



Grupo de Investigación en Cooperación
y Desarrollo Humano - GRECDH

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Diseño de microrredes en proyectos de electrificación eólico-solares

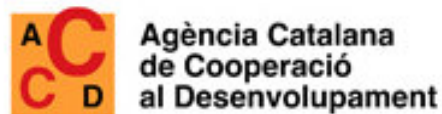
Dra. Laia Ferrer Martí

Universidad Politécnica de Cataluña (España)

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

**Seminario – Taller de Sociabilización e Intercambio de Experiencias para Planificadores
y Actores en Políticas Energéticas de Bolivia
11 y 12 de Marzo de 2010, Cochabamba, Bolivia**

Índice

1. Introducción
2. Objetivos
3. Evaluación de recurso eólico
4. Modelo matemático de diseño
5. Resultados
6. Proyecto de Alto Perú
7. Conclusiones

Introducción

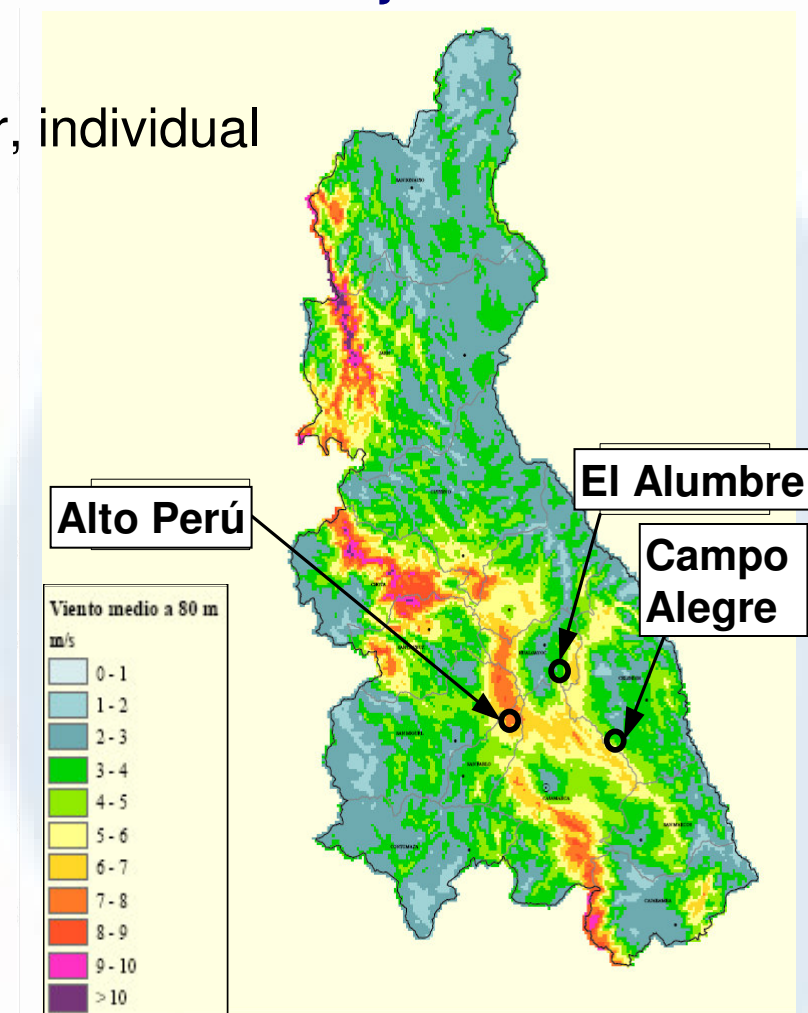
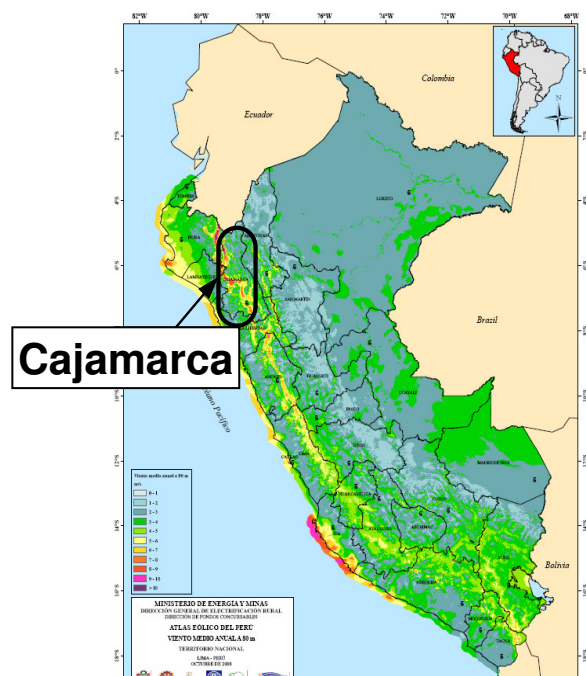
- Los sistemas de electrificación que utilizan energías renovables son una solución adecuada para proveer de electricidad a comunidades de forma autónoma.
 - Utilizan recursos locales
 - Coste menor que extender el interconectado

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



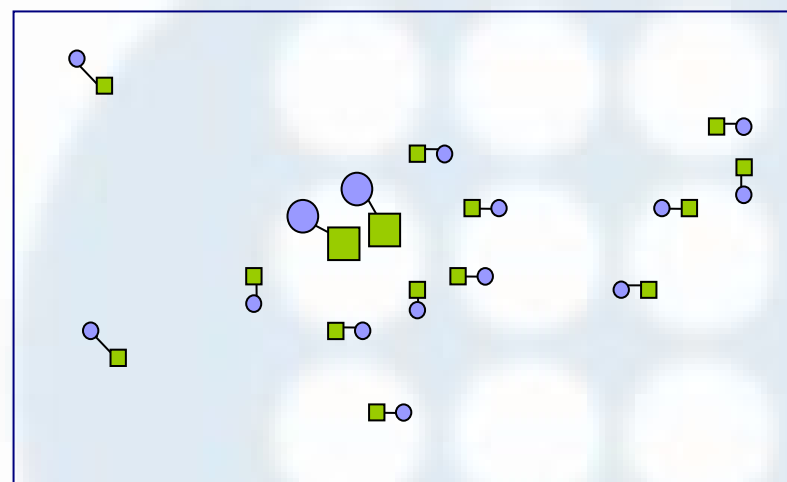
Introducción

- Sistemas microeólicos implementados en Cajamarca
 - El Alumbre: eólico, individual
 - Campo Alegre: híbrido eólico-solar, individual
 - Alto Perú: eólico, microrredes



Introducción

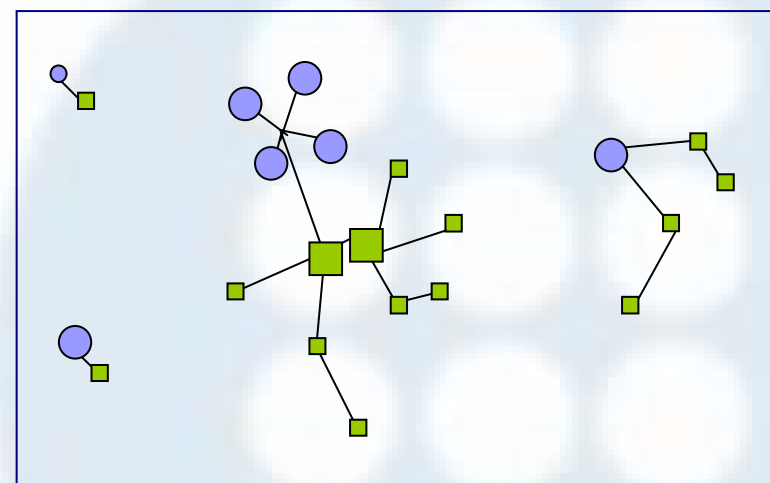
- Los proyectos de electrificación mediante energía eólica tienden a instalar microaerogeneradores individuales, por punto de consumo.
- Limitaciones
 - En algunos puntos de consumo la energía generada puede ser insuficiente por falta de recurso
 - No se considera utilizar aerogeneradores de mayor potencia 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

- Como alternativa, se propone definir 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 recurso 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-solar**
 - Decida qué generadores (eólico/solares) utilizar, dónde instalarlos y qué microrredes de distribución utilizar
 - Considere la situación y la demanda de los puntos de consumo y el recurso eólico/solar en cada punto

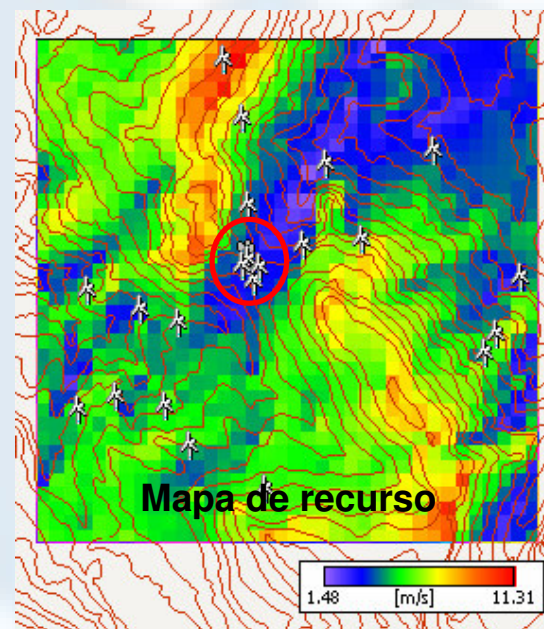
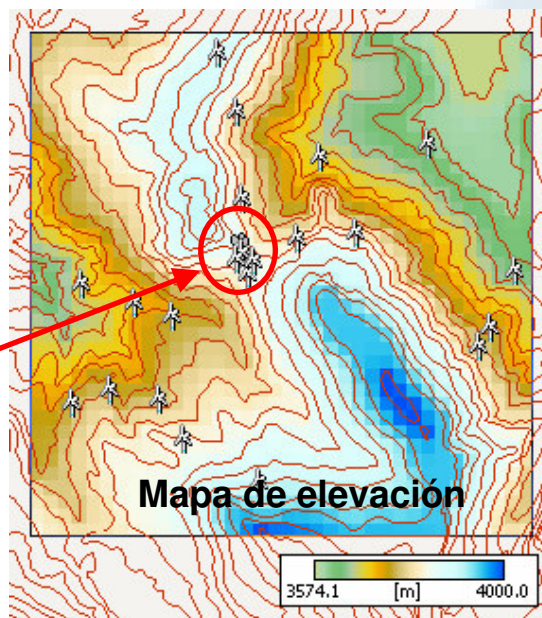
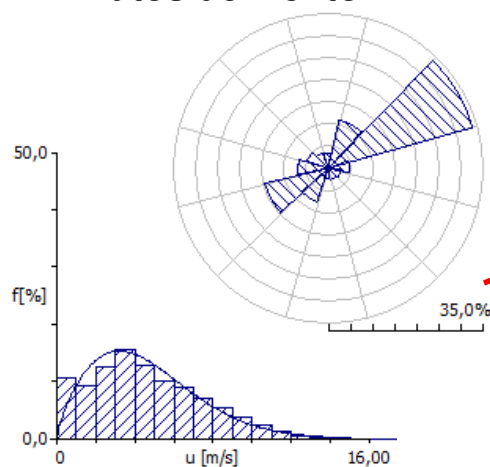
- **Realizar un estudio y evaluación de recurso eólico a microescala**
 - Analizar las herramientas de evaluación de recurso disponibles e identificar las más adecuadas
 - Definir una metodología a utilizar en el estudio del recurso eólico en una comunidad en la sierra andina

Evaluación de recurso eólico

■ Modelos de simulación de viento a microescala

- Extrapola las medidas en superficie de un anemómetro en el área que se quiere estudiar, a partir de:
 - Mapa topográfico
 - Medidas de viento en un punto
- Modelo utilizado: WAsP

Datos de viento

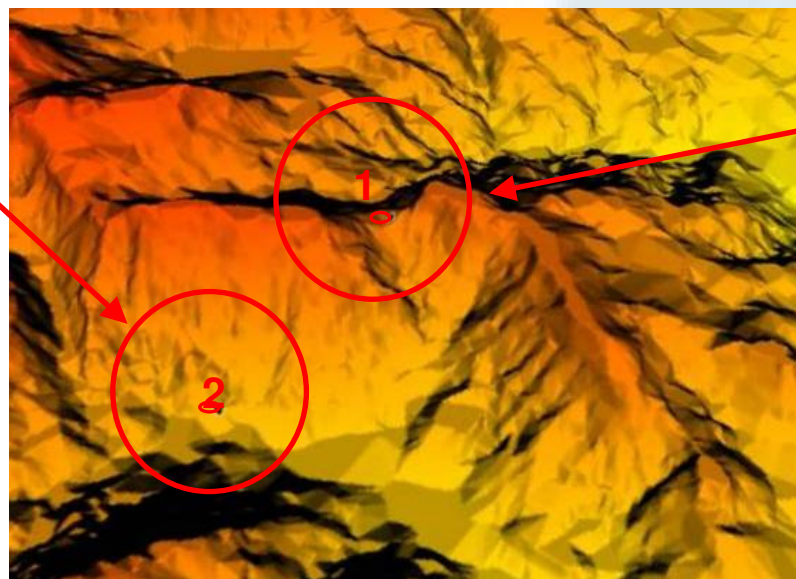


Evaluación de recurso eólico

■ Datos de viento

- Datos medidos por dos anemómetros
 - Escuela (3832m) y Alfredo (3653m)
 - Distancia en planta entre anemómetros: 1950 m
 - Datos del 18 diciembre al 25 marzo

Alfredo (3653 m)



Escuela (3832 m)



Evaluación de recurso eólico

■ Validación

- Estimación del recurso desde el anemómetro de la Escuela (parte alta) al anemómetro de Alfredo (parte baja)

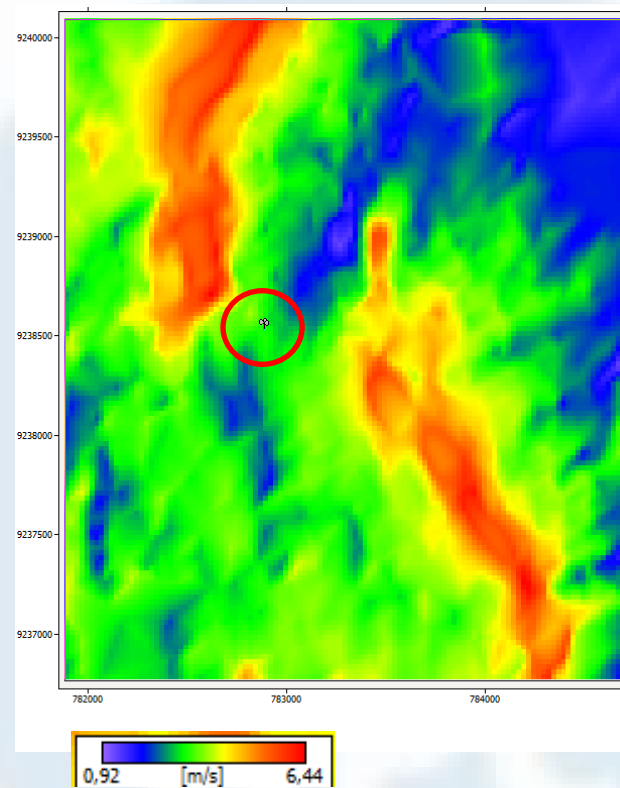
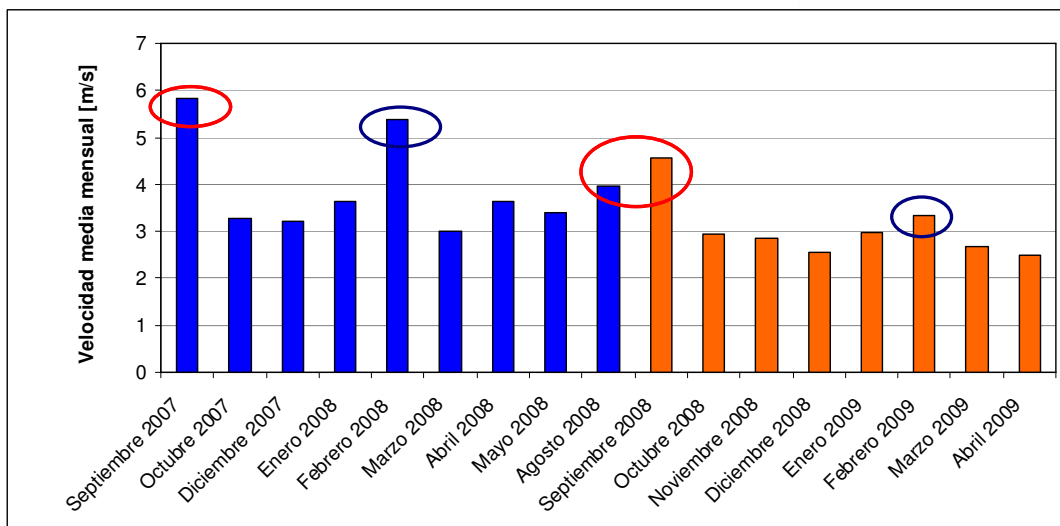
	Medias de los datos [m/s]		Estimación [m/s]	Error [%]
	Escuela	Alfredo		
Diciembre 2008	2,71	2,49	2,64	6,02
Enero 2009	3,01	2,65	2,48	-6,42
Febrero 2009	3,37	2,58	2,46	-4,65
Marzo 2009	2,94	2,54	2,42	-4,72
Media	3,05	2,58	2,50	5,50

- Los resultados del mapa de recurso obtenido son fiables:
 - El error medio obtenido es del 5%
 - Se tiende a infravalorar el recurso

Evaluación de recurso eólico

■ Resultado: mapa final

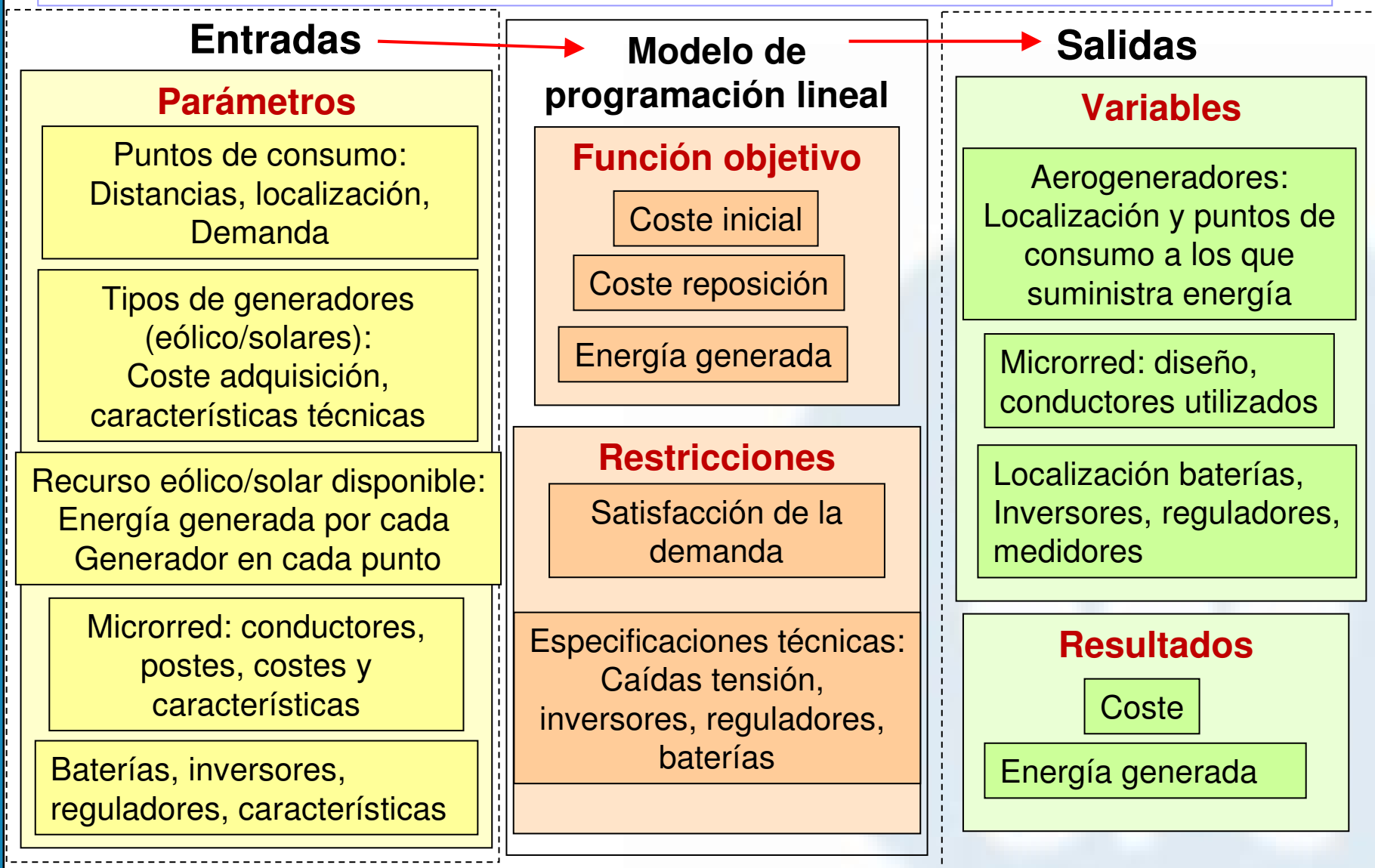
- A partir de los datos de viento del periodo de estiaje.



Modelo matemático de diseño

- **Modelo de programación lineal entera y mixta (PLEM)**
 - Método para formular matemáticamente un problema de optimización combinatoria
 - Evalúa y optimiza una función objetivo explorando todas las combinaciones de soluciones posibles:
 - de ubicación de cada tipo de equipo
 - de las microrredes de distribución
 - considerando el recurso y los puntos de demanda
- **Ventajas**
 - Permite modelar problemas muy amplios y su diseño es modular
 - Permite su resolución óptima con software especializado

Modelo matemático de diseño



Modelo matemático de diseño

■ Parámetros

$CA_a, CB_b, CI_i, CR_r, CM$ Coste [\$] de un aerogenerador del tipo a , de una batería de tipo b , de un inversor de tipo i , de un regulador de tipo r y de un medidor

EA_{pa} Energía generada [Wh/día] por un aerogenerador tipo a situado en el punto p

EB_b Capacidad equivalente [Wh] de una batería del tipo b

PI_i, PR_r Potencia máxima [W] de un inversor de tipo i y de un regulador de tipo r

VB, DB Tiempo de autonomía de las baterías [días], factor de descarga de las baterías [%]

L_{pd} Longitud [m] entre el punto p y el punto de consumo d

P, D p puntos de generación y d puntos de consumo

■ Variables

$xa_{pan}, xb_{pbn}, xi_{pin}, xr_{prn}, xm_p$ Variable binaria que indica si se coloca en el punto p un aerogenerador del tipo a , una batería del tipo b , un inversor del tipo i , un regulador del tipo r y un medidor, número n . Vale 1 en caso afirmativo y 0 en caso contrario.

$fe_{pd}, fp_{pd}, xc_{pdc}$ Flujo de energía, flujo de potencia y tipo de conductor entre el punto p y d con el tipo de conductor c .

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

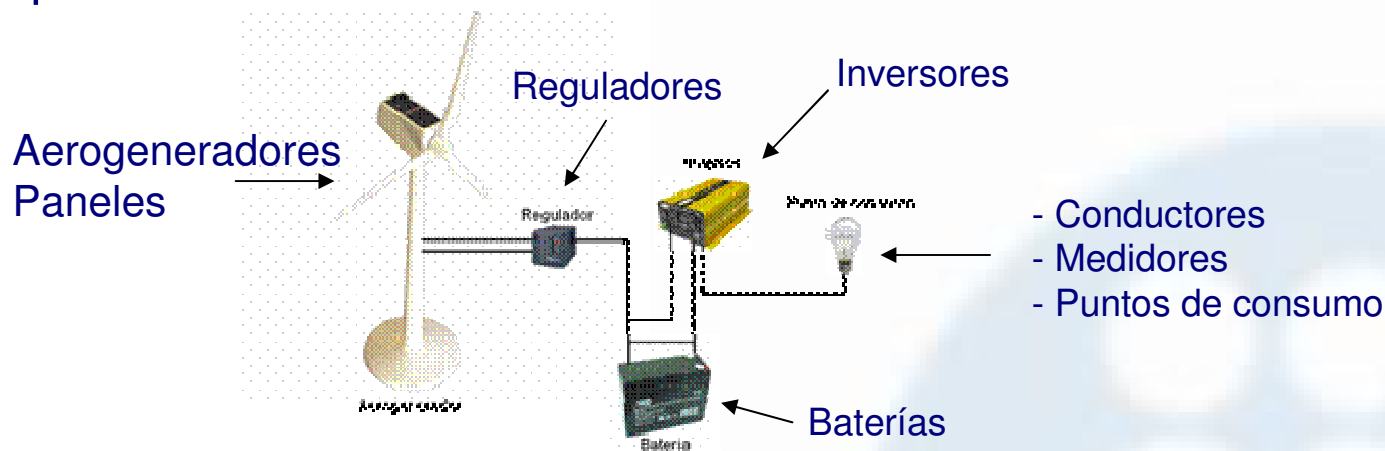
- **Caída tensión**
$$v_p - v_d \geq \frac{L_{pd} RC_c fp_{pd}}{V_n} - (V_{max} - V_{min})(1 - xc_{pdc}) \quad p \in P; d \in Q_p; c = 1, \dots, C$$

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

Modelo matemático de diseño

■ Esquema de elementos:



- **Aerogeneradores**, la energía generada depende del tipo y de la localización
- **Paneles**, la energía generada depende del tipo
- **Reguladores** convierten AC/DC y controlan la carga/descarga de la batería
- **Baterías**, su capacidad tiene en cuenta la demanda y la autonomía.
- **Inversores**, convierten DC/AC al voltaje nominal de distribución.
- **Conductores**, configuran la microrred de distribución, esquema radial
- **Medidores**, miden la energía consumida en los puntos de las microrredes

Resultados

■ Experiencia computacional

Equipos eólicos	4 tipos de aerogeneradores (100W - 2000W)	
Equipos solares	3 tipos de aerogeneradores (50W - 100W)	
Puntos de consumo	De las comunidades: domicilios, escuelas, postas médicas	
Puntos de ubicación	Puntos de consumo + grilla	
Demanda	Baja (DB=11400 Wh/mes)	Alta (DA=22800 Wh/mes)
Puntos de consumo	De las comunidades: domicilios, escuelas, postas médicas	

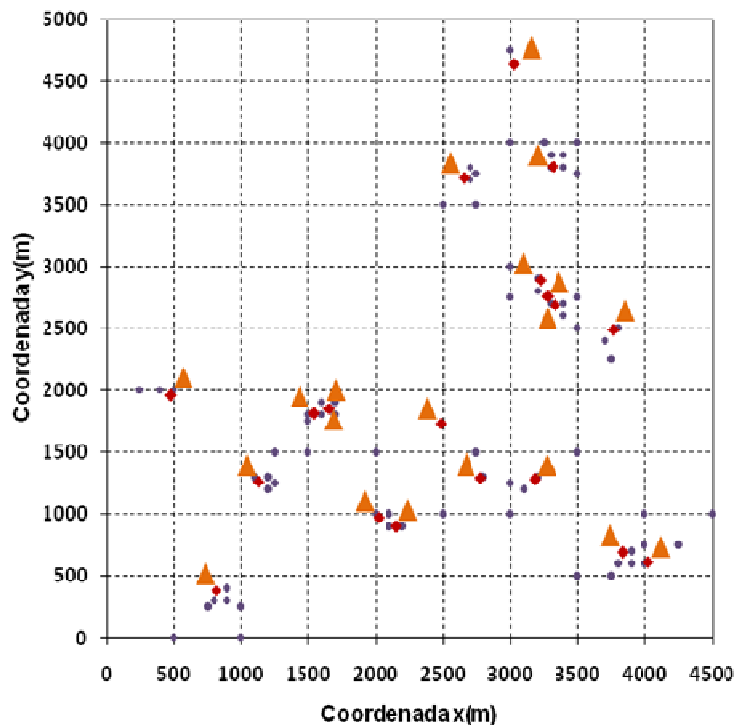
EL ALUMBRE
 - 33 aero. de 100W en los domicilios.
 - 2 aero. de 500W, en la escuela y en el centro de salud.

CAMPO ALEGRE
 - 20 aero. de 100W en los domicilios.
 - 20 paneles de 50W, en los domicilios

ALTO PERÚ
 - Microrred 1: 2 aero. de 500 W (SP-500), alimenta a 6 familias
 - Microrred 2: 2 aero. de 500 W (SP-500), alimenta a 7 familias

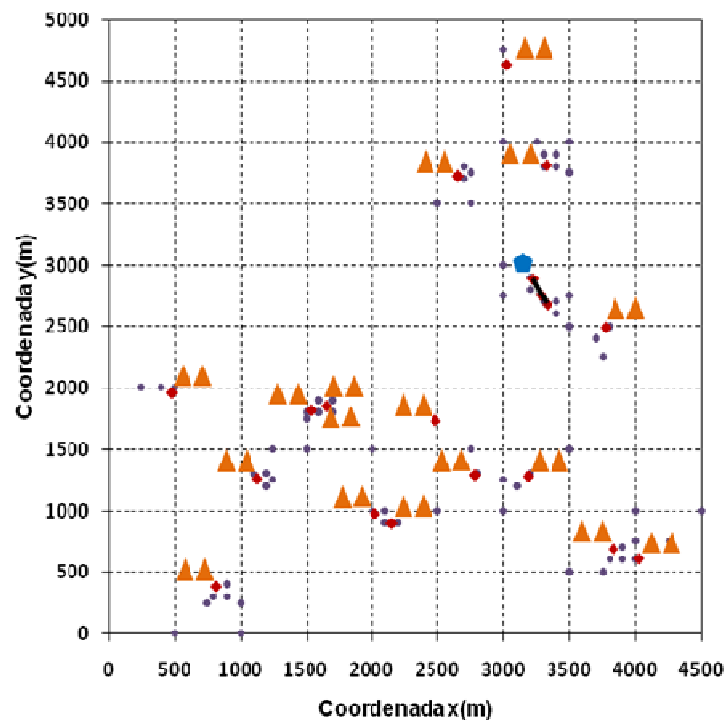
Resultados: Campo Alegre

- Demanda Baja
- Se utilizan aerogeneradores individuales y una microrred



- Aerogenerador 100W
- ⊕ Aerogenerador 500W
- Aerogenerador 1000W
- Aerogenerador 2000W
- ▶ Panel fotovoltaico 50W
- ▶ Panel fotovoltaico 75W
- ▶ Panel fotovoltaico 100W

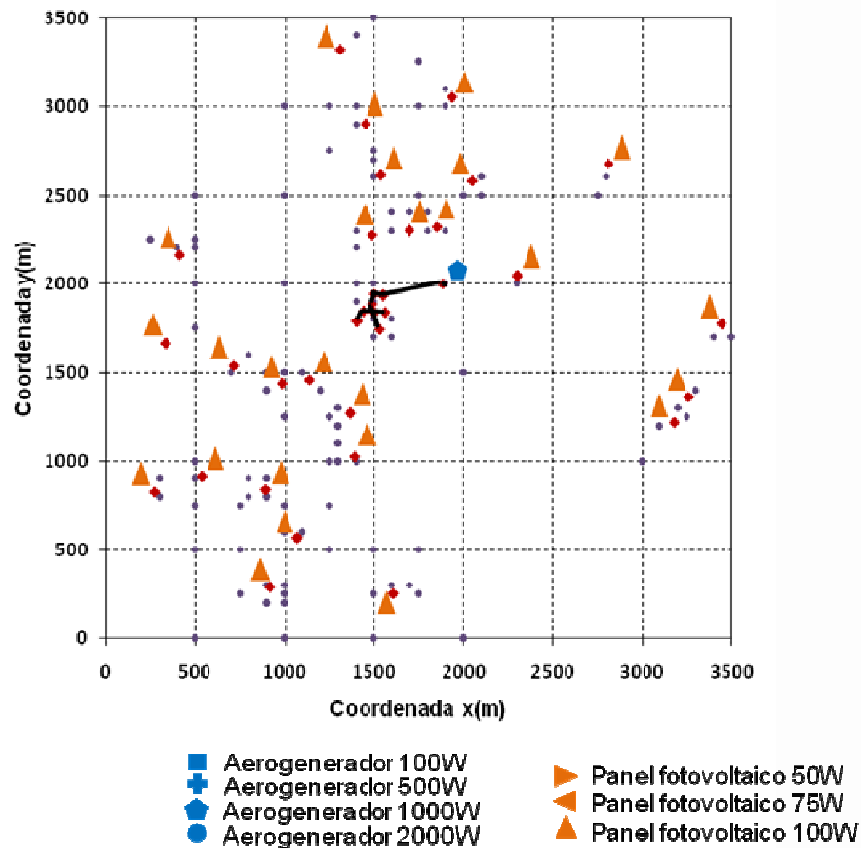
- Demanda Alta
- El nº de microrredes aumenta
- Se utilizan más aero. de más potencia



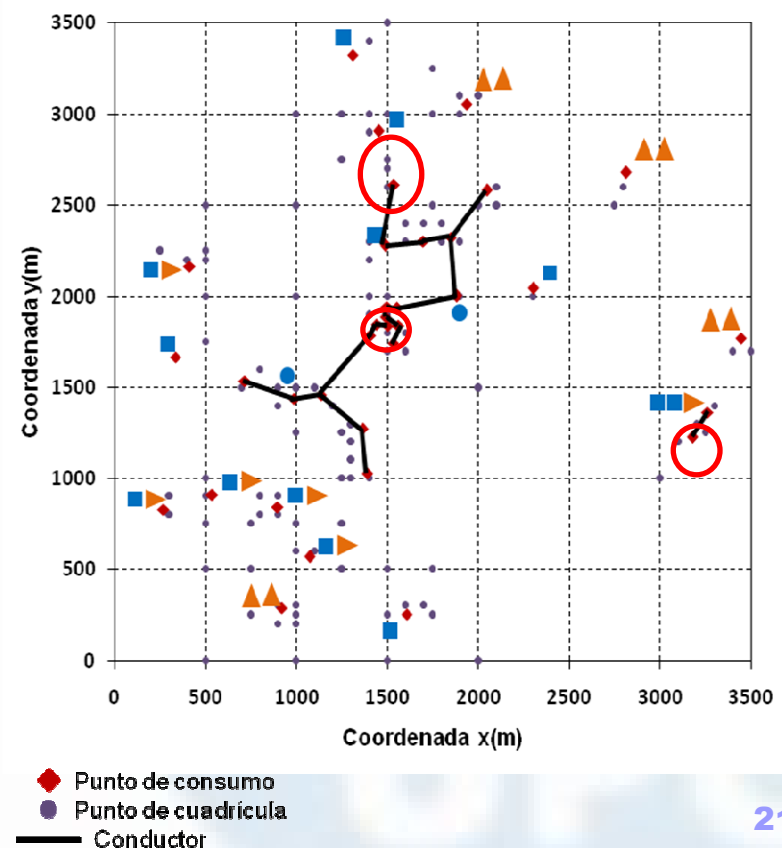
- ◆ Punto de consumo
- Punto de cuadrícula
- Conductor

Resultados: El Alumbre

- Demanda Baja
- Se utilizan aerogeneradores individuales y una microrred



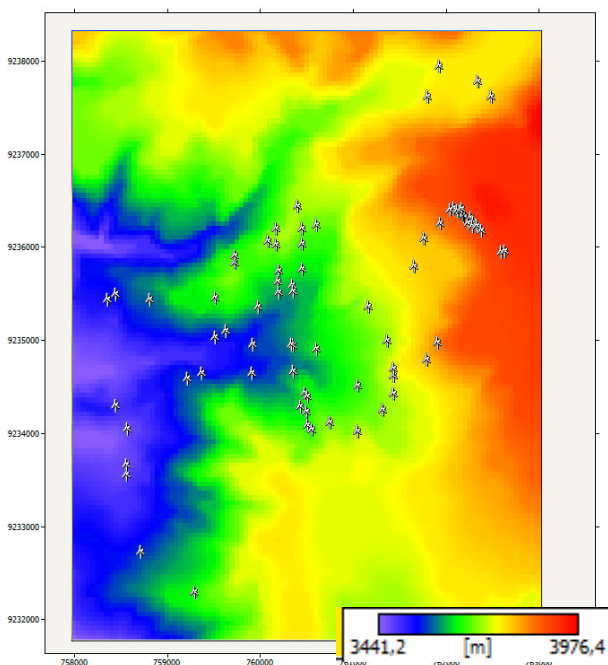
- Demanda Alta
- El nº de microrredes aumenta
- Se utilizan más aero. de más potencia



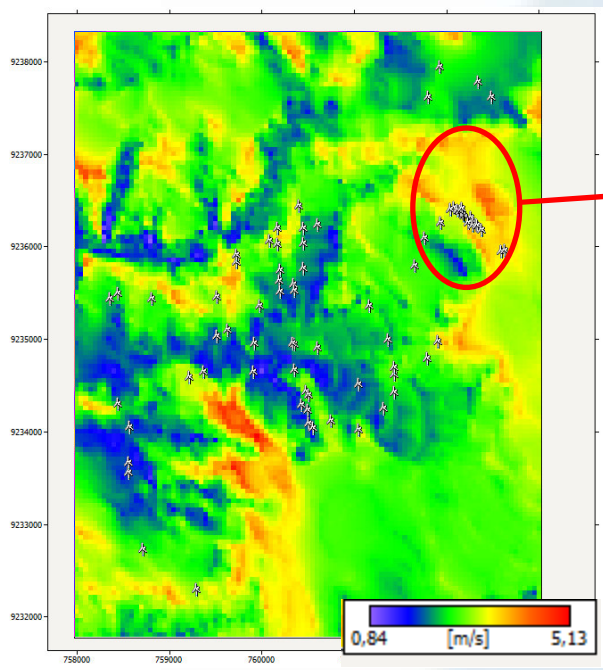
Resultados: Alto Perú

■ Mapa de viento

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

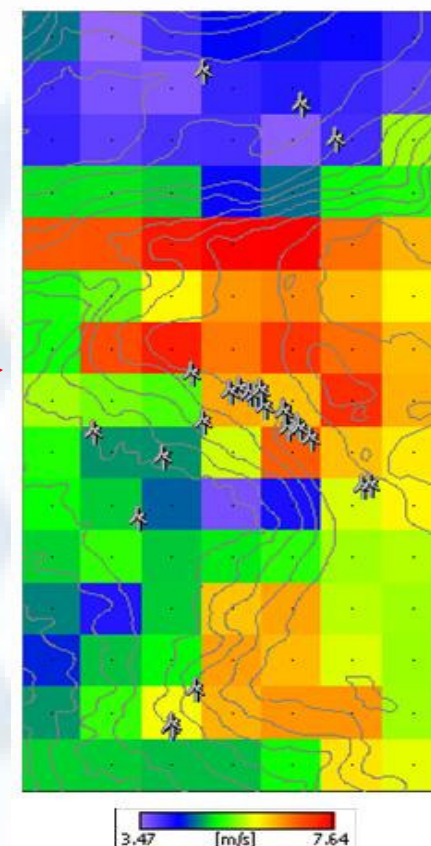


Mapa de elevación



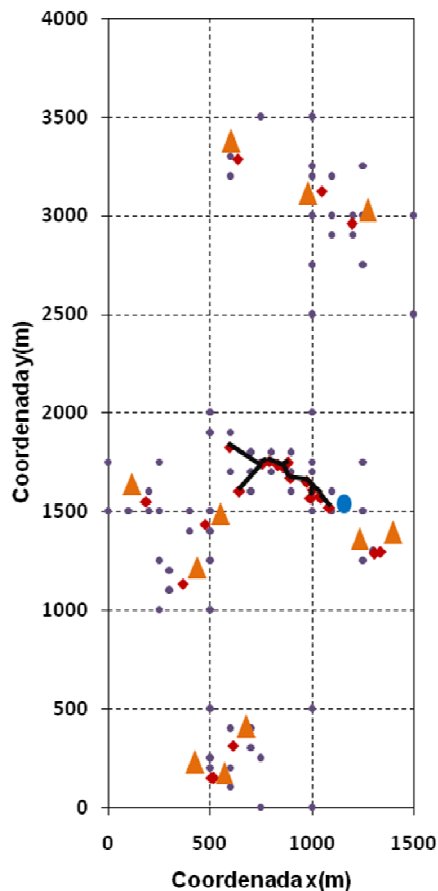
Mapa de recurso

Parte Alta

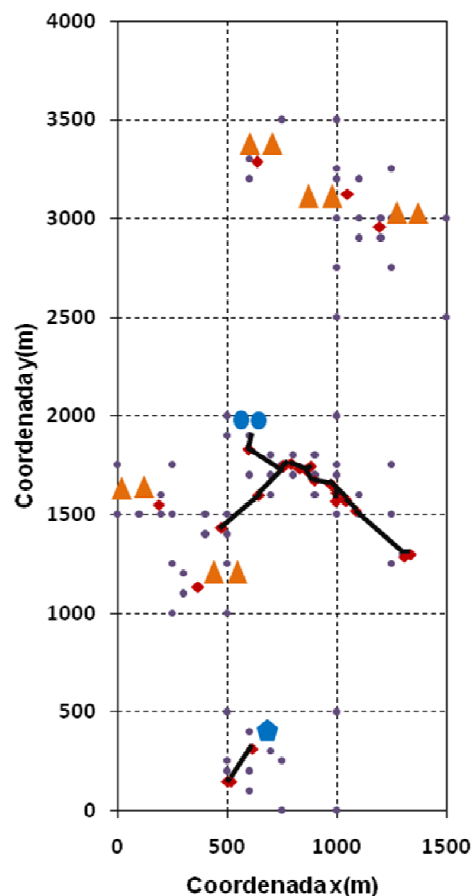


Resultados: Alto Perú

■ Demanda Baja



■ Demanda Alta



- | | | |
|-----------------------|---------------------------|-----------------------|
| ■ Aerogenerador 100W | ▲ Panel fotovoltaico 50W | ◆ Punto de consumo |
| + Aerogenerador 500W | ▲ Panel fotovoltaico 75W | ● Punto de cuadrícula |
| ⬠ Aerogenerador 1000W | ▲ Panel fotovoltaico 100W | — Conductor |
| ● Aerogenerador 2000W | | |

- Demanda Baja
- Se utilizan aerogeneradores individuales y una microrred eólica donde hay mas concentración de demanda

- Demanda Alta
- Aumentan las microrredes y el uso de equipos de más potencia

Resultados

■ Soluciones obtenidas

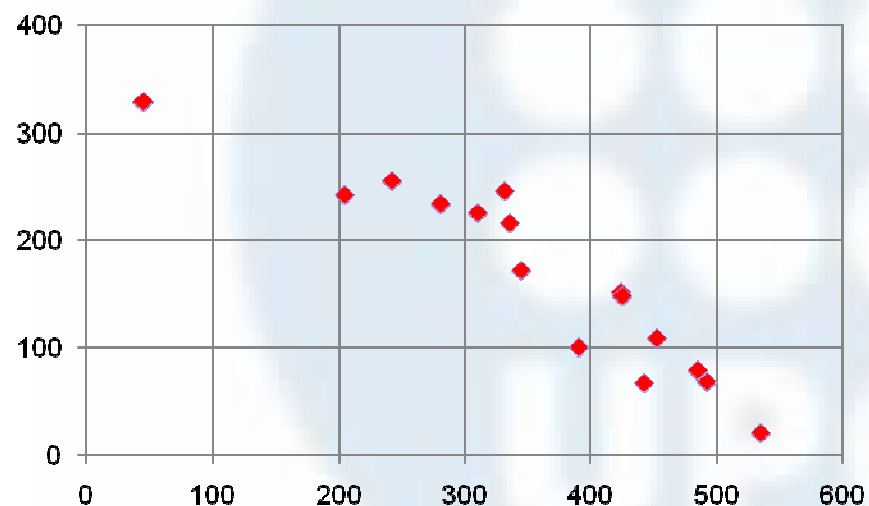
	Campo Alegre			Alto Perú			El Alumbre		
	DB	DA	dif	DB	DA	dif	DB	DA	dif
Indiv.	30360	58220	91.8	39468	75686	91.8	58746	10252 5	74.5
Model	30360	57048	87.9	32087	53953	68.1	52912	87027	64.5
Dif.	0,0	2.0		18.7	28.7		9,9	15,1	

- Todas las soluciones del modelo utilizan microrredes y tienen un coste menor a las soluciones con equipos individuales.
- El uso de microrredes permite considerar escenarios de demanda alta con un incremento de coste inferior.

Resultados: Alto Perú (zona carretera)

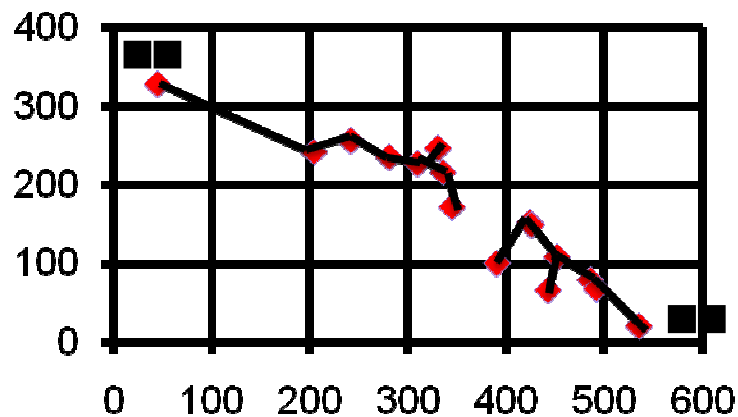
■ Experimentación

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	

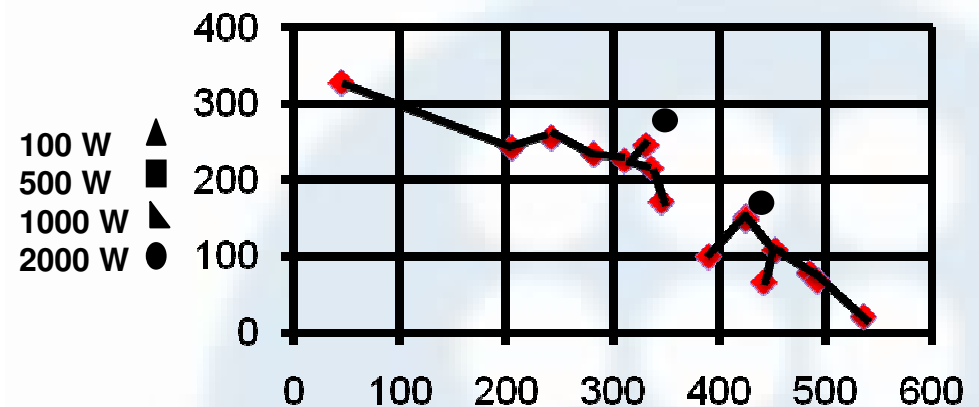


Resultados: Alto Perú (zona carretera)

- Demanda Baja
2 tipos aerogeneradores



- Demanda Baja
4 tipos aerogeneradores



- Creación en los dos casos de dos microrredes.
- Al aumentar la demanda de los consumidores aumenta la tendencia a colocar aerogeneradores grandes.

Proyecto de Alto Perú

- El proyecto consiste en 2 microrredes
 - Cada micro-red tiene 2 aerogeneradores 500W
 - Energía para 13 casas + 1 iglesia

- Usos de electricidad
 - Luz en 13 casas
 - Luz y DVD en iglesia
 - Radio, TV y celulares
 - 2 Tiendas domiciliarias
 - Restaurante (planificado)



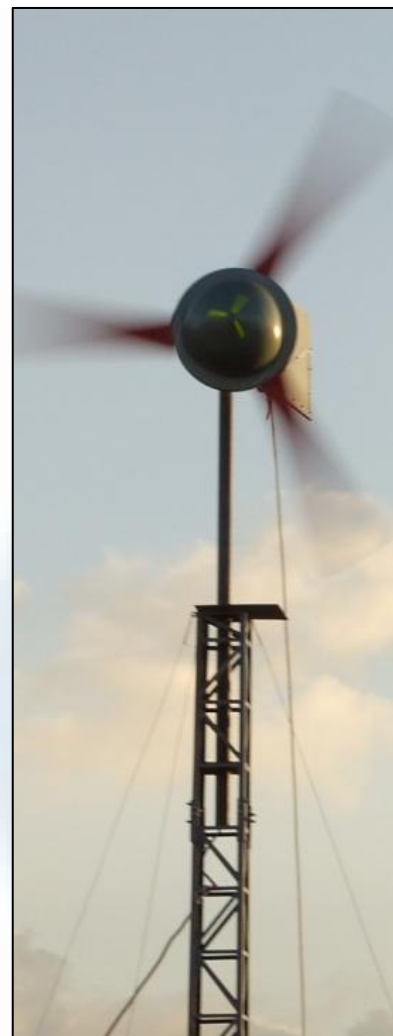
Proyecto de Alto Perú



Proyecto de Alto Perú



Proyecto de Alto Perú



Conclusiones

Comunidad	Tecnología	Usos	Ventajas	Desventajas
El Alumbre	33 aerog. 100W 2 aerog. 500W	33 casas 1 escuela 1 posta médica	- Diseño sencillo	- Variación de cantidad de energía durante año - Variación entre usuarios
Campo Alegre	20 sistemas (100W aerog. + 50W solar)	20 casas	- Más electricidad y más estable todo el año	- Técnicamente más complejo
Alto Perú	4 aerog. 500W (2 microrredes)	13 casas 1 iglesia	- Más electricidad - Más económico - Cantidad de energía equitativa entre usuarios	- Diseño más complejo - Requiere más coordinación entre usuarios



Grupo de Investigación en Cooperación
y Desarrollo Humano - GRECDH

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Muchas gracias por su atención

Diseño de microrredes en proyectos de electrificación eólico-solares

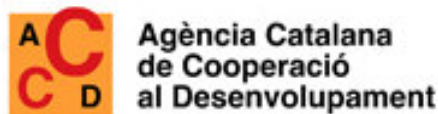
Dra. Laia Ferrer Martí

Universidad Politécnica de Cataluña (España)

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

**Seminario – Taller de Sociabilización e Intercambio de Experiencias para Planificadores
y Actores en Políticas Energéticas de Bolivia
11 y 12 de Marzo de 2010, Cochabamba, Bolivia**