

Estudio del sistema eléctrico ibérico ante un incremento de generación eólica

Palabras clave: Energía eólica, redes eléctricas, control de tensiones, potencia reactiva.

Key words: Wind power, electric networks, voltage control, reactive power.

Resumen:

La seguridad de suministro es fundamental en los sistemas de energía eléctrica (SEE). La generación eólica (GE), debido a su naturaleza variable y poco previsible, supone un desafío para la operación del sistema. En España la energía eólica representa ya un 17% de la potencia instalada y se prevé que este porcentaje siga aumentando. Debido a su condición de isla energética, el estudio de la generación eólica en la red de la Península Ibérica cobra especial importancia. En este artículo se presenta un estudio sobre el impacto de la generación eólica en la red realizado en el marco de un proyecto fin de carrera.

Abstract

The security of supply is a fundamental issue in electrical power systems. Wind power generation, due to its variable and unpredictable nature, presents a challenge to power system operation. Wind power in Spain represents already more than 17% of the total installed power, and it is expected to represent a larger share in the future. The study of wind power has high relevance in the Iberian Peninsula due to its limited interconnection capacity. The present article presents a study about the impact of wind power in the electrical grid in the framework of a final thesis.



Diego Luca de Tena Costales

Ingeniero Industrial del ICAI, Promoción 2008. Estudiante de doctorado en el Institute of Technical Thermodynamics del German Aerospace Center. Su área de interés es la integración de vehículos eléctricos en el sistema eléctrico.



Joachim Lehner

Ingeniero Mecánico por la Universidad de Stuttgart, Promoción 2005. Investigador en el departamento "Power Generation and Automatic Control", en el "Institute of Combustion and Power Plant Technology" (IFK), de la Universidad de Stuttgart. Su área de interés es la estabilidad de sistemas de energía eléctrica y la integración de generación renovable y distribuida en la red.

Introducción

El uso de energía eólica para generación eléctrica ha ganado importancia en los últimos años. Desde el año 2000 al año 2007, la potencia eólica instalada en la Unión Europea (UE) se incrementó en 47 GW, y a finales de 2007 cubrió un 7% del mix energético de la UE [1]. La UE planea que la energía de origen renovable represente en 2020 un 20% de la demanda total de energía en Europa [2], por lo que es previsible que, para

alcanzar este objetivo, la contribución a la generación eléctrica de origen renovable, especialmente eólica, desempeñe un papel aún más importante al actual.

Sin embargo, una alta penetración eólica dificulta una operación estable del sistema y establece nuevas responsabilidades para el operador del sistema. Los parques eólicos están normalmente conectados a la red de distribución, lo que puede provocar grandes cambios en los flujos de potencia. Esto

puede llevar a situaciones de sobrecarga y originar problemas de tensión en la propia red de distribución. Una alta penetración eólica puede ocasionar también problemas en la red de transporte. Normalmente la potencia reactiva para el control de tensiones es provista por grandes grupos de generación. Debido al reemplazo de generación convencional por GE, hay menos grupos convencionales de generación disponible para el control de tensiones. Esto puede llevar a problemas de tensión en la red de muy alta tensión.

Las interconexiones del sistema eléctrico ibérico con Francia y Marruecos son muy limitadas y, por tanto, las fluctuaciones de la energía eólica deben ser compensadas dentro de la propia Península Ibérica. Debido a ello, los problemas relacionados con la energía eólica en España y Portugal son particularmente elevados en comparación con otros países europeos.

Condiciones para una operación estable del sistema

Una alta penetración eólica puede afectar a la estabilidad del sistema en gran medida. Cabe resaltar el efecto de ésta sobre las tensiones en la red; esto se debe a las caídas de tensión originadas por los flujos de potencia producidos, los cuales se ven modificados de manera significativa.

Límites de tensiones

Para proteger a la infraestructura de transmisión de daños hay establecidos límites superiores de tensión, así como hay límites inferiores para evitar el colapso de tensiones.

Caída de tensión

En circuitos de corriente alterna la caída de tensión está causada por flujos de potencia a través de la infraestructura de transmisión. Esto se puede explicar con el sencillo ejemplo de la Figura 1, en el que un generador síncrono alimenta una carga a través de una línea representada por una impedancia serie $Z = R + jX$, con una carga que es

$S = P + jQ$. En ese caso la caída de tensión es dada por la ecuación:

$$\Delta V = [(R \cdot P + X \cdot Q) + j(X \cdot P - R \cdot Q)]/V_2$$

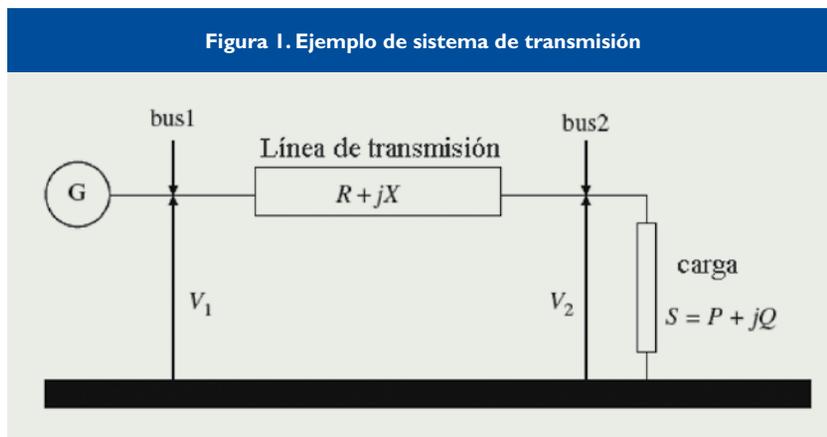


Figura 1. Ejemplo de sistema de transmisión

Por tanto la tensión se ve afectada por los flujos de potencia activa y reactiva. Si además la diferencia de ángulo de las tensiones es pequeña, la parte imaginaria de la ecuación (1) puede ser despreciada. En las líneas de muy alta tensión la resistencia R es pequeña en comparación con la inductancia X ($X/R \gg 1$). Por ello, de acuerdo con la ecuación (1), la caída de tensión en muy alta tensión está causada principalmente por los flujos de potencia reactiva.

Sin embargo, a menores niveles de tensión, la reactancia X de las líneas de transmisión en redes de distribución se reducen en comparación con la resistencia R. Por ello, las caídas de tensión en redes de distribución están causadas en mayor medida por flujos de potencia activa.

Los flujos de potencia activa en un sistema de potencia están determinados principalmente por las cargas y por el programa de generación; los

flujos de potencia reactiva dependen además en gran medida del consumo de la propia red.

Consumo de potencia reactiva

Por un lado, la demanda de potencia reactiva depende de los consumidores, por otro lado, depende de los consumos de reactiva de las líneas y de los transformadores que dependen a su vez del nivel de carga de los mismos. Las líneas de transmisión pueden tener un carácter capacitivo, es decir producen potencia reactiva, en caso de que el nivel de carga de la línea sea inferior a su "carga natural" –ver Figura 2–. Por otra parte, las líneas de transmisión pueden tener también un carácter inductivo, es decir consumen potencia reactiva si la carga de la línea es superior a su "carga natural". Si la demanda de potencia reactiva no puede ser compensada regionalmente, las caídas de tensión pueden conducir a problemas de tensión.

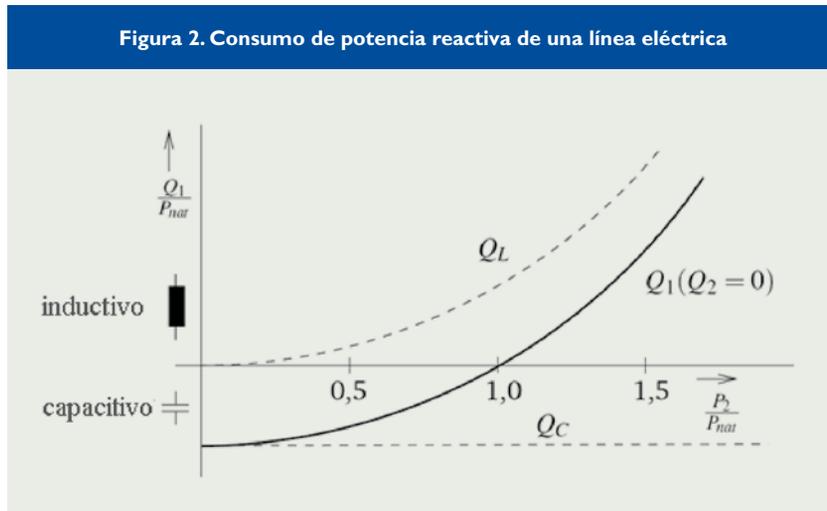


Figura 2. Consumo de potencia reactiva de una línea eléctrica

Control de tensiones

Por lo tanto, la tensión en sistemas de corriente alterna está fuertemente relacionada con la potencia reactiva, principalmente en muy alta tensión. Para mantener los niveles de tensión dentro de un margen dado, se requiere suficiente potencia reactiva para compensar los consumos del sistema eléctrico. Como la potencia reactiva no puede ser transportada a grandes distancias [4], esta potencia reactiva ha de ser suministrada regionalmente. Por ello, el fenómeno del colapso de tensión es debido normalmente a una falta regional de reserva de potencia reactiva. La potencia reactiva para el control de tensiones en la red de muy alta tensión es provista normalmente por generadores síncronos, pero también por equipos de compensación de reactiva (como reactancias paralelo, bancos de condensadores o FACTS). Sin embargo el control de tensiones en redes de distribución se realiza en general de manera centralizada para toda la red, regulando las tomas de las subestaciones de transformación.

Máxima capacidad de transmisión y límite de estabilidad

En sistemas de corriente alterna la capacidad de transmisión no debe superar los límites térmicos de las líneas y demás equipos de transporte como medida de protección frente a un exceso de corriente. Existe además en corriente alterna una capacidad máxima de transmisión para cada línea que depende de los flujos de potencia, y que podría ser alcanzada antes del límite térmico. Este hecho puede ser ilustrado considerando otra vez el sencillo ejemplo de la Figura 1, para el que la tensión V se mantiene constante y la resistencia R se desprecia frente a la inductancia X . La Figura 3 muestra la familia de curvas P-V en magnitudes unitarias para distintos valores del factor de potencia. Para cada factor de potencia hay una máxima capacidad de transmisión. Dentro de los límites de tensión, no se alcanza la

máxima capacidad de transmisión para los factores de potencia mostrados. La máxima capacidad de transmisión coincide además con el límite de estabilidad de la línea. Esto está representado en la Figura 3, en la que para valores por encima del mismo (línea de trazo continuo) el comportamiento es estable, y por debajo (línea de trazo discontinuo) éste es inestable.

Condiciones de carga

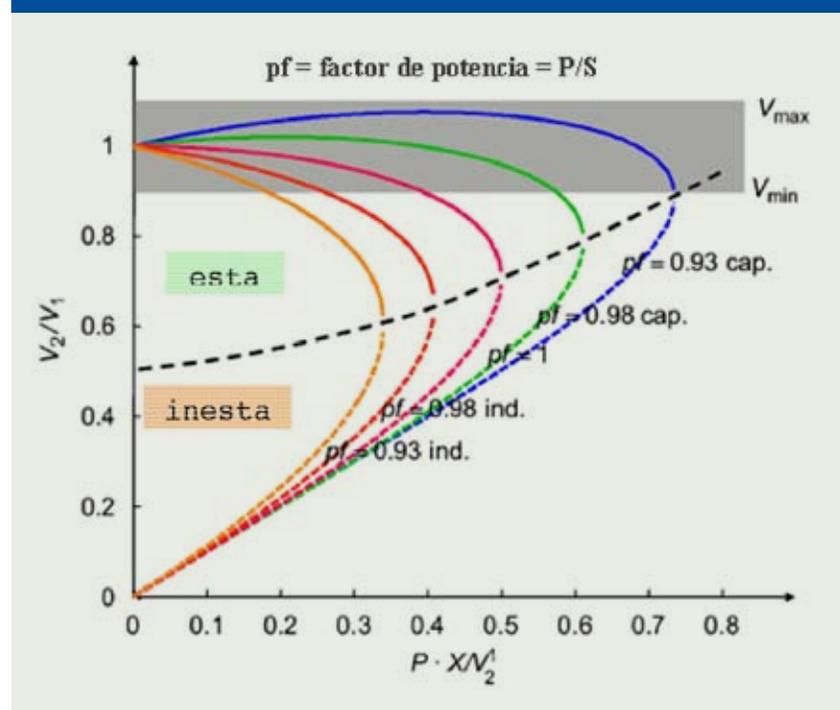
Generalmente en redes eléctricas atendiendo a la condición de carga se dan dos situaciones extremas: el caso punta, que representa el máximo consumo de potencia, y el caso valle, que representa el menor consumo en el sistema. En situaciones de punta predominan bajas tensiones en la red, mientras que en situaciones de valle lo hacen las altas tensiones. Con el fin de analizar las influencias de un incremento de la generación distribuida en la red se ha de tomar una condición de carga como base para el análisis. Por un lado, una misma generación distribuida durante el caso valle representa una mayor penetración en términos relativos comparada con el

caso punta. Además, en el caso valle están disponibles menos grupos de generación para tareas de control y se hacen más probables grandes fluctuaciones en los flujos de potencia. Por otro lado, en condiciones de valle las sobretensiones en los puntos de conexión a red de equipos de generación distribuida son un gran problema, especialmente en redes de distribución. Estas sobretensiones ocurren debido a caídas de tensión causadas por los flujos de potencia en las líneas de transmisión. Por ello, el análisis en el caso valle es especialmente relevante.

Metodología

El objetivo del presente estudio es mostrar el impacto de la GE en la red eléctrica ibérica. Mediante el programa POSIM desarrollado en IVD, empleado para simulaciones dinámicas de SEE, se pueden obtener los flujos de potencia activa y reactiva y el perfil de tensiones para condiciones de régimen permanente. Con ello se pueden estudiar los flujos de potencia así como la capacidad del sistema de mantener un nivel adecuado de tensiones. No se estudiará el comportamiento del

Figura 3. Familia de curvas P-V para diferentes factores de carga



sistema durante y después de falta, debido al carácter muy general de esté proyecto.

Presentación de resultados

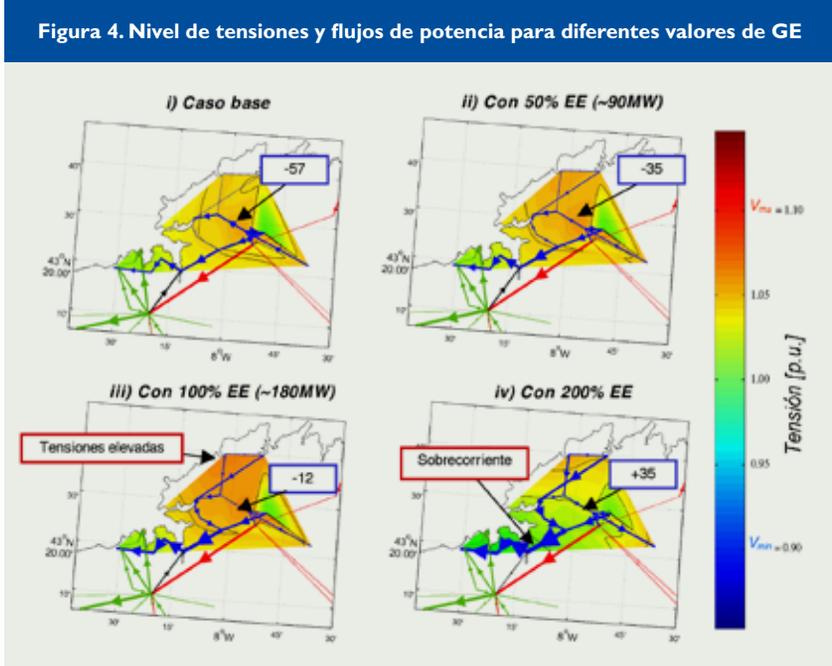
El análisis se llevó a cabo en tres niveles. El primero se realizó a nivel de parque; para ello se modeló el parque eólico de Sotavento, del que está publicada información de los principales componentes eléctricos [5], se estudió la capacidad del mismo de mantener un factor de potencia concreto para distintos valores de generación y se desarrolló un modelo eléctrico del mismo [6]. Debido al hecho de que la mayoría de los parques están conectados a la red de distribución, se analizó en detalle una de estas redes. Finalmente se analizó la red de transporte ibérica en términos de tensión y flujos de potencia. El modelo de red empleado se obtuvo de publicaciones de Red Eléctrica de España (REE) [7]. El parque de generación eólica se modeló a partir de publicaciones de la Asociación Empresarial Eólica [8] y de REE [9].

Estudio de red de distribución

La red elegida es de 132 kV y está situada al oeste de la ciudad de la Coruña, se eligió esta zona debido a su elevada penetración eólica.

Primeramente se estudió el comportamiento de la red en su conjunto, en términos de potencia de pérdidas y de consumos de potencia reactiva para distintos valores de GE, y las situaciones de carga valle y punta. Comparando los resultados del caso valle con los del caso punta se observa que las pérdidas y consumos de reactiva son menores en el caso punta. Esto es debido a que la GE compensa en parte la energía tomada del exterior, contribuyendo así en parte a una menor carga de la infraestructura de transmisión.

Se estudiaron además los flujos de potencia y el nivel de tensiones en la red de distribución mencionada para distintos niveles de GE, que van desde el 0% hasta el 200% de



la potencia instalada, valor tomado para estimar lo que podría suceder en la citada red en el futuro. En la Figura 4 se muestran los resultados de simulación.

Si se observa la transmisión de potencia por la línea eléctrica señalada, se evidencia la mencionada compensación de la potencia tomada del exterior. En el caso analizado, la red en conjunto pasa de ser deficitaria de energía a alimentar la red de muy alta tensión en los dos últimos casos. Esto ejemplifica una situación que con anterioridad no se daba, es decir, las redes de distribución fueron construidas para llevar energía eléctrica desde la red de transporte a las cargas, a menores niveles de tensión.

En la Figura 4 se muestran también los niveles de tensiones de la red estudiada. Si se comparan las tres primeras simulaciones (0, 50 y 100%) queda patente la clara influencia de la GE y de los flujos de potencia activa en general, con los niveles de tensión. El fenómeno observado toma una importancia aún mayor en redes de menor tensión, en éstas la resistencia es comparable a la inductancia ($X_1/R_1 \sim 1$) y por tanto, como se deduce de la ecuación (1), los

flujos de potencia activa contribuyen en mayor medida a las caídas de tensión que los de reactiva, en parte también porque éstos son en general de menor magnitud.

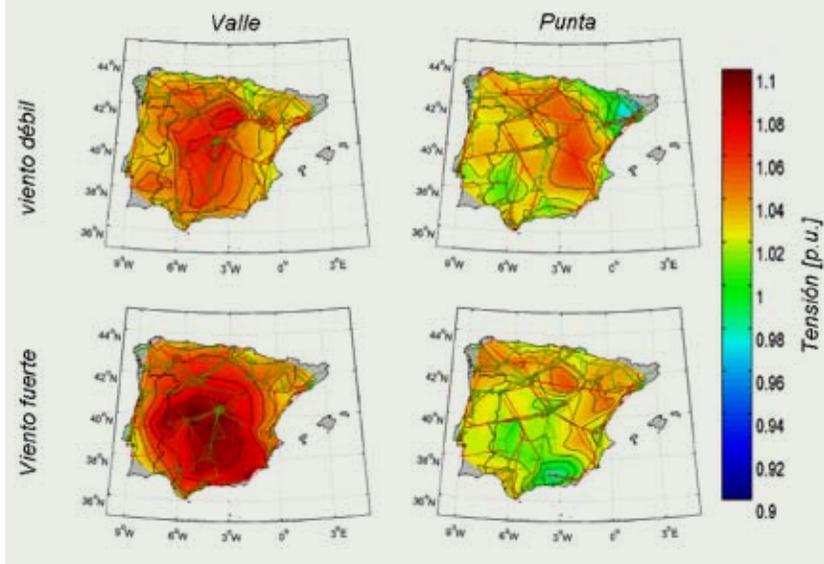
Por último, cabe señalar que, en el último caso, que corresponde con una proyección a futuro de la GE, la red actual no es suficiente ya que se sobrepasa el límite térmico de una de las líneas. Una posible solución es construir nuevas líneas o reforzar las líneas actuales, lo que incrementa la capacidad de transporte de la red. Otra solución es emplear dispositivos FACTS, los cuales tienen la capacidad de modificar los parámetros que determinan los flujos de potencia por la red. Esto es, incrementando la flexibilidad de la misma consigue incrementar su capacidad efectiva de transporte [10].

Estudio a nivel nacional

Los casos de alta y de baja GE se analizaron y compararon tanto para el caso punta como para el caso valle. Los casos de baja GE analizados corresponden con los programas de REE para el 13/05/2008 a las 4 a.m. para el caso valle, y para el 1/07/2008 a las 13 p.m. para punta, los casos de alta penetración eólica con el 22/03/2008

⁽¹⁾ El nivel de tensiones es menor en el último caso debido a que las tomas de los transformadores fueron cambiadas para evitar sobretensiones en la red.

Figura 5. Nivel de tensiones y flujos de potencia para valle y punta, tanto para alta como para baja carga



a las 17 p.m. para el caso valle y con el 27/03/2008 a las 20 p.m. para el caso punta.

En la Figura 5 se presentan el nivel de tensiones y los flujos de potencia activa para los casos descritos. En primer lugar, se observa que el nivel de tensiones es superior en los casos de valle que en los casos de punta. Extrapolando lo expuesto anteriormente para una única línea, se puede decir que en el caso valle la red se comporta en general de manera capacitiva y de manera inductiva en punta. Esto es debido al distinto nivel de carga de la misma en ambos casos, lo que hace que varíen en gran medida las necesidades de potencia reactiva de la red, y que varíe con ello el nivel de tensiones. En segundo lugar se observa que, en los casos de alta GE, las tensiones se hacen más extremas, esto es, aún menores en el caso punta y aún mayores en valle. La razón es que para la misma carga un sistema con mayor GE presenta una menor capacidad para controlar el nivel de tensión, al haber menos grupos de generación disponibles.

Conclusiones

La incorporación de generación en el sistema eléctrico modifica en gran medida el funcionamiento de la red. Las redes de distribución se

construyeron para tomar potencia de la red de transporte y distribuirla entre los clientes/abonados. Para altos niveles de GE se puede producir la situación contraria, esto es se llega a inyectar potencia en la red de transporte desde la red de distribución, ya que a esta última suelen estar conectados los parques eólicos.

Conforme la potencia eólica instalada siga creciendo, las redes de distribución tendrán que garantizar una operación estable en condiciones cada vez más variables. Para ello será necesario introducir equipos que permitan una operación más flexible, como pueden ser transformadores desfasadores, o compensadores estáticos de potencia reactiva (SVC) u otros FACTS. Estas redes deberán ser reforzadas para dar salida a la GE.

Los resultados del análisis de la red de transporte ibérica muestran que el impacto de la GE sobre la estabilidad de tensiones es relativamente bajo si se compara, por ejemplo, con el impacto en Alemania. Una razón para ello es que en la Península Ibérica los parques eólicos se encuentran relativamente más cercanos a las zonas de consumo, por lo que las caídas de tensión en la red son menores al ser menor la distancia recorrida. Aunque el impacto en la estabilidad de tensiones sea relativamente menor,

si la GE prosigue su actual tendencia, habrá que reforzar la actual red de transporte en general y muy especialmente las capacidades de interconexión. Esto será necesario en caso de que los niveles de generación de origen renovable se acerquen más a los de demanda del sistema. Esto no parece muy remoto dado que se espera para el año 2010 una potencia eólica instalada superior a 20 GW [11], lo que representa aproximadamente la demanda de energía eléctrica en valle.

En un SEE con una mayor generación renovable dispone para una misma demanda de menos grupos de generación para tareas de control, dado que hasta la actualidad éstas han prestado los servicios complementarios de control potencia-frecuencia y control de tensiones, debido al progresivo reemplazo de generación convencional por GE es de esperar que los aerogeneradores pasen a ofrecer estos servicios en el futuro. ■

Bibliografía

- [1] "EWEA and Platts PowerVision", European Union Energy Mix, 2008.
- [2] "World Renewable Energy Conference", Bonn, 2004.
- [3] CIGRÉ, "Protection Against Voltage Collapse"; CIGRÉ Technical Brochure 128.
- [4] Judy W. Chang, Frank C. Graves and Dean M. Murphy: "Transmission Management in the Deregulated Electric Industry: A Case Study on Reactive Power", 2003.
- [5] "Análisis de la instalación eléctrica en el parque eólico experimental Sotavento", Sotavento Galicia S.A., June 2003.
- [6] Diego Luca de Tena: "Analysis of the Spanish and Portuguese Transmission Network With Increasing Wind Power Feed-in", ICAI. Proyecto fin de carrera 2008.
- [7] Red Eléctrica de España, "Publicaciones OS; Sistema de Información del Operador del Sistema 2008".
- [8] Asociación Española de Energía Eólica, "Mapa eólico".
- [9] Red Eléctrica de España, "Mapa de transporte ibérico", 2007 v3.
- [10] Pablo García González, Aurelio García Cerrada, "Transporte flexible de la energía eléctrica en corriente alterna". Anales de Mecánica y Electricidad, noviembre-diciembre 2004.
- [11] Asociación Española de Energía Eólica, "Potencia instalada".