilios.
 - 2 aero. de 500W (SP-500), en la escuela y en el centro de salud.

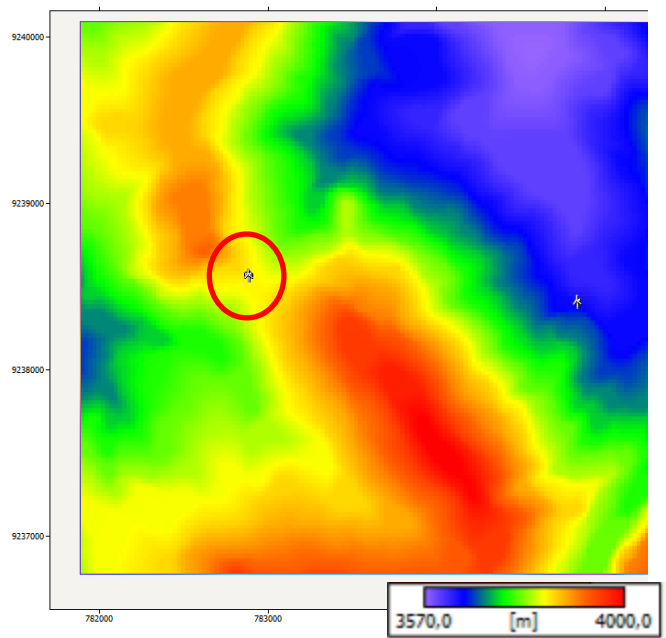


Resultados: El Alumbre

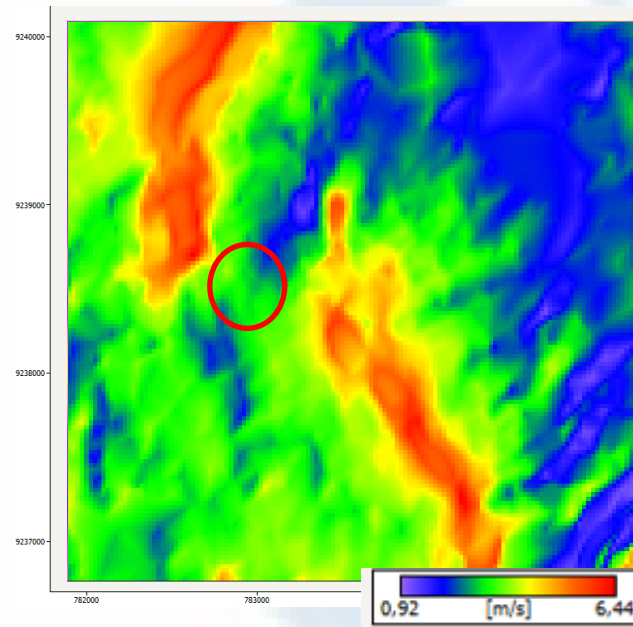
■ Mapa de viento

- Parte alta: Mucho recurso eólico.
- Centro: Buen recurso eólico.
- Parte Baja: Poco recurso

Mapa de elevación



Mapa de recurso



Resultados: El Alambre

■ Experiencia computacional

Equipos	4 tipos de aerogeneradores (100W - 2000W)	
Puntos de consumo	33 domicilios, 1 escuela, 1 posta médica	
Demanda	Baja (DB=11400 Wh/mes)	Alta (DA=22800 Wh/mes)
Puntos de ubicación	Puntos de consumo	Puntos de consumo + grilla

■ Incorporación de equipos de más potencia.

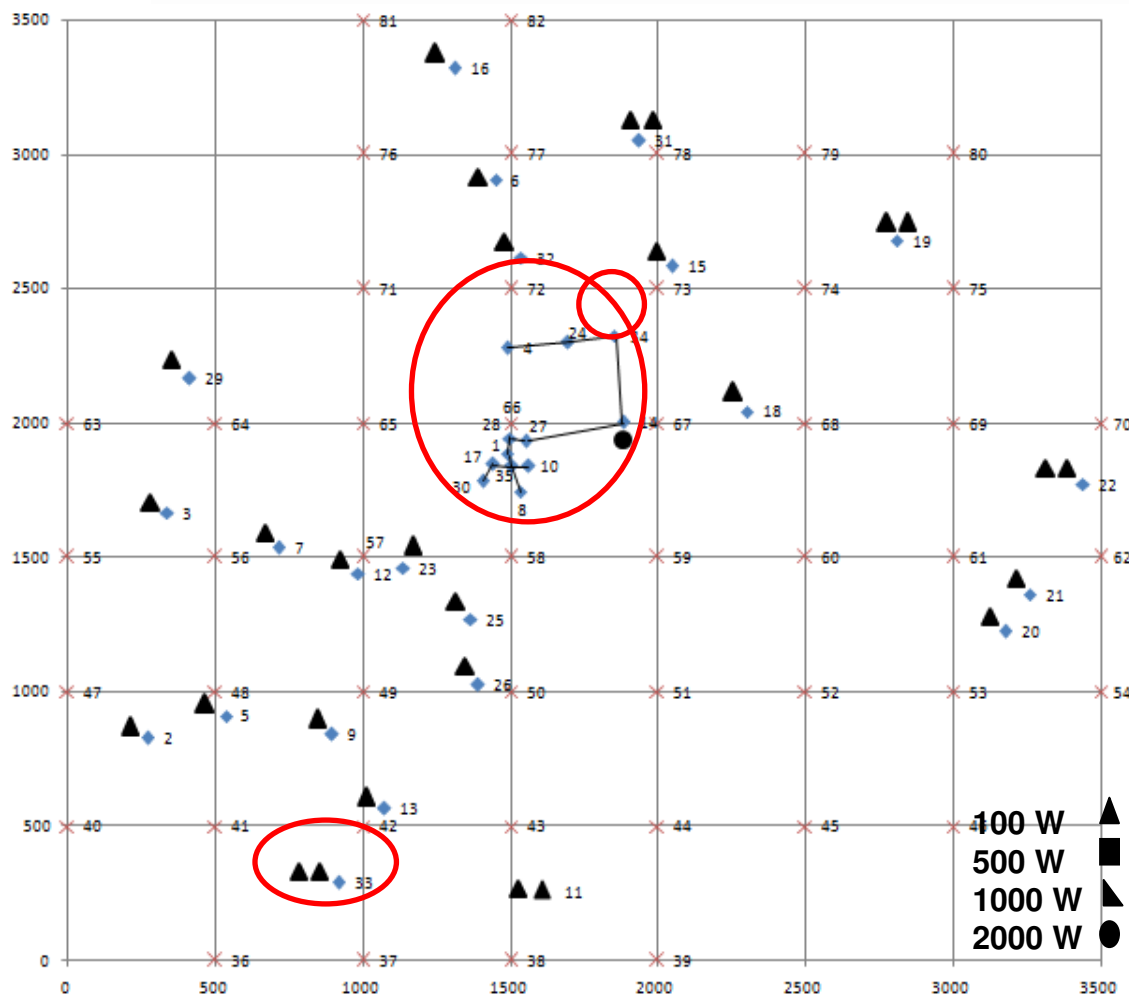
□ Aerogeneradores

Potencia (W)	Modelo	Precio (\$)
100	IT-100	974
500	SP-500	2737
1000	-	4105
2000	-	5131

- Baterías, Bat.1 120 Ah, Bat.2 150 Ah, Bat.3 200 Ah y Bat.4 250 Ah
- Inversores, Inv.1 300W, Inv.2 1200W, Inv.3 2000W y Inv.4 3000W
- Reguladores, Reg.1 35A, Reg.2 60A, Reg.3 75A y Reg.4 150A

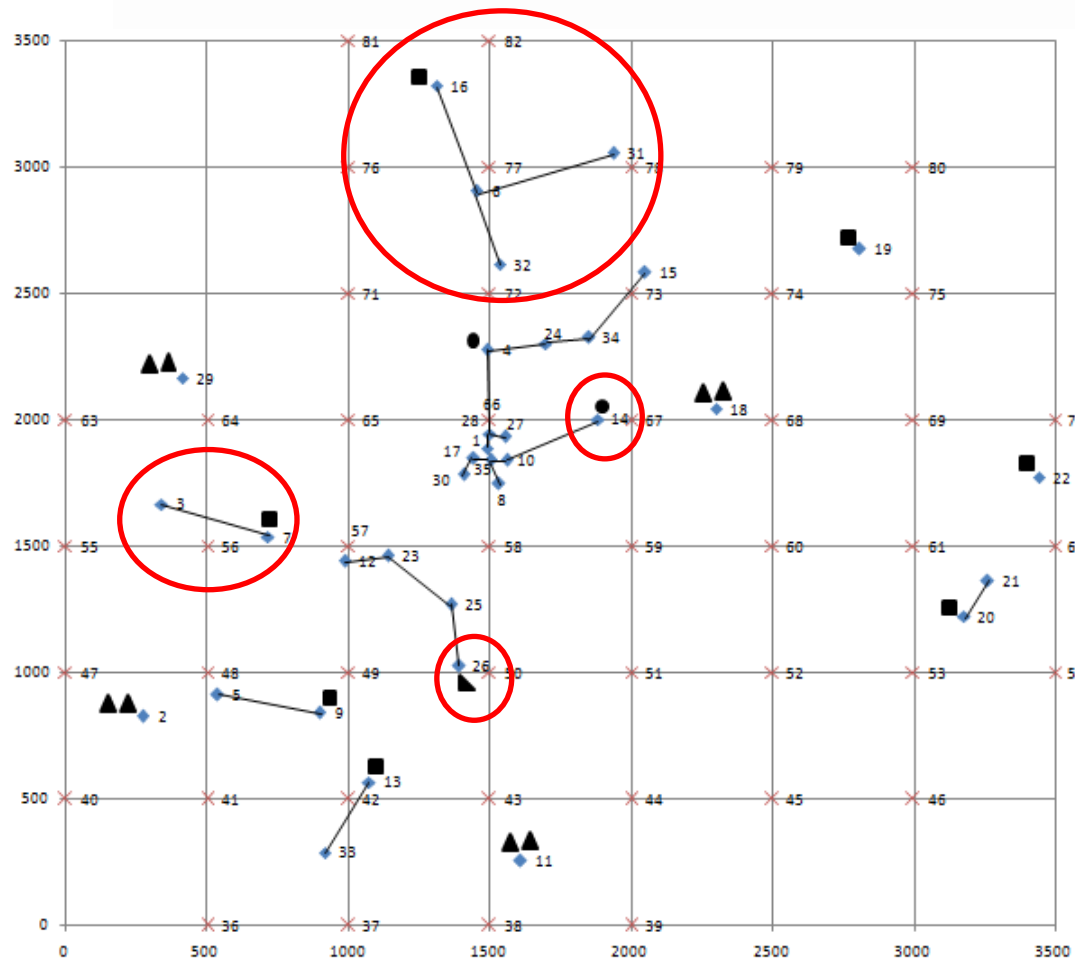
Resultados: El Alumbre

- **Demanda Baja**
- Combinación de aerog. individuales y de una microrred con un aerog. de 2000W.
- El punto 34 siempre pertenece a una microrred (punto de generación baja).
- Hay puntos donde se colocan dos IT-100 debido a que uno solo no cubre la demanda.



Resultados: El Alambre

- **Demanda Alta**
- Aumento de microrredes
- Utilización de equipos de más potencia



Resultados: El Alambre

■ Tabla comparativa

	Demanda Baja			Demanda Alta		
	Indiv.	Sin Malla	Con Malla	Indiv.	Sin Malla	Con Malla
Solución (\$)	76651	64327	65726	131893	102678	102082
Cota (\$)	-	59356	55434	-	84637	77286
Aerogeneradores: 100W, 500W, 1000W, 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

- Todas las soluciones del modelo utilizan microrredes y tienen un coste menor a las soluciones con aerogeneradores individuales. (16% DB, 23% DA)
- El uso de microrredes permite considerar escenarios de demanda alta con un incremento de coste inferior (58% vs. 72%)

Resultados: Alto Perú

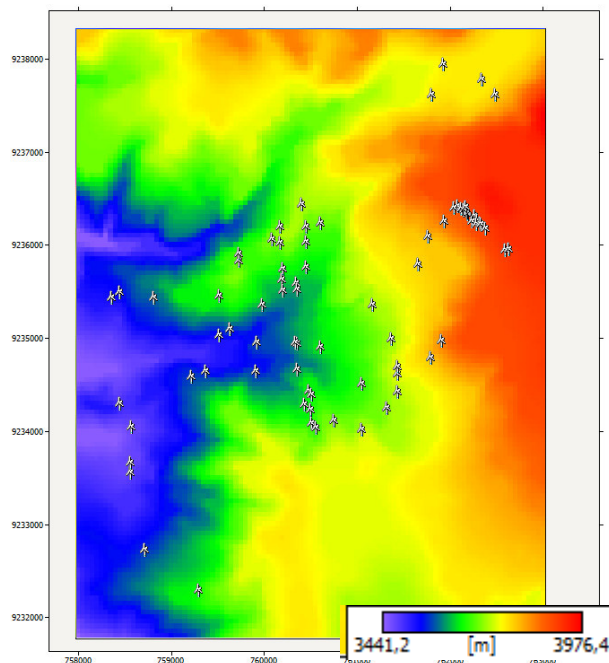
- Alto Perú, San Pablo, Cajamarca (Perú).
 - Situado a 3800 msnm, escasa cobertura vegetal.
 - Consta de 94 puntos de consumo, población muy dispersa.
 - Parte Alta: compuesta por 34 puntos de consumo
 - Parte Baja: compuesta por 57 puntos de consumo
 - Proyecto: instalación de 2 microrredes en la parte alta



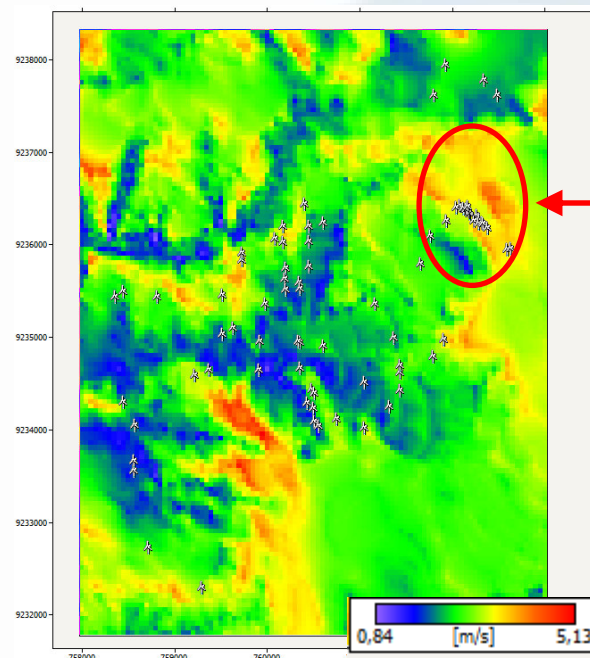
Resultados: Alto Perú

■ Mapa de viento

- Parte alta: Mucho recurso
- Centro: Buen recurso eólico
- Parte Baja: Poco recurso



Mapa de elevación



Mapa de recurso

Parte Alta

Resultados: Alto Perú

■ Experiencia computacional

Equipos	2 tipos: 100W y 500W	4 tipos :100W - 2000W
Puntos de consumo	Parte alta, 26 domicilios	
Demanda	Baja (DB=11400 Wh/mes)	Alta (DA=22800 Wh/mes)
Puntos de ubicación	Puntos de consumo	

■ Incorporación de equipos de más potencia.

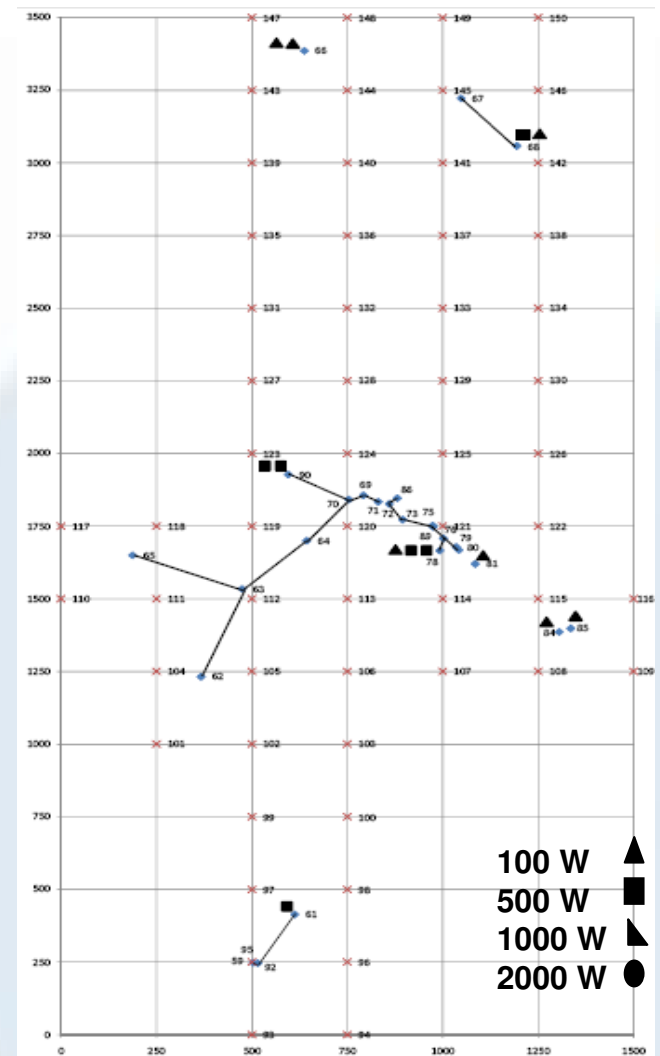
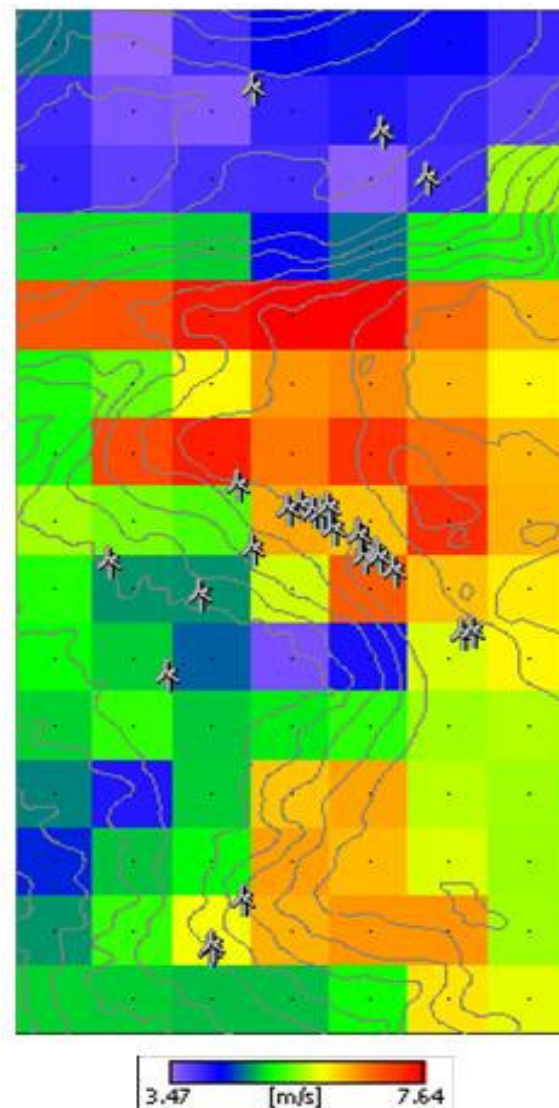
□ Aerogeneradores

Potencia (W)	Modelo	Precio (\$)
100	IT-100	974
500	SP-500	2737
1000	-	4105
2000	-	5131

- Baterías, Bat.1 120 Ah, Bat.2 150 Ah, Bat.3 200 Ah y Bat.4 250 Ah
- Inversores, Inv.1 300W, Inv.2 1200W, Inv.3 2000W y Inv.4 3000W
- Reguladores, Reg.1 35A, Reg.2 60A, Reg.3 75A y Reg.4 150A

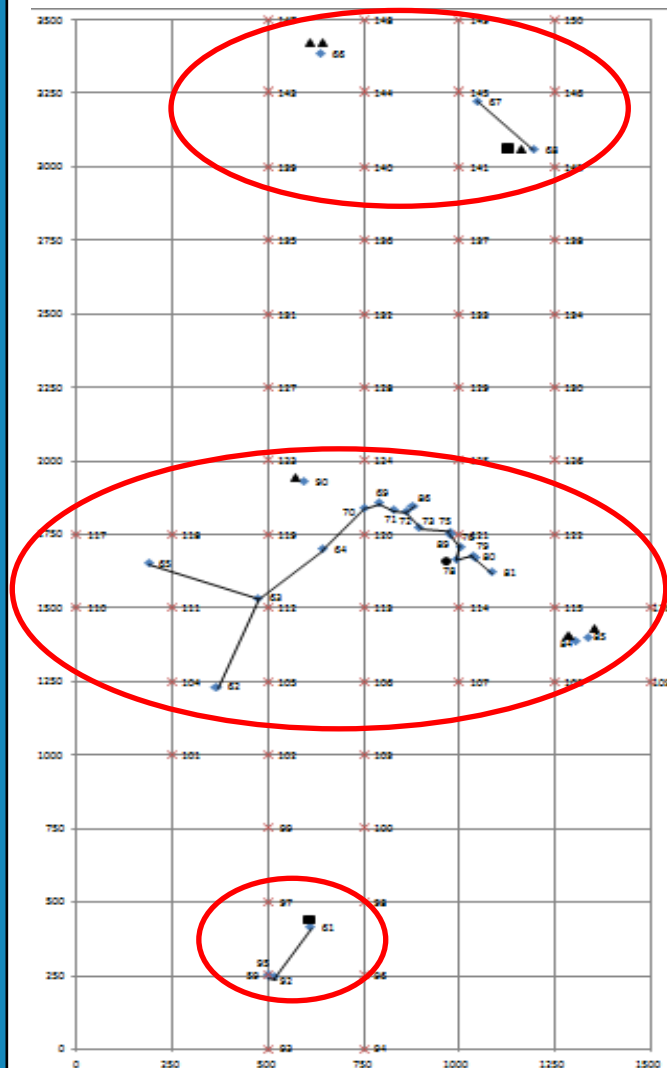
Resultados: Alto Perú

- **Mapa de viento**
- Parte Alta: poco viento, se necesita más de un aerog. para cubrir la demanda.
- Parte Media: creación de microrredes aprovechando los puntos de mayor potencial.
- Parte Baja: una pequeña microrred



Resultados: Alto Perú

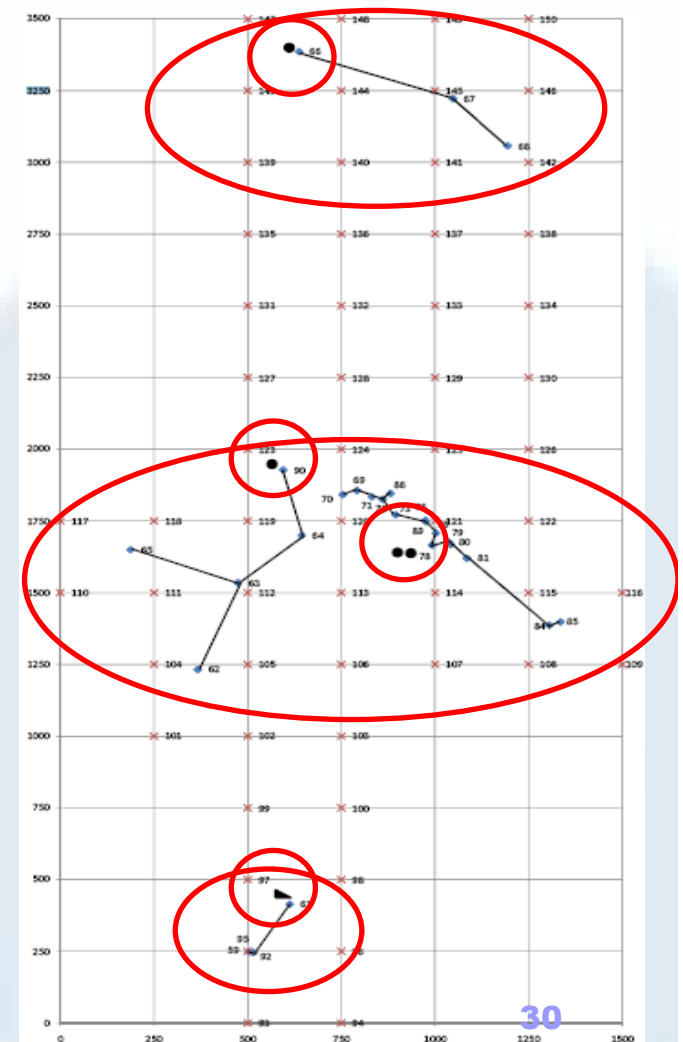
Demanda baja



- 4 tipos de aerog.
- Tendencia a la colocación de aerogeneradores de mayor potencia y formación de microrredes más grandes.
- Podría realizarse un estudio de cada zona de forma independiente.

100 W ▲
 500 W ■
 1000 W ▲
 2000 W ●

Demanda alta



Resultados: Alto Perú

■ Tabla comparativa

	Demanda Baja			Demanda Alta	
	Invid.	2 aerog	4 aerog	2 aerog	4 aerog
Solución (\$)	71078	51485	41207	88923	62005
Nº microrredes	0	4	3	5	4
Aerogeneradores: 100W, 500W, 1000W, 2000W	32, 3	8,6	6, 2, 0, 1	5, 15	0, 0, 1, 4
Energía (Wh/día)	-	15866	16066	32348	39619

- Respecto los aerog. individuales, las soluciones del modelo:
 - con 2 aerog. reduce los costes en un **28%**
 - con 4 aerog. reducen los costes en un **42%**.
- Usando 4 tipos de aerog., los costes se reducen en un 20% en el caso de DB y en un 30% en el caso de DA, respecto a la utilización de 2.
- Un aumento del 100% de la demanda aumenta un 50,4% del coste.

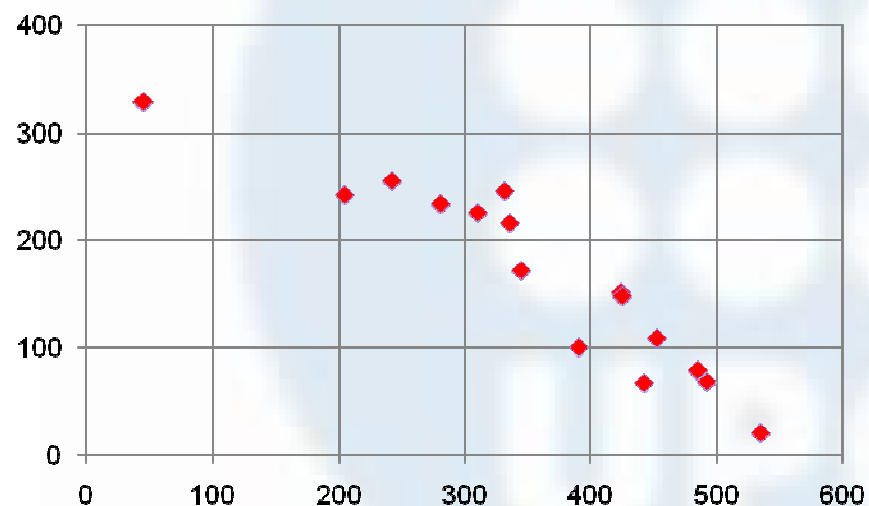
Resultados: Alto Perú (zona carretera)

■ Experimentación

Equipos	2 tipos: 100W y 500W	4 tipos :100W - 2000W
Puntos de consumo	Casas situadas en al zona central (16 viviendas). Primeras viviendas que se electrificarán	
Demanda	Baja (DB=11400 Wh/mes)	Alta (DA=22800 Wh/mes)
Puntos de ubicación	Puntos de consumo	

- Limitación del número de aerogeneradores en un punto.

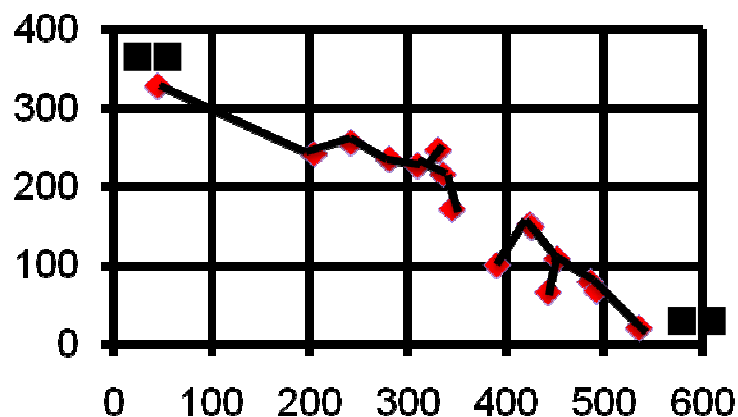
- 2 de 500W
- 1 de 500W y 2 de 100W



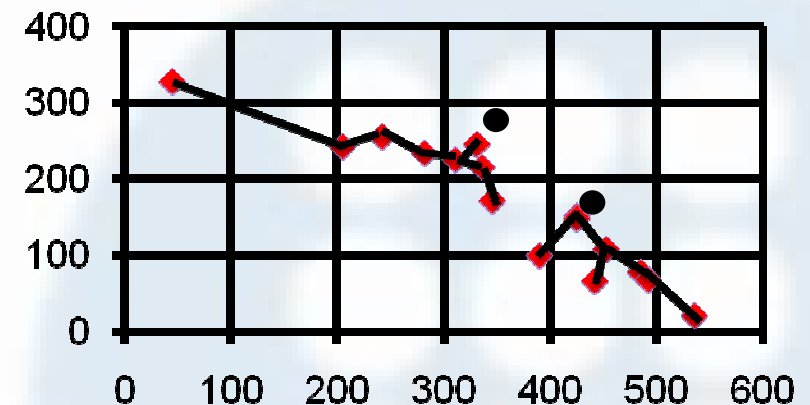
Resultados: Alto Perú (zona carretera)

■ Experimentación

Demanda baja - 2 tipos aerog.
- restricción de nº max aerog.



Demanda alta - 4 tipos aerog.
- sin restricción de nº max aerog.



- Creación en los dos casos de dos microrredes.
 - Al aumentar la demanda de los consumidores aumenta la tendencia a colocar aerogeneradores grandes.
 - La limitación del voltaje limita la colocación de aerogeneradores en un punto.

Resultados: Alto Perú (zona carretera)

■ Tabla comparativa

	Demanda Baja			Demanda Alta	
	Invid.	2 aerog rest V	2 aerog	2 aerog rest V	4 aerog
Solución (\$)	27856	23399	22126	42620	26652
Nº microrredes	0	2	1	4	2
Aerogeneradores: 100W, 500W, 1000W, 2000W	16, 0	0, 4	2, 3	0, 8	0, 0, 0, 2
Energía (Wh/día)	9235	8663	8315	17101	17243

- Los costes, respecto al caso base, se reducen un 16% en el caso con restricción de voltaje y un 21% en el caso sin dicha restricción (2 aerog.).
- Al doblar la demanda supone un incremento de coste de un 82% en el caso de 2 aerogenerador pero solo un 22% en el caso de 4 aerogeneradores

Conclusiones

- En este trabajo se presenta un modelo de optimización del diseño de sistemas microeólicos de electrificación rural.
- 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.
- El proceso de evaluación de recurso y los resultados del modelo han sido validados mediante su aplicación a las comunidades de El Alumbre y Alto Perú.
- Las soluciones obtenidas proponen utilizar micro-aerogeneradores de mayor potencia y pequeñas microrredes independientes, reducen los costes de inversión inicial y permiten cubrir escenarios de demanda más alta con un incremento de inversión menor.

Extensiones

- **Función objetivo:**
 - Incorporar los costes de mantenimiento y reemplazo de equipos a lo largo de la vida útil de la instalación,
 - Ponderar el coste con la energía total generada.
 - Incorporar criterios técnico-sociales: nº microrredes, seguridad-fiabilidad de suministro
- **Diseño del sistema:**
 - Considerar bancos de baterías no situados en el punto de generación.
 - Ampliar a sistemas híbridos que combinen la generación de energía eólica y solar.



Grupo de Investigación en Cooperación
y Desarrollo Humano - GRECDH

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Muchas gracias por su atención

Metodología para la ubicación de aerogeneradores y diseño de microrredes en proyectos eólicos

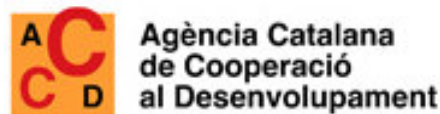
Dra. Laia Ferrer Martí

Universidad Politécnica de Cataluña

Grupo de Investigación en Cooperación y Desarrollo Humano (GRECDH)

Grupo de Investigación en Ingeniería en Organización y Logística Industrial (EOLI)

Con el apoyo de:



Centre de Cooperació per
al Desenvolupament. CCD

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

XIII ELPAH, Taller: Evaluación de recursos, Diseño, Instalación y gestión de sistemas eólicos de pequeña escala, 20-22 Julio 2009, Cajamarca, Perú.