



Grupo de Electrotecnia y Redes Eléctricas
Departamento de Ingeniería Eléctrica
Universidad de Vigo



Proyecto:

**Estudio y simulación de los sistemas de
generación eólica de Sotavento**

***Estudio de la
bonificación por energía
reactiva del parque
de Sotavento***

Vigo, 5 de octubre de 2006





ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	1
2	ANÁLISIS DE LOS DATOS	1
3	BATERÍAS DE LOS AEROGENERADORES.....	2
4	LA POTENCIA ACTIVA	4
5	LA ENERGÍA	8
6	ANÁLISIS INDIVIDUAL DE LOS AEROGENERADORES	10
7	COMPORTAMIENTO DEL PARQUE DURANTE EL PERÍODO DE ESTUDIO.....	17
8	ANÁLISIS GLOBAL DEL PARQUE	18
8.1	Estudio de casos particulares	18
8.2	Resultados de modificar el número de baterías de la subestación	26
9	CONSUMO DE REACTIVA DE AEROGENERADORES	28
10	CONCLUSIONES	31



ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 1: Potencia reactiva frente a potencia activa inyectadas a red</i>	1
<i>Ilustración 2: Potencia reactiva frente a potencia activa sin considerar las baterías de condensadores</i>	2
<i>Ilustración 3: Potencia reactiva de baterías frente a activa para diferentes aerogeneradores</i>	3
<i>Ilustración 4: Potencia reactiva de baterías frente a activa para diferentes aerogeneradores</i>	3
<i>Ilustración 5: Histograma de la potencia activa inyectada a red</i>	4
<i>Ilustración 6: Porcentaje de tiempo que se inyecta una potencia activa a red</i>	4
<i>Ilustración 7: Energía generada para distintas potencias</i>	5
<i>Ilustración 8: Porcentaje de energía genera para diferentes potencias</i>	5
<i>Ilustración 9: Histograma de la potencia activa inyectada a red en horas punta</i>	6
<i>Ilustración 10: Histograma de la potencia activa inyectada a red en horas llano</i>	7
<i>Ilustración 11: Histograma de la potencia activa inyectada a red en horas valle</i>	7
<i>Ilustración 12: Porcentaje de potencia activa inyectada en horas punta, llano y valle</i>	8
<i>Ilustración 13: Energía anual generada según la potencias en horas punta, llano y valle</i>	8
<i>Ilustración 14: Porcentaje de energía anual generada en función de la potencia en horas punta, llano y valle</i>	9
<i>Ilustración 15: Potencia reactiva frente a potencia activa inyectadas a red</i>	9
<i>Ilustración 16: Potencia reactiva (MVAR) frente activa (MW) en el aerogenerador 1</i>	10
<i>Ilustración 17: Potencia reactiva frente activa en el aerogenerador 1 en periodos de 1000 horas</i>	10
<i>Ilustración 18: Potencia reactiva (MVAR) frente activa (MW) en el aerogenerador 2</i>	11
<i>Ilustración 19: Potencia reactiva frente activa en el aerogenerador 2 en periodos de 1000 horas</i>	11
<i>Ilustración 20: Potencia reactiva (MVAR) frente activa (MW) en el aerogenerador 4</i>	12
<i>Ilustración 21: Potencia reactiva frente activa en el aerogenerador 4 en periodos de 1000 horas</i>	12
<i>Ilustración 22: Potencia reactiva (MVAR) frente activa (MW) en el aerogenerador 5</i>	13
<i>Ilustración 23: Potencia reactiva frente activa en el aerogenerador 5 en periodos de 1000 horas</i>	13
<i>Ilustración 24: Potencia reactiva (MVAR) frente activa (MW) en el aerogenerador 6</i>	14
<i>Ilustración 25: Potencia reactiva frente activa en el aerogenerador 6 en periodos de 1000 horas</i>	14
<i>Ilustración 26: Potencia reactiva (MVAR) frente activa (MW) en el aerogenerador 12</i>	15
<i>Ilustración 27: Potencia reactiva frente activa en el aerogenerador 12 en periodos de 1000 h.</i>	15
<i>Ilustración 28: Potencia reactiva (MVAR) frente activa (MW) en el aerogenerador 24</i>	16

<i>Ilustración 29: Potencia reactiva frente activa en el aerogenerador 24 en periodos de 1000 h.</i>	16
<i>Ilustración 30: Potencia reactiva frente activa inyectada a red en periodos de 1000 horas.</i>	17
<i>Ilustración 31: Potencia reactiva frente activa inyectada a red, sin considerar la aportada por las baterías de condensadores de la subestación, en periodos de 1000 horas.</i>	17
<i>Ilustración 32: distribución de las potencias en horas llano para optimizar la bonificación con dos baterías iguales en la subestación</i>	18
<i>Ilustración 33: distribución de las potencias en horas llano para optimizar la bonificación con dos baterías, una de 1'215 MVar y otra de 2'430 MVar en la subestación</i>	19
<i>Ilustración 34: distribución de las potencias en horas llano con dos baterías de 1'215 MVar y 2'430 MVar respectivamente, en la subestación y tres opciones de conexión</i>	19
<i>Ilustración 35: distribución de las potencias en horas llano con dos baterías de 1x1'215 + 3x1'215 MVar</i>	20
<i>Ilustración 36: distribución de las potencias en horas llano con dos baterías de 1x1'215 + 4x1'215 MVar</i>	20
<i>Ilustración 37: distribución de las potencias en horas llano con dos baterías de 1x1'215 + 5x1'215 MVar</i>	21
<i>Ilustración 38: distribución de las potencias en horas llano con dos baterías de 2x1'215 + 2x1'215 MVar</i>	21
<i>Ilustración 39: distribución de las potencias en horas llano con dos baterías de 2x1'215 + 3x1'215 MVar</i>	22
<i>Ilustración 40: distribución de las potencias en horas llano con dos baterías de 2x1'215 + 4x1'215 MVar</i>	22
<i>Ilustración 41: distribución de las potencias en horas llano con dos baterías de 2x1'215 + 5x1'215 MVar</i>	23
<i>Ilustración 42: distribución de las potencias en horas llano con dos baterías de 2x1'215 + 6x1'215 MVar</i>	23
<i>Ilustración 43: distribución de las potencias en horas punta para optimizar la bonificación con dos baterías iguales en la subestación</i>	24
<i>Ilustración 44: distribución de las potencias en horas punta para optimizar la bonificación con dos baterías, una de 1'215 MVar y otra de 2'430 MVar en la subestación</i>	25
<i>Ilustración 45: distribución aproximada de las potencias en horas valle con todas las baterías de la subestación desconectadas</i>	25
<i>Ilustración 46: distribución aproximada de las potencias en horas valle con todas las baterías de la subestación y de los aerogeneradores desconectados</i>	26
<i>Ilustración 47: Bonificación en punta según el nº de condensadores de subestación</i>	27
<i>Ilustración 48: Bonificación en llano según el nº de condensadores de subestación</i>	27
<i>Ilustración 49: Bonificación global según el nº de condensadores de subestación</i>	28
<i>Ilustración 50: Potencias reactivas en vacío frente a plena carga de los aerogeneradores</i>	29
<i>Ilustración 51: Potencia reactiva (MVar) frente activa (MW) del parque con y sin los condensadores de los aerogeneradores</i>	29
<i>Ilustración 52: Pérdidas de potencia reactiva en las líneas y transformadores del parque, frente a Potencia activa total generada</i>	30



ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1: N° y potencia de las baterías de condensadores de los aerogeneradores.....</i>	<i>2</i>
<i>Tabla 2: Características de las baterías de condensadores según el tipo de aerogenerador.....</i>	<i>3</i>
<i>Tabla 3: Bonificaciones establecidas en el RD436/2004.....</i>	<i>6</i>
<i>Tabla 4: Franjas horarias establecidas en el RD1432/2002.....</i>	<i>6</i>
<i>Tabla 5: Bonificaciones para llano en función del número de baterías de subestación de 1'215 MVar.....</i>	<i>23</i>
<i>Tabla 6: Bonificaciones para punta en función del número de baterías de la subestación de 1'215 MVar.....</i>	<i>25</i>
<i>Tabla 7: Bonificaciones para punta, llano y total en función del número de baterías de la subestación de 1'215 MVar cada una.....</i>	<i>27</i>
<i>Tabla 8: N° y potencia de las baterías de condensadores y consumo de reactiva del aerogenerador.....</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 9: Bonificaciones para punta, llano, valle y media anual para diferentes configuraciones.....</i>	<i>1</i>



1 INTRODUCCIÓN

Para el estudio de las diferentes alternativas de compensación de reactiva en el parque de sotavento que permitan incrementar la bonificación obtenida, se han empleado un total de 525600 datos minutales correspondientes al período comprendido entre el 1 de marzo de 2004 y el 28 de febrero de 2005. En la figura siguiente se representa la potencia reactiva frente a la potencia activa inyectadas a red durante el citado período.

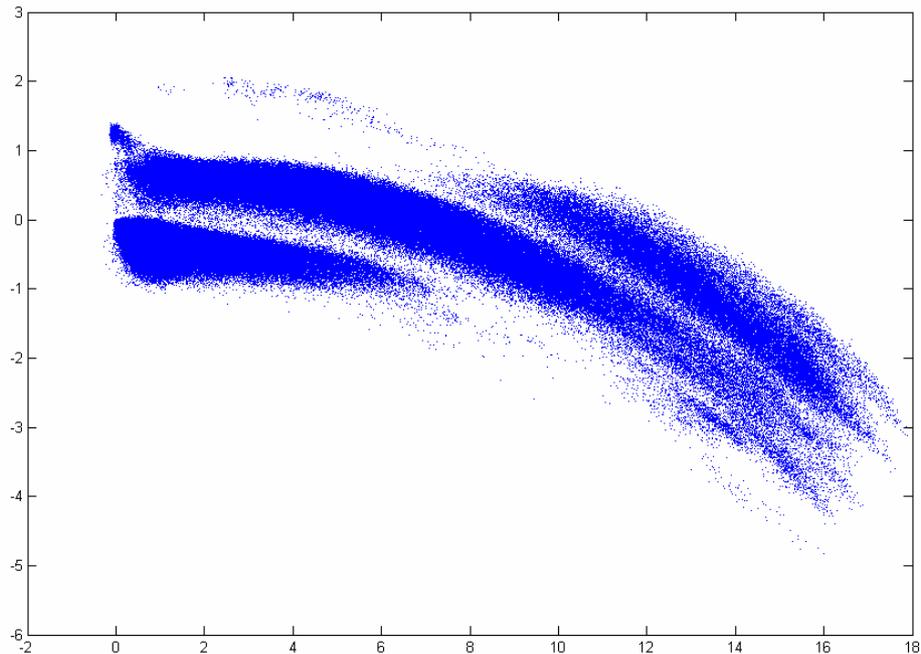


Ilustración 1: Potencia reactiva frente a potencia activa inyectadas a red

En la figura anterior se aprecia perfectamente las tres franjas correspondientes a las tres situaciones siguientes:

- No hay conectadas baterías de condensadores en la subestación.
- Está conectada una batería de condensadores de 1'215 MVar.
- Están conectadas dos baterías de condensadores de 1'215 MVar cada una.

2 ANALISIS DE LOS DATOS

En la figura siguiente se representa la misma situación sin considerar la potencia reactiva inyectada por dichas baterías. Se puede observar, que la potencia reactiva consumida por el parque puede alcanzar los 6 MVar cuando la potencia activa generada está próxima a los 18 MW.

Para determinar el número de baterías de condensadores conectados se han considerado los 3 siguientes supuestos:

$$\begin{cases} \text{sin condensadores:} & Q < 0'1-0'019 \cdot P^2 \\ \text{1 banco de condensadores:} & 0'1-0'019 \cdot P^2 \leq Q < 1'4-0'17 \cdot P^2 \\ \text{2 bancos de condensadores:} & 1'4-0'17 \cdot P^2 \leq Q \end{cases}$$

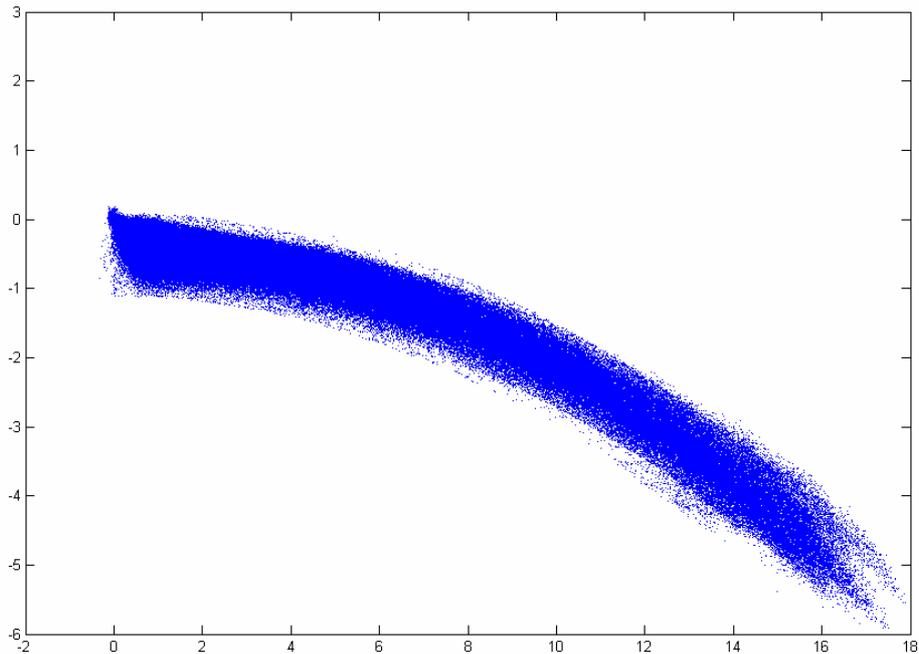


Ilustración 2: Potencia reactiva frente a potencia activa sin considerar las baterías de condensadores

La capacidad de las baterías de condensadores de los aerogeneradores suponen aproximadamente 4'7 MVAR, según los datos aportados por el personal del parque.

3 BATERÍAS DE LOS AEROGENERADORES

Tabla 1: N° y potencia de las baterías de condensadores de los aerogeneradores

Aerogenerador	Nº de baterías	Q _{total} (kVAR)
AE-01	5	350
AE-02	4	225
AE-04	4	200
AE-05	3	150
AE-06	4	280
AE-08	4	225
AE-09	3	150
AE-10	4	280
AE-11	4	200
AE-12	4	275
AE-13	4	225
AE-15	4	200
AE-17	4	280
AE-18	3	150
AE-20	4	225
AE-21	4	200
AE-22	3	150
AE-23	4	280
AE-24	6	665
Total (kVAR)		4710

Tabla 2: Características de las baterías de condensadores según el tipo de aerogenerador

AE	TIPO MAQUINA	Potencia (kW)	Tensión (V)	Reactiva (kVAr)	Escalones (MVar)					
					1	2	3	4	5	6
1	Izar-Bonus 1.3 Mw	1300	690	350	0,0875	0,075	0,075	0,075	0,0375	
6	Made AE - 46	660	690	280	0,07	0,07	0,07	0,07		
12	Neg Micon NM-900	900	690	300	0,075	0,075	0,075	0,050		
13	Neg Micon NM-750	750	690	225	0,075	0,075	0,05	0,025		
15	Ecotecnia 44 – 640*	640	690	200	0,05	0,05	0,05	0,05		
16	Made AE-52	800	1000	0						
18	Izar-Bonus MK - IV	600	690	150	0,05	0,05	0,05			
19	Gamesa G-47	660	690	0						
24	Made AE - 61	1320	690	665	0,035	0,07	0,14	0,14	0,14	0,14

*Para la máquina de Ecotecnia 44-640 se ha "estimado" la reactiva instalada.

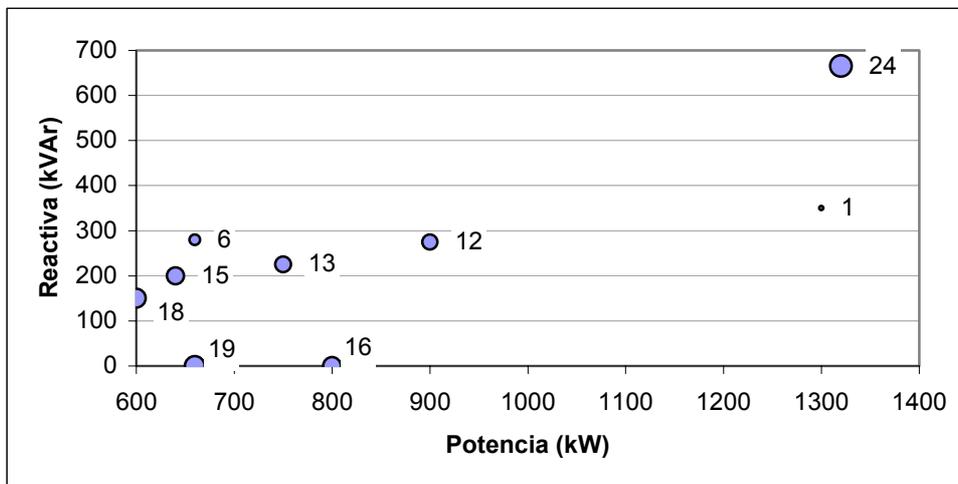


Ilustración 3: Potencia reactiva de baterías frente a activa para diferentes aerogeneradores

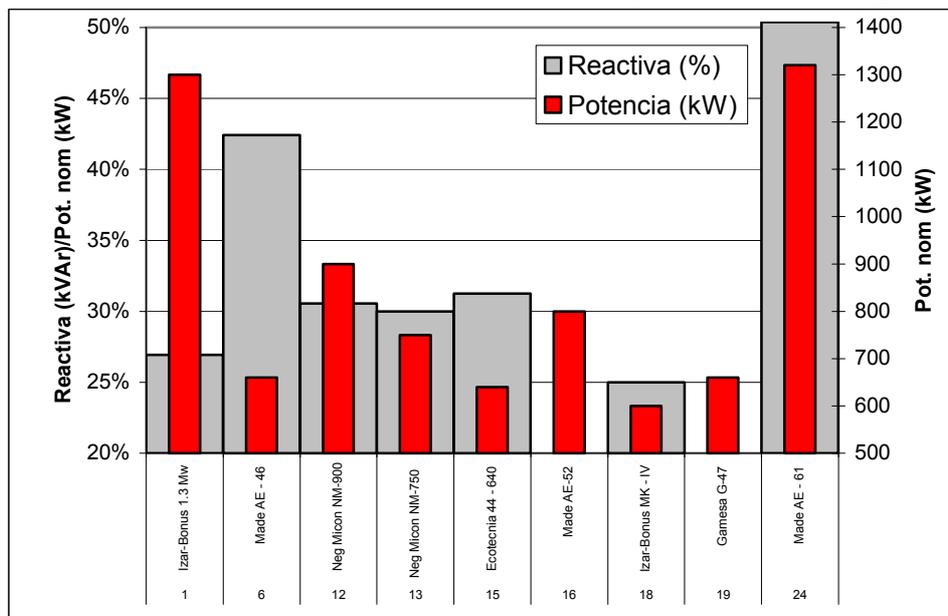


Ilustración 4: Potencia reactiva de baterías frente a activa para diferentes aerogeneradores

4 LA POTENCIA ACTIVA

El histograma de la figura representa la distribución de potencias activas minutales generadas durante el año en estudio.

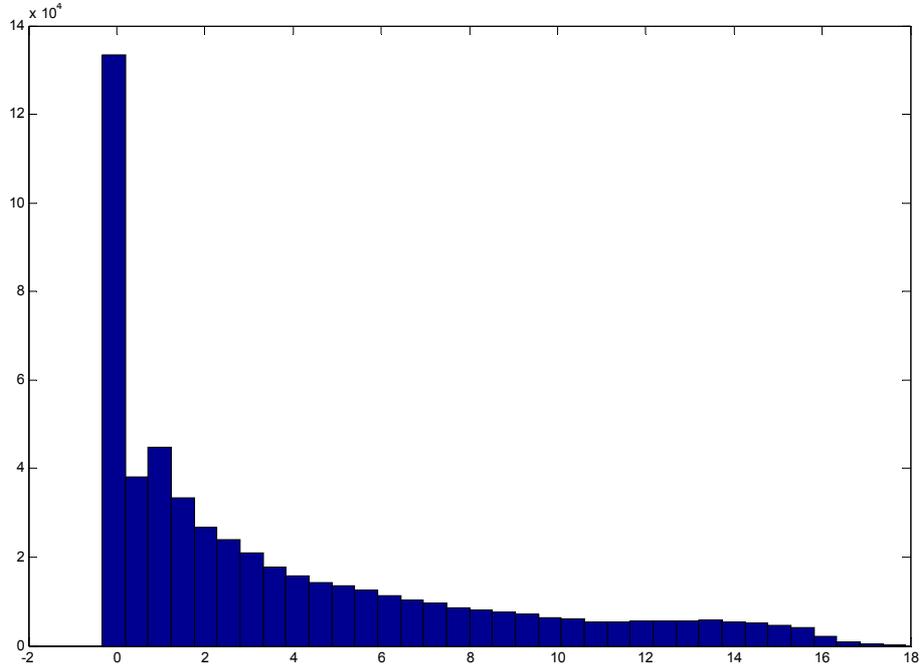


Ilustración 5: Histograma de la potencia activa inyectada a red

Del análisis de la figura anterior y de la figura siguiente se desprende que el 25% del tiempo no se genera potencia, generándose el 50% del tiempo potencias inferiores a los 2 MW.

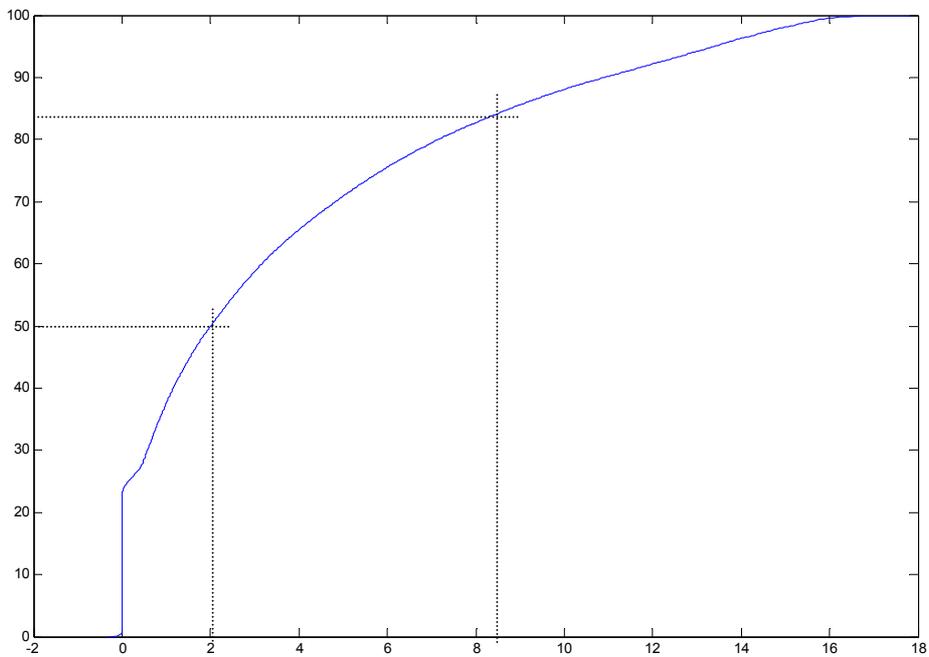


Ilustración 6: Porcentaje de tiempo que se inyecta una potencia activa a red

Sin embargo, el hecho de que se generen durante un bajo porcentaje de tiempo las potencias más elevadas lleva a que la energía anual generada para los diferentes valores de potencia sea similar, como se puede observar en la figura siguiente. Se puede observar que dicho valor de energía toma valores entre 1000 y 1300 MWh para las potencias comprendidas entre los 3 y los 16 MW. La energía anual generada, y que corresponde al área delimitada por dicha curva representa un total de 32714 MW.

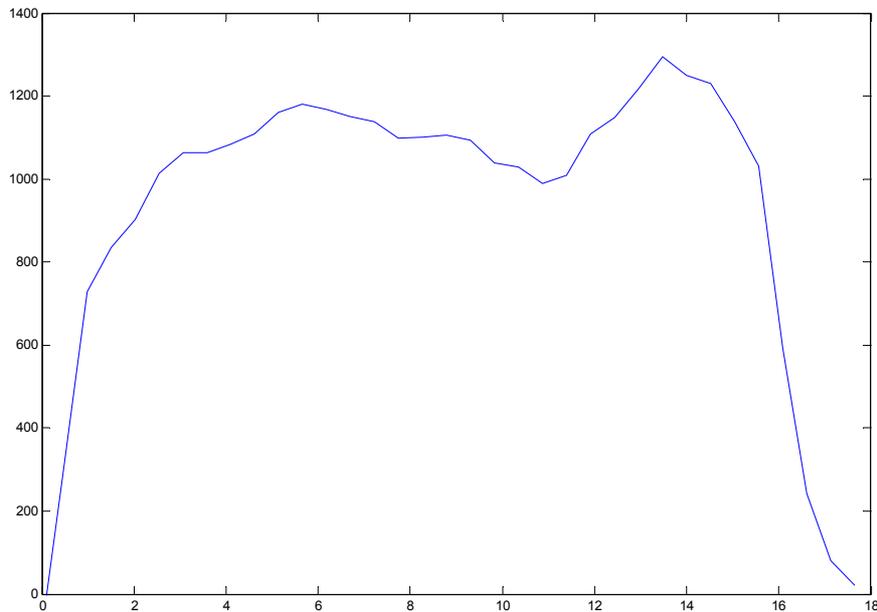


Ilustración 7: Energía generada para distintas potencias

Se puede observar un pequeño valle en torno a los 11 MW, con un pico importante en torno a los 14 MW, que sin embargo es poco relevante, si se ve en la gráfica siguiente. En términos de energía se puede concluir que la mitad se genera cuando el parque trabaja a potencias inferiores a 8'5 MW y la otra mitad para potencias superiores. Teniendo en cuenta la gráfica vista anteriormente, la mitad de la energía se genera en el 85% del tiempo y la otra mitad en tan solo el 15%.

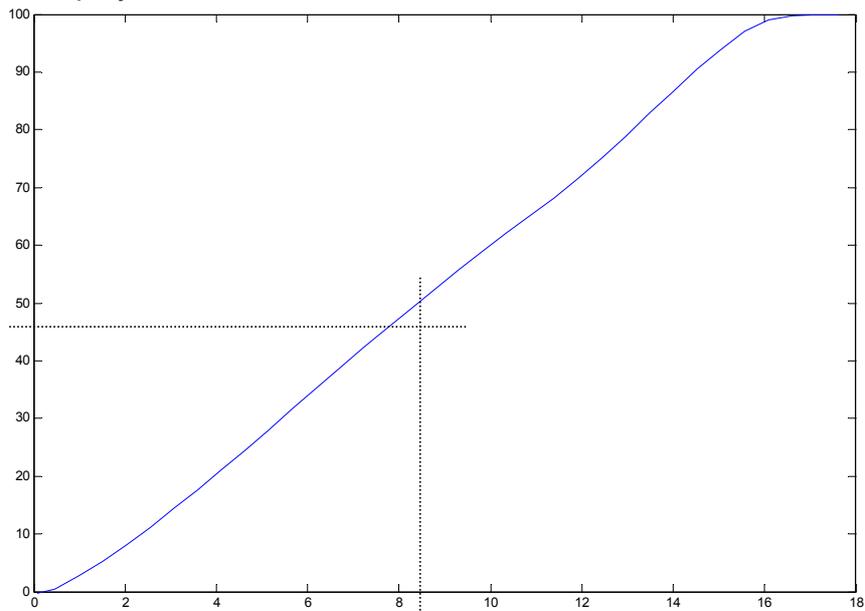


Ilustración 8: Porcentaje de energía genera para diferentes potencias

El Real Decreto 436/2004, de 12 de marzo establece en su anexo V los complementos por energía reactiva, y que se indican en la tabla siguiente.

Tabla 3: Bonificaciones establecidas en el RD436/2004

	Energía activa y reactiva	Bonificación por ciento		
		Punta	Llano	Valle
	Factor de potencia			
Inductivo	<0'95	-4	-4	8
	<0'96 y ≥0'95	-3	0	6
	<0'97 y ≥0'96	-2	0	4
	<0'98 y ≥0'97	-1	0	2
	<1 y ≥0'98	0	2	0
	1	0	4	0
Capacitivo	<1 y ≥0'98	0	2	0
	<0'98 y ≥0'97	2	0	-1
	<0'97 y ≥0'96	4	0	-2
	<0'96 y ≥0'95	6	0	-3
	<0'95	8	-4	-4

Además, establece que el horario de cada tipo es el establecido por el Real Decreto 1432/2002, de 27 de diciembre, y que se refleja en la tabla siguiente.

Tabla 4: Franjas horarias establecidas en el RD1432/2002

Invierno			Verano		
Punta	Llano	Valle	Punta	Llano	Valle
18 – 22	8 – 18 22 – 24	0 – 8	9 – 13	8 – 9 13 – 24	0 – 8

Teniendo en cuenta los horarios anteriores, a continuación se representan los histogramas de potencias activas generadas en horas de tipo punta, llano y valle. Se puede apreciar que hay pequeñas diferencias entre las tres gráficas, lo que indica que los vientos varían ligeramente en función de la hora del día.

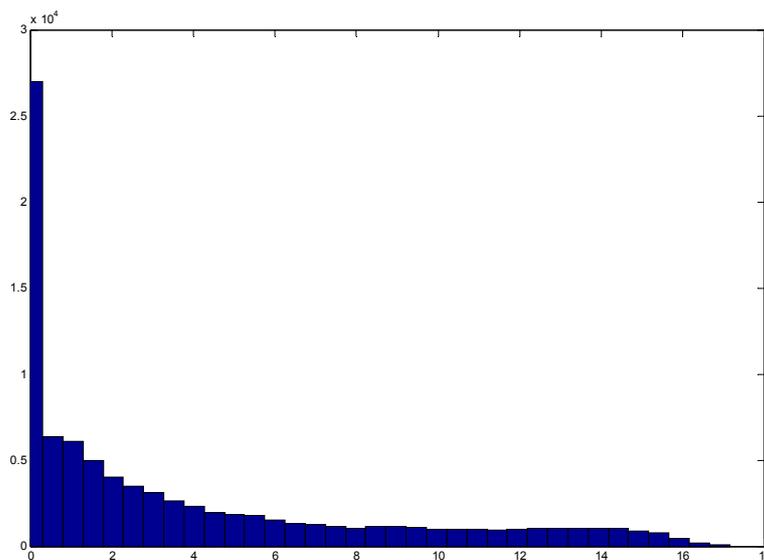


Ilustración 9: Histograma de la potencia activa inyectada a red en horas punta

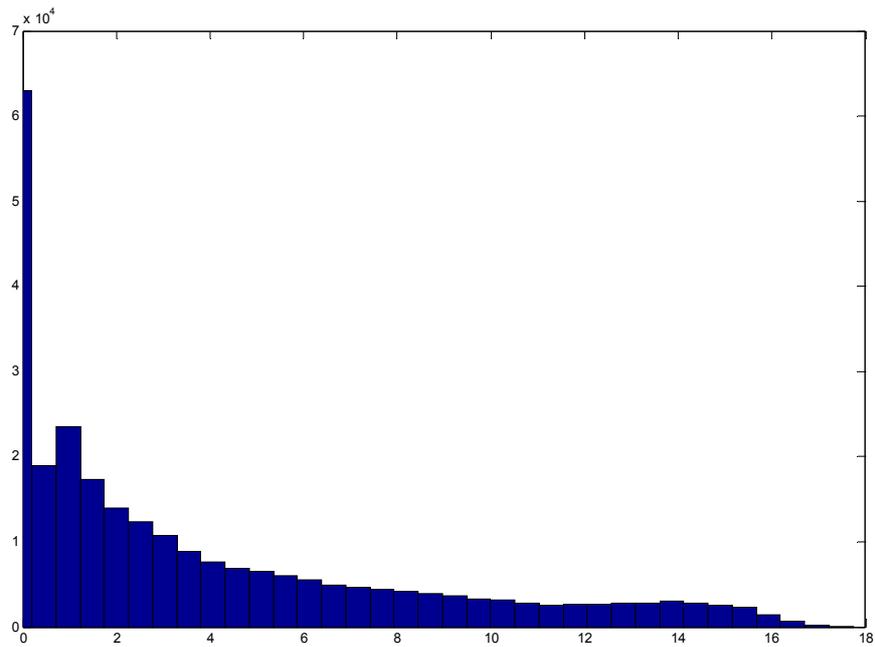


Ilustración 10: Histograma de la potencia activa inyectada a red en horas llano

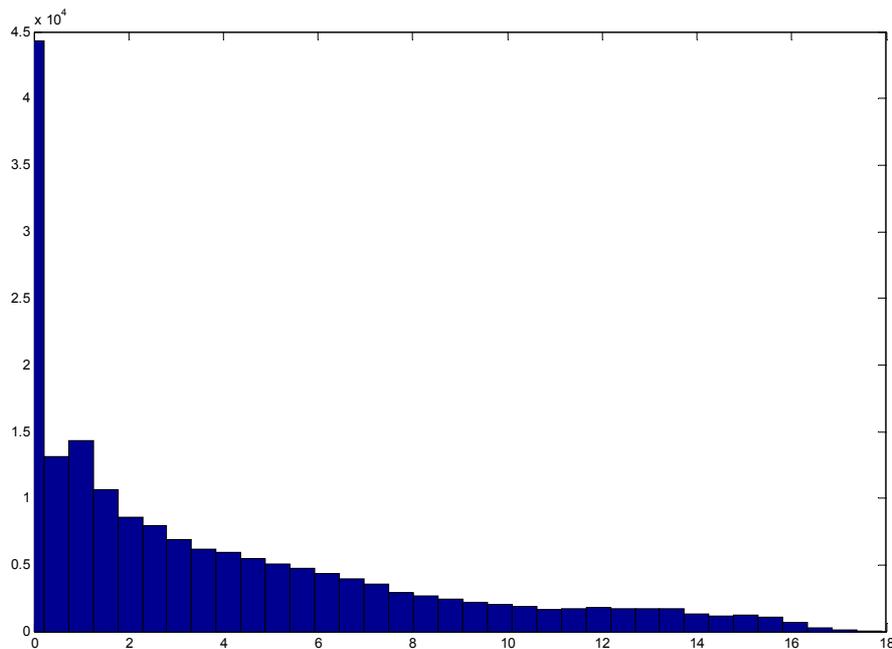


Ilustración 11: Histograma de la potencia activa inyectada a red en horas valle

En la figura siguiente se aprecia mejor las diferencias entre los tres tipos de tramos, siendo por ejemplo mayor el número de horas sin generación en horas punta que en valle o llano.

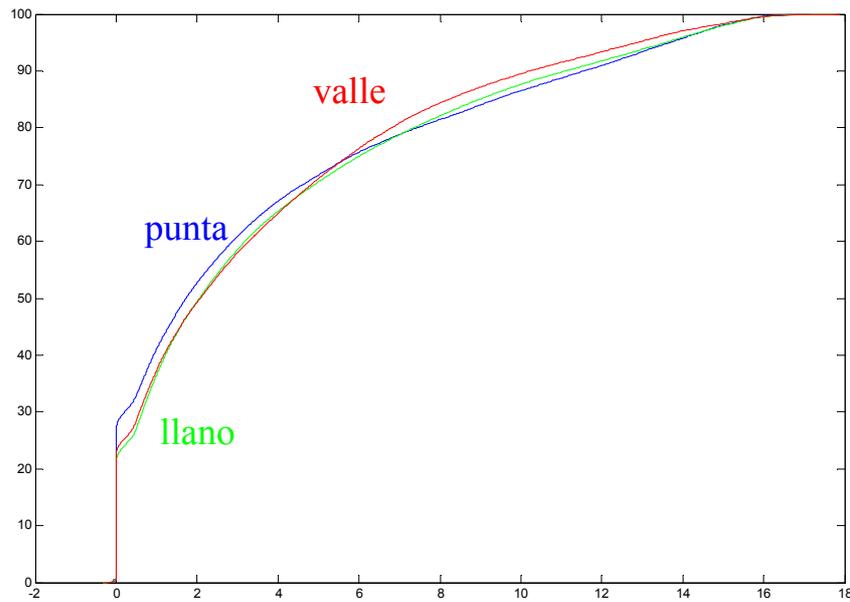


Ilustración 12: Porcentaje de potencia activa inyectada en horas punta, llano y valle

5 LA ENERGÍA

La figura siguiente representa la energía generada en punta, llano y valle a lo largo del año para las diferentes potencias. Se pueden observar grandes diferencias en la forma de las tres gráficas, de manera que en horas punta la energía generada es muy superior para potencias elevadas que para el resto, en llano es bastante estable, con valores algo superiores a potencias elevadas, y sin embargo, en valle la mayor parte de la energía es generada a potencias bajas o medias. Las energías anuales generadas representan un total de 5415 MW en horas punta (16'60%), 16616 MW en horas llano (50'93%) y 10594 MW en horas valle (32'47%).

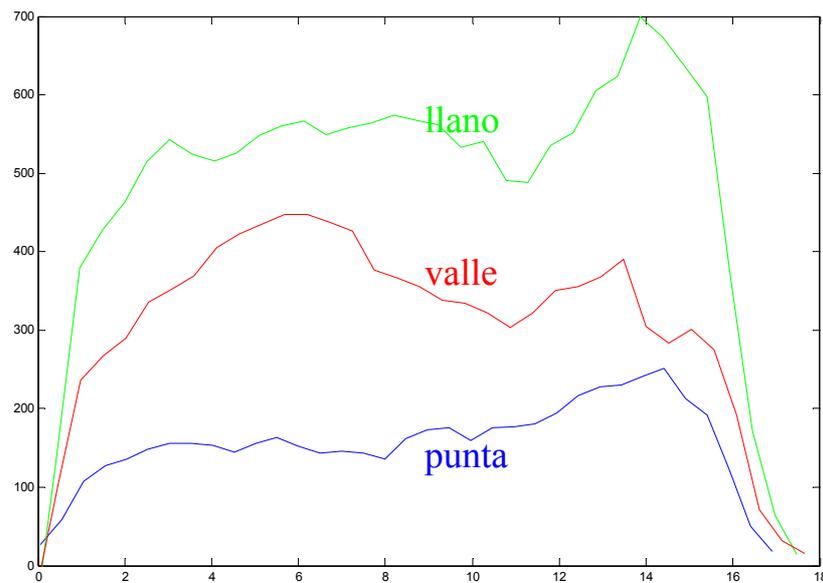


Ilustración 13: Energía anual generada según la potencias en horas punta, llano y valle

Se puede observar que para generar la mitad de la energía, en horas punta se consigue con potencias menores de 9'2 MW, en llano con menores de 8'7 MW y en valle para potencias menores de 7'8 MW.

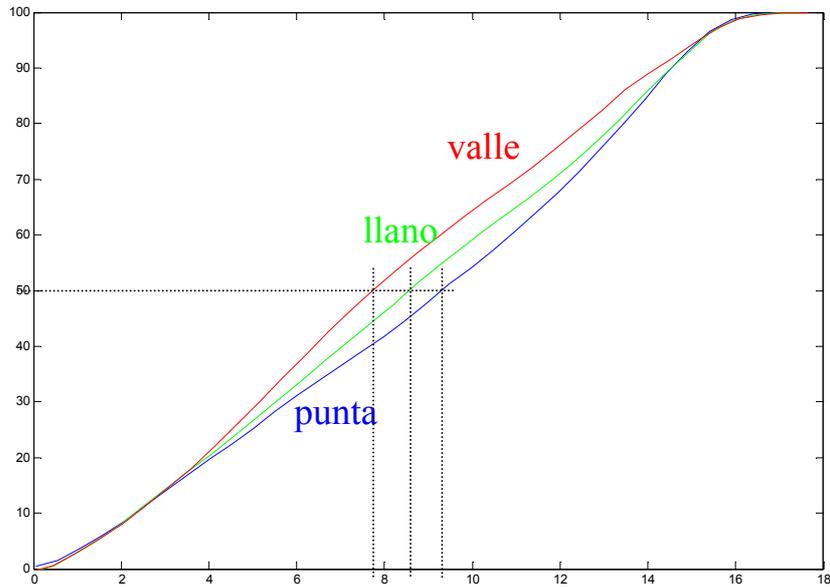


Ilustración 14: Porcentaje de energía anual generada en función de la potencia en horas punta, llano y valle

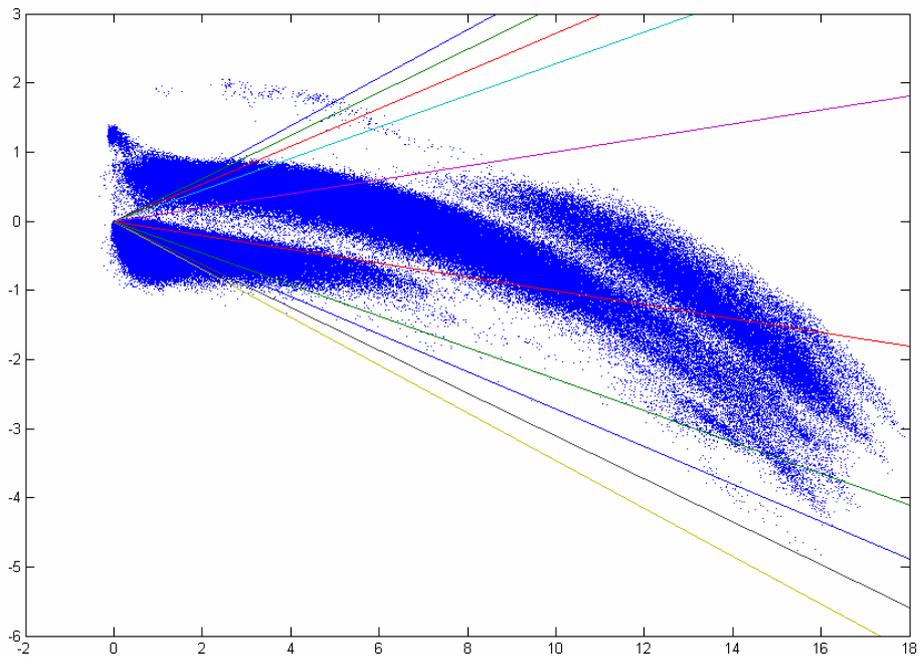


Ilustración 15: Potencia reactiva frente a potencia activa inyectadas a red en el período en estudio y tramos de diferentes bonificaciones

6 ANÁLISIS INDIVIDUAL DE LOS AEROGENERADORES

Aero1 (Izar-Bonus 1'3 MW)

Las baterías de condensadores del aerogenerador 1 no están actuando de una forma adecuada, según se desprende de la Ilustración 16, o los valores de tensión han sido modificados en el transformador. Siempre funciona en la zona inductiva, alcanzando factores de potencia de 0'96 con todas las baterías y de 0'93 cuando solo están parte de ellas. Esto ocurre tanto cuando funciona con 4 como con 6 polos.

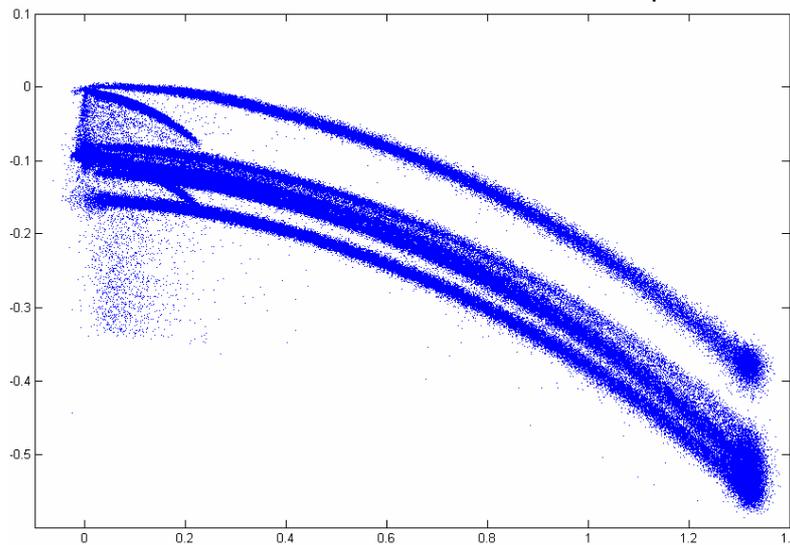


Ilustración 16: Potencia reactiva (MVar) frente activa (MW) en el aerogenerador 1

En el caso del **aerogenerador 1** se han producido las siguientes situaciones:

- Durante las 2000 primeras horas, nunca cambia el número de baterías de condensadores conectadas (2x75 kVAr)
- Entre las 2000 y 3000 horas y entre las 7000 a 8000 horas aparecen algunos escalones más.
- Entre las 3000 y las 7000 horas aparecen diferentes valores intermedios.
- A partir de las 8000 horas están conectadas todas las baterías.

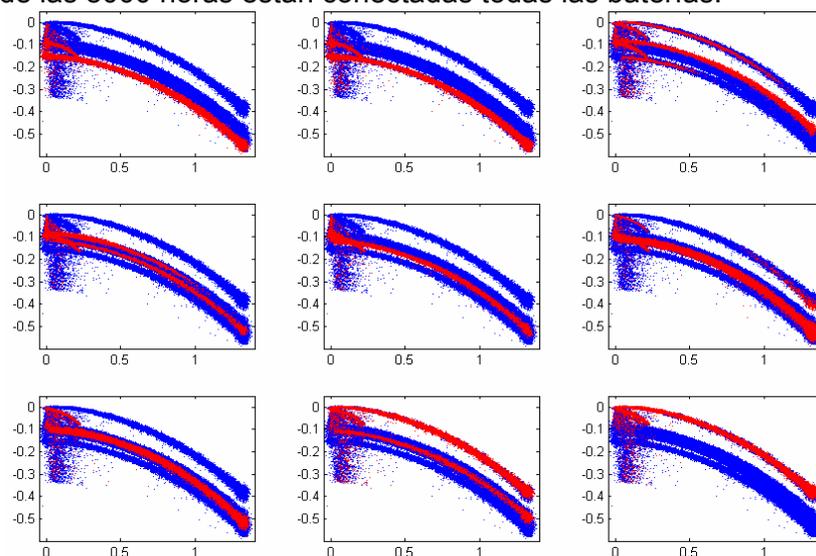


Ilustración 17: Potencia reactiva frente activa en el aerogenerador 1 en períodos de 1000 horas

Aero2 (Neg Micon NM-750)

Las baterías de condensadores del aerogenerador 2 están actuando de una forma adecuada, según se desprende de la Ilustración 18, ya que cambia a todas las baterías conectadas en cuanto el factor de potencia se aleja de 1.

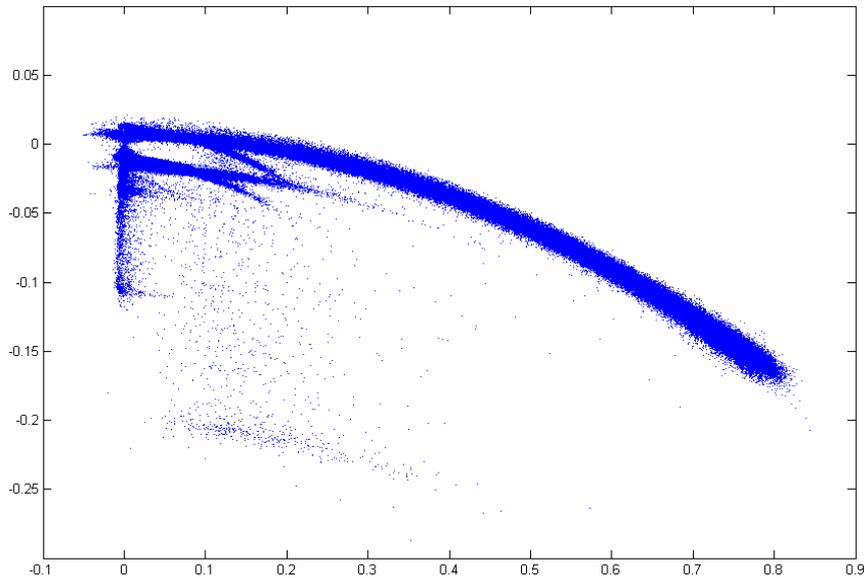


Ilustración 18: Potencia reactiva (MVar) frente activa (MW) en el aerogenerador 2

En el aerogenerador 2 el comportamiento a lo largo del año ha sido bastante estable.

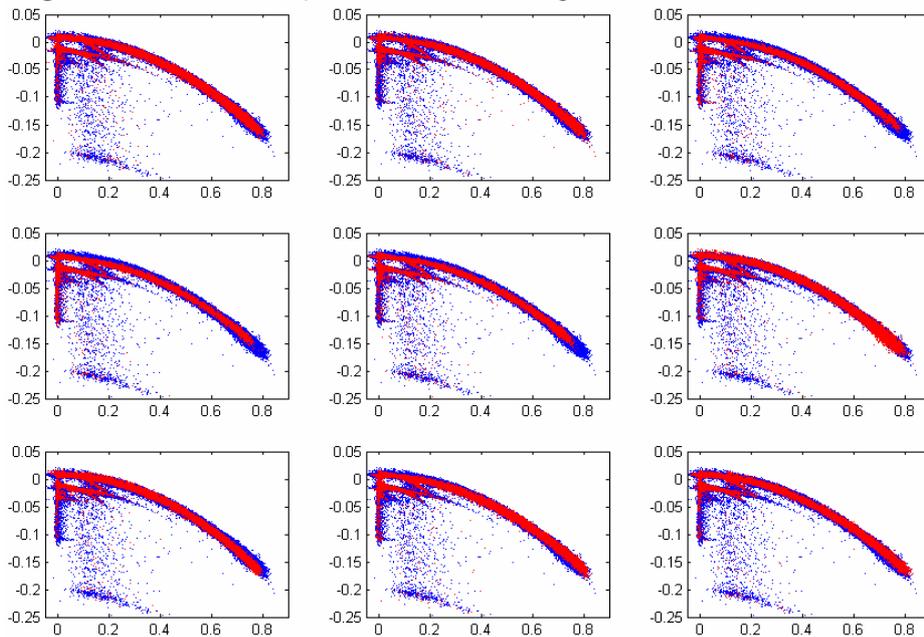


Ilustración 19: Potencia reactiva frente activa en el aerogenerador 2 en períodos de 1000 horas

Aero4 (Ecotecnia 44 - 640)

Se desconocen las baterías que tiene, aunque se puede suponer a partir de la Ilustración 20 que deben ser un total de 200 kVAr, con 4 escalones de 50 kVAr cada uno.

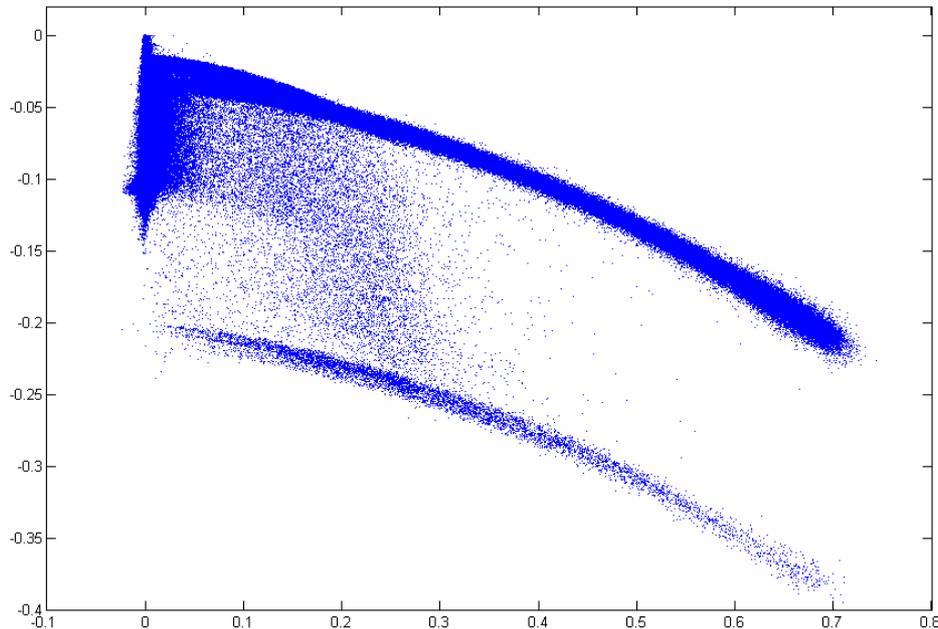


Ilustración 20: Potencia reactiva (MVar) frente activa (MW) en el aerogenerador 4

En el caso del **aerogenerador 4** se han producido las siguientes situaciones:

- Durante las 1000 a 3000 horas y a partir de las 8000, las baterías de condensadores están a veces desconectadas. En los restantes períodos esto no ocurre.

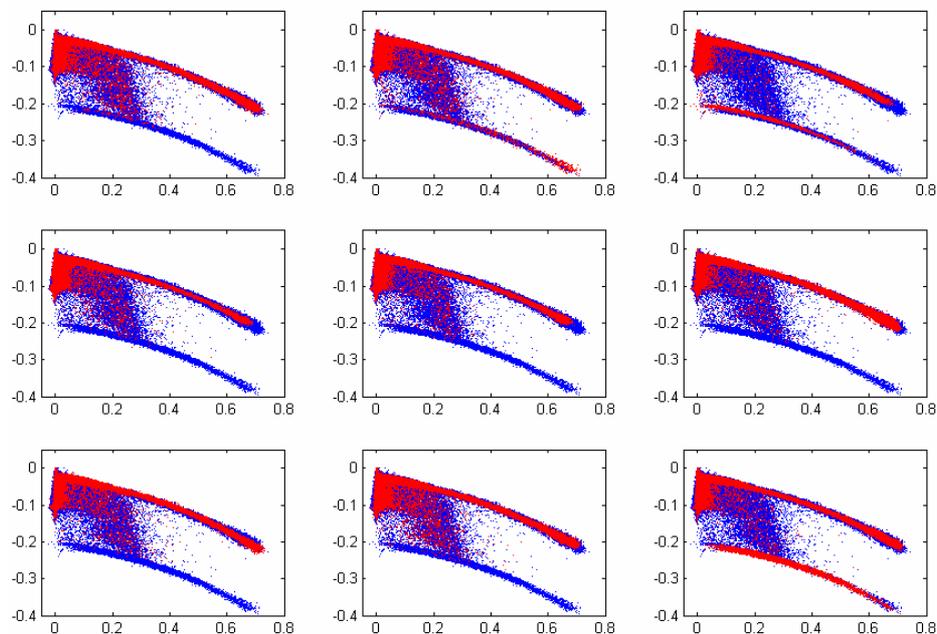


Ilustración 21: Potencia reactiva frente activa en el aerogenerador 4 en períodos de 1000 horas

Aero5 (Izar-Bonus MK-IV)

Tiene 3 baterías de 50 kVAR cada una. En la Ilustración 22 se observa que los diferentes valores tienen diferencias de 150 kVAR, pero las curvas intermedias no se corresponden con situaciones de conmutación entre esos tres posibles escalones.

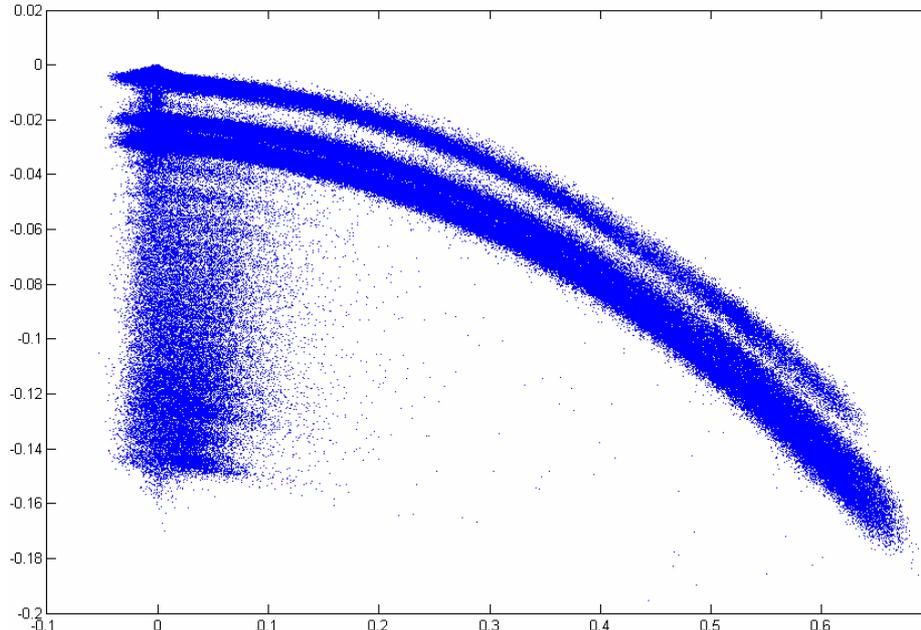


Ilustración 22: Potencia reactiva (MVAR) frente activa (MW) en el aerogenerador 5

En el caso del **aerogenerador 5** se han producido más modificaciones, que implican las siguientes situaciones:

- Entre las 2000 horas y las 5000 horas la energía reactiva cambia de situación, lo que puede estar relacionado con cambios en la toma del transformador.

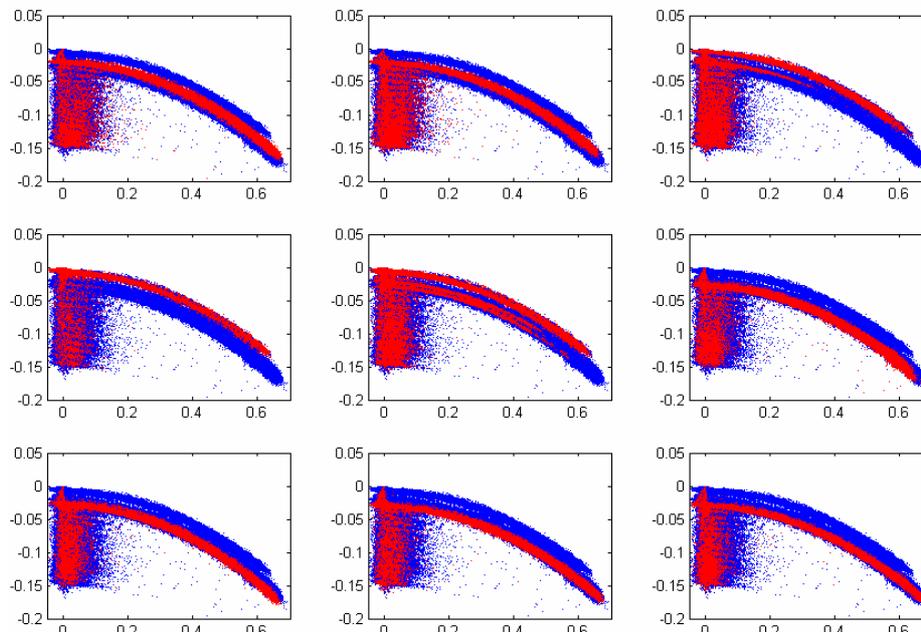


Ilustración 23: Potencia reactiva frente activa en el aerogenerador 5 en períodos de 1000 horas

Aero6 (Made AE-46)

Tiene 4 baterías de 70 kVAr cada una, de las cuales 2 están permanentemente conectadas, y conmutando las otras 2 para mantener el factor de potencia próximo a la unidad. Cuando está trabajando la máquina pequeña, no conmuta nunca.

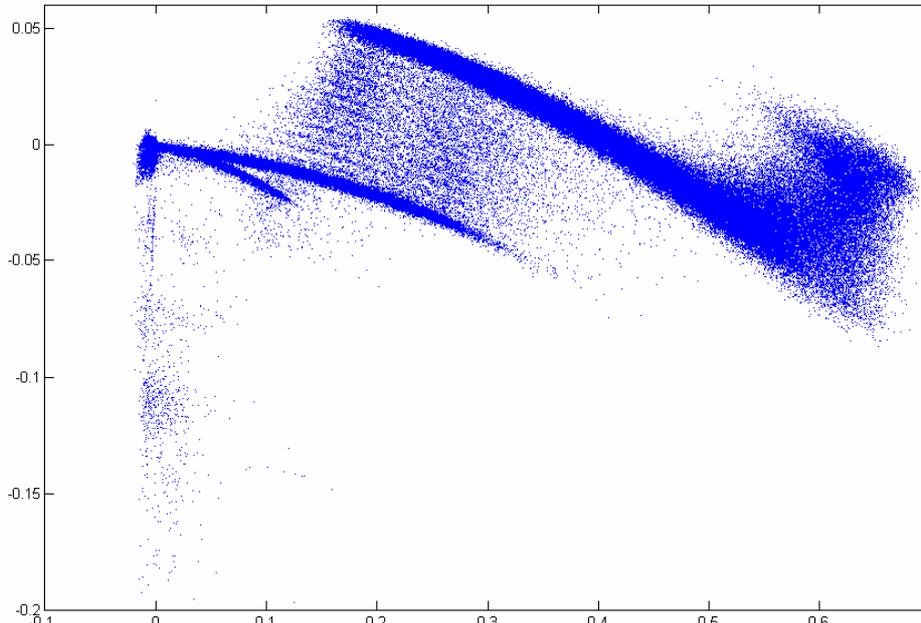


Ilustración 24: Potencia reactiva (MVar) frente activa (MW) en el aerogenerador 6

El comportamiento del **aerogenerador 6** el a lo largo del año ha sido bastante estable.

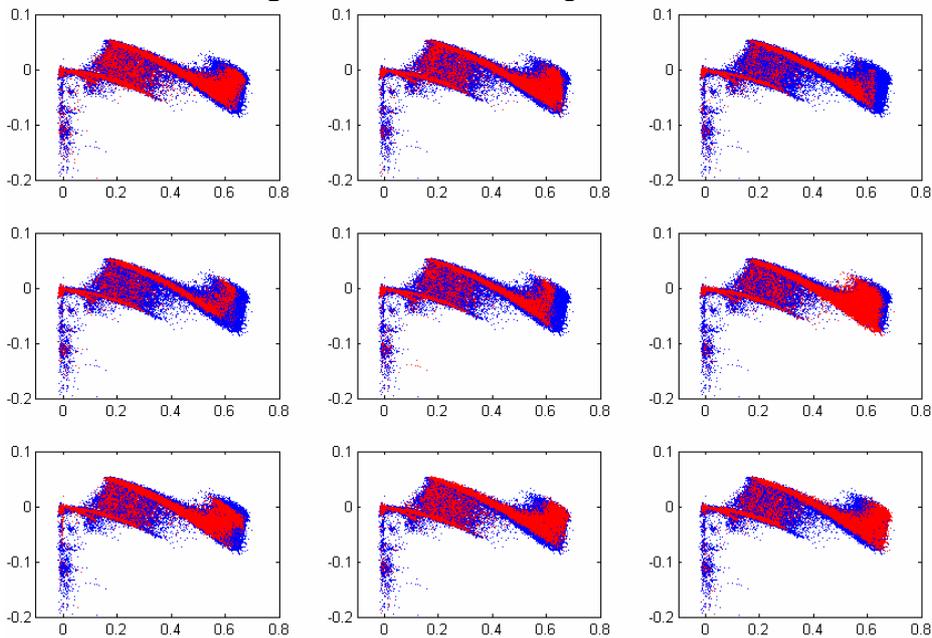


Ilustración 25: Potencia reactiva frente activa en el aerogenerador 6 en períodos de 1000 horas

Aero12 (Neg Micon NM-900)

Tiene 3 baterías de 75 kVAr cada una y una de 50 kVAr. Con la máquina de 900 kW están conectadas las 4 y con la máquina de 200, están conectadas normalmente 2. Las curvas que se ven en la parte superior corresponden a la entrada de los demás escalones cuando está trabajando la máquina pequeña.

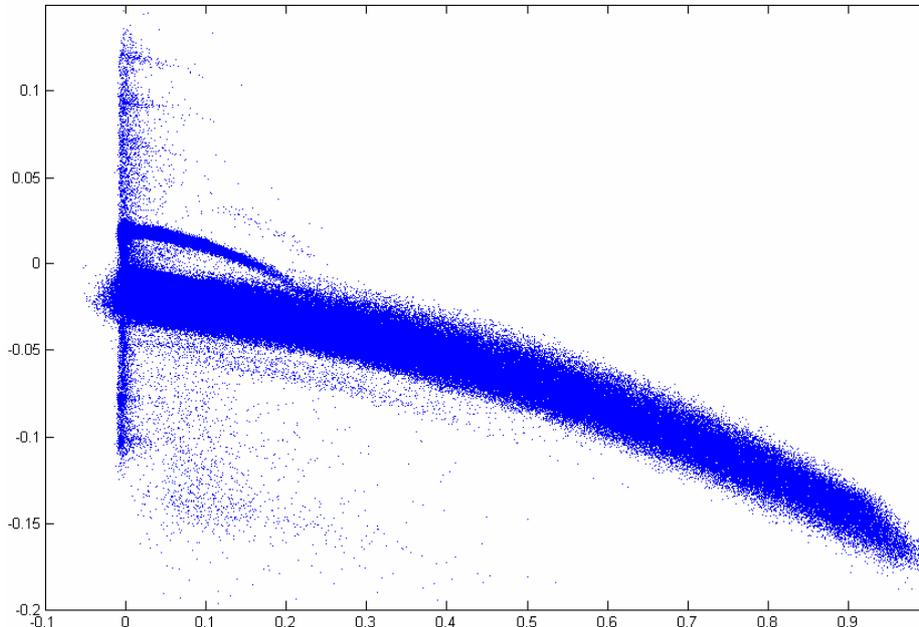


Ilustración 26: Potencia reactiva (MVar) frente activa (MW) en el aerogenerador 12

En el caso del **aerogenerador 12** se han producido modificaciones entre las 2000 y las 5000 horas en la energía reactiva generada, lo que puede estar relacionado con un cambio en la toma del transformador.

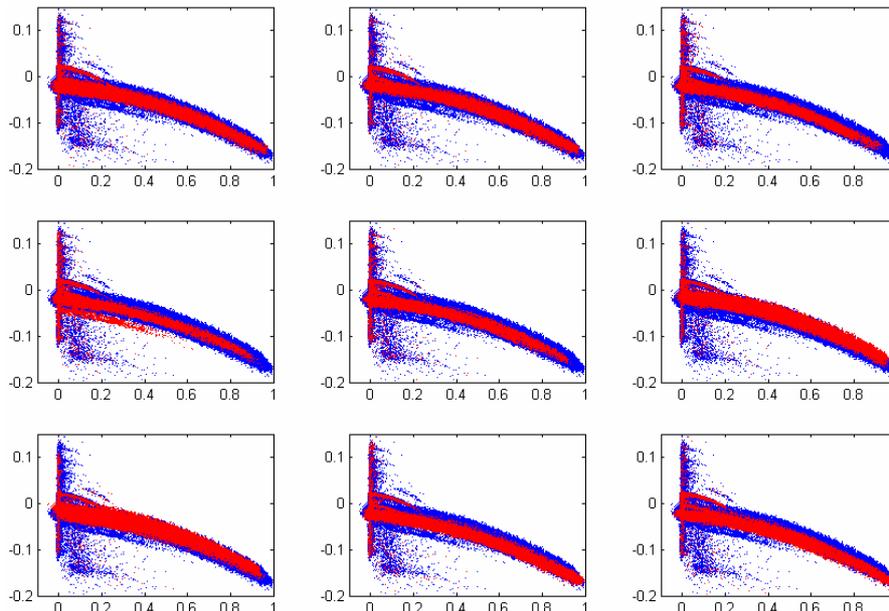


Ilustración 27: Potencia reactiva frente activa en el aerogenerador 12 en períodos de 1000 h.

Aero24 (Made AE-61)

Tiene 6 baterías de las cuales una es de 35 kVAr, otra de 70 kVAr y 4 de 140 kVAr cada una.

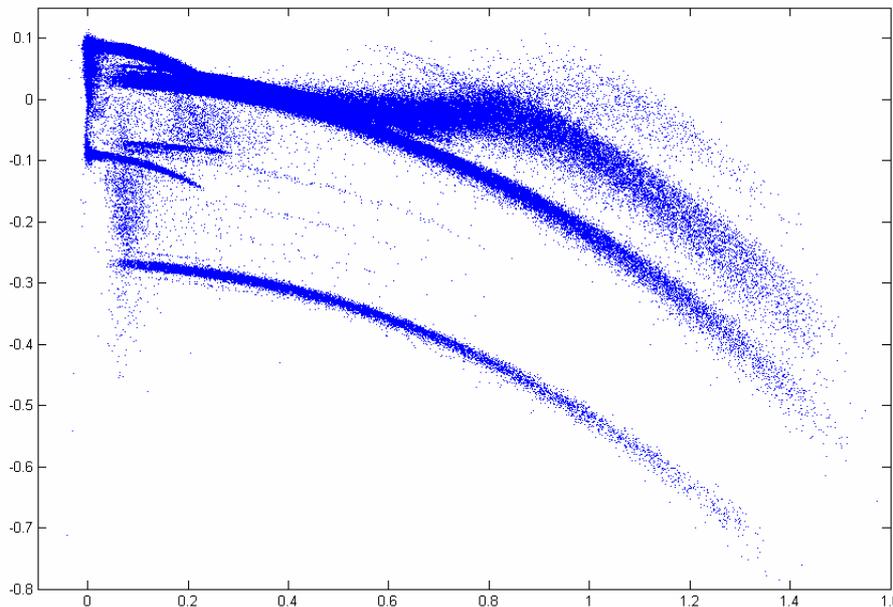


Ilustración 28: Potencia reactiva (MVar) frente activa (MW) en el aerogenerador 24

En el caso del **aerogenerador 24** se han producido más modificaciones, que implican las siguientes situaciones:

- Durante las 2000 primeras horas, nunca cambia el número de baterías de condensadores conectadas
- Entre las 2000 y las 3000 horas y entre las 6000 y 7000 horas aparecen la situación sin baterías conectadas.
- A partir de las 3000 horas aparece un nuevo escalón, cuando las potencias generadas son superiores a los 600 KW, tomando diferentes valores antes y después de las 5000 horas.

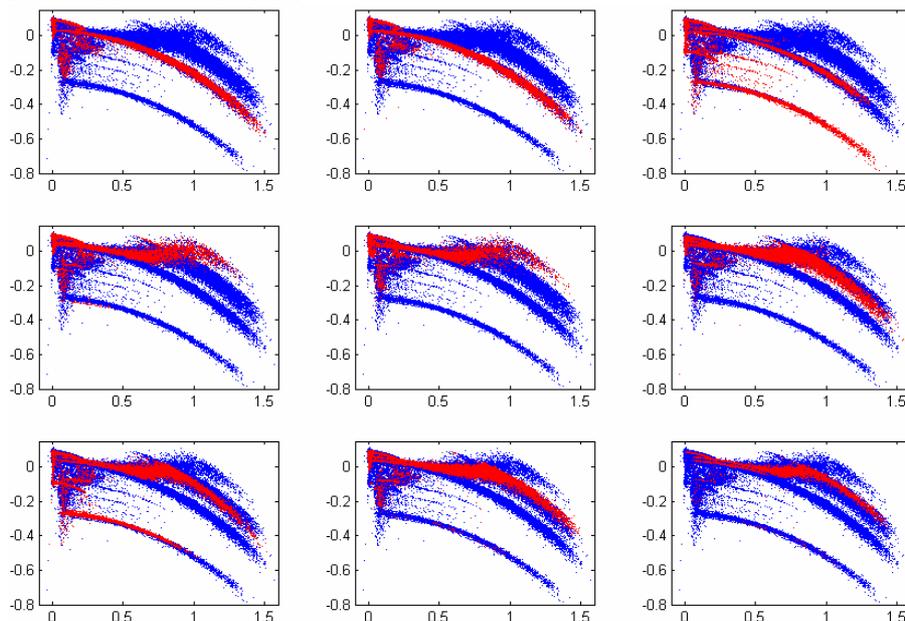


Ilustración 29: Potencia reactiva frente activa en el aerogenerador 24 en períodos de 1000 h.

7 COMPORTAMIENTO DEL PARQUE DURANTE EL PERÍODO DE ESTUDIO

En la salida del parque la inyección de potencias activas y reactivas a red han tenido un comportamiento diferente en función del período del año estudiado. Se puede observar en la Ilustración 30 que a partir de las 3000 horas y hasta las 5000 horas, no ha entrado la segunda batería de condensadores de la subestación. Por otro lado, el comportamiento en el período restante tampoco ha sido igual.

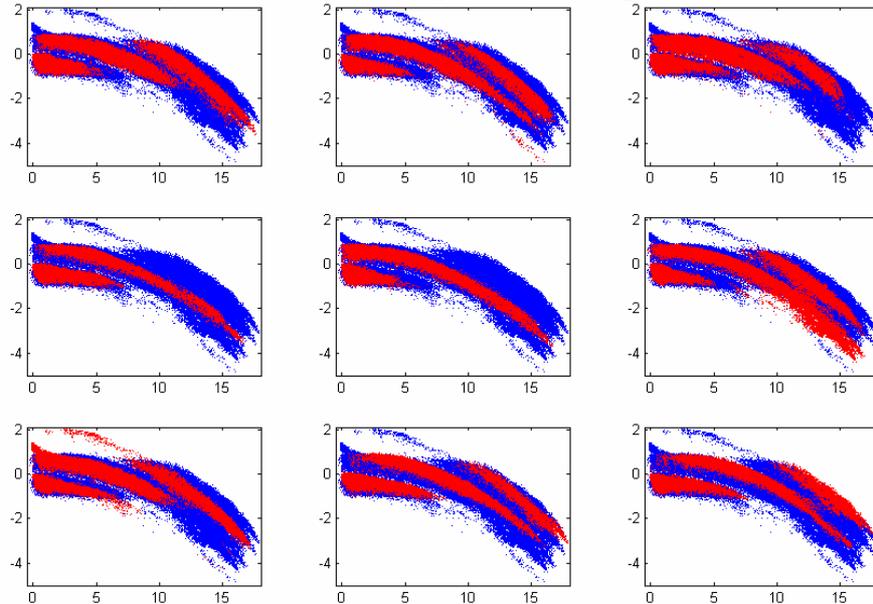


Ilustración 30: Potencia reactiva frente a activa inyectada a red en períodos de 1000 horas

Si se elimina la potencia reactiva aportada por las baterías de condensadores de la subestación, se ve en la Ilustración 31 las variaciones debidas al diferente comportamiento de las baterías de algunos aerogeneradores.

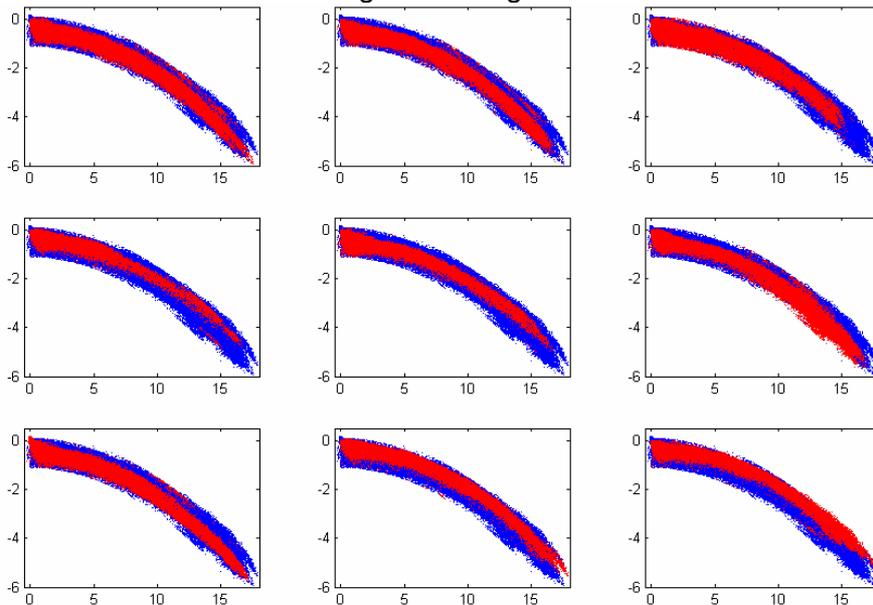


Ilustración 31: Potencia reactiva frente a activa inyectada a red, sin considerar la aportada por las baterías de condensadores de la subestación, en períodos de 1000 horas

8 ANÁLISIS GLOBAL DEL PARQUE

Son muchas las alternativas posibles, que van a depender de las actuaciones que se quieran acometer en el parque. Las principales son:

- Modificar el control de las baterías existentes en la subestación
- Ampliar las baterías de la subestación
- Modificar el control en las baterías de los aerogeneradores

En función de que sean horas punta, llano o valle, las consecuencias de las diferentes actuaciones varían de forma significativa.

8.1 Estudio de casos particulares

8.1.1 Horas llano con regulación de las baterías de la subestación

En horas llano no es posible conseguir la bonificación máxima de 4% empleando únicamente las baterías de condensadores de la subestación. Para potencias inferiores a 6 MW, el valor del escalón (1'215 MVar) es muy grande, pasándose de muy inductiva a muy capacitiva al conectar la batería, alejándose del valor óptimo. Para valores superiores a 13 MW son insuficientes los dos escalones de condensadores de la subestación para obtener el 4% de bonificación, quedándose en el 2%. El valor medio obtenido en horas llano de la bonificación es de 3'3214 y corresponde a la Ilustración 32, en la que se representan los valores del año en estudio

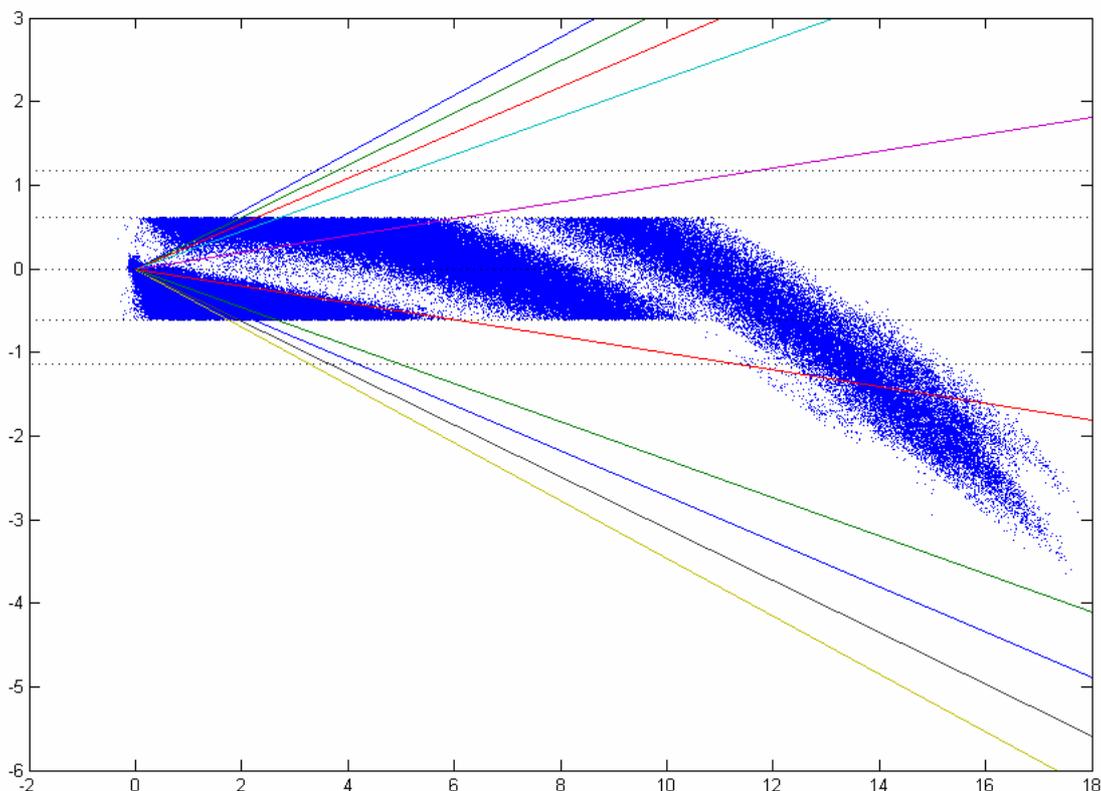


Ilustración 32: distribución de las potencias en horas llano para optimizar la bonificación con dos baterías iguales en la subestación

En la Ilustración 33 se representa la misma situación, pero empleando en la subestación dos baterías diferentes. La primera es de 1'215 MVar y la segunda es de 2'430 MVar. Si no se conectan más que los dos escalones, la bonificación media en horas llano se incrementa a 3'5990, con un beneficio de un 8'3% respecto al caso anterior.

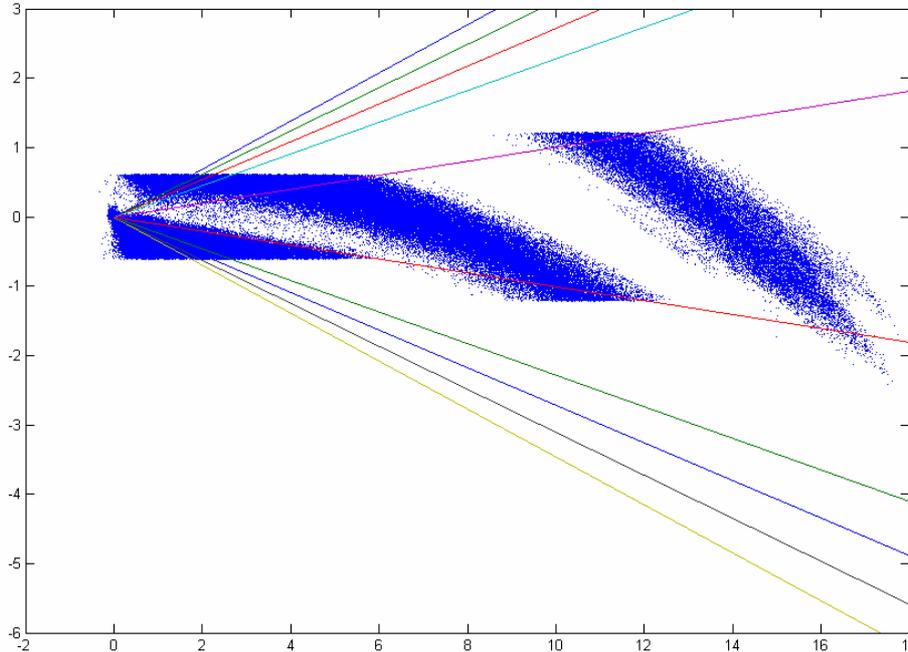


Ilustración 33: distribución de las potencias en horas llano para optimizar la bonificación con dos baterías, una de 1'215 MVar y otra de 2'430 MVar en la subestación

Si se permite la conexión de las 2 baterías de forma que se tengan 3 escalones, es decir, 1'215, 2'430 y 3'645 MVar, la bonificación se incrementa en menos del 1%, obteniéndose un valor de 3'6029.

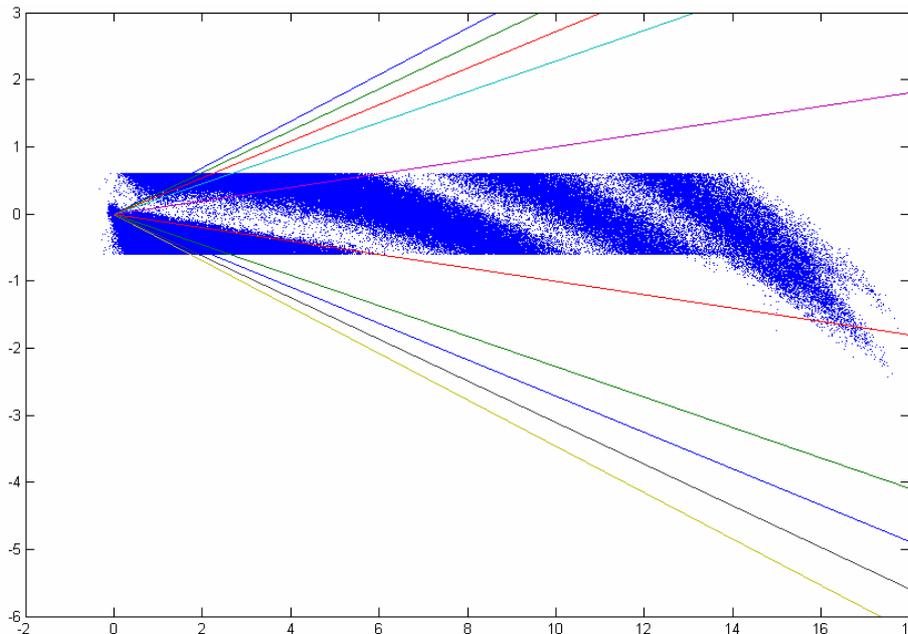


Ilustración 34: distribución de las potencias en horas llano con dos baterías de 1'215 MVar y 2'430 MVar respectivamente, en la subestación y tres opciones de conexión

Siguiendo con la misma filosofía, si se tienen dos grupos de baterías múltiples de las existentes con tres posibles conexiones, se obtienen las gráficas de las ilustraciones siguientes, con los valores de la *Tabla 8*.

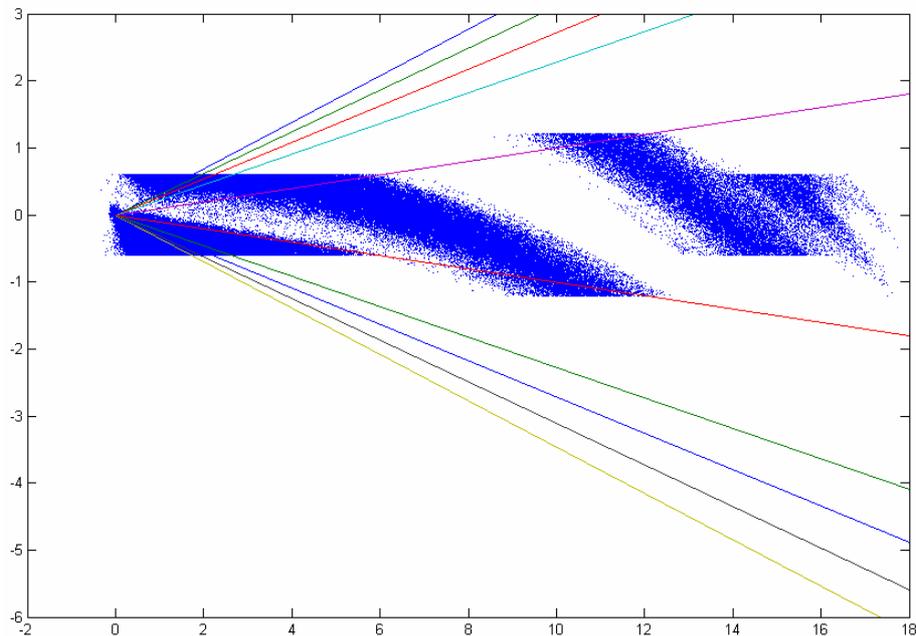


Ilustración 35: distribución de las potencias en horas llano con dos baterías de 1x1'215 + 3x1'215 MVar

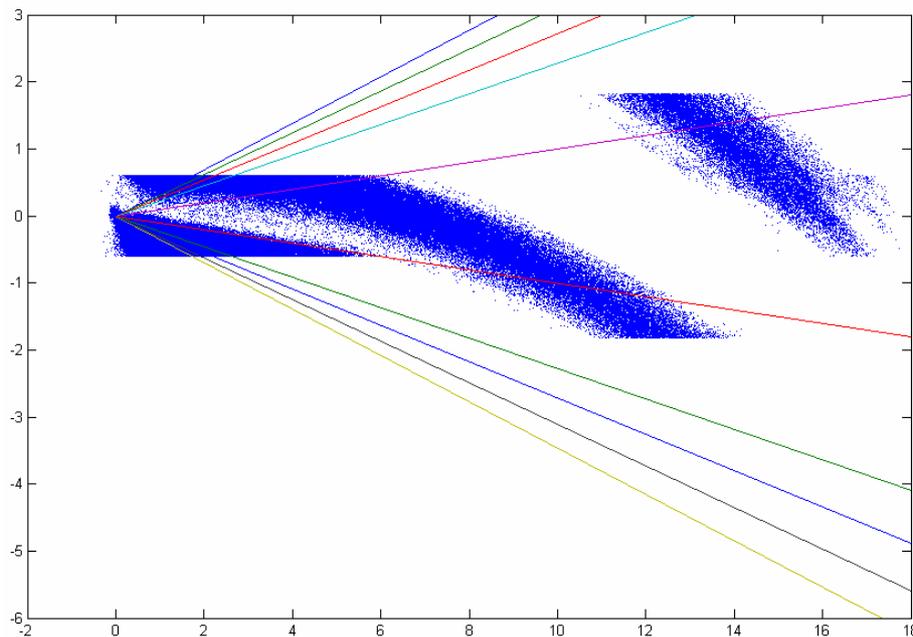


Ilustración 36: distribución de las potencias en horas llano con dos baterías de 1x1'215 + 4x1'215 MVar

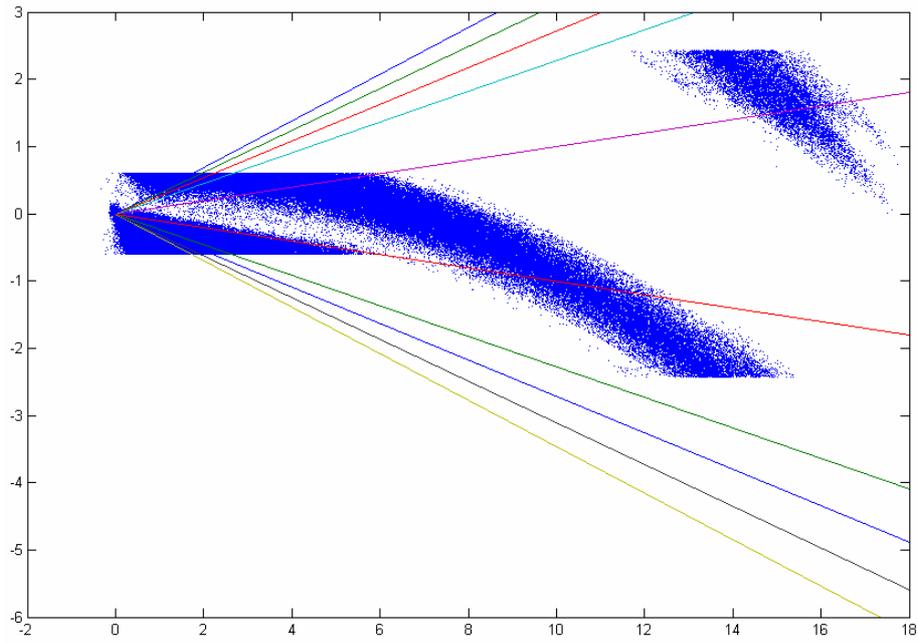


Ilustración 37: distribución de las potencias en horas llano con dos baterías de 1x1'215 + 5x1'215 MVAR

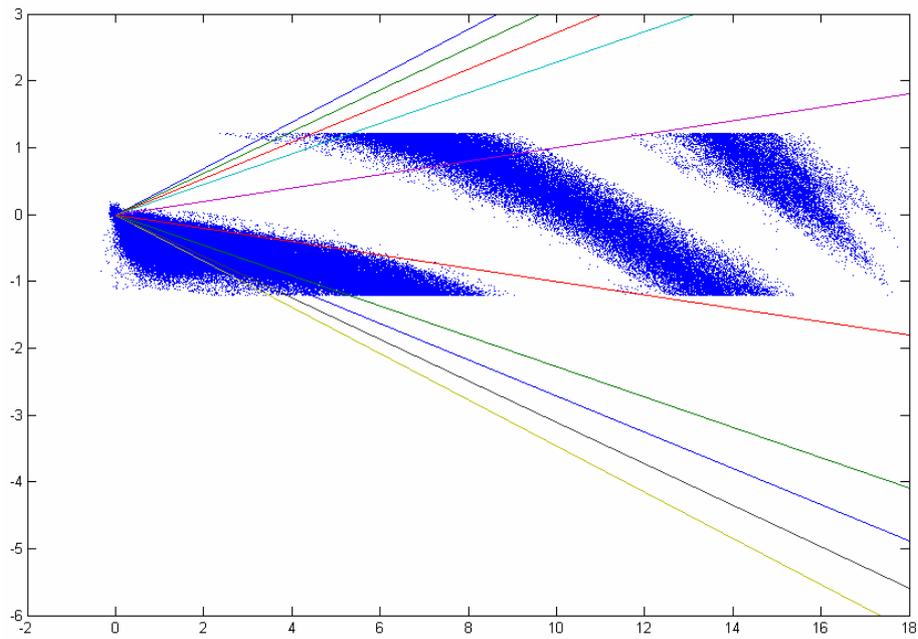


Ilustración 38: distribución de las potencias en horas llano con dos baterías de 2x1'215 + 2x1'215 MVAR

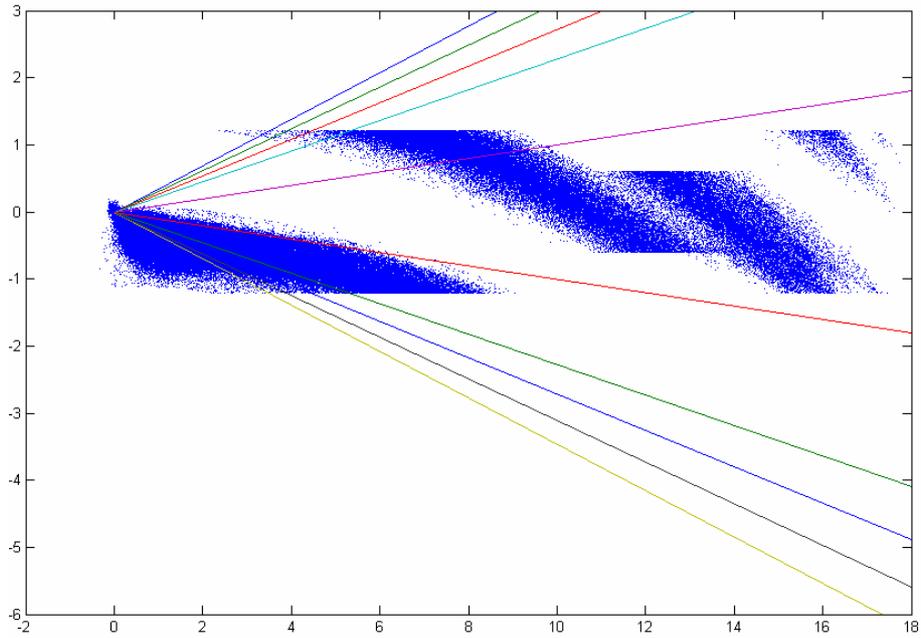


Ilustración 39: distribución de las potencias en horas llano con dos baterías de 2x1'215 + 3x1'215 MVAR

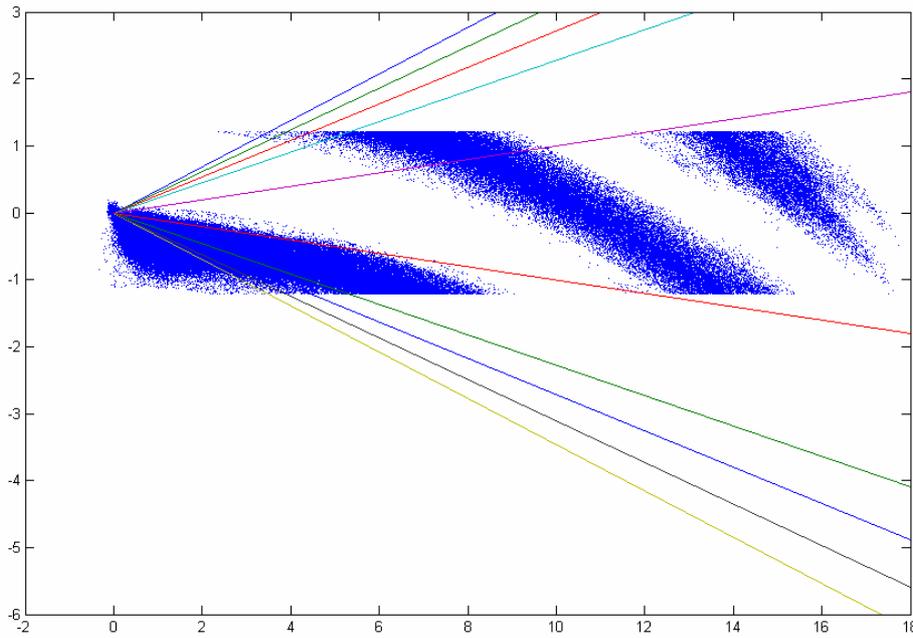


Ilustración 40: distribución de las potencias en horas llano con dos baterías de 2x1'215 + 4x1'215 MVAR

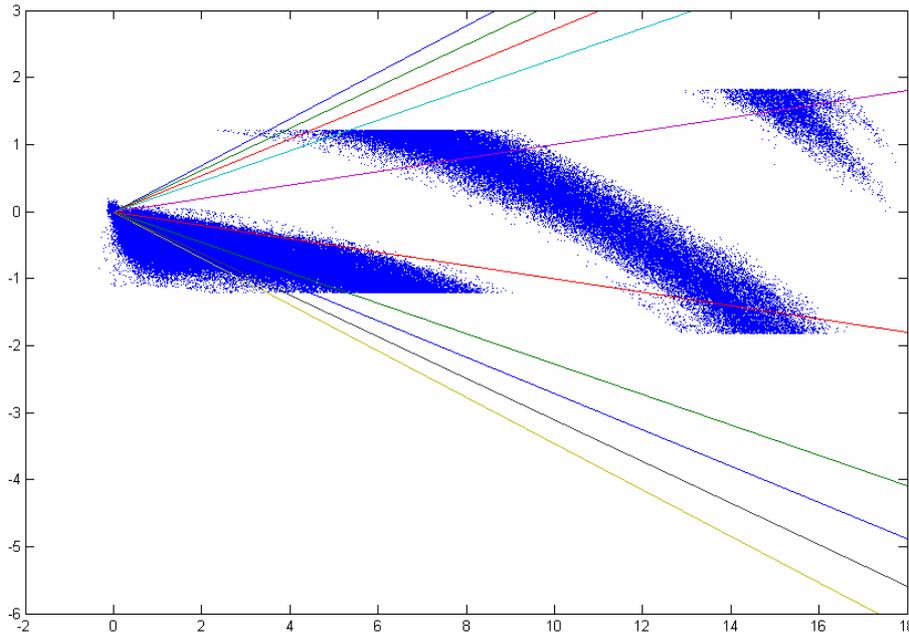


Ilustración 41: distribución de las potencias en horas llano con dos baterías de 2x1'215 + 5x1'215 MVar

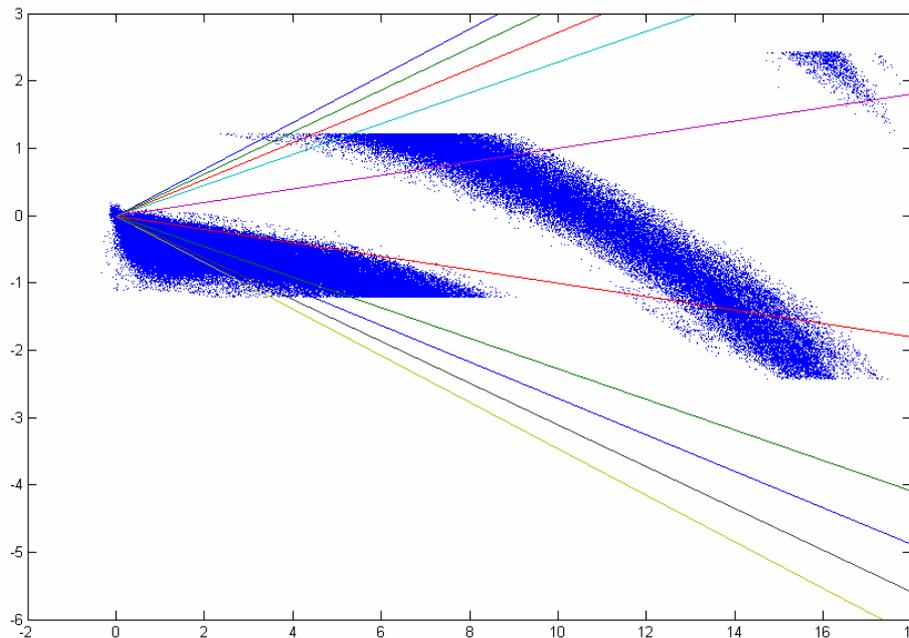


Ilustración 42: distribución de las potencias en horas llano con dos baterías de 2x1'215 + 6x1'215 MVar

Tabla 5: Bonificaciones para llano en función del número de baterías de subestación de 1'215 MVar

Nº bat. 1'215 MVar	1+2	1+3	1+4	1+5	1+6	2+2	2+3	2+4	2+5	2+6	2+7	2+8
Llano(%)	3'60	3'60	3'45	3'09	2'92	2'94	2'94	2'94	2'92	2'73	2'66	2'65

Como se puede observar en la *Tabla 8*, es imposible alcanzar una bonificación del 4% en horas llano. Para poder conseguirlo es necesario poder controlar la potencia reactiva con escalones pequeños cuando se está generando menos de 6 MW, ya que en muchos de estos casos se pasa de una situación muy inductiva a una muy capacitiva al conectar una batería de la subestación, dado que tienen una potencia de 1'215 MVar. Una opción sería mediante el control de las baterías de los aerogeneradores desde el centro de control, teniendo en cuenta que hay un total de 4'735 MVar correspondientes a 69 baterías diferentes.

8.1.2 Horas punta con regulación de las baterías de la subestación

En horas punta los resultados obtenidos en el caso de que en la subestación se tengan las dos baterías de condensadores actuales, pero modificando su control para optimizar la bonificación incrementa la bonificación media de -0'18, correspondientes al control actual a 2'046, y que se corresponde con la distribución de potencias de la Ilustración 43.

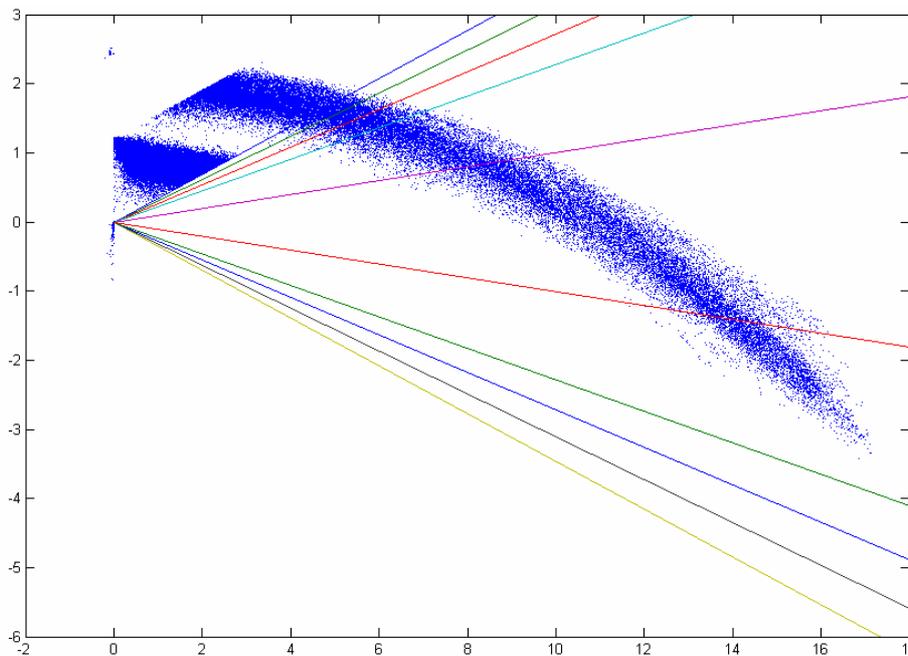


Ilustración 43: distribución de las potencias en horas punta para optimizar la bonificación con dos baterías iguales en la subestación

Una segunda opción es sustituir una de las baterías por otra del doble de valor. En este caso se incrementará la bonificación a 3'1097, representando un 52% de crecimiento. Esta situación es la representada en la Ilustración 44. A diferencia de la situación en horas llano, no van a cambiar los valores de la bonificación por conmutar las baterías de condensadores en tres escalones.

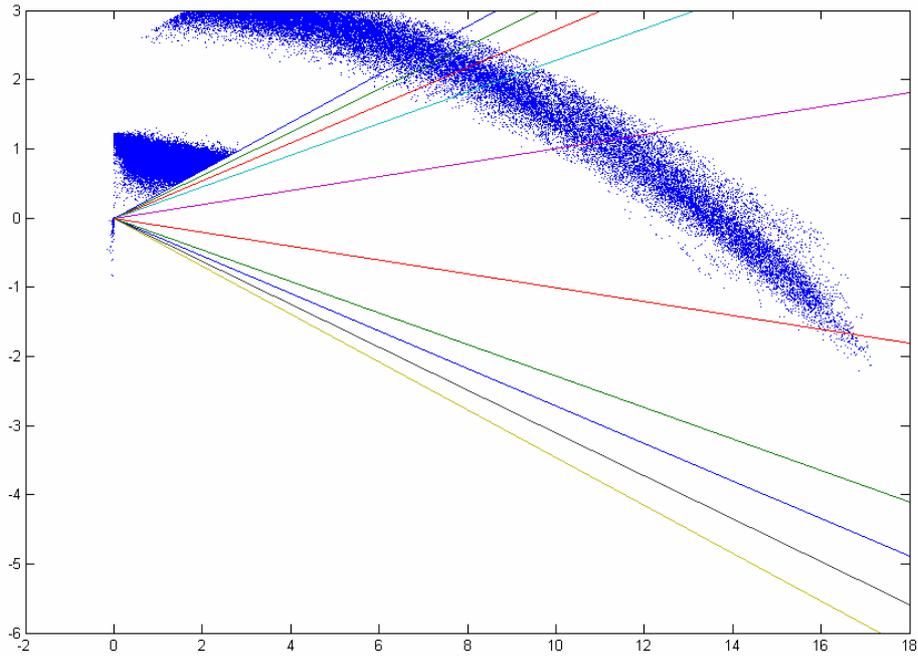


Ilustración 44: distribución de las potencias en horas punta para optimizar la bonificación con dos baterías, una de 1'215 MVar y otra de 2'430 MVar en la subestación

Tabla 6: Bonificaciones para punta en función del número de baterías de la subestación de 1'215 MVar

Nº bat. 1'215 MVar	Actual	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Bonif(%)	-0'18	-0'81	0'69	2'05	3'11	4'14	5'14	6'19	7'22	7'84	7'99	8'00

8.1.3 Horas valle con regulación de las baterías de de la subestación y de los aerogeneradores

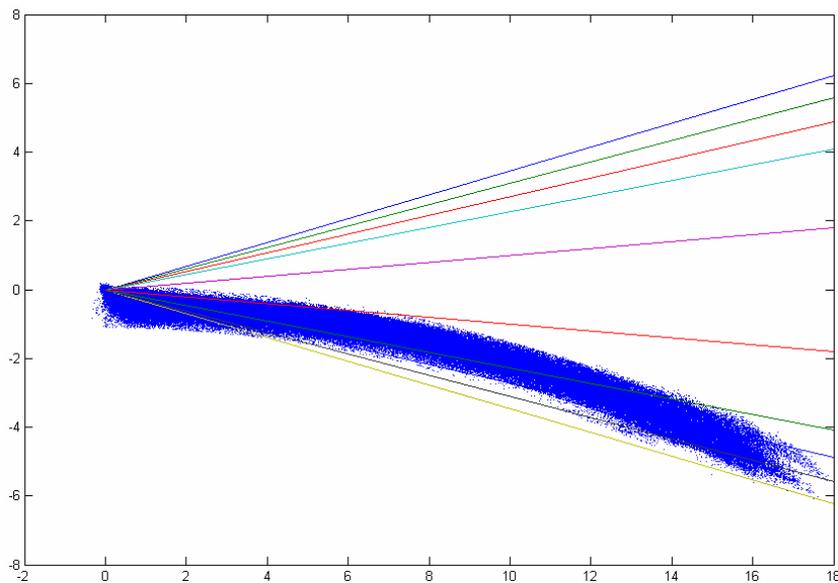


Ilustración 45: distribución aproximada de las potencias en horas valle con todas las baterías de la subestación desconectadas

En horas valle la desconexión de las baterías de condensadores de la subestación permite obtener una bonificación del 1'39%, valor muy alejado del 8% máximo posible.

En horas valle es necesaria la desconexión de las baterías de condensadores de la subestación y las propias de los aerogeneradores para poder alcanzar una bonificación del 8%.

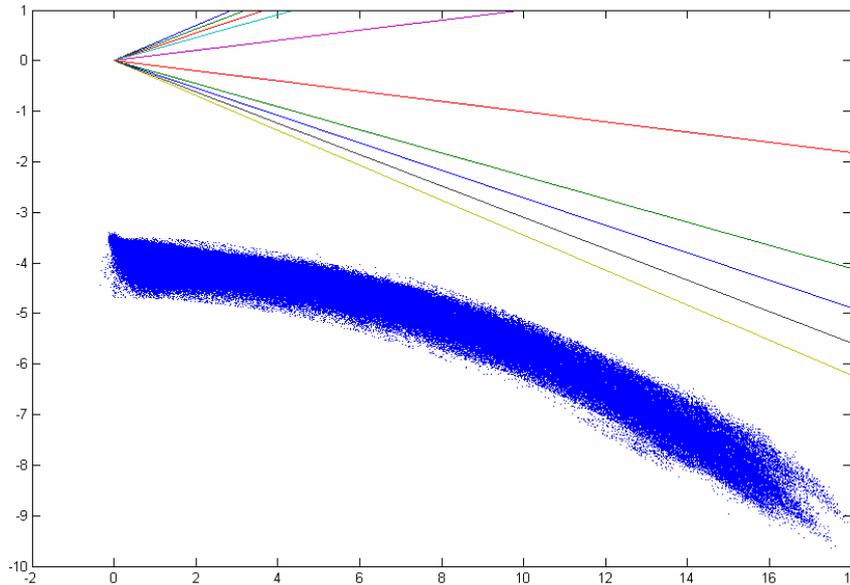


Ilustración 46: distribución aproximada de las potencias en horas valle con todas las baterías de la subestación y de los aerogeneradores desconectados

La posibilidad de realizar dicho control desde el centro de control del parque permitiría ajustar también en horas llano la regulación, principalmente cuando se tienen bajas potencias de generación, en las que no se consigue ajustar la potencia reactiva con las baterías de la subestación.

8.2 Resultados de modificar el número de baterías de la subestación

En los apartados anteriores se estudiaron diferentes situaciones particulares, que permiten obtener las soluciones que mejores resultados dan para los tres tipos de tramos horarios. El incremento de las baterías en la subestación aumenta la bonificación en horas punta de una forma importante (Ilustración 47), pero perjudica a la bonificación en horas llano (Ilustración 48). Teniendo en cuenta que hay 4 horas punta y 12 horas llano al día, en el cómputo global, el incremento de bonificación es poco relevante para la inversión necesaria. Con las dos baterías actuales se puede alcanzar un 4'63 global, no pudiendo superarse el 5'29 si se añaden 6 baterías más (Ilustración 49), representando 0,66 de incremento. De este incremento, la mitad se puede conseguir añadiendo únicamente 1 batería, trabajando en modo 1+2, con 3 escalones de 1, 2 y 3, y una bonificación global de 4'95 (0'32 más). Estos valores son en el supuesto de que se desconectan todas las baterías de los aerogeneradores en horas valle.

Tabla 7: Bonificaciones para punta, llano y total en función del número de baterías de la subestación de 1'215 MVar cada una

Nº bat. 1'215 MVar	1+2	1+3	1+4	1+5	1+6	2+2	2+3	2+4	2+5	2+6	2+7	2+8
Punta(%)	3'11	4'14	5'14	6'19	7'22	4'14	5'14	6'19	7'22	7'84	7'99	8'00
Llano(%)	3'60	3'60	3'45	3'09	2'92	2'94	2'94	2'94	2'92	2'73	2'66	2'65
valle(%)	8'00	8'00	8'00	8'00	8'00	8'00	8'00	8'00	8'00	8'00	8'00	8'00
Total(%)	4'95	5'12	5'21	5'20	5'28	4'78	4'95	5'12	5'28	5'29	5'28	5'28

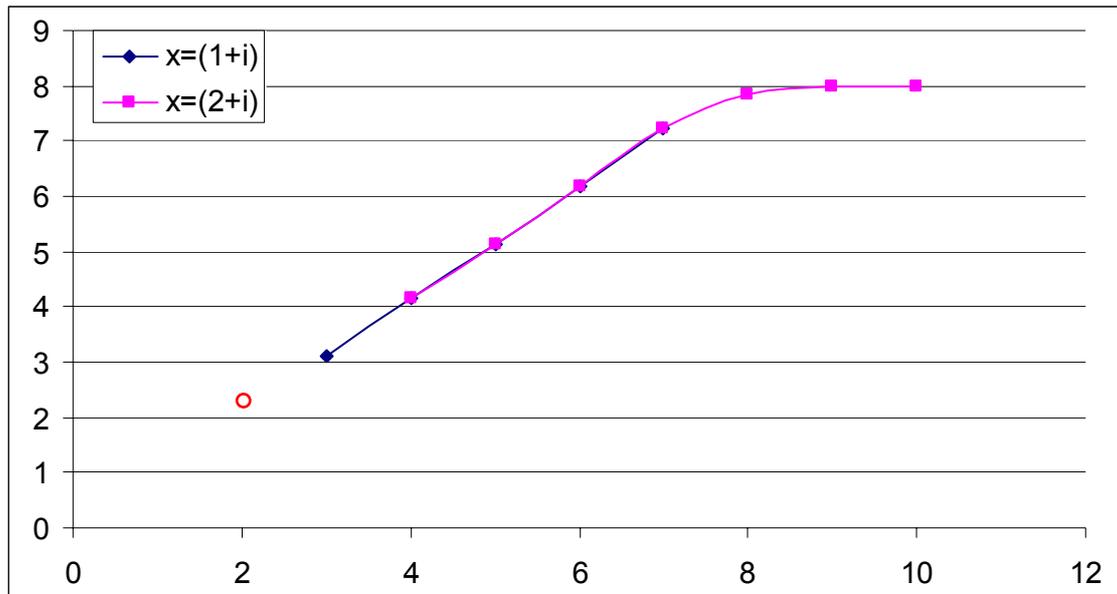


Ilustración 47: Bonificación en punta según el nº de condensadores de subestación

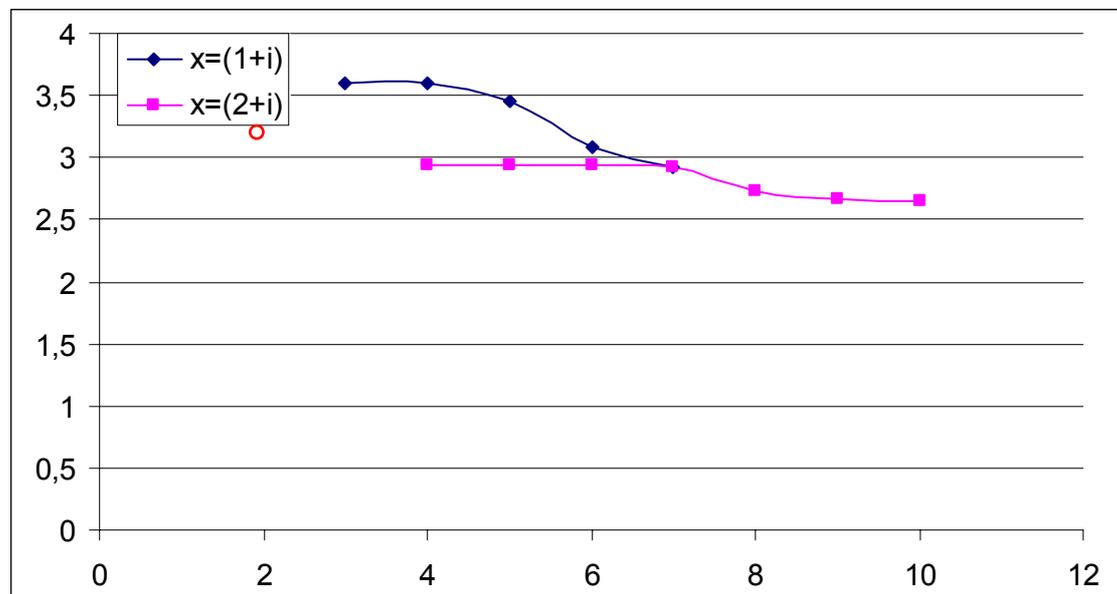


Ilustración 48: Bonificación en llano según el nº de condensadores de subestación

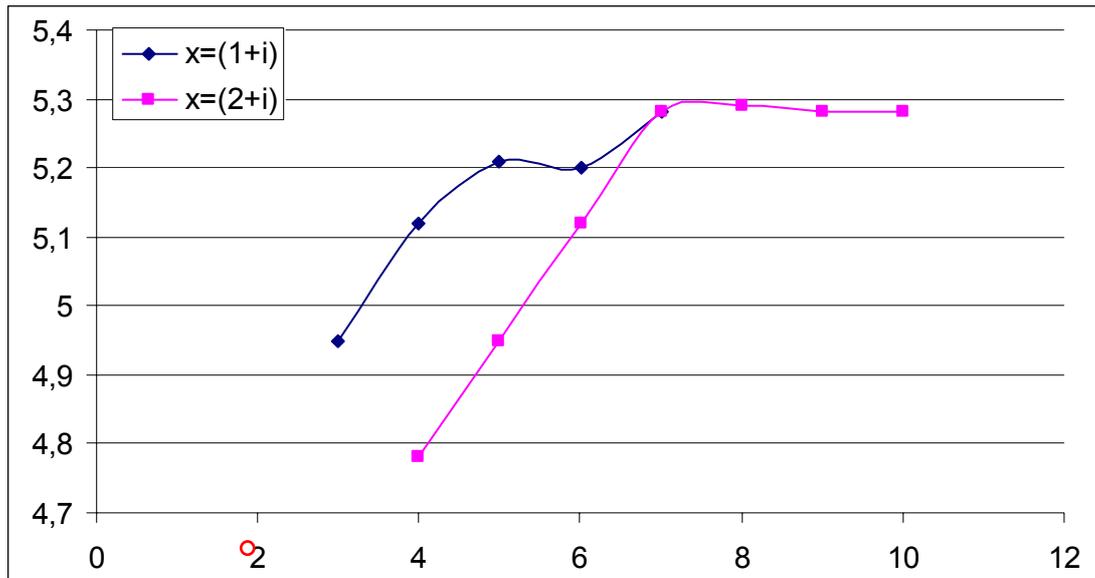


Ilustración 49: Bonificación global según el nº de condensadores de subestación

9 CONSUMO DE REACTIVA DE AEROGENERADORES

Mediante el análisis de las curvas de potencias de los diferentes aerogeneradores, se puede estimar el valor de la potencia reactiva consumida por las máquinas cuando están en vacío y a plena carga.

Tabla 8: N° y potencia de las baterías de condensadores y consumo de reactiva del aerogenerador

Aerogenerador	$\cong Q_0$ (kVAr)	Q_{max} (kVAr)	$Q_{max}-Q_0$ (kVAr)
AE-01	-340	-720	-380
AE-02	-225	-385	-160
AE-04	-200	-360	-160
AE-05	-150	-275	-125
AE-06	-140	-290	-150
AE-08	-225	-385	-160
AE-09	-150	-275	-125
AE-10	-140	-290	-150
AE-11	-200	-360	-160
AE-12	-275	-410	-135
AE-13	-225	-385	-160
AE-15	-200	-360	-160
AE-17	-140	-290	-150
AE-18	-150	-275	-125
AE-20	-225	-385	-160
AE-21	-200	-360	-160
AE-22	-150	-275	-125
AE-23	-140	-290	-150
AE-24	-420	-880	-460
	-3895	-7250	-3355

En la Ilustración 50 se representan los valores de las potencias reactivas en vacío y a plena carga para las diferentes tecnologías de aerogeneradores. Se puede apreciar que la tendencia es bastante lineal.

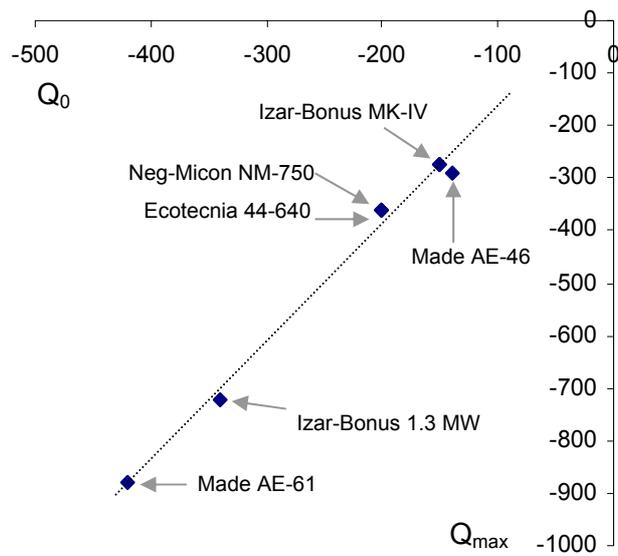


Ilustración 50: Potencias reactivas en vacío frente a plena carga de los aerogeneradores

Teniendo en cuenta los valores obtenidos de potencia reactiva en vacío y en carga de los aerogeneradores, la zona de en la que se situaría el parque corresponde a la curva continua de la Ilustración 51. La zona sombreada correspondería a la reactiva consumida por la instalación (suma de transformadores de los aerogeneradores, de la subestación y líneas), que será mayor cuanto mayor sea la potencia generada en el parque, como se observa en la Ilustración 52. La potencia reactiva esta en una franja debido a las variaciones de tensión y cambios de toma en trafos, etc. Por último se representan las mismas curvas en el caso en que estuviesen conectadas todas las baterías de los aerogeneradores.

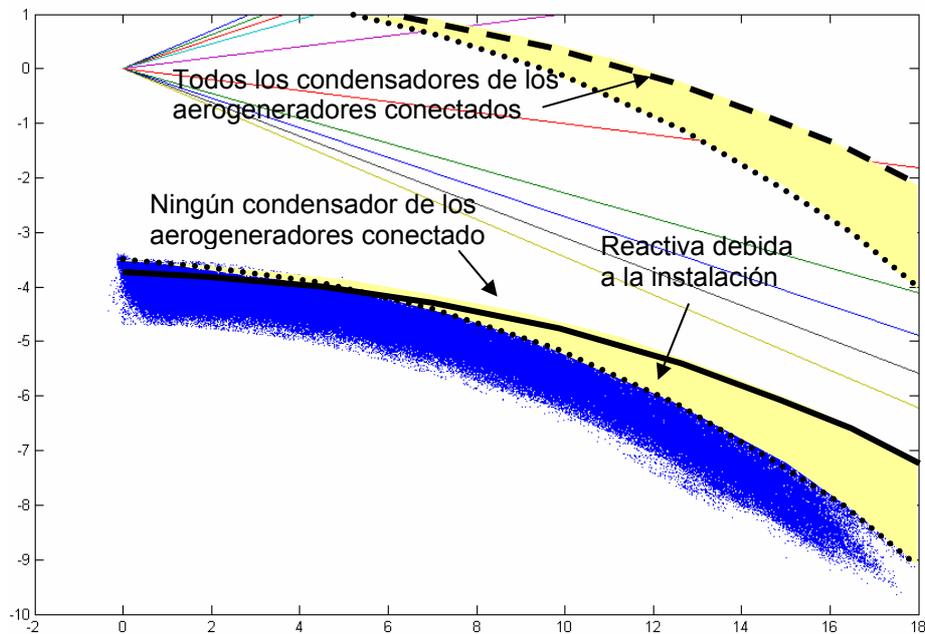


Ilustración 51: Potencia reactiva (MVar) frente activa (MW) del parque con y sin los condensadores de los aerogeneradores

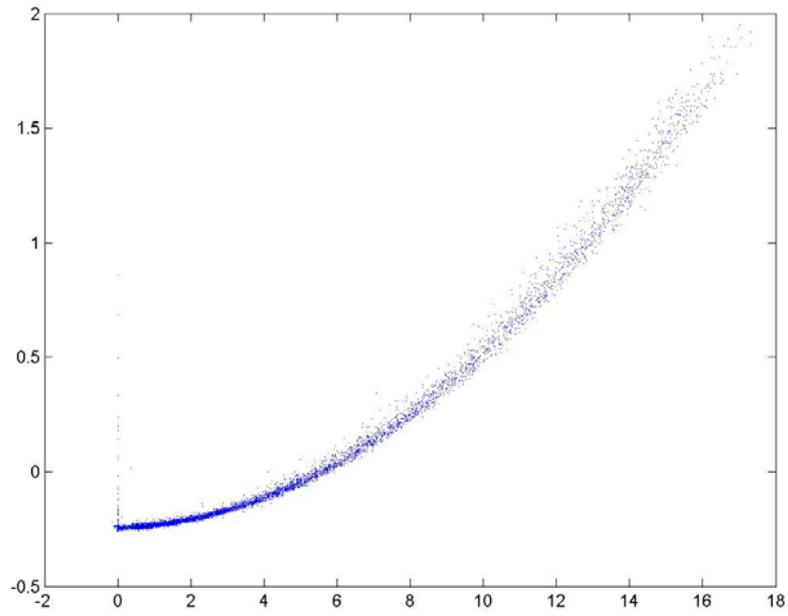


Ilustración 52: Pérdidas de potencia reactiva en las líneas y transformadores del parque, frente a Potencia activa total generada

10 CONCLUSIONES¹

Como principales conclusiones se pueden destacar que:

- Es imposible superar una bonificación de 2'48% sin ampliar los equipos de compensación de la subestación o sin actuar sobre los condensadores propios de los generadores.
- Controlando los condensadores de los aerogeneradores se puede alcanzar una bonificación media de 4'63% desconectándolos en horas valle, lo que representa un incremento del 2'15% más.
- Sería necesario instalar 10 veces más baterías de condensadores en la subestación para poder garantizar una bonificación del 8% en horas punta, lo que permitiría alcanzar una bonificación media de 3'61% sin actuar sobre los equipos de los aerogeneradores, y de 5'76% desconectando las baterías de los aerogeneradores en horas valle.
- La mayor bonificación media que se podría alcanzar es del 5'96%, frente al 6% teórico, debido a que la energía generada varía según la franja horaria.
- Ampliando al doble una de las baterías de condensadores de la subestación, modificando el control de las baterías de la subestación y desconectando las baterías de los aerogeneradores en horas valle se conseguiría una bonificación del 4'9473.
- Mediante el control de las baterías de condensadores de los aerogeneradores, o instalando una batería en el centro de control en baja tensión de varios escalones se podría conseguir una prima próxima al 4% en horas llano, y mejorando algo en horas punta. Esto permitiría obtener un valor medio de bonificación de 5'1511.

La regulación del factor de potencia gestionada desde un sistema central, que actuase sobre los reguladores de los aerogeneradores y de la subestación, permitiría pasar de una bonificación media del 1'50% (dejando los equipos y control actuales), a una bonificación media del 5'15%.

¹ No se ha tenido en cuenta que para la reconexión de los condensadores de la subestación deben pasar 2 minutos, según las especificaciones del fabricante, lo que podría implicar una pequeña reducción en la bonificación en horas llano.



Estudio preliminar:
Estudio de la bonificación por energía reactiva del parque de Sotavento

Tabla 9: Bonificaciones para punta, llano, valle y media anual para diferentes configuraciones

Baterías de condensadores			Franja horaria			
Subest (MVA _r)	Control de C subestación	Control de C aerogeneradores	Punta	Llano	Valle	Media
2x1'215	Control actual	Control actual	-0'18	2'84	0'25	1'4977
2x1'215	Control actual	Desconex valle	-0'18	2'84	8'00	4'0140
2x1'215	Controlables	Control actual	2'05	3'32	1'39	2'4825
10x1'215	Controlables*	Control actual	8'00	3'60	1'39	3'6128
2x1'215	Controlables	Desconex valle	2'05	3'32	8'00	4'6288
1'215+2'430	Controlables	Control actual	3'11	3'60	1'39	2'8011
1'215+2'430	Controlables	Desconex valle	3'11	3'60	8'00	4'9473
1'215+2'430	Controlables	Controlables	3'11	4	8'00	5'1511
10x1'215	Controlables*	Controlables	8'00	4	8'00	5'9628
	ideal	ideal	8'00	4	8'00	5'9628

Control actual:

situación actual

Controlables:

modificando el control, para que pueda ser gestionado según nuevos parámetros desde el centro de control

Desconex valle:

se desconectan todas las baterías de los aerogeneradores durante todo el tiempo valle

*:

las 10 baterías deben permitir conectarse en varios escalones.