



Proyecto fin de grado

**Gestión de potencia reactiva en un parque eólico  
con aerogeneradores basados en máquinas de  
inducción de jaula de ardilla**

Alumno: Álvaro Corno Aparicio

Directores:

Luis Rouco Rodríguez

José Ramón Arechederra Álvarez

Madrid

Junio 2016

## AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN ACCESO ABIERTO DE DOCUMENTACIÓN

### *1º. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.*

El autor D. Álvaro Corno Aparicio, como alumno de la UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS (COMILLAS), DECLARA que es el titular de los derechos de propiedad intelectual, objeto de la presente cesión, en relación con la obra *Gestión de potencia reactiva en un parque eólico con aerogeneradores basados en máquinas de inducción de jaula de ardilla*, que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual como titular único o cotitular de la obra.

En caso de ser cotitular, el autor (firmante) declara asimismo que cuenta con el consentimiento de los restantes titulares para hacer la presente cesión. En caso de previa cesión a terceros de derechos de explotación de la obra, el autor declara que tiene la oportuna autorización de dichos titulares de derechos a los fines de esta cesión o bien que retiene la facultad de ceder estos derechos en la forma prevista en la presente cesión y así lo acredita.

### *2º. Objeto y fines de la cesión.*

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad y hacer posible su utilización de *forma libre y gratuita (con las limitaciones que más adelante se detallan)* por todos los usuarios del repositorio y del portal e-ciencia, el autor CEDE a la Universidad Pontificia Comillas de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución, de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra (a) del apartado siguiente.

### *3º. Condiciones de la cesión.*

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia, el repositorio institucional podrá:

- (a) Transformarla para adaptarla a cualquier tecnología susceptible de incorporarla a internet; realizar adaptaciones para hacer posible la utilización de la obra en formatos electrónicos, así como incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar “marcas de agua” o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.
- (b) Reproducir la en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato. .
- (c) Comunicarla y ponerla a disposición del público a través de un archivo abierto institucional, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.

(d) Distribuir copias electrónicas de la obra a los usuarios en un soporte digital.

#### *4º. Derechos del autor.*

El autor, en tanto que titular de una obra que cede con carácter no exclusivo a la Universidad por medio de su registro en el Repositorio Institucional tiene derecho a:

- a) A que la Universidad identifique claramente su nombre como el autor o propietario de los derechos del documento.
- b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.
- c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada. A tal fin deberá ponerse en contacto con el vicerrector/a de investigación ([curiarte@rec.upcomillas.es](mailto:curiarte@rec.upcomillas.es)).
- d) Autorizar expresamente a COMILLAS para, en su caso, realizar los trámites necesarios para la obtención del ISBN.
- d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

#### *5º. Deberes del autor.*

El autor se compromete a:

- a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
- b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.
- c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e intereses a causa de la cesión.
- d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

#### *6º. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.*

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

- a) Deberes del repositorio Institucional:

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.

- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.

- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.

b) Derechos que se reserva el Repositorio institucional respecto de las obras en él registradas:

- retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

Madrid, a 14 de junio de 2016

ACEPTA

Fdo:  Álvaro Corno Aparicio



Proyecto fin de grado

**Gestión de potencia reactiva en un parque eólico  
con aerogeneradores basados en máquinas de  
inducción de jaula de ardilla**

Alumno: Álvaro Corno Aparicio

Directores:

Luis Rouco Rodríguez

José Ramón Arechederra Álvarez

Madrid

Junio 2016



# Contenidos

<b>Capítulo 1. Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1 El tema del proyecto.....	1
1.2 Objetivos del proyecto.....	2
1.3 Organización del documento.....	3
<b>Capítulo 2. Descripción del parque eólico.....</b>	<b>4</b>
2.1 Configuración del parque eólico.....	4
2.2 Descripción eléctrica.....	5
2.2.1 Esquemas unifilares.....	6
2.2.2 Datos de los transformadores.....	9
2.2.3 Datos de las líneas.....	10
2.2.4 Datos de los aerogeneradores.....	11
2.3 Cumplimiento de requisitos de factor de potencia.....	15
<b>Capítulo 3. Modelo de flujo de cargas del parque eólico.....</b>	<b>18</b>
3.1 Medidas y ajuste.....	18
3.2 Opción 1.....	21
3.3 Opción 2.....	23
3.4 Opción 3.....	24
<b>Capítulo 4. Necesidades y soluciones de regulación de potencia reactiva.....</b>	<b>30</b>
4.1 Necesidades de regulación.....	30
4.2 Soluciones de regulación de potencia reactiva.....	32
4.3 Análisis económico de soluciones de regulación de potencia reactiva.....	34
<b>Capítulo 5. Conclusiones.....</b>	<b>36</b>
<b>Capítulo 6. Referencias.....</b>	<b>38</b>



## Índice de figuras

Figura 1: Configuración de los aerogeneradores del parque.....	4
Figura 2: Vista aérea del parque de estudio .....	5
Figura 3: Esquema unifilar general.....	6
Figura 4: Esquema unifilar del centro de distribución 2.....	7
Figura 5: Esquema unifilar del centro de distribución 4.....	8
Figura 6: Esquema en $\pi$ de la línea .....	11
Figura 7: Circuito en T.....	12
Figura 8: Placa de características del aerogenerador ECO 48 .....	13
Figura 9: Placa de características del aerogenerador ECO 74 .....	13
Figura 10: Penalizaciones incumplimiento consignas factor de potencia.....	15
Figura 11: P-Q 220kV abril 2016 .....	16
Figura 12: P-Q 220kV febrero 2016.....	16
Figura 13: Potencia reactiva consumida en 220 kV frente a potencia activa generada en 220 kV: medidas registradas.....	19
Figura 14: Detalles del ajuste con Matlab: pantalla 1 .....	20
Figura 15: Detalles de ajuste con Matlab: pantalla 2 .....	20
Figura 16: Potencia reactiva consumida en 220 kV frente a potencia activa generada en 220 kV: medidas y ajuste de medidas por polinomio de 4º grado .....	21
Figura 17: Potencia reactiva consumida en 220 kV frente a potencia activa generada en 220 kV: ajuste de medidas y opción 1 de modelo de flujo de carga.....	22
Figura 18: Potencia reactiva consumida en 220 kV frente a potencia activa generada en 220 kV: ajuste de medidas y opción 2 de modelo de flujo de carga.....	23
Figura 19: Configuración de los aerogeneradores del parque.....	28
Figura 20: Barranco cerca de los aerogeneradores con más horas equivalentes.....	28
Figura 21: Potencia reactiva consumida en 220 kV frente a potencia activa generada en 220 kV: ajuste de medidas y opción 2 de modelo de flujo de carga.....	29
Figura 22: Penalización según rango de potencia activa generada.....	31
Figura 23: Factor de potencia medio en función del rango de potencia activa generada .	31
Figura 24: Reactancia controlada por tiristores (Thyristor Controlled Reactor, TCR).....	32
Figura 25: Condensador conmutado por tiristores (Thyristor Switched Capacitor, TSC)r.	33
Figura 26: Características estáticas de un SVC. ....	33
Figura 27: STATCOM.....	34



Figura 28: Característica estática de un STATCOM. .... 34



## Índice de tablas

Tabla 1: Transformador aerogenerador ECO 48.....	9
Tabla 2: Transformador aerogenerador ECO 74 (401).....	9
Tabla 3: Transformador subestación.....	9
Tabla 4: Conductor 95 mm <sup>2</sup> .....	10
Tabla 5: Conductor 150 mm <sup>2</sup> .....	10
Tabla 6: Conductor 240 mm <sup>2</sup> .....	10
Tabla 7: Características generador ECO 48.....	12
Tabla 8: Parámetros en pu del aerogenerador ECO 48.....	12
Tabla 9: Baterías de condensadores disponibles en los aerogeneradores .....	14
Tabla 10: Coeficientes producción aerogeneradores .....	24



## Resumen

Este proyecto aborda el estudio de la gestión de potencia reactiva en un parque eólico con aerogeneradores basados en máquinas de inducción de jaula de ardilla

El estudio nace de las penalizaciones mensuales en un parque eólico real por el incumplimiento de la consigna de factor de potencia establecida por el operador del sistema.

Para comprender el funcionamiento del parque eólico se presentan los resultados de simulación del flujo de cargas del parque y se compara los citados resultados con los registros del parque.

El interés de este proyecto es el cumplimiento de los requisitos de factor de potencia en el punto de conexión (220 kV). Por ello se presenta la potencia reactiva consumida en 220 kV frente a la potencia activa generada en 220 kV. Por supuesto, la simulación del flujo de cargas proporciona otros resultados (que no se muestran) como las tensiones en los diferentes nudos y los flujos por las líneas y transformadores.

Para ajustar los resultados del modelo de simulación de flujo de cargas a las medidas registradas se muestran diferentes opciones de modelado y se compara el resultado del modelo de simulación con la realidad. En particular, se han considerado tres opciones de modelado con complejidad creciente y que se denominan opción 1, opción 2 y opción 3.

Por último se investiga las necesidades de control de potencia reactiva y las posibles soluciones.



## Abstract

This final degree project has studied the reactive power management in a wind farm with turbines based on induction machines squirrel cage.

The study stems from the monthly penalties in a real wind farm of the set point power factor set by the system operator.

To understand the wind farm operation, simulation results of flow of the park loads are presented and compared with the data recorded from the park.

The interest of this project is the fulfillment of the requirements for power factor at the point of connection (220 kV). Thus the reactive power consumed in 220 kV versus active power generated at 220 kV is presented. Of course, the load flow simulation provides other results (not shown) as tensions in the different nodes and flows through the lines and transformers.

To adjust the results of the simulation model of load flow measures recorded will leave modeling showing different options and comparing the result of the simulation model with reality. In particular, we have considered three options modeling with increasing complexity and designated as Option 1, Option 2 and Option 3.

Finally the needs of reactive power control and possible solutions are investigated.



## Agradecimientos

El autor quiere agradecer a sus directores de proyecto D. Luis Rouco Rodríguez su dedicación y conocimientos transmitidos y D. José Ramón Arechederra Álvarez por haber posibilitado comenzar este trabajo en los meses de sus prácticas.

El autor desea expresar su gratitud a sus amigos y compañeros, por su compañía en las horas de realización del mismo.

El autor también quiere agradecer a Nacho Sanz Soriano, por su ayuda y compañía.

Por último el autor desea agradecer a toda su familia, en especial a sus padres y hermano, por hacer que sea la persona que es hoy en día.



# Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

## *1.1 EL TEMA DEL PROYECTO*

La calidad y seguridad del suministro de energía eléctrica exige que la frecuencia y la tensión se encuentre en unos determinados márgenes de funcionamiento. El Procedimiento de Operación 1.1 establece los márgenes de variación de la frecuencia del sistema eléctrico y de la tensión de la red de transporte peninsular española.

La frecuencia de un sistema eléctrico es resultado del equilibrio entre la generación y la demanda. De forma más precisa, es consecuencia de cómo la regulación de frecuencia logra mantener el citado equilibrio. En otras palabras, la frecuencia es un fenómeno de naturaleza electromecánica. Aunque matemáticamente la frecuencia de cada una de las barras de la red eléctrica es distinta, dadas las pequeñas diferencias entre las citadas frecuencias es usual suponer que la frecuencia es una magnitud global de un sistema eléctrico interconectado.

La tensión de las barras de una red eléctrica es resultado entre el equilibrio entre la potencia reactiva consumida y la potencia reactiva generada. Mientras que el balance de potencia activa en una red es sencillo: los generadores suministran potencia activa y las cargas y las líneas y transformadores consumen potencia activa, el balance de potencia reactiva es más complicado: los generadores, las líneas y las cargas pueden generar y consumir potencia reactiva y los transformadores consumen potencia reactiva. Las líneas son los elementos que introducen mayor complejidad en el balance de potencia reactiva en una red eléctrica ya que dependiendo de la carga pueden generar o consumir potencia reactiva. En contraste con la frecuencia, la tensión de una red eléctrica es un fenómeno de carácter local como local es el balance entre potencia reactiva generada y consumida.

El control de tensión de una red eléctrica tiene por misión mantener las tensiones de las barras de una red eléctrica en los márgenes especificados. Los recursos que el control de tensión tiene a su disposición son los generadores, los transformadores y los elementos de compensación paralelo (reactancias y condensadores). De todos ellos los elementos más importantes son los generadores.

La generación térmica, hidráulica y nuclear se ha realizado tradicionalmente con máquinas síncronas.

La generación eólica es ahora en muchos sistemas eléctricos, y en particular en el sistema eléctrico peninsular español, una componente muy relevante no sólo de la potencia instalada sino también de la producción de energía eléctrica.



En la generación eólica se empezaron utilizando las máquinas de inducción de jaula de ardilla por su robustez y bajo precio, pero con el paso del tiempo se han ido sustituyendo por máquinas de inducción doblemente alimentados y las máquinas síncronas multipolares conectadas a red a través de convertidores electrónicos autoconmutados.

La gestión de potencia reactiva en parques eólicos basados en máquinas de jaula de ardilla es complicada por la naturaleza discreta de los elementos de compensación (baterías de condensadores).

Antiguamente el Real Decreto 436/2004 del 12 de marzo establecía una bonificación ó penalización en función del periodo horario en que se realizase la cesión de energía a la red midiendo el factor de potencia para controlar que el vertido a la red fuera seguro (1).

En la actualidad el Real Decreto 413/2014 del 6 de junio, es el que regula la actividad de producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables, cogeneración y residuos. En éste Real Decreto se indica todo lo relativo al servicio de ajuste de control del factor de potencia. La última actualización, publicada el 13/12/2014, incluye la disposición transitoria decimocuarta (recomendación de la CNMC) para imponer que las instalaciones den cumplimiento a los rangos de factor de potencia indicados por el operador del sistema. El incumplimiento horario conllevará el pago de una penalización de 0,261 c€/kWh.

La regulación del factor de potencia se realizará y se obtendrá haciendo uso del equipo de medida contador-registrador de la instalación de producción. Se calculará con tres cifras decimales y el redondeo se hará por defecto o por exceso, según que la cuarta cifra decimal sea o no menor de cinco. La penalización se aplicará con periodicidad horaria, realizándose, al finalizar cada mes, un cómputo mensual, que será destinado a minorar el coste de los servicios de ajuste que correspondan (2).

## **1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO**

El objetivo de este proyecto es estudiar la gestión de potencia reactiva en un parque eólico real con aerogeneradores basados en máquinas de inducción de jaula de ardilla.

El parque eólico está formado 65 máquinas Eco 48 de 750 kW y una máquina Eco 74 de 1670 kW con un transformador de 690V/30kV cada una, un transformador de 220kV/30kV y dos baterías de condensadores de 3,6 Mvar y 7,2 Mvar de media tensión.

Para alcanzar el citado objetivo, se realizarán las siguientes de tareas:



1. Analizar el cumplimiento por parte del parque eólico de los requisitos de factor de potencia en el punto de conexión.
2. Investigar los factores que afectan el cumplimiento de los requisitos de factor de potencia en el punto de conexión por medio de un modelo matemático del parque.
3. Estudiar cómo se puede mejorar el cumplimiento de los requisitos de factor de potencia en el punto de conexión.

### ***1.3 ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO***

Esta memoria contiene 6 capítulos.

El capítulo 2 incluye todo lo referente al estudio del parque. Comienza con una descripción eléctrica: esquemas unifilares, datos de los transformadores, líneas y aerogeneradores. Después, se muestra las penalizaciones por incumplimiento de la consigna del factor de potencia. Y terminar serie de medidas reales.

En el capítulo 3 del documento, se recoge la figura con los puntos medios para validar el modelo con la curva lo ajusta y el análisis de las diferentes opciones de modelado del parque eólico tras la resolución del flujo de cargas.

El capítulo 4 recoge las necesidades y soluciones de regulación de potencia reactiva.

El capítulo 5 presenta las conclusiones del proyecto.

Y por último, el capítulo 6 contiene las referencias bibliográficas.



## Capítulo 2. DESCRIPCIÓN DEL PARQUE EÓLICO

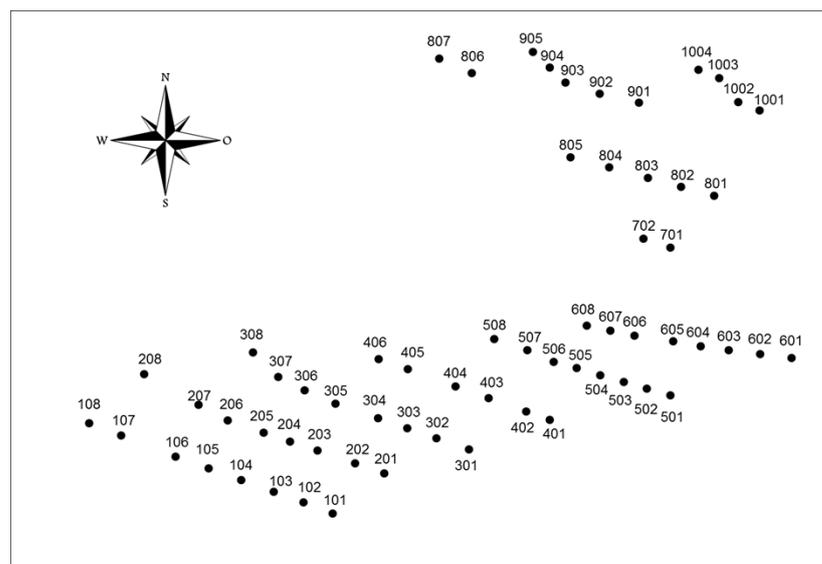
Este segundo capítulo, comienza describiendo la configuración y descripción de los elementos del parque en las secciones 2.1 y 2.2 respectivamente.

En la sección 2.3 se muestran las penalizaciones por incumplimiento de la consigna del factor de potencia.

A continuación en el punto 2.4, se muestran medidas horarias reales de puntos de operación, funcionando y sin funcionar las baterías de condensadores de media tensión.

### 2.1 CONFIGURACIÓN DEL PARQUE EÓLICO

Antes de comenzar con la descripción eléctrica es interesante conocer la configuración de los aerogeneradores en el parque. La Figura 1 muestra la configuración de los aerogeneradores en el parque y la Figura 2 proporciona una vista aérea del parque.



*Figura 1: Configuración de los aerogeneradores del parque*



*Figura 2: Vista aérea del parque de estudio*

## **2.2 DESCRIPCIÓN ELÉCTRICA**

En la Figura 3 se observa el esquema unifilar general. Y el detalle de dos centros de distribución (CD) 2 y 4 se puede ver en la Figura 4 y Figura 5 respectivamente.

- CD2: que contiene desde el aerogenerador 501 al 1004 sin incluir el 508 y 509.
- CD4: consta del resto de máquinas, desde la 101 a la 509 sin incluir de la 501 a la 507.

2.2.1 ESQUEMAS UNIFILARES

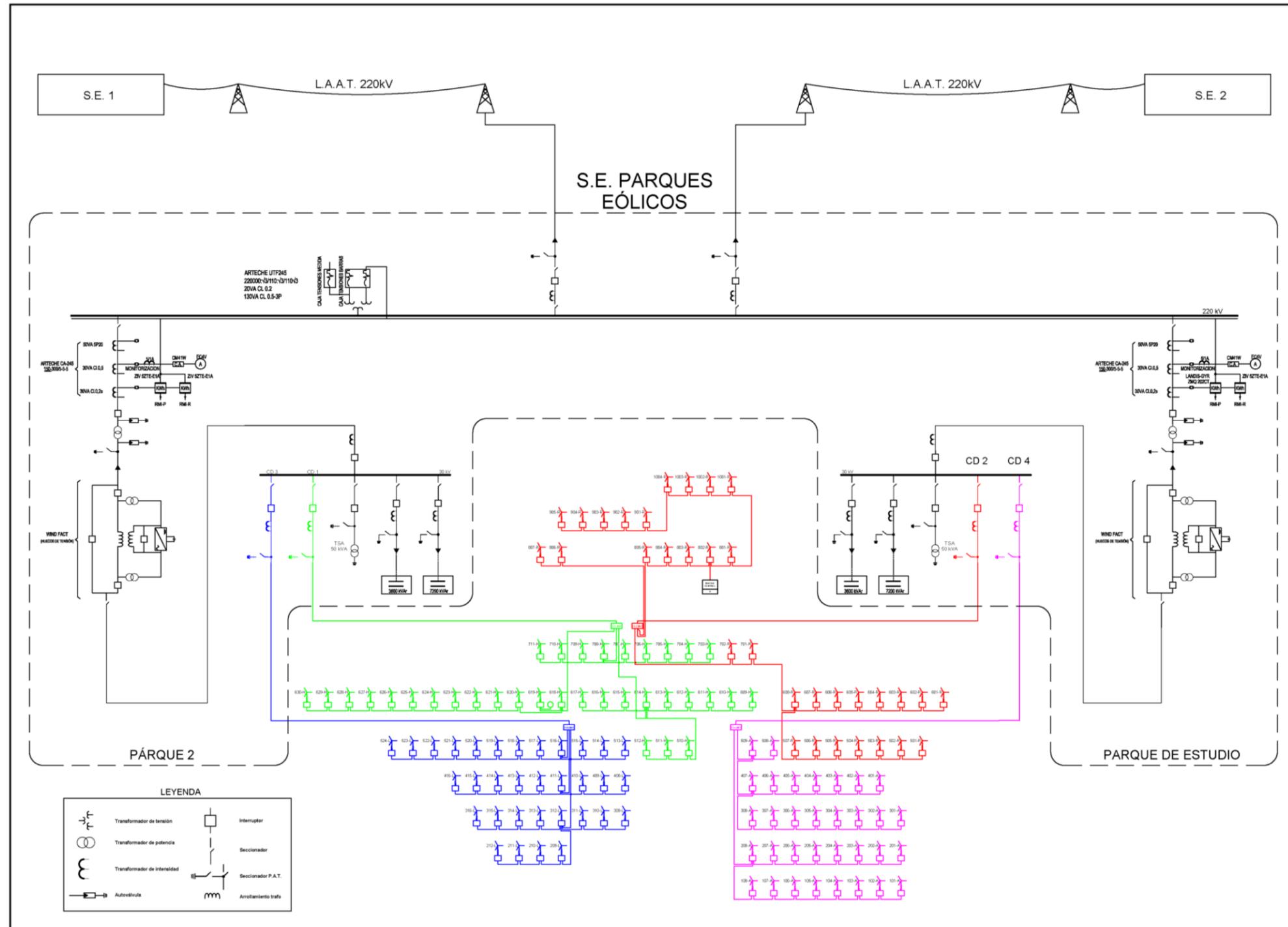


Figura 3: Esquema unifilar general

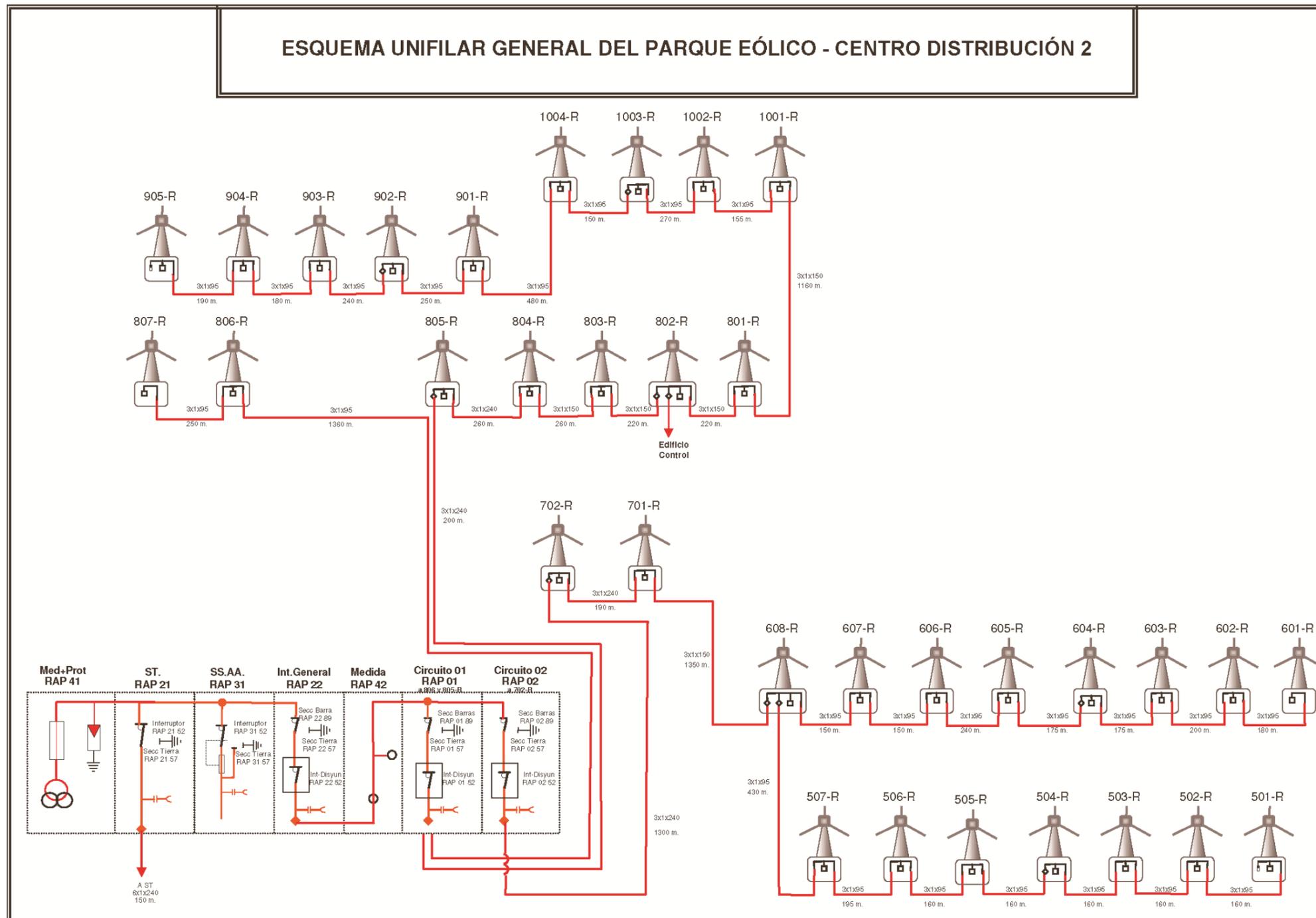


Figura 4: Esquema unifilar del centro de distribución 2

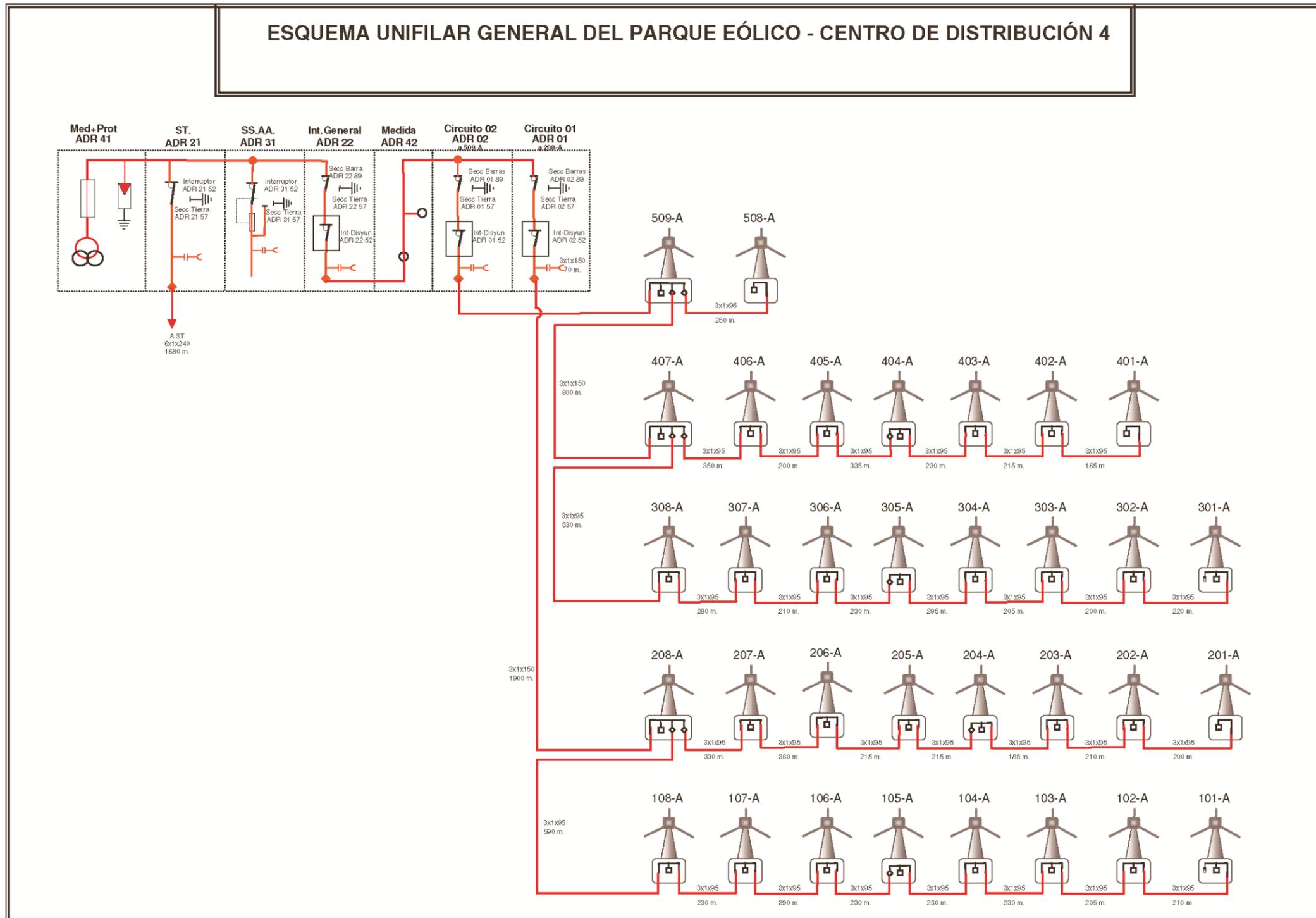


Figura 5: Esquema unifilar del centro de distribución 4



## 2.2.2 DATOS DE LOS TRANSFORMADORES

Los parámetros de los transformadores de los aerogeneradores EC 48 y ECO 70 están contenidos en la Tabla 1 y en la Tabla 2 respectivamente. La Tabla 3 contiene los parámetros del transformador de la subestación.

*Tabla 1: Transformador aerogenerador ECO 48*

Potencia aparente nominal (kVA)	900
Tensión primaria nominal (V)	30000
Tensión secundaria nominal (baja) (V)	690
Tensión de cortocircuito (%)	7,857
Pérdidas en carga (W)	7667

*Tabla 2: Transformador aerogenerador ECO 74 (401)*

Potencia aparente nominal (kVA)	2080
Tensión primaria nominal (V)	30000
Tensión secundaria nominal (baja) (V)	690
Tensión de cortocircuito (%)	5,65
Pérdidas en vacío (W)	4499
Pérdidas en carga (W)	16478
Pérdidas totales (W)	20977

*Tabla 3: Transformador subestación*

Potencia aparente nominal (kVA)	50000-60000
Tensión primaria nominal (V)	220000+10x2200-10x2200
Tensión secundaria nominal (baja) (V)	30000
Tensión de cortocircuito (%)	13



---

Pérdidas en carga (W)	180343
-----------------------	--------

---

El modelo del transformador está dado por las ecuaciones:

$$p_{cc} \approx r_{cc} \quad (1)$$

$$u_{cc} \approx x_{cc} \quad (2)$$

$$Z_{cc} = p_{cc} + j \cdot u_{cc} = r_{cc} + j \cdot x_{cc} \quad (3)$$

### 2.2.3 DATOS DE LAS LÍNEAS

La Tabla 4, la Tabla 5 y la Tabla 6 contienen las características de los conductores de 95, 150 y 240 mm<sup>2</sup> de sección, respectivamente.

*Tabla 4: Conductor 95 mm<sup>2</sup>*

R (Ω/km)	0,245
X (Ω/km)	0,133
C (μF/km)	0,163

*Tabla 5: Conductor 150 mm<sup>2</sup>*

R (Ω/km)	0,159
X (Ω/km)	0,124
C (μF/km)	0,187

*Tabla 6: Conductor 240 mm<sup>2</sup>*

R (Ω/km)	0,098
----------	-------



X ( $\Omega/\text{km}$ )	0,115
C ( $\mu\text{F}/\text{km}$ )	0,215

Para la línea se ha considerado el esquema en  $\pi$  por el ser el que mejor aproxima líneas cortas sin necesidad de utilizar el modelo de parámetros distribuidos lo que simplifica los cálculos posteriores.

A continuación se presenta se presenta el circuito equivalente de la línea correspondiente a dicho modelo:

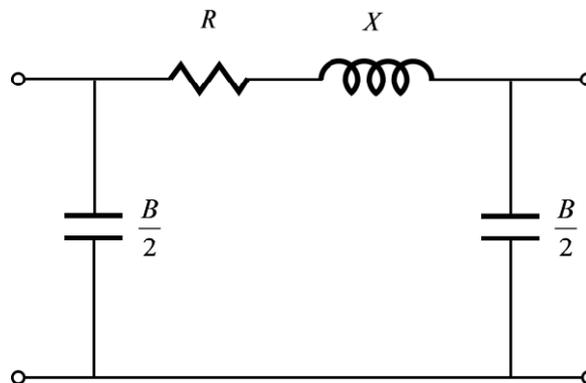


Figura 6: Esquema en  $\pi$  de la línea

Siendo en la Figura 6:

$$Z_S = (R + jX) \cdot l \text{ (}\Omega\text{)} \quad (4)$$

$$Y_P = (j\omega \cdot C) \cdot l = jB \cdot l \text{ (}\mu\text{S}\text{)} \quad (5)$$

Con  $\omega=2 \cdot \pi \cdot f$ , siendo  $f$  la frecuencia de 50 Hz.

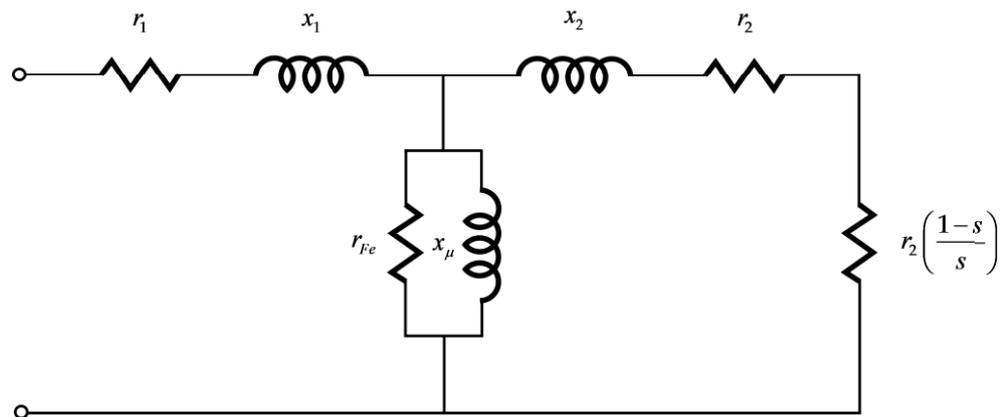
## 2.2.4 DATOS DE LOS AEROGENERADORES

La máquina ECO 48 dispone de dos generadores idénticos de 375 kW conectados en paralelo. Las características de los citados generadores se dan en la Tabla 7.



*Tabla 7: Características generador ECO 48*

$P_N$ (kW)	375
$U_N$ (V)	690
$f_N$ (Hz)	50
$I_N$ (A)	365
$n_N$ (1/min)	1518
$M_N$ (Nm)	2455
$\text{Cos } \varphi$	0.9



*Figura 7: Circuito en T*

Los parámetros del circuito equivalente fase-neutro en T con el rotor reducido al estator y el rotor girando de la Figura 7 se dan en la Tabla 8.

*Tabla 8: Parámetros en pu del aerogenerador ECO 48*

$r_1$	0,01120
$x_1$	0,11603
$r_2$	0,01522
$x_2$	0,23297
$x_\mu$	4,722



---

$\Gamma_{Fe}$	288,82
---------------	--------

---

Los valores en p.u. de la Tabla 8 están referidos a  $Z_{BASE}=1,091 \Omega$ .

En función de las horas de operación de cada uno de los dos generadores, se conectará el que menos tenga. Una vez superados los 225 kW de generación, entra el segundo generador conectado en paralelo. A partir de entonces, la potencia se reparte entre ambos en partes iguales.

Los datos del generador proporcionados por el fabricante de la ECO 48 y ECO 74 se dan en la Figura 8 y en la Figura 9, respectivamente.

Tipo	2 generadores de inducción trifásicos
Construcción	IMB3
Potencia nominal	2 x 375 kW
Tensión nominal	690 + 5% - 10% V
Frecuencia	50 5 % Hz
Grado de protección	IP55
Tipo de refrigeración	Eléctrica, independiente
Factor de potencia	0.90 (corregido a 0,98)
Conexión	Y
Clase de aislamiento	F
Rendimiento (VDE)	95,8 %

*Figura 8: Placa de características del aerogenerador ECO 48*

Tipo	Generador de rotor devanado con doble convertidor basado en tecnología IGBT
Fabricante	ABB, SIEMENS ó equivalente
Potencia nominal	1700 kW
Tensión nominal	690 $\pm$ 10%
Velocidad de giro nominal	1800 r.p.m.
Ondulador de potencia	Bidireccional 750/400 kVA tecnología IGBT
Clase de protección	IP54
Rango cos fi a potencia nominal	0.95 inductivo - 0.95 capacitivo
Sistema de refrigeración	Aire/Aire

*Figura 9: Placa de características del aerogenerador ECO 74*

Como se observa en la Figura 9 la máquina ECO 74 tiene la capacidad de regular de forma continua el factor de potencia entre 0.95 inductivo y 0.95 capacitivo. Esto será suficiente



para realizar el modelo, a diferencia de con la máquina ECO 48, en la que se necesita el modelo en T para calcular el consumo de reactiva en función de la potencia activa generada.

Los aerogeneradores tienen dos baterías de condensadores de compensación de potencia reactiva: una primera de  $2 \times 75 = 150$  kvar y una segunda de  $2 \times 50 = 100$  kvar.

La lógica del sistema de control que gobierna la conexión de las baterías de condensadores en cada aerogenerador es:

- Si la potencia activa generada es cero los generadores están desconectados y no hay ninguna etapa conectada.
- Si la potencia activa generada es inferior a 225 kW estará conectados la mitad de la primera etapa y solo estará funcionando uno de los dos generadores, estando el otro desconectado de la red.
- Si está generando entre 225 kW y 450 kW está la primera etapa de 150 kvar completa. Y se reparten la potencia entre ambos generadores.
- Y para una generación de más de 450 kW las dos etapas están conectadas. Es decir un total de 250 kvar.

No todos los aerogeneradores tienen operativa las dos baterías de condensadores anteriormente citadas. La Tabla 9 detalla las baterías de condensadores disponibles en los aerogeneradores.

*Tabla 9: Baterías de condensadores disponibles en los aerogeneradores*

Dos baterías disponibles (150 y 100 kvar)	101, 102, 103, 104, 105, 106, 201, 202, 203, 205, 206, 301, 302, 303, 304, 306, 402, 403, 404, 501, 502, 503, 504, 505, 506, 603, 604, 605, 606, 607, 803, 901, 902, 903, 904, 905, 1003, 1004
Una batería disponible (150 kvar)	107, 108, 207, 208, 307, 308, 405, 406, 407, 507, 508, 509, 601, 602, 608, 701, 702, 801, 802, 804, 805, 806, 807, 1001, 1002
Ninguna batería disponible	204, 305



## 2.3 CUMPLIMIENTO DE REQUISITOS DE FACTOR DE POTENCIA

Esta sección estudia el cumplimiento de requisitos de factor de potencia en el punto de conexión (a 220 kV). Para ello se han determinado las penalizaciones (en €/MWh ) por incumplimiento de las consignas del factor de potencia en el parque eólico.

La penalización total del mes se calcula como:

$$PT = PIM \cdot PTM \cdot h \quad (6)$$

Donde:

- PT = penalización total del mes (€).
- PIM = penalización por incumplimiento en el mes (€/MWh).
- PTM = producción en el mes (MW).
- h = horas de ese mes (h).

La Figura 10 muestra las penalizaciones a lo largo del periodo comprendido entre mayo 2015 y abril de 2016. En la Figura 10 el mes de febrero de 2016 destaca sobre el resto. En éste mes quedó indisponible el sistema de control que gobierna las baterías de condensadores de media tensión y por eso la penalización es mayor.

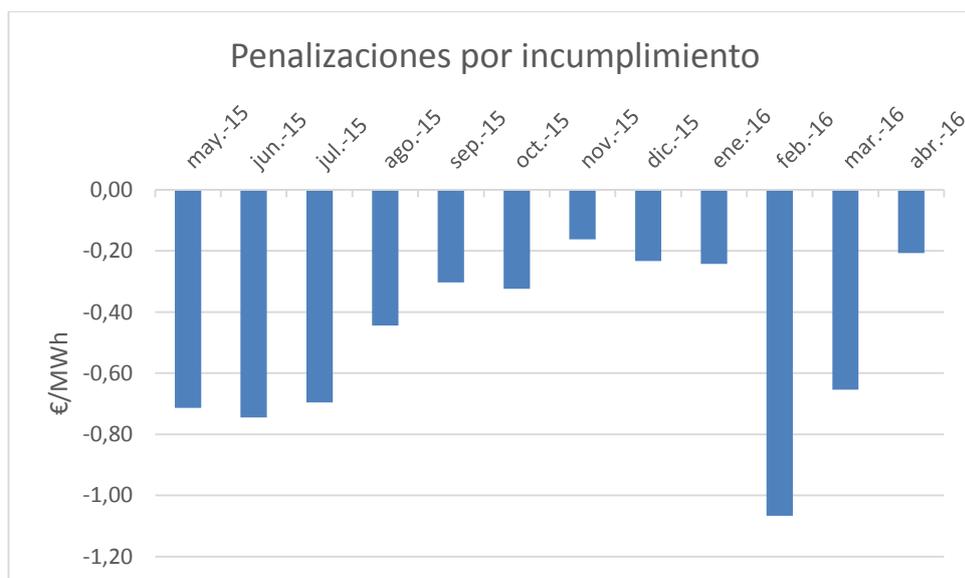


Figura 10: Penalizaciones incumplimiento consignas factor de potencia



La Figura 11 y la Figura 12 muestran la potencia activa generada y la potencia reactiva consumida en el punto de conexión a 220kV a lo largo de los meses de abril y febrero de 2016, respectivamente.

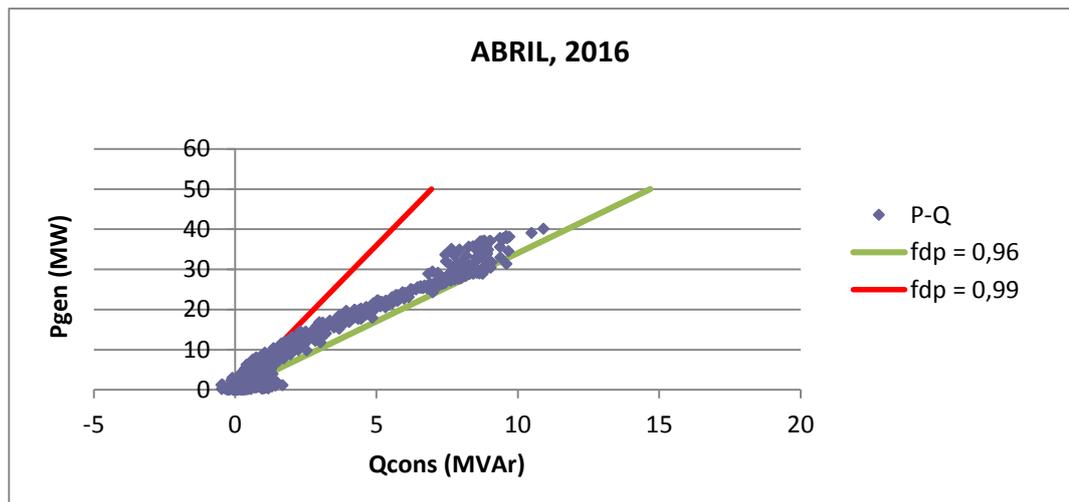


Figura 11: P-Q 220kV abril 2016

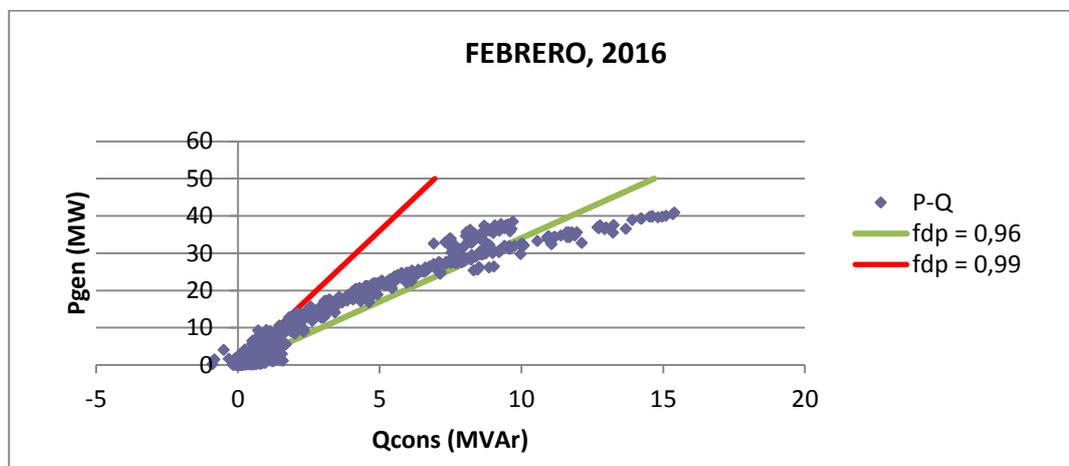


Figura 12: P-Q 220kV febrero 2016

La Figura 11 confirma que cumplimiento de los requisitos de factor de potencia gracias al funcionamiento satisfactorio del sistema de control de las baterías de condensadores en media tensión (30 kV): la inmensa mayoría de los puntos de funcionamiento se encontraban dentro del margen de variación admisible.

En cambio la Figura 12 muestra que gran parte de los puntos con potencias superiores a 30MW se encuentran fuera del margen de variación de factor de potencia admisible. Esto



se debe a que a mitad de mes el sistema de control de las baterías de condensadores quedó indisponible.



## Capítulo 3.    **MODELO DE FLUJO DE CARGAS DEL PARQUE EÓLICO**

Este capítulo presenta los resultados de simulación del flujo de cargas del parque eólico descrito en el Capítulo 2 y compara los citados resultados con los registros del parque.

El interés de este proyecto es el cumplimiento de los requisitos de factor de potencia en el punto de conexión (220 kV). Por ello se presentará la potencia reactiva consumida en 220 kV frente a la potencia activa generada en 220 kV. Por supuesto, la simulación del flujo de cargas proporciona otros resultados (que no se mostrarán) como las tensiones en los diferentes nudos y los flujos por las líneas y transformadores.

El capítulo comienza con el análisis de las medidas de potencia reactiva consumida en 220 kV frente a potencia activa generada en 220 kV.

Para ajustar los resultados del modelo de simulación de flujo de cargas a las medidas registradas se irán mostrando diferentes opciones de modelado y comparando el resultado del modelo de simulación con la realidad. En particular, se han considerado tres opciones de modelado con complejidad creciente y que se denominan opción 1, opción 2 y opción 3.

### **3.1    *MEDIDAS Y AJUSTE***

Para validar el modelo se toma una muestra de 1254 h con las medidas de potencia activa y reactiva en los contadores de 220 kV cuando estaban indisponibles las baterías de condensadores en 30 kV. Se ha considerado esta situación para validar el modelo del parque (líneas, transformadores, máquinas) y el control de las baterías de condensadores de los aerogeneradores. La Figura 13 muestra las medidas consideradas.

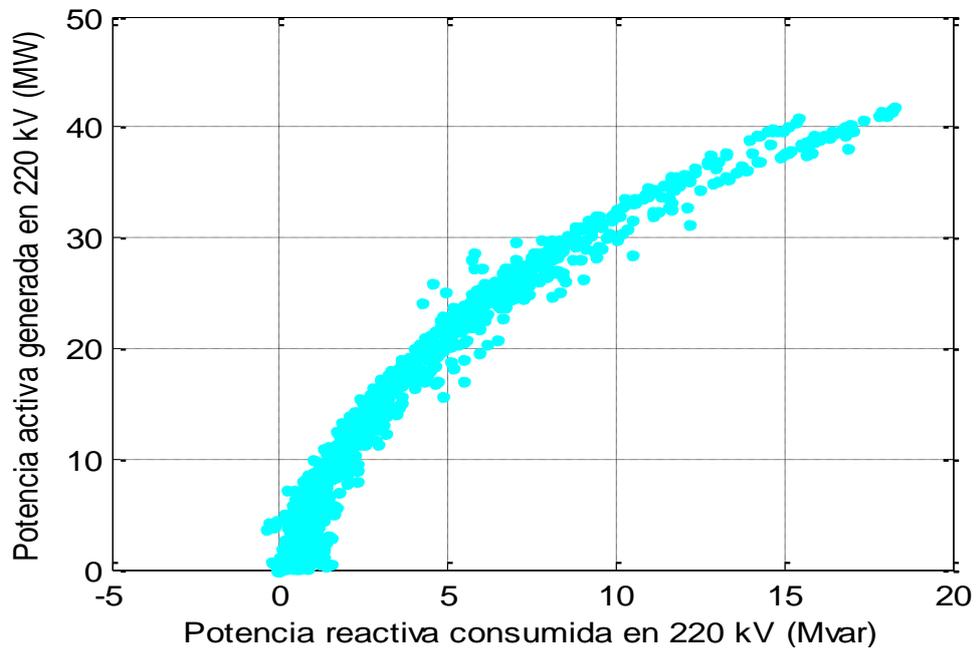


Figura 13: Potencia reactiva consumida en 220 kV frente a potencia activa generada en 220 kV: medidas registradas

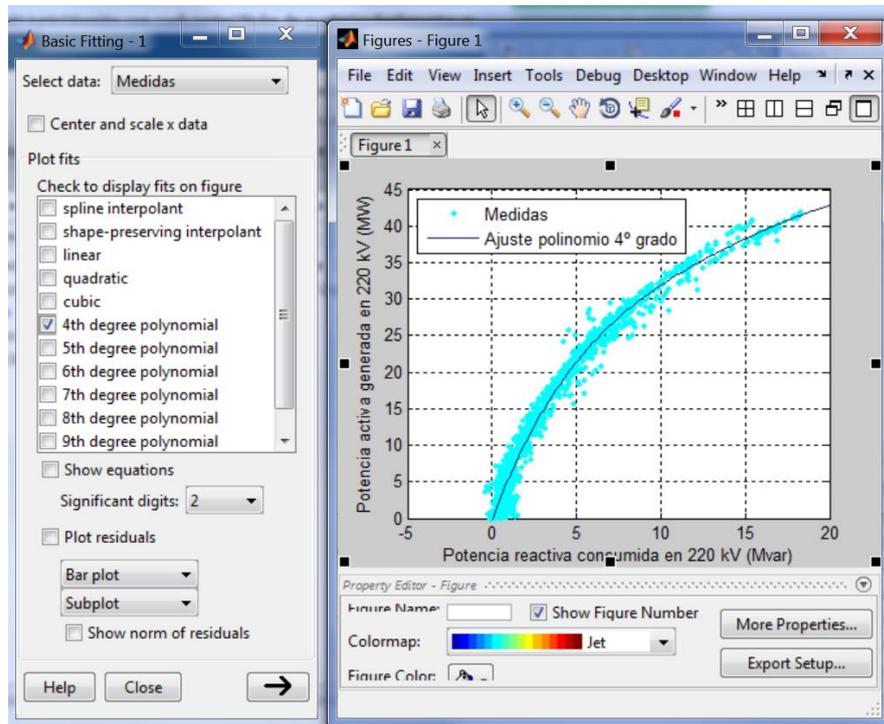
Para una mejor utilización de las medidas se plantea representar dichas medidas por un polinomio de 4º orden, cuya expresión es:

$$P = c1 \cdot Q^4 + c2 \cdot Q^3 + c3 \cdot Q^2 + c4 \cdot Q + c5 \quad (7)$$

Siendo:

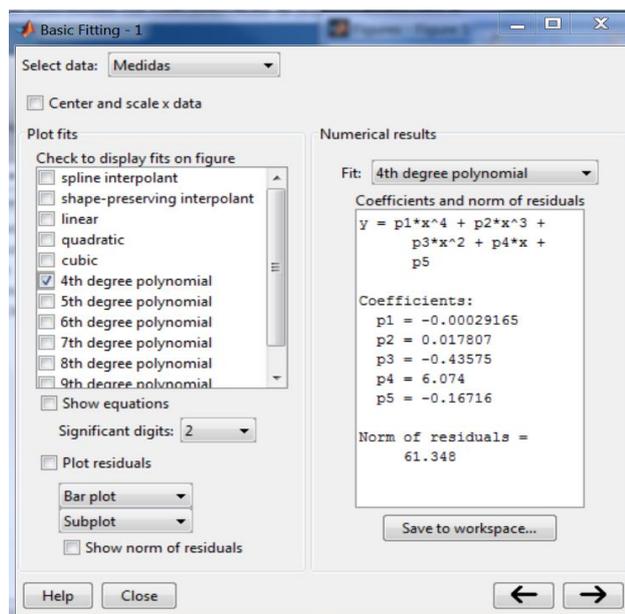
P = Potencia activa generada en 220 kV en MW  
Q = Potencia reactiva consumida en 220 kV en Mvar  
c1 = -0.00029165  
c2 = 0.017807  
c3 = -0.43575  
c4 = 6.074  
c5 = -0.16716

Para poder ajustar con Matlab un polinomio, una vez que se tienen los puntos que se quiere ajustarse va a: Tools – Basic Fitting y aparecerá la ventana de la Figura 14.



*Figura 14: Detalles del ajuste con Matlab: pantalla 1*

Una vez seleccionado el ajuste deseado se puede ampliar la información presionando sobre la flecha situada en la esquina inferior derecha de la Figura 15.



*Figura 15: Detalles de ajuste con Matlab: pantalla 2*



La Figura 16 incluye el ajuste con el polinomio de 4º grado.

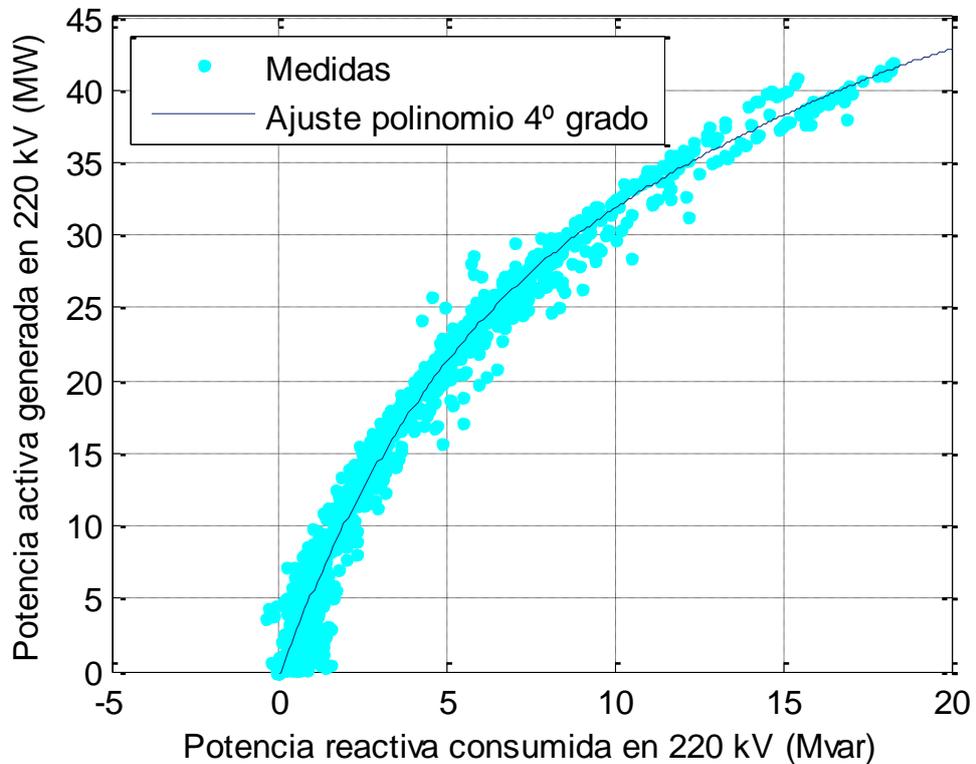


Figura 16: Potencia reactiva consumida en 220 kV frente a potencia activa generada en 220 kV: medidas y ajuste de medidas por polinomio de 4º grado

### 3.2 OPCIÓN 1

La primera opción de modelado contempla:

- Generación uniforme: no hay dependencia de la generación de potencia activa de los aerogeneradores con su localización en el parque.
- El consumo de potencia reactiva de los aerogeneradores es nulo.
- Los condensadores de los aerogeneradores no están conectados
- El consumo potencia reactiva de los transformadores de los aerogeneradores en vacío es nulo

La Figura 17 compara la potencia reactiva consumida en 220 kV frente a potencia activa generada en 220 kV proporcionadas por el ajuste de medidas y por la opción 1 de modelo de flujo de cargas. La opción 1 proporciona resultados muy alejados de la realidad medida.

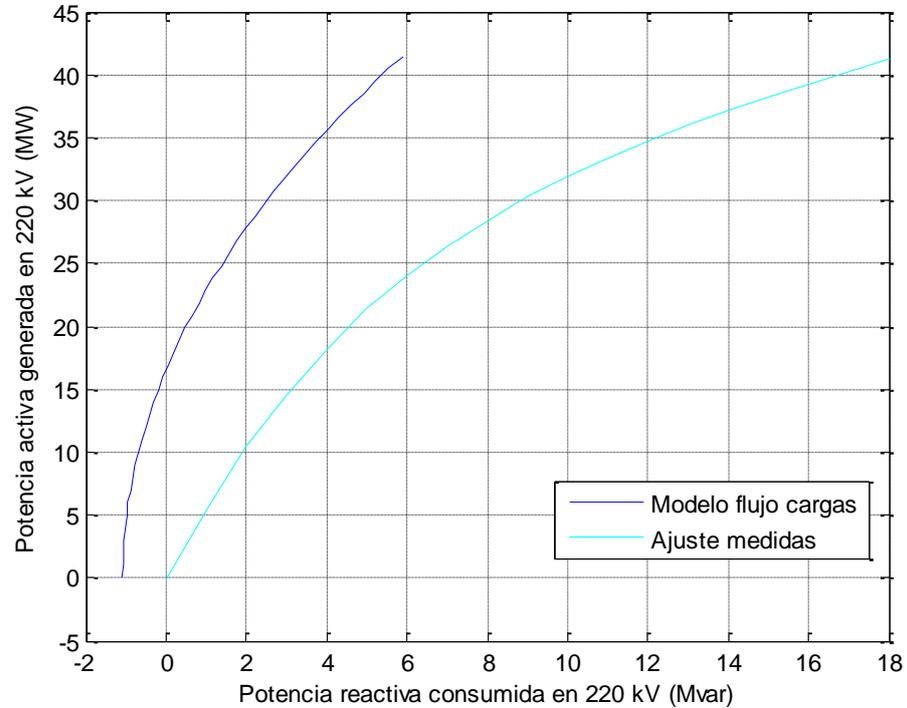


Figura 17: Potencia reactiva consumida en 220 kV frente a potencia activa generada en 220 kV: ajuste de medidas y opción 1 de modelo de flujo de carga

Para valorar la aproximación del modelo al ajuste se plantea calcular el error cuadrático medio (ECM) como:

$$ECM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (p_{ajuste} - p_{modelo\ 1})^2}{n}} \quad (8)$$

donde:

$n$  = numero de medidas.

$p_{ajuste}$  = potencia activa de la curva de ajuste en la  $i$ -ésima medida.

$p_{modelo\ 1}$  = potencia activa de la opción 1 de modelado en la  $i$ -ésima medida.

El ECM que resulta es 17,01.



### 3.3 OPCIÓN 2

La segunda opción de modelado supone:

- Generación uniforme: no hay dependencia de la generación de potencia activa de los aerogeneradores con su localización en el parque.
- El consumo de potencia reactiva de los aerogeneradores.
- Los condensadores de los aerogeneradores están conectados de acuerdo con su lógica.
- La máquina 401 (ECO 74) trabaja con factor de potencia unidad.
- El consumo potencia reactiva de los transformadores de los aerogeneradores en vacío es no nulo: 4.5 kvar cada transformador y de 8 kvar del transformador del aerogenerador 401.

La Figura 18 compara la potencia reactiva consumida en 220 kV frente a potencia activa generada en 220 kV proporcionadas por el ajuste de medidas y por la opción 2 de modelo de flujo de cargas.

La opción 2 proporciona resultados mucho más cercanos a la realidad medida.

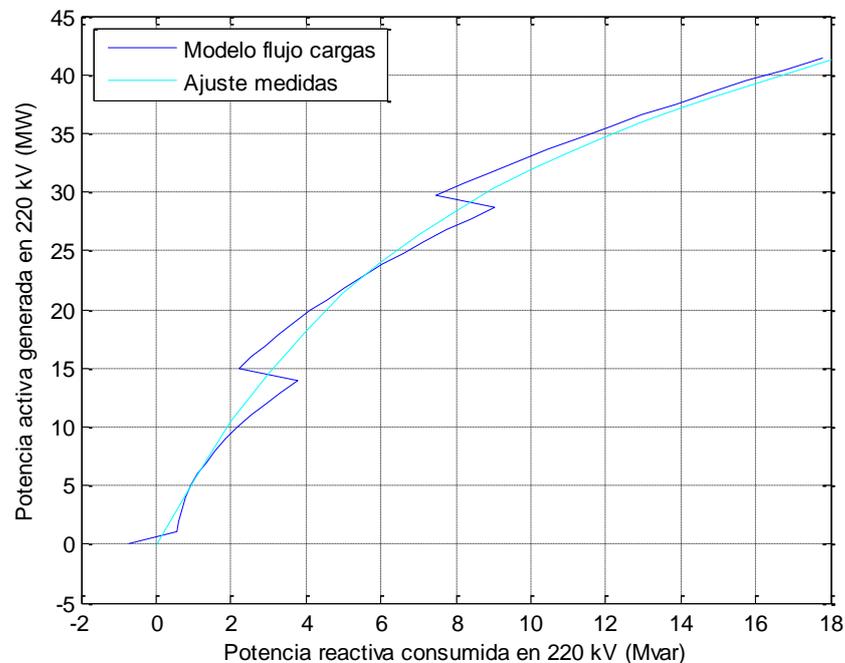


Figura 18: Potencia reactiva consumida en 220 kV frente a potencia activa generada en 220 kV: ajuste de medidas y opción 2 de modelo de flujo de carga



El error cuadrático medio (ECM) es: 2,22. El ECM ha disminuido considerablemente.

En la Figura 18 se observan saltos cuando se conectan las baterías de condensadores de cada aerogenerador.

### 3.4 OPCIÓN 3

La tercera opción de modelado supone:

- Generación no uniforme: no hay dependencia de la generación de potencia activa de los aerogeneradores con su localización en el parque. Se ha obtenido coeficientes de producción para cada generador en función los datos históricos del parque.
- El consumo de potencia reactiva de los aerogeneradores.
- Los condensadores de los aerogeneradores están conectados de acuerdo con su lógica.
- La máquina 401 (ECO 74) trabaja con factor de potencia unidad.
- El consumo potencia reactiva de los transformadores de los aerogeneradores en vacío es no nulo: 4.5 kvar cada transformador y de 8 kvar del transformador del aerogenerador 401.

La Tabla 10 detalla los coeficientes de producción de los aerogeneradores obtenidos de los datos históricos del parque. Se confirma que el coeficiente de producción de la máquina 401 (ECO 74), la única de 1670 kW, es el mayor de todos ya que es la máquina mayor del parque. Por supuesto, la suma de todos los coeficientes de producción es igual a la unidad.

*Tabla 10: Coeficientes producción aerogeneradores*

101	0.0158
102	0.0149
103	0.0149
104	0.0129
105	0.0132
106	0.0138



**UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS**  
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)  
INGENIERO ELECTROMECAÁNICO

*Modelo de flujo de cargas del parque eólico*

---

107	0.0140
108	0.0130
201	0.0153
202	0.0149
203	0.0138
204	0.0137
205	0.0131
206	0.0128
207	0.0130
208	0.0134
301	0.0154
302	0.0141
303	0.0135
304	0.0134
305	0.0135
306	0.0139
307	0.0136
308	0.0140
401	0.0422
402	0.0143
403	0.0147
404	0.0145
405	0.0137
406	0.0140
407	0.0129

---



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS  
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

INGENIERO ELECTROMECAÁNICO

*Modelo de flujo de cargas del parque eólico*

---

501	0.0178
502	0.0167
503	0.0175
504	0.0148
505	0.0144
506	0.0134
507	0.0140
508	0.0145
509	0.0131
601	0.0201
602	0.0181
603	0.0170
604	0.0160
605	0.0142
606	0.0148
607	0.0155
608	0.0147
701	0.0128
702	0.0122
801	0.0160
802	0.0180
803	0.0157
804	0.0148
805	0.0136
806	0.0173

---



**UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS**  
**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)**  
**INGENIERO ELECTROMECAÁNICO**

*Modelo de flujo de cargas del parque eólico*

---

807	0.0180
901	0.0148
902	0.0142
903	0.0154
904	0.0146
905	0.0162
1001	0.0139
1002	0.0144
1003	0.0158
1004	0.0156

---

También existe una correlación de los coeficientes de producción y las horas equivalentes de los aerogeneradores: los aerogeneradores con mayores coeficientes de producción son los aerogeneradores con más horas equivalentes.

La Figura 19 muestra con un código de colores las horas equivalente de los aerogeneradores. Se observan aerogeneradores desde 1200 horas equivalentes hasta 1800:

1. Las cotas de los aerogeneradores son distintas. Los que tienen más horas equivalentes se corresponden con los aerogeneradores a mayor altitud.
2. Los aerogeneradores con más horas están situados al borde de un barranco (ver Figura 20), por lo que las estelas que le llegan son más limpias que al resto de los aerogeneradores.

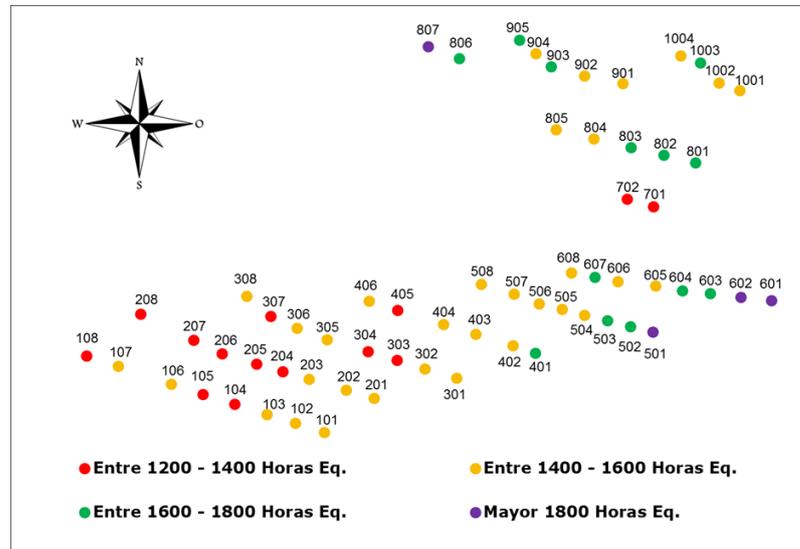


Figura 19: Configuración de los aerogeneradores del parque

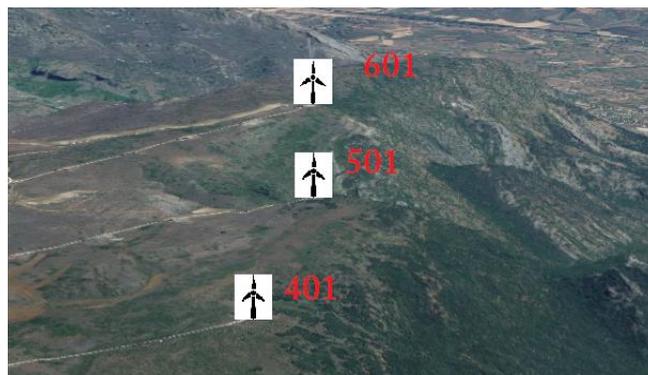
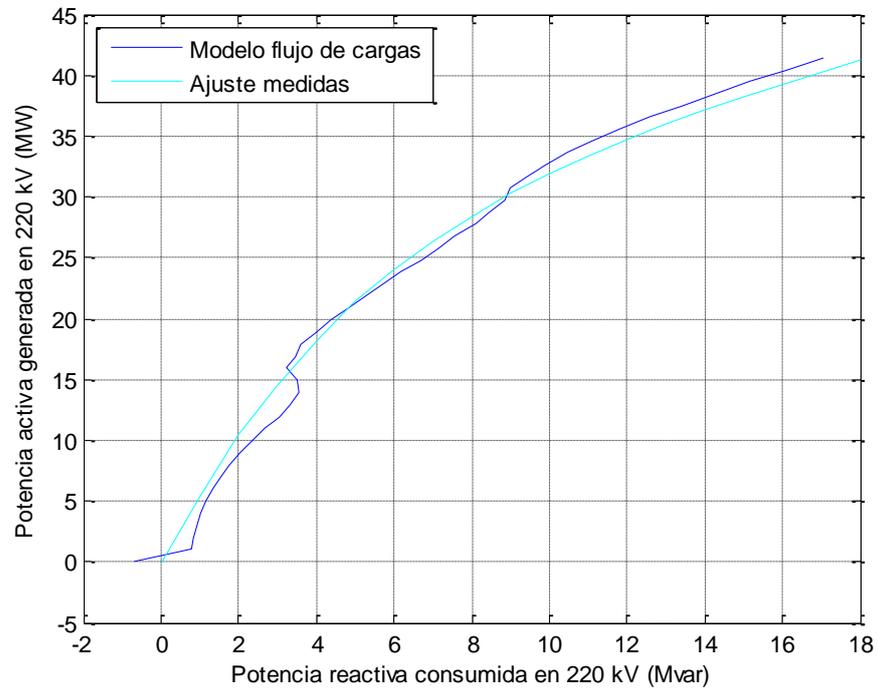


Figura 20: Barranco cerca de los aerogeneradores con más horas equivalentes

La Figura 21 compara la potencia reactiva consumida en 220 kV frente a potencia activa generada en 220 kV proporcionadas por el ajuste de medidas y por la opción 3 de modelo de flujo de cargas.



*Figura 21: Potencia reactiva consumida en 220 kV frente a potencia activa generada en 220 kV: ajuste de medidas y opción 2 de modelo de flujo de carga*

El error cuadrático medio (ECM) es: 2,04. El ECM ha disminuido. La opción 3 es la opción que mejor se ajusta a la realidad y menor error de las tres tiene. En la opción 3 se observa que se consigue suavizar la curva gracias a establecer unos coeficientes de producción para cada aerogenerador obtenidos de datos históricos.



## **Capítulo 4. NECESIDADES Y SOLUCIONES DE REGULACIÓN DE POTENCIA REACTIVA**

El capítulo investiga las necesidades de control de potencia reactiva y las posibles soluciones.

### **4.1 NECESIDADES DE REGULACIÓN**

Para caracterizar las necesidades de regulación de potencia reactiva se investiga los rangos de potencia en los cuales se producen las penalizaciones económicas por incumplimiento de factor de potencia. Se considera ahora que las baterías de condensadores en 30 kV están disponibles.

La Figura 22 muestra las penalizaciones en % en función de rango de potencia activa generada por el parque.

Llama la atención que la mayoría de las penalizaciones tienen lugar en el rango entre 0 y 10 MW: a potencias bajas. También hay penalizaciones en el rango entre 30 y 40 MW. Apenas hay penalizaciones en el margen entre 10 y 30 MW porque el parque, de forma natural, se encuentra dentro del margen de factor de potencia establecido.

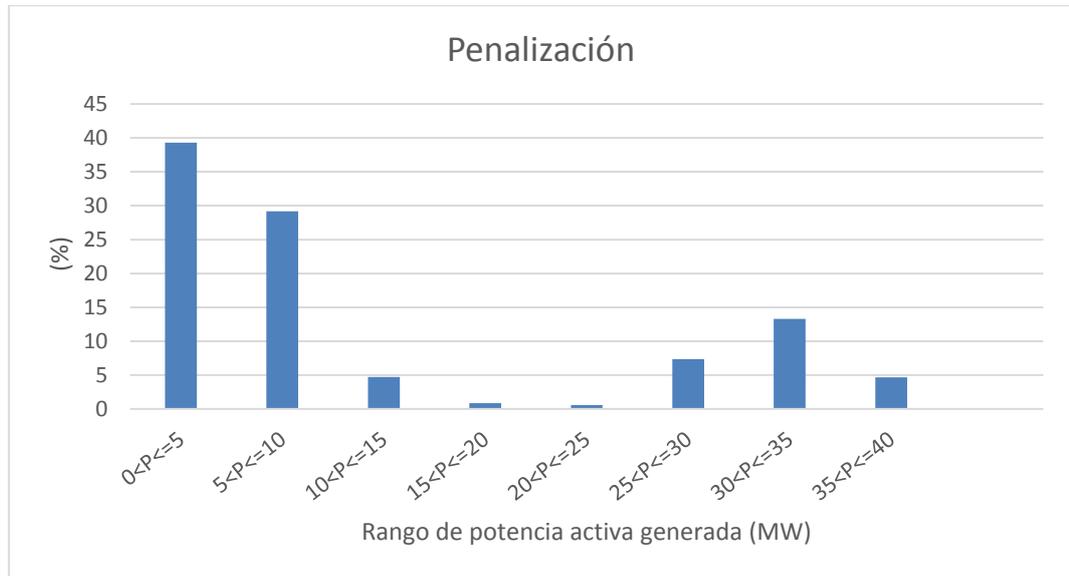


Figura 22: Penalización según rango de potencia activa generada

La Figura 23 muestra los factores de potencia medios en función de rango de potencia activa generada. Cuando el parque produce menos de 5 MW el factor de potencia es muy bajo. Cuando el parque produce entre 5 y 15 MW el factor de potencia es superior al requerido.

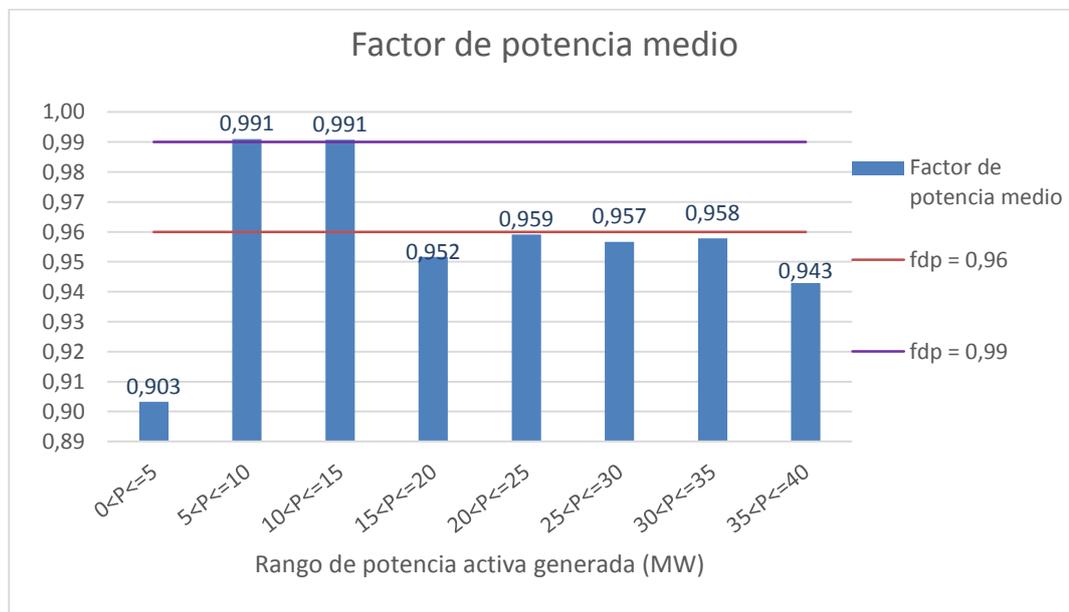


Figura 23: Factor de potencia medio en función del rango de potencia activa generada

El 75% de las penalizaciones tienen lugar por pequeñas desviaciones de potencia reactiva ya que se producen en el rango de potencias entre 0 y 15 MW.



La potencia reactiva continuamente ajustable adicional necesaria para que en el rango entre 0 y 5 MW el factor de potencia sea al menos 0,96 es igual a 0,24 Mvar.

## 4.2 SOLUCIONES DE REGULACIÓN DE POTENCIA REACTIVA

La regulación continua de potencia reactiva puede hacerse con dispositivos basados en electrónica de potencia. Los dispositivos pueden ser conmutados por la línea (SVCs) o autoconmutados (STATCOM).

Las reactancias controladas por tiristores (Thyristor Controlled Reactors, TCRs) combinadas con los condensadores conmutados por tiristores (Thyristor Switched Capacitors, TSCs) dan lugar a los compensadores estáticos de potencia reactiva (Static Var Compensators, SVCs). La Figura 24 muestra el esquema de un TCR trifásico. La Figura 25 muestra el esquema de un TSC trifásico.

Los TCRs cambian continuamente la potencia reactiva consumida por los SVCs. Los TSCs cambian por escalones la potencia reactiva suministrada por SVCs.

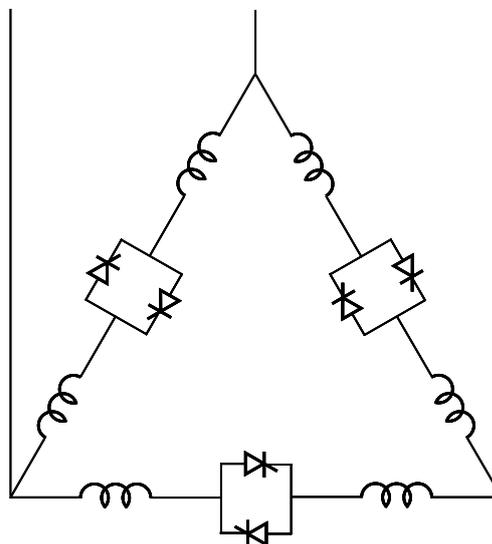


Figura 24: Reactancia controlada por tiristores (Thyristor Controlled Reactor, TCR).

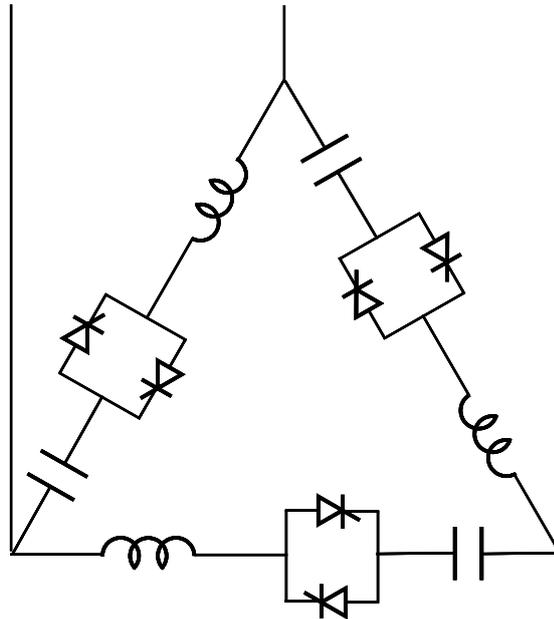


Figura 25: Condensador conmutado por tiristores (Thyristor Switched Capacitor, TSC)r.

La Figura 26 muestra las características estáticas de un SVC tal y como se logran a partir de las características estáticas de un TCR y un TSC.

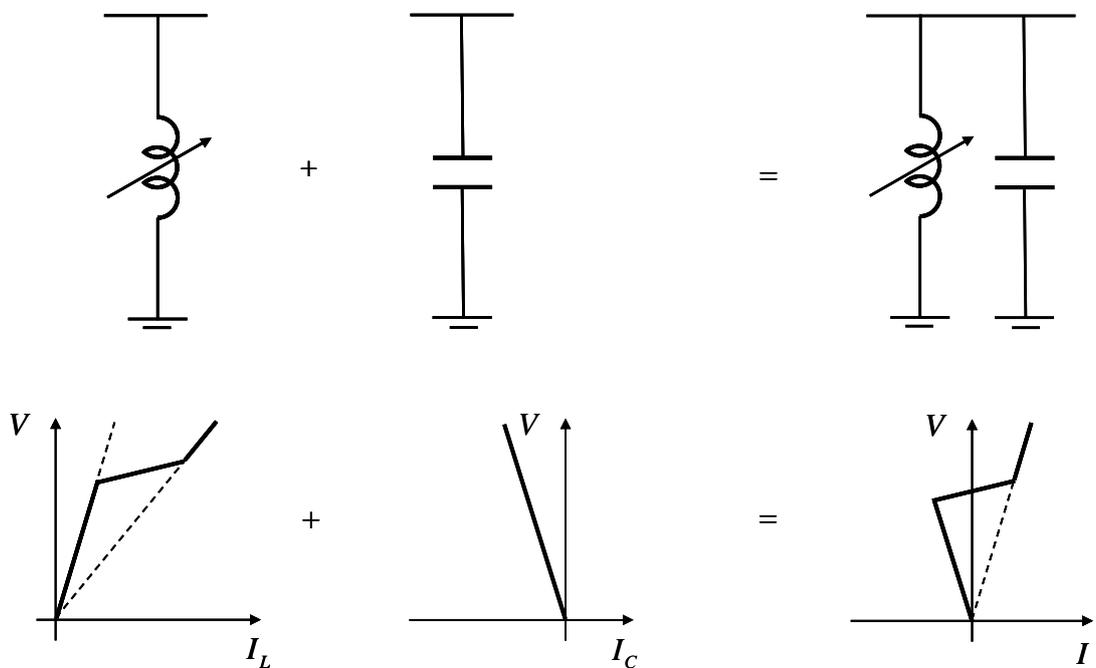


Figura 26: Características estáticas de un SVC.

Una alternativa al SVC es el STATCOM. El STATCOM es un dispositivo de electrónica de potencia basado en un convertidor autoconmutado con modulación de ancho de pulso de pulso tal y como se muestra en la Figura 27. Desde el punto de vista de la red, el STATCOM puede generar y consumir potencia reactiva. La Figura 28 muestra la característica estática de un STATCOM. En el margen de regulación, el STATCOM exhibe la misma característica estática que un SVC. El STATCOM se comporta como una Fuente de corriente cuando alcanza sus límites en contraste con el SVC que se comporta como una admitancia constante.

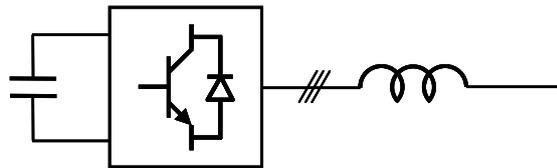


Figura 27: STATCOM.

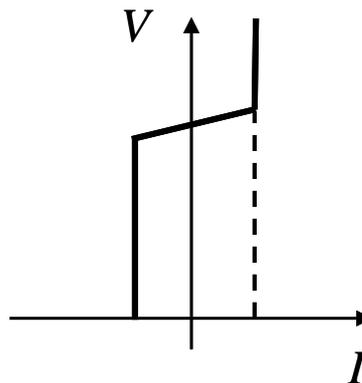


Figura 28: Característica estática de un STATCOM.

### **4.3 ANÁLISIS ECONÓMICO DE SOLUCIONES DE REGULACIÓN DE POTENCIA REACTIVA**

La Tasa Interna de Retorno (TIR) de una inversión se define como la tasa de descuento que hace que el Valor Actual Neto (VAN) de la inversión sea nulo al final del periodo de maduración de la inversión.

El VAN se calcula como:



$$VAN = \sum_{t=1}^N \frac{C_t}{(1+d)^t} - I_0$$

donde:

$I_0$  son los costes de inversión

$C_t$  es el flujo de caja de cada año  $t$  que se calcula como la diferencia entre los ingresos y los gastos.

$d$  es la tasa de de descuento.

$N$  es el periodo de maduración de la inversión expresado en número de años

En efecto, la TIR es la tasa de descuento  $d$  que hace que el VAN sea nulo:

$$0 = \sum_{t=1}^N \frac{C_t}{(1+d)^t} - I_0$$

$$0 = -I_0 + \frac{C_1}{(1+d)^1} + \frac{C_2}{(1+d)^2} + \dots + \frac{C_N}{(1+d)^N}$$

Para una tasa de descuento del 5%, un periodo de maduración de 5 años y un flujo de caja igual a las penalizaciones en una año, el coste de inversión es de 190 497 €.



## Capítulo 5. CONCLUSIONES

Un modelo adecuado y preciso de un parque eólico requiere que los circuitos eléctricos equivalentes que modelan los distintos componentes del parque sean completos, es decir, sin simplificaciones. Lo que, si bien hace más complejos los cálculos, nos da la precisión necesaria para lograr un ajuste fiel a la realidad.

Los modelos de circuitos eléctricos que permiten alcanzar este nivel de precisión son:

- El modelo en T de la máquina de inducción de jaula de ardilla frente al modelo simplificado que desprecia ciertos componentes de la máquina.
- El modelo en  $\pi$  de la línea, ya que ajusta de forma precisa las capacidades e inductancias de la misma. Además al tratarse de líneas subterráneas estos componentes tienen una mayor influencia en la generación o el consumo de la reactiva, por lo que es doblemente necesario considerarlos: por la precisión que requiere el modelo y la influencia sobre la potencia reactiva total.
- El modelo en T para los transformadores, al tener en cuenta la rama de magnetización de los mismos.

Todos estos detalles en el modelado eléctrico de los componentes marcan la diferencia entre un buen ajuste y uno mucho más rudimentario. Si se desprecia uno de estos detalles en el modelado de una máquina, línea o transformador su influencia en el resultado final es nula pero si se desprecia en todos ellos se comprueba que el resultado final se aleja de la realidad.

Los coeficientes de producción han sido determinantes en el modelado del parque para ajustar de forma afinada el modelo matemático. Esto tiene mucho sentido ya que cada máquina posee unas condiciones de funcionamiento diferentes, debido a la distribución de viento en el parque eólico. La generación no está repartida equitativamente entre todas las máquinas. Cada máquina tiene un punto de funcionamiento diferente. Siendo aquellas que generan a potencias en el entorno de la nominal las de mayor eficiencia y mejor factor de potencia. Mientras que las que se encuentran en puntos de funcionamiento más alejados de su potencia nominal presentan peor eficiencia y factor de potencia. De ahí que sea necesario el uso de estos coeficientes para ponderar el peso del factor de potencia de cada una de ellas en el final.

Un análisis de los datos muestra que la mayoría de penalizaciones económicas se da en el rango de 0 a 15 MW de potencia activa generada. En el diseño del sistema de regulación de reactiva este rango de generaciones tiene un peso muy importante y los elementos de control deben de ser diseñados para manejar potencias que se muevan en estos rangos.



La lógica de control actual es imprecisa por ser discreta, ya que las baterías de condensadores entran por escalones. Además los condensadores tienen unos tiempos de entrada y salida considerables con respecto a las rápidas fluctuaciones en la generación de potencia activa y el consumo de potencia reactiva. Lo que no permite realizar un ajuste fino y rápido de las necesidades de consigna del factor de potencia del parque.

El 75% de las penalizaciones tienen lugar por pequeñas desviaciones de potencia reactiva ya que se producen en el rango de potencias entre 0 y 15 MW.

La potencia reactiva continuamente ajustable adicional necesaria para que en el rango entre 0 y 5 MW del factor de potencia sea al menos 0,96 es igual a 240 kvar.

La regulación continua de potencia reactiva puede hacerse con dispositivos basados en electrónica de potencia. Los dispositivos pueden ser conmutados por la línea (SVCs) o autoconmutados (STATCOM).

Los TCRs cambian continuamente la potencia reactiva consumida por los SVCs. Los TSCs cambian por escalones la potencia reactiva suministrada por SVCs.

Una alternativa al SVC es el STATCOM. El STATCOM es un dispositivo de electrónica de potencia basado en un convertidor autoconmutado.



## Capítulo 6. REFERENCIAS

- [1].**B.O.E.** *Real Decreto 436/2004*. Publicado el 12 de marzo de 2004.
- [2].**B.O.E.** *Real Decreto 413/2014*. Publicado el 10 de junio de 2014.
- [3].**Renzetti, Mario A.** *e29*. s.l. : Cultura energética, 2008.
- [4].**Fraile Mora, Jesús.** *Máquinas eléctricas (7ª edición)*. Garceta grupo editorial, (2015).
- [5].**Caro Carretero, Raquel.** *Estadística: yo no soy mala, me han dibujado así*. Civitas, (2013).
- [6]. **Gómez Expósito, A.** *Análisis y operación de sistemas de energía eléctrica*. McGraw Hill, (2002).
- [7]. **Wood, A. J. and Wollenberg, B. F.** *Power Generation, Operation, and Control*. Wiley, (2012).
- [8]. **Van Cutsem, T.** *Voltage Stability of Electric Power Systems*. Springer Science & Business Media, (2007).
- [9]. **Short, T. A.** *Electric Power Distribution Handbook, Second Edition*. CRC Press, 2014.
- [10]. **IEC Standard 60287**, *Electric Cable – Calculation of the Current Rating*.