VII.- PARQUES EÓLICOS

pfernandezdiez.es

VII.1.- CONCEPTO DE PARQUE EÓLICO

Con este nombre se conoce la instalación conjunta de un determinado número de generadores eólicos que generan electricidad conectados a las redes de suministro, resolviendo dos problemas como son la potencia relativamente baja de los aerogeneradores individuales y su producción intermitente.

Hasta hace unos pocos años, un parque eólico estaba constituido por un conjunto de un centenar, o más, de aerogeneradores de potencia entre 25 kW y 50 kW, lo que reducía los gastos de mantenimiento y simplificaba los requisitos de interconexión de potencia, suavizando y compensando las interrupciones provocadas por las turbulencias y fluctuaciones locales en la velocidad del viento; se estructuraban de forma que, por ejemplo, una instalación con rotores de 12,5 m de diámetro podía comenzar a suministrar energía para velocidades del viento de 4 m/seg, llegando a generar una potencia nominal de 30 kW con velocidades del viento del orden de 11 m/seg; para velocidades del viento por encima de este valor, podían mantener constante su potencia hasta velocidades de desconexión del orden de 25 m/seg.

La red de parques eólicos más extensa del mundo, a principios de 1992, se encontraba en California; había 17.000 aerogeneradores de 25 kW a 50 kW instalados en terrenos montañosos que generaban el 1% de la energía consumida en California, y que suponía en esa época el 80% de toda la energía eólica generada en el mundo; se calculaba que para el año 2000 la energía eólica podría suministrar el 20% de la electricidad consumida en el Estado de California, pero problemas inherentes a la propia señal eléctrica no permitieron llegar a esta situación.

Actualmente el concepto de parque eólico está asociado a un conjunto de aerogeneradores con potencias individuales del orden de 0,6 MW a 3 MW que suman en total una potencia entre 10 MW y 20 MW. Los problemas tecnológicos que plantean las interconexiones entre los aerogeneradores requieren un estudio completo e individualizado de coordinación económica, meteorológica y social.

Se ha llegado a la conclusión de que más de un 13% de energía eléctrica de tipo eólico conectada

a la red puede originar perturbaciones y averías en determinados aparatos y equipos industriales, científicos y domésticos, por lo que parece ser, por el momento, un límite superior a no sobrepasar.

Para mantener al mínimo posible unas necesidades de planificación, los parques eólicos se han desarrollado, con la experiencia acumulada en estos años, con un concepto técnico de constituir una estación central de distribución de energía del orden de 20 MW o más.

Los requerimientos a tener en cuenta para su instalación, mantenimiento preventivo y reparación de aerogeneradores en lugares alejados, hacen que la estructuración de un parque eólico compuesto por aerogeneradores pequeños resulte más conveniente que una instalación única de mayor potencia; el número de aerogeneradores y la potencia nominal del parque eólico, se rigen por las necesidades constantes de suministro de potencia a la red eléctrica y por criterios económicos que permiten ampliar un parque eólico para aumentar la generación de energía eléctrica, gracias a la estructura modular que se ha dado al conjunto de aerogeneradores que le conforman por cuento éstos se construyen en serie. Todas las funciones esenciales del servicio corren a cargo de unidades de control electrónico en cada uno de los sistemas aeroeléctricos, que están integradas:

- *Para el arranque del aerogenerador, o su interconexión a la red*
- *A su seguimiento y desconexión en caso de avería en la red o interrupciones breves*
- *A toda una serie de funciones de seguridad y servicio*

que permiten la operatividad automática y casi exenta del cuidado y mantenimiento del parque eólico.

La operatividad de las instalaciones de energía eólica conectadas a una red eléctrica, tienen que ser consecuentes con la frecuencia de la señal eléctrica principal, por lo que se las exige un ajuste de ciertos controles como el del ángulo de ataque de la pala que permite mantener regulado el régimen de rotación y potencia dentro de estrechas tolerancias, independientemente de las condiciones momentáneas de la red; como es natural, sólo es posible controlar la potencia generada por una instalación aeroeléctrica, en regímenes por debajo de los correspondientes a la potencia máxima dada por la velocidad instantánea del viento.

Para mantener una frecuencia fiable, incluso si el gasto másico disponible del viento sobrepasa temporalmente las necesidades de potencia de la red, es necesario tomar medidas preventivas en las técnicas de control del aerogenerador actuando sobre el ángulo de ataque de las palas, lo que ofrece posibilidades sencillas y eficaces que evitan el ascenso indeseable de la frecuencia de la señal a la red eléctrica general. Esto supone, como ya se ha dicho y comprobado, que la máxima energía eléctrica de tipo eólico conectada a la red general no debe superar el 10% de ésta; los daneses ya han llegado a esta cota y los españoles llegaremos próximamente.

Es posible programar en la unidad de control de la instalación aeroeléctrica una curva caracte-

rística de potencia supeditada a la frecuencia, con objeto de que la potencia emitida caiga a cero antes de que se alcance la frecuencia límite superior admisible; alternativamente, también es posible consignar a las diferentes unidades de control de cada aerogenerador un parámetro de potencia teórica o una instrucción de desconexión a través de un sistema de mando remoto, por ejemplo desde un grupo electrógeno Diesel cuando conformen un sistema híbrido.

El período operativo de los parques eólicos permite disponer actualmente de resultados estadísticos suficientemente fiables para poder juzgar los proyectos en toda su extensión; los resultados demuestran, para todos los lugares de ubicación, la existencia de una buena concordancia entre la generación de energía comprobada y lo planificado en la fase de proyecto.

La disponibilidad temporal de las instalaciones eólicas, a largo plazo, puede ser superior al 98%, lo que se refleja en un mantenimiento inferior al 0,5% de los gastos de inversión en el parque eólico, y representan un notable ahorro económico en la producción de electricidad. Los costes del capital invertido y la producción energética anual constituyen, en términos muy generales, los factores decisivos que influyen sobre los costes de producción de energía.

Los costes de operación tienen menor importancia, pero para contar con una estimación realista no se deben despreciar; una estimación de los costes previsibles para la generación de electricidad, en base a los costes efectivos de la inversión y la producción de corriente obtenida hasta la fecha, se puede llevar a cabo de acuerdo con los supuestos siguientes:

Tasa de interés anual 8%
Vida útil 20 años
Mantenimiento preventivo y de reparación, 2% anual de los costes de inversión, y 1% anual en seguros

Comparando estos costes con los de generación de corriente eléctrica, no se aprecian todavía ventajas claras en este tipo de instalaciones eólicas, por cuanto la potencia instalada es muy pequeña; sin embargo, su aplicabilidad económica respecto del consumo de gasóleo en sistemas híbridos, en los que la generación está más equilibrada, no sólo depende del creciente nivel de los precios de los combustibles fósiles, sino también de la optimización técnica y económica del parque eólico.

Se han conseguido algunas mejoras modificando el diámetro del rotor y la altura de la torre, según el lugar de ubicación, para obtener la misma potencia, con unos costes operativos y de inversión prácticamente iguales.

Perspectivas.- Las experiencias operativas que se han hecho en los parques eólicos han motivado el interés por aprovechar más a fondo la energía eólica, en base a ampliar los parques eólicos existentes o de instalar nuevos puntos de ubicación.

Los parques eólicos se consideran un complemento adecuado a las centrales eléctricas convencionales, dentro del 10% indicado, interés que no sólo se debe a los costes de generación de energía

que resultan de los cálculos de rentabilidad, sino también a los criterios del aprovechamiento de la energía eólica, que son más amplios; es importante considerar que el cálculo de los costes de generación de electricidad se hagan a largo plazo y se mantengan al margen de la evolución de los precios de los combustibles. Con el estudio de las instalaciones de energía eólica disponibles en la actualidad, se han sentado las bases para una más amplia explotación racional de la energía eólica en los llamados países umbrales y en vías de desarrollo. No sería de extrañar que aerogeneradores de primera generación, retirados de algunos parques eólicos, se reutilizasen en estos países.

Tabla VII.1.- Potencia eólica instalada a nivel mundial

POTENCIA EÓLICA INSTALADA A NIVEL MUNDIAL de 2006 a 2013, en MW									
Año	*China*	*EE.UU.*	*Alemania*	*España*	*India*	*Reino Unido*	*Italia*	*Francia*	*Canadá*
2006	*2599*	*11603*	*20622*	*11630*	*6270*	*1963*	*2123*	*1589*	*1460*
2007	*5912*	*16819*	*22247*	*15145*	*7850*	*2389*	*2726*	*2477*	*1846*
2008	*12210*	*25170*	*23903*	*16740*	*9587*	*3288*	*3537*	*3426*	*2369*
2009	*25104*	*35159*	*25777*	*19149*	*10925*	*4070*	*4850*	*4410*	*3319*
2010	*44733*	*40200*	*27214*	*20676*	*13064*	*5203*	*5797*	*5660*	*4008*
2011	*62733*	*46919*	*29060*	*21674*	*16084*	*6540*	*6747*	*6800*	*5265*
2012	*75564*	*60007*	*31332*	*22796*	*18421*	*8445*	*8144*	*7196*	*6200*
2013	*91424*	*61091*	*34250*	*22959*	*20150*	*10531*	*8552*	*8254*	*7803*
	Dinamarca	*Portugal*	*Suecia*	*Brasil*	*Polonia*	*Australia*	*Turquía*	*Países Bajos*	*Japón*
2006	*3140*	*1716*	*571*	*237*	*153*	*651*	*65*	*1571*	*1309*
2007	*3129*	*2130*	*831*	*247*	*276*	*824*	*207*	*1759*	*1528*
2008	*3164*	*2862*	*1067*	*339*	*472*	*1306*	*433*	*2237*	*1880*
2009	*3465*	*3535*	*1560*	*606*	*725*	*1712*	*801*	*2223*	*2056*
2010	*3752*	*3702*	*2163*	*932*	*1107*	*1991*	*1329*	*2237*	*2304*
2011	*3871*	*4083*	*2970*	*1509*	*1616*	*2176*	*1799*	*2328*	*2501*
2012	*4162*	*4525*	*3745*	*2508*	*2497*	*2584*	*2312*	*2391*	*2614*
2013	*4772*	*4724*	*4470*	*3456*	*3390*	*3239*	*2959*	*2693*	*2661*
	Rumanía	*Irlanda*	*México*	*Grecia*	*Austria*	*Bélgica*	*Noruega*	*N. Zelanda*	*Taiwán*
2006	*2*	*746*	*84*	*758*	*965*	*194*	*325*	*171*	*188*
2007	*7*	*805*	*85*	*873*	*982*	*287*	*333*	*322*	*280*
2008	*10*	*1245*	*85*	*990*	*995*	*384*	*428*	*325*	*358*
2009	*14,1*	*1260*	*520*	*1087*	*995*	*563*	*431*	*497*	*436*
2010	*462*	*1379*	*733*	*1208*	*1011*	*911*	*441*	*530*	*519*
2011	*982*	*1614*	*873*	*1629*	*1084*	*1078*	*512*	*623*	*564*
2012	*1905*	*1738*	*1370*	*1749*	*1378*	-	*704*	*623*	*564*
2013	*2600*	*2037*	*1992*	*1865*	*1684*	-	-	*623*	*614*
	Bulgaria	*Corea del Sur*	*Egipto*	*Chile*	*Hungría*	*Marruecos*	*Tailandia*	*Argentina*	*Costa Rica*
2006	*36*	*176*	*230*	-	*61*	*64*	-	-	-
2007	*70*	*192*	*310*	-	*65*	*125*	-	-	-
2008	*120*	*278*	*390*	-	*127*	*125*	-	-	*74*
2009	*177*	*348*	*430*	*20*	*201*	*253*	-	-	*123*
2010	*500*	*379*	*550*	*168*	*329*	*286*	-	-	*119*
2011	*612*	*407*	*550*	*172*	-	*291*	-	*113*	*132*
2012	-	*483*	*550*	*205*	-	*291*	*112*	*167*	*147*
2013	-	*561*	*550*	*335*	-	*291*	*223*	*218*	*218*
	Rep. Checa	*Finlandia*	*Estonia*	*Etiopía*	*Lituania*	*Croacia*	*Nicaragua*	*Total mundial (MW)*	
2006	*57*	*86*	*31.8*	-	*56*	*n/a*	-	*74151*	
2007	*116*	*110*	*59*	-	*50*	*n/a*	-	*93927*	
2008	*150*	*143*	*78*	-	*54*	*69,4*	-	*121188*	
2009	*192*	*147*	*142*	-	*91*	*104*	-	*157899*	
2010	*215*	*197*	*149*	-	*154*	*152*	-	*197637*	
2011	-	*197*	*184*	*23*	-	*187,4*	*62*	*238035*	
2012	-	-	-	*81*	-	*207,1*	*102*	*282482*	
2013	-	-	-	*171*	-	-	*146*	*318137*	

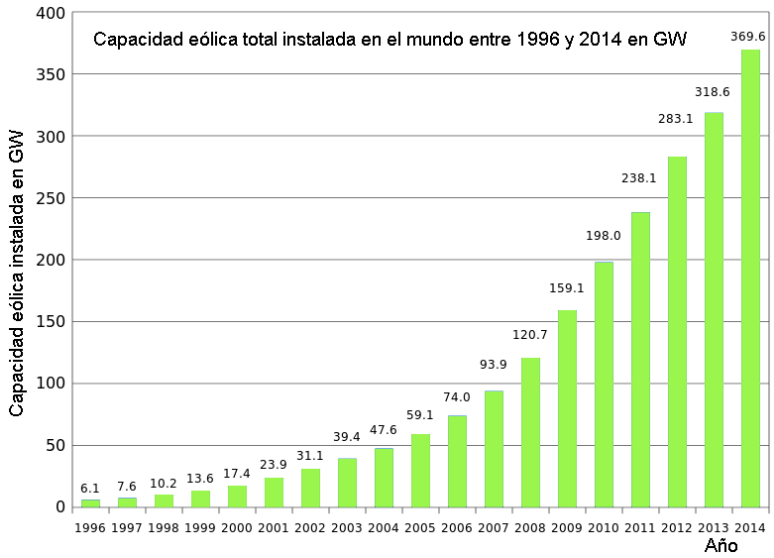


Fig VII.1.- Capacidad eólica mundial

Es importante estudiar con detalle los aspectos ambientales de los parques, construirlos con esmero y dotarlos de elementos singulares que los caractericen.

Los aerogeneradores tienen que adecuarse a situaciones de un mayor aprovechamiento de los vientos locales existentes, es decir, aprovechar los vientos más bajos que se pueden dar en zonas más accesibles, que implicarían menores costes de instalación. Su producción en serie incide en menores costos de fabricación. Equipos sofisticados de control, telemando y telegestión permitirán una explotación más racional de los parques eólicos y una mejor calidad de la señal de la energía suministrada a la red. También permitirán adaptar las turbinas eólicas a situaciones insulares, donde el factor de calidad de la energía suministrada es más crítico, por no existir otras fuentes de energía convencionales.

En España el sector eólico ha sido un fenómeno, probablemente, demasiado rápido; se van a cumplir holgadamente los objetivos del Plan de Fomento de las Energías Renovables y habrá que empezar a prever soluciones para cuando haya un exceso de potencia eventual, momento en que la red tendrá que limitar la entrada de energía eólica en horas valle.

Existe en el mundo una gran cantidad de aerogeneradores en funcionamiento, con una capacidad total de generación eléctrica de 370 GW a finales de 2014, de los que Europa cuenta con el 36,3%, China y Estados Unidos representan juntos casi el 50% de la capacidad eólica global, mientras que los primeros cinco países (China, EE. UU., Alemania, España e India) representaron el 71,7% de la capacidad eólica mundial en 2014.

Alemania, España, EE.UU., India y Dinamarca, han realizado las mayores inversiones en generación de energía eólica. Dinamarca es, en términos relativos, la más destacada en cuanto a fabricación y utilización de turbinas eólicas, con el compromiso realizado en los años 1970 de llegar a obtener la mitad de la producción de energía del país mediante el viento. En 2014 generó el 39,1% de su

electricidad mediante aerogeneradores, mayor porcentaje que cualquier otro país, y el año anterior la energía eólica se consolidó como la fuente de energía más barata del país.

En España, desde la década de 2000 se ha experimentado un aumento espectacular, incentivado por una legislación que estimulaba fuertemente la investigación e inversiones en este sector (Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo) mediante incentivos. En 2013 la potencia eólica instalada era de 22.959 MW, cubriendo el 20,9% de la demanda eléctrica peninsular; desde 2009 es la tercera fuente de energía tras superar a la generada en centrales térmicas de carbón, y durante el mes de marzo de 2011 fue la principal tecnología de generación eléctrica del país (21% de la demanda). A finales de 2014, España tenía instalada una capacidad de energía eólica de 23 GW lo que supone el 21,3% de la capacidad del sistema eléctrico nacional, la segunda fuente de energía del país por detrás de las centrales de ciclo combinado con 27,2 GW; ese mismo año la energía eólica produjo 51,026 GW el 19,7% de la demanda eléctrica. Se sitúa así en cuarto lugar en el mundo en cuanto a potencia eólica instalada, detrás de China, EE. UU. y Alemania.

Condiciones de venta en España de la energía eólica a la red.- La Ley 54/97 del Sector Eléctrico y la Normativa que la desarrollaba, establecían la obligación de la red eléctrica de comprar toda la energía generada en los parques eólicos a un determinado precio, establecido anualmente, que en 1999 era de 11,02 pta/kW y en 2000 de 10,42 pta/kW. Esta bajada del 5,5% sumada a una inflación del 2,5% supuso una bajada del 8,0%., por lo que se preveía que en el futuro seguiría esta tendencia a la baja.

De igual modo que en el resto de las energías renovables, y con objeto de facilitar el desarrollo eólico, estos precios estaban primados sobre los costos medios de generación del sector eléctrico, que se podían estimar entre $5 \div 6$ pta/kW. La justificación de estas primas era conseguir el objetivo de la UE de reducir las emisiones de CO_2 y limitar los efectos sobre el cambio climático. Como la energía eólica tiene el inconveniente de que es una energía eventual, ya que se produce cuando hay viento, no sirve para cerrar centrales térmicas, sino para que éstas funcionen menos horas. En un planteamiento estrictamente económico, los kW eólicos, al no tener garantía, deberían tener un precio marginal; sin embargo están primados porque ha prevalecido el criterio ambiental. Esta situación de primar las energías renovables es probable que se mantenga, y aunque el sistema de primas puede cambiar, se acabará por aproximar a los costos reales de las diferentes fuentes de energía.

La legislación posterior, como el RD 2818/98, el RD 436/04 y el RD 661/07 afinaron y desarrollaron el esquema básico de la ley 54/97 hasta crear el apoyo más eficiente de toda Europa, por el que empresas españolas han soportado proyectos millonarios que han ejecutado acudiendo a la financiación externa, del orden del 80% y más, con cargo a los propios proyectos.

La obligación de la red de admitir todos los kW que se generasen en los parques eólicos se posible se mantenga, siempre que la potencia total generada entre las centrales nucleares, hidráulicas,

térmicas, cogeneración, y las renovables sea inferior a la demanda en horas valle. Cuando esta demanda se supere, habrá algún tipo de limitación, pudiendo ocurrir que en esas horas se limite la entrada en la red de la energía eólica, por lo que habrá que estudiar soluciones que den garantía a una energía eventual.

Las máquinas que se han instalado en España son de 0,6÷3 MW. La disponibilidad de las máquinas, es decir, las horas de funcionamiento supera el 99%, lo que indica que apenas tienen averías. El aumento continuado de la potencia y la fabricación en grandes series de los equipos hacen que el precio unitario esté bajando.

En el año 2000 el costo total de los parques eólicos estaba en 140.000 ptas/kW y se preveía que bajase a unas 120.000 ptas/kW e incluso a menos. La bajada del costo y la fiabilidad de las máquinas ha abarato los costos de generación. A ello se ha unido, en los últimos años, la bajada de los tipos de interés, que, en instalaciones de gran inversión y reducidos gastos de mantenimiento, son su principal carga.

En la Tabla VII.2 se indica, a título de curiosidad, el costo del kW generado en diversas hipótesis de costo de inversión y horas de funcionamiento, que dan una idea de la producción total anual funcionando las máquinas a plena potencia, y suponen, por tanto, un índice de la producción.

Tabla VII.2.- Costo del kW generado según costo de inversión y horas de funcionamiento

Horas de funcionamiento	*Precio del kW generado en pesetas según costo de inversión*		
	140000	*120000*	*100000*
3500	*5,93*	*5,29*	*4,68*
3000	*6,63*	*5,93*	*5,19*
2500	*7,7*	*6,81*	*5,93*
2000	*9,25*	*8,14*	*7,03*
1500	*11,83*	*10,35*	*8,88*

El cálculo se realizó con un tipo de interés del 5,5%, una financiación con el 20% de capital propio, 15 años de vida útil de las máquinas y amortización, e incluyendo 1,50 ptas/kW como gasto de mantenimiento; a las cantidades indicadas en el cuadro habría que añadir los gastos de promoción, licencias, impuestos y canon de ocupación de terrenos.

Los costos de generación calculados resultaban extraordinariamente bajos; en el caso de altas velocidades del viento, resultaban inferiores a los valores medios de generación del sector eléctrico. Se observa que estos costos en parques de más 2.000 horas de funcionamiento, eran inferiores al precio de compra por la red; esta situación fué la causa del desarrollo tan rápido del sector.

El precio de venta de energía a la red motivó que se construyesen parques con no muchas horas de funcionamiento y nada bien estudiados, y eso podría implicar que cuando llegue la saturación del sector ya no se puedan hacer otros de mayor rentabilidad, es decir que una prima elevada fué la causa de:

- Un desarrollo inadecuado que provocó la aparición de especuladores en este sector, sin intención de construir, sino de vender derechos

- Que se abonasen cánones excesivos a propietarios de terrenos

- Se hayan construido parques sin datos suficientes de viento

- Se hagan parques con un porcentaje muy bajo de capital propio confiando en que se mantuviesen los bajos tipos de interés, etc.

La limitación de entrada a la red, unida a la continuada bajada de precios, ha dado lugar a que algunos proyectos muy ajustados y con un porcentaje muy bajo de capital propio resulten menos rentables de lo que sus promotores hubieran estimado. Este rápido desarrollo ha provocado la construcción de más fábricas de equipos que las que serían razonables, y que habrá que cerrar cuando se sature el mercado nacional, salvo que se vaya preparando la venta de aerogeneradores en el extranjero, como al parecer ya está sucediendo.

VII.2.- IMPACTO AMBIENTAL DE LOS AEROGENERADORES EÓLICOS

Los principales efectos de los aerogeneradores sobre el medio ambiente son los siguientes:

Efectos meteorológicos sobre el microclima.- Se estima que la reducción de la velocidad del viento por los aerogeneradores tiene, aproximadamente, las mismas consecuencias sobre el clima local que un grupo de árboles, no esperándose que se produzcan cambios significativos.

Efectos sobre la fauna y flora.- El efecto mas significativo está relacionado con el obstáculo que los rotores representan para el vuelo de las aves. Sin embargo, la experiencia obtenida hasta el momento ha demostrado que la probabilidad de choque es sumamente baja, debido a la rotación lenta de las máquinas y su bajo coeficiente de solidez.

Ruido.- La intensidad del ruido generado por las máquinas eólicas ha sido investigado por la NASA mediante un prototipo de 100 kW. El estudio acústico abarcó un espectro de frecuencias comprendido en el rango de audición entre 15 ÷20.000 Hz. El nivel acústico medido cerca de la máquina fue de 64 dB para las frecuencias en el rango audible, con un nivel de ruido de fondo de 52 dB, observándose que el ruido de la máquina era inaudible por encima del ruido de fondo a distancias del orden de 200 m.

El ruido generado por una máquina de 2,5 MW a pie de torre es similar, en cuanto al tipo de intensidad, al de un automóvil circulando por una autopista, desapareciendo el ruido a una distancia relativamente pequeña de la máquina.

El ruido correspondiente a frecuencias inferiores al rango audible es producido por la circulación del aire sobre obstáculos como la torre y las palas, y puede afectar a la salud ocasionando problemas si se superan los 100 dB; las mediciones efectuadas no han sobrepasado los 75 dB.

Existe sin embargo otra experiencia, en una aeroturbina de 2 MW en la que sí se han presentado ruidos molestos para los residentes en las inmediaciones, ligados a los fenómenos aeroacústicos antes mencionados; en dicha máquina, cuyo rotor estaba a sotavento de la torre, se producía una interacción de muy baja frecuencia entre las palas y la torre, que originaba ruidos por debajo del rango audible que obligaron a modificar el diseño del aerogenerador, reduciendo la velocidad periférica de las palas. Este problema tiene menores probabilidades de presentarse en el caso de posicionar el rotor a barlovento, si bien se estima que durante el diseño se puede evitar su aparición, aun en el caso de estar posicionado a sotavento. Lo cierto es que, actualmente, dada la proliferación de parques eólicos, son muchas las quejas por este motivo, de personas que viven en sus proximidades y a las que nadie, en ningún momento, pidió su aprobación para la instalación.

Interferencias con ondas de televisión y radiocomunicaciones.- Las palas del aerogenerador pueden reflejar las ondas electromagnéticas, pero se estima poco probable que produzcan interferencias en las señales de radio y navegación salvo a distancias pequeñas de la máquina.

La señal de televisión puede quedar afectada a distancias de unos centenares de m e, incluso, hasta $1 \div 2$ km. Esto puede ocurrir si el aerogenerador está emplazado a gran altura y si los receptores de televisión reciben normalmente una señal débil, debido a la distancia o a efectos de blindaje causados por el terreno sobre la estación de televisión. Influyen también las posiciones relativas de la estación, el receptor y el aerogenerador.

Consumo de energía.- Una de las ventajas de la energía eólica frente a otras nuevas fuentes de energía, es que el balance energético de los aerogeneradores es claramente positivo, recuperando el coste de la energía empleada en $\begin{cases} \textit{la producción de sus materiales constitutivos} \\ \textit{su construcción en un período del orden de 7 meses de funcionamiento} \end{cases}$

Seguridad y utilización del terreno.- El principal problema relacionado con la seguridad radica en la posibilidad de rotura de una pala. Dada la alta velocidad periférica del rotor, se estima que el área de seguridad en torno a un aerogenerador debe comprender un círculo de unos 200 m a partir de la base de la torre.

Con los métodos de cálculo existentes actualmente la probabilidad de que se produzca dicha rotura es pequeña por lo que la zona de seguridad se puede utilizar para usos agrícolas, ganadería, circulación de vehículos y otros fines equivalentes La superficie de terreno ocupada por un aerogenerador de 1 MW es pequeña, (2000 m^2); la zona de seguridad abarcaría 120.000 m^2.

En el caso de una agrupación de aerogeneradores es necesario que la distancia entre ellos guarde un mínimo necesario para evitar interferencias aerodinámicas entre máquinas, que es del orden de $7 \div 10$ veces el diámetro del rotor, lo que implica distancias de aproximadamente 1 km para generadores de 2,5 MW. El terreno entre aerogeneradores podría ser utilizado para otros fines respetando las servidumbres impuestas por las carreteras de acceso a las máquinas y las líneas eléctricas.

Protección contra el rayo.- Como los aerogeneradores sobresalen del entorno que les rodea, constituyen unos conductores privilegiados de transmisión de la electricidad estática de las nubes hacia el suelo. Para evitar que durante una tormenta se estropeen por un rayo, conviene conectar el pilón soporte del aerogenerador a una buena toma a tierra y colocar pararrayos en los cables eléctricos que unen el aerogenerador a la red de utilización, (chispómetros de gas, y en las instalaciones de grandes potencias, eventualmente variómetros). Como los chispómetros de pararrayos se regulan para una tensión doble de la tensión máxima eficaz que pueden producir en sus bornes, se deben unir a la toma a tierra mediante un conductor lo más corto posible.

VII.3.- CONEXIÓN DE PARQUES EÓLICOS A LA RED ELÉCTRICA

Las turbinas eólicas que operan en sistemas eléctricos de potencia se deben equipar con los dispositivos y sistemas pertinentes.

El esquema eléctrico general de las turbinas eólicas consiste en:

a) Sección del generador

b) Sección de BT

c) Sección del transformador elevador MT/BT

d) Sección de MT

a) La configuración del aerogenerador depende de las tecnologías tipo I a IX, del Cap VI

- Para generadores asíncronos de jaula de ardilla esta parte incluye sólo el generador asíncrono

- Si es un generador asíncrono doblemente alimentado tipo V habrá además un convertidor

- Si es un generador asíncrono de rotor bobinado con resistencias en el rotor tipo IV se tendrá la electrónica de potencia apropiada para variar la resistencia, etc.

b) La sección de BT comprende: el arrancador suave, los bancos de condensadores, los sistemas de protección, y los servicios auxiliares.

- El arrancador suave se utiliza para suavizar la conexión y desconexión del generador del sistema de potencia

- El banco de condensadores se utiliza en las configuraciones I, II, III y IV que utilizan generadores asíncronos de rotor bobinado o de jaula, para compensar la potencia reactiva consumida; en la configuración V, con generador de inducción doblemente alimentado, la compensación de reactiva se realiza con el convertidor a través del control de la corriente del rotor

- Los sistemas de protección de la red comprenden la sobrecorriente, subtensiones y sobretensiones, así como las protecciones de velocidad, temperatura, etc.

- Los servicios auxiliares del aerogenerador comprenden los motores de los actuadores, bombas y ventiladores para los sistemas de lubricación y ventilación, y la alimentación de los sistemas de control y comunicaciones

c) La sección del transformador elevador MT/BT, comprende el transformador elevador con los

correspondientes sistemas de protección

d) En la sección de MT están los embarrados / buses, interruptores, seccionadores y transformadores de medida de tensión e intensidad para las protecciones; los sistemas de medida de energía normalmente se sitúan en la base de la torre.

Sistemas de conexión a la red:

a) Aerogeneradores con máquina de inducción doblemente alimentada y red de MT.- *Esta estructura es muy común ya que los aerogeneradores se conectan a la red en forma modular, Fig. VII.2.*

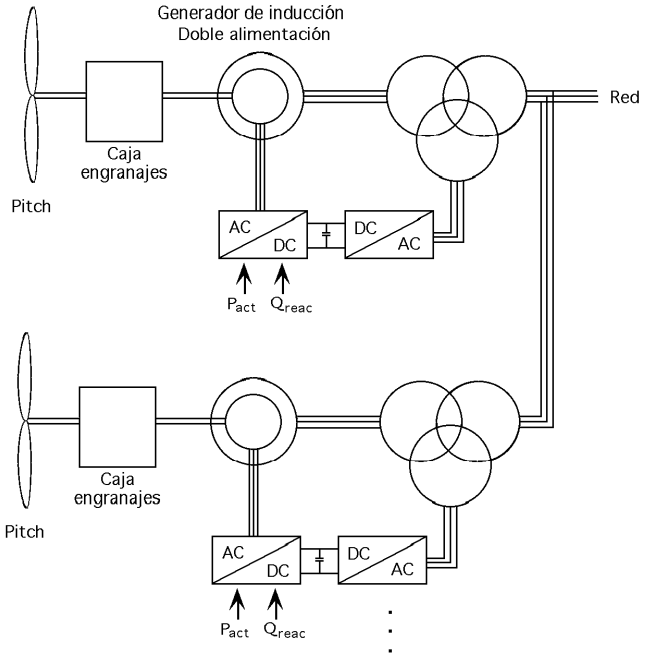


Fig VII.2.- Aerogeneradores con máquina de inducción doblemente alimentada y compensador de reactiva centralizado

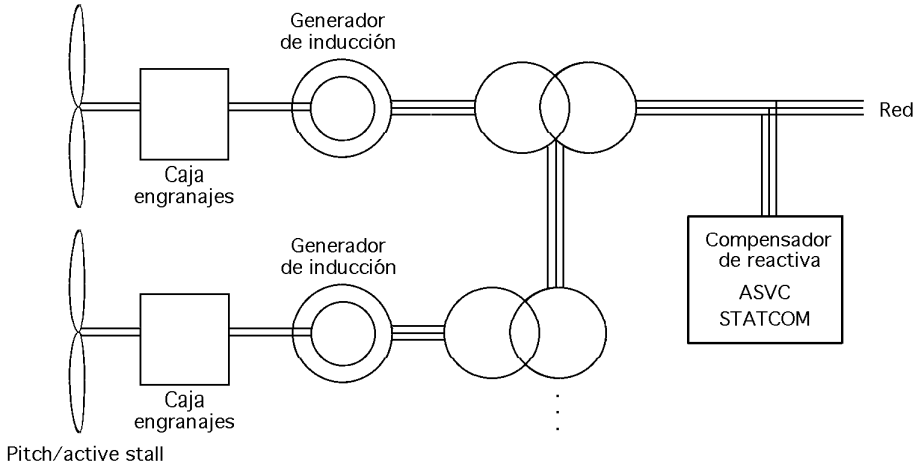


Fig VII.3.- Aerogeneradores con máquina de inducción y compensador de reactiva centralizado

b) Aerogeneradores con máquina de inducción y compensación de reactiva centralizado.- *Esta estructura es también muy común en parques eólicos con máquinas de inducción de velocidad fija. La compensación de energía reactiva es centralizada e incluye la compensación de la reactiva generada por el transformador de interconexión, Fig VII.3; existe la posibilidad de una combinación entre compensación individual y centralizada.*

c) Aerogeneradores con control de velocidad individual a través de una red interna de continua.- *La estructura de la Fig VII.4 se aplica a conceptos de turbinas con convertidor, con la diferencia de que las salidas de los aerogeneradores se rectifican y están conectados a través es una red de continua a un ondulador centralizado; se utiliza para potencias elevadas y en parques off-shore*

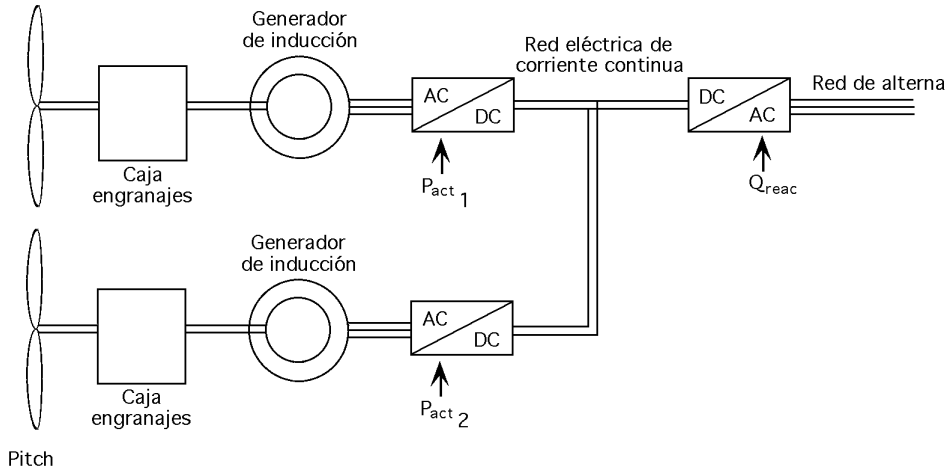


Fig VII.4.- Aerogeneradores con control de velocidad individual a través de una red interna de continua

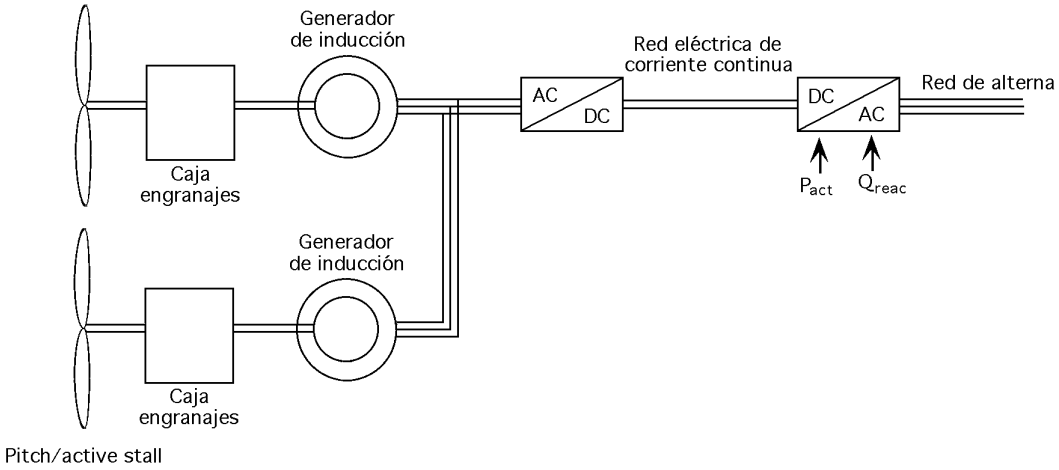


Fig VII.5.- Aerogeneradores sin control de velocidad individual a través de una red interna de continua

d) Aerogeneradores sin control de velocidad individual con una red interna de continua.- *Esta estructura se aplica a turbinas con convertidor, con la diferencia de que las salidas de los aerogeneradores están unidas con una red de media tensión, Fig VII.4. A la salida de dicha red se encuentra un rectificador centralizado transmitiéndose la energía eólica a través de una red de continua a un ondulador centralizado.*

Puesto que todos los aerogeneradores están conectados a la misma red de media tensión, no es posible el control de la velocidad; se utiliza para potencias elevadas y en parques off-shore.

EFECTOS DE LA CONEXIÓN DE UN PARQUE EÓLICO A LA RED ELÉCTRICA.- La conexión de un parque eólico a la red eléctrica se realiza, en un punto determinado, a través de una red propia de media tensión (6, 10 ó 20 kV). La conexión de la energía eólica en una red de distribución existente modifica la filosofía de diseño con la que fue construida dicha red. En una red sin energía eólica, la generación conectada a un nivel de tensión elevado se distribuye a través de la red, transformadores y aparamenta, en niveles de tensión inferiores hasta llegar al consumidor; en un sistema con una alta penetración de generación eólica, el flujo de energía se puede invertir y, por ello, el diseño de la red se debe adaptar a esta circunstancia.

La finalidad de un sistema eléctrico de potencia es producir, transportar y distribuir energía eléctrica manteniendo los parámetros (tensión, frecuencia y forma senoidal) dentro de unos límites bien definidos. La tensión está sometida a variaciones, debido a la energía reactiva consumida, mientras que el consumidor puede experimentar perturbaciones eléctricas como huecos de tensión, interrupciones, etc. La frecuencia depende del equilibrio entre la potencia activa generada y consumida. Aparte de estos fenómenos, hay que tener en cuenta la existencia de cargas no lineales, cada vez más presentes en la red, que generan armónicos y flicker, provocando la distorsión de la onda senoidal.

El suministro se caracteriza mediante los siguientes parámetros:

- *Frecuencia, amplitud y variaciones de la tensión suministrada.*
- *Variaciones rápidas de tensión*
- *Huecos de tensión*
- *Interrupciones breves y largas de la tensión suministrada*
- *Sobretensiones temporales y /o transitorias en la red entre fases y tierra*
- *Desequilibrio de la tensión suministrada*
- *Tensiones armónicas e interarmónicas*
- *Señales de transmisión de información por la red*

Los sistemas eléctricos de los aerogeneradores pueden ser los que introduzcan perturbaciones en la red o ser las propias máquinas susceptibles a perturbaciones provenientes de la red.

La producción de energía reactiva es un factor importante que influye en el nivel de tensión de la red. Los aerogeneradores de inducción con rotor de jaula de ardilla tienen la característica de que consumen potencia reactiva para así generar potencia activa.; la razón de emplear habitualmente una compensación de reactiva radica en que los gestores de la red a la que está conectado el aerogenerador exigen un factor de potencia unitario, mientras que el productor procura minimizar el consumo de reactiva para minimizar el coste de generación.

Los elementos a compensar en un parque eólico son:

- *Las máquinas de inducción*
- *Los transformadores BT/MT*
- *El transformador de conexión de la red del parque a la red pública*

Como la reactiva a compensar depende del nivel de generación, se emplean compensaciones de reactiva variable que, a través de escalones, añaden o eliminan baterías de condensadores; durante el proceso del cambio de escalón se pueden producir sobretensiones y, por tanto, hay que tomar precauciones. Las máquinas de inducción doblemente alimentadas y las máquinas asíncrono/síncrono con un convertidor para potencia plena, no precisan compensación de reactiva, debido a sus propias características de funcionamiento.

El impacto dinámico de la generación eólica a la red se limita a:

Las variaciones de tensión durante la conexión de aerogeneradores
Flicker o parpadeo durante dicha conexión
Flicker durante la operación de los aerogeneradores
Comportamiento dinámico del parque durante un cortocircuito en la red

Variación de la tensión en la conexión de los aerogeneradores.- En la fase de arranque de los aerogeneradores aparece un transitorio de tensión de hasta un 300% de la corriente nominal durante un periodo de varios segundos, Fig VII.6, produciéndose un consumo elevado debido a las caídas de tensión en las impedancias de la red; para evitar grandes transitorios, se emplea electrónica de potencia, que limita la intensidad de arranque a valores inferiores.

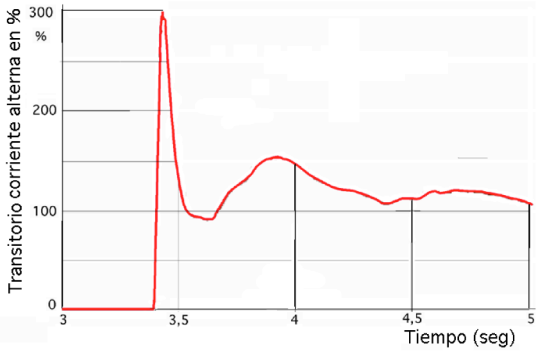


Fig VII.6.- Curva de arranque de un aerogenerador

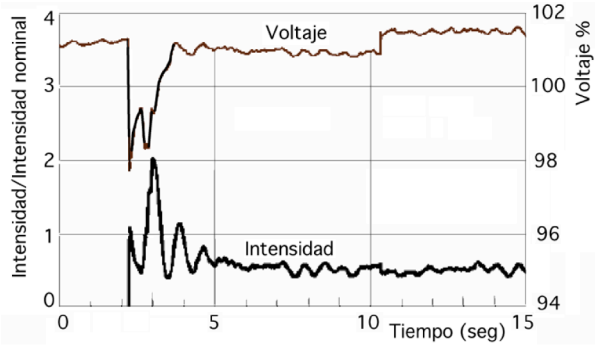


Fig VII.7.- Tensión e intensidad media durante el arranque

La caída de tensión experimentada en el punto de conexión, Fig VII.7, depende de las impedancias de la red a la que está conectado el aerogenerador. Durante las operaciones de conexión de un parque eólico se pueden producir fluctuaciones periódicas de tensión que afectan a la calidad de suministro del sistema. La operación de conexión y desconexión en un parque eólico puede generar variaciones de tensión con una frecuencia cerca del rango de frecuencia de flicker (parpadeo).

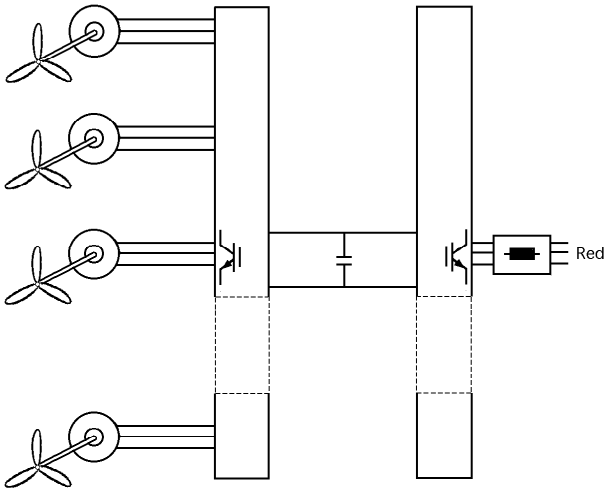
El método para determinar el flicker es complejo, ya que precisa medir la forma de la intensidad e introducir dichos valores en un modelo teórico que calcule la emisión de flicker. En medidas reales de aerogeneradores conectados a la red, el nivel de flicker medido en el punto de conexión del parque es la suma de la emisión del parque y el nivel de flicker de la propia red.

La generación de flicker en un parque eólico en funcionamiento continuo se origina por:

- La variación del espectro de potencia del viento, que puede ser del 10 % con una frecuencia entre 1 a 10 Hz, se puede transmitir a la potencia eléctrica generada

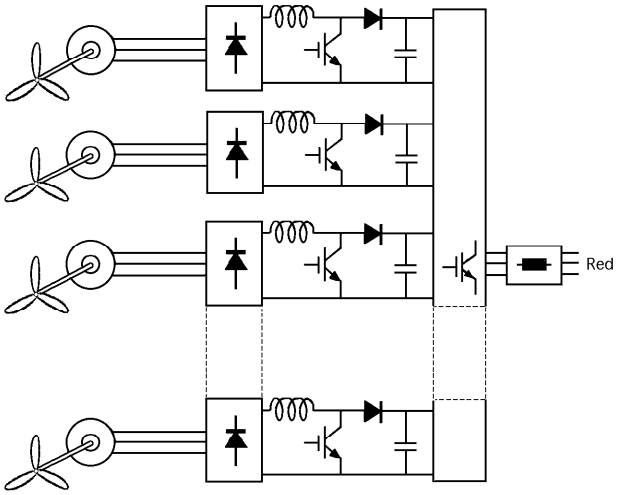
- Las ráfagas de viento, cuya amplitud puede alcanzar un 20% de la velocidad media con una duración de hasta 30 seg

- El efecto sombra que la torre provoca cada vez que una pala se alinea con la misma, hace que el par medio disminuya hasta un 30% con una frecuencia de 1 a 1,5 Hz



Funcionamiento de la red controlada por un convertidor común; Pérdidas complejas; Dos convertidores no redundantes; Todos los aerogeneradores tienen la misma velocidad

Fig VII.8- Conexión común AC-RED



Control de velocidad individual; Conexión a red controlada por un convertidor común y único; Gran complejidad Sólo generadores síncronos

Fig VII.9.- Conexión individual a DC-BUS (podría ser HVDC)

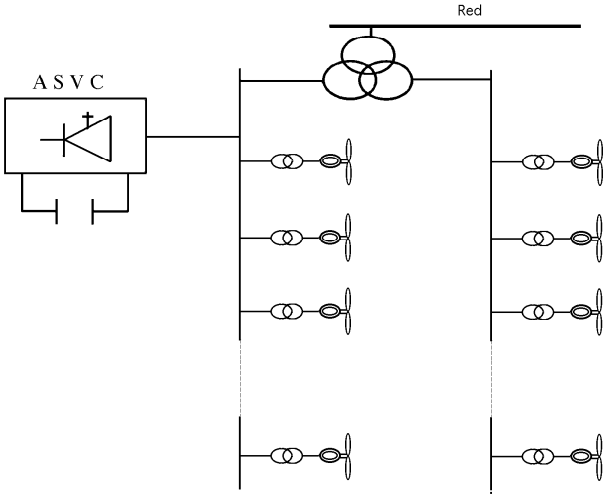


Fig VII.10.- Control centralizado

- La velocidad del viento varía entre la base y la punta de las palas, lo que origina una fluctuación del par con una frecuencia de 0,3 a 0,5 Hz

- Las perturbaciones en el sistema mecánico

- Las intensidades y tensiones armónicas del convertidor de frecuencia

Todos estos fenómenos causan variaciones de la potencia activa generada por el parque, provocando variaciones de tensión en el rango de frecuencias donde aparece el flicker.

La emisión de flicker depende también de factores externos como la potencia de cortocircuito y el ángulo de fase de la impedancia. Otro factor que influye en la emisión de flicker es la tecnología de los aerogeneradores y el número de ellos conectados:

- Los aerogeneradores de velocidad fija conectados directamente a la red tipos I, II, III y IV provocan un impacto elevado

- Los aerogeneradores con convertidores de potencia total tipos VI a IX, o potencia parcial tipo V, a velocidad variable tienen la menor emisión.

Tabla VII-3.- Tensión, tamaño y potencia transmisible en diversos tipos de parques eólicos

Tensión del sistema	*Tamaño del parque eólico*	*Potencia transmisible*
Baja tensión (< 1 kV)	*Aerogeneradores pequeños y medianos*	*Hasta 300 kW*
Media tensión (antena) (25 kV)	*Aerogeneradores grandes y medianos*	*De 2 a 5 MW*
Media tensión, punto de conexión con un sistema de tensión superior (25 kV)	*Aerogeneradores grandes y medianos*	*Entre 10 y 40 MW*
Alta tensión (110 kV)	*Concentración de grandes parques*	*Hasta 100 MW*
Muy alta tensión (220 kV) y (400 kV)	*Parques off-shore*	*Más de 500 MW*

A mayor número de aerogeneradores del parque, menor emisión de flicker, debido a que en un mismo instante la contribución de potencia afectada por flicker, sea debida probablemente a unos

pocos aerogeneradores, percibiéndose menos fluctuaciones en la potencia total entregada por el parque. La incorporación de electrónica de potencia en los aerogeneradores implica un aumento de corrientes y tensiones armónicas en la red.

VII.3.- PARQUES OFF-SHORE

En el mar, el viento se encuentra con una superficie de rugosidad variable, las olas, y sin obstáculos como islas, islotes, etc., lo que implica que la velocidad del viento no experimenta grandes cambios, por lo que se pueden emplazar torres más bajas que en tierra.

El viento en el mar es, por lo general, menos turbulento que en tierra, con lo que se amplía el periodo de trabajo útil de un aerogenerador. La baja turbulencia del mar se debe, ante todo, al hecho de que las diferencias de temperatura que se producen sobre el mar a distintas altitudes de la atmósfera son inferiores a las de tierra adentro.

El ambiente marino es ideal para instalar un aerogenerador; el viento en el mar es mas fuerte y sobre todo constante (sin turbulencia) que en tierra. El motivo es que la superficie es casi plana y su rugosidad casi nula.

Es posible instalar turbinas gigantes de 120 m de diámetro y 5 MW, mientras que en tierra las potencias son del orden de 2 MW.

En contra tiene el carácter agresivo del ambiente marino (oxidación, humedades), así como un coste mucho mayor en cimentaciones.

En la actualidad los parques off-shore, se sitúan en aguas poco profundas, alejados de las rutas marinas comerciales, de los emplazamientos militares y de los espacios de interés natural u ornitológico. La distancia de la costa debe ser como mínimo de dos kilómetros para aprovechar mejor el régimen de vientos, de características diferentes a los que llegan a tierra.

El primer parque eólico marino, compuesto por 11 aerogeneradores, se construyó en Dinamarca en 1991 en el mar Báltico y, en 2002, tras la puesta en marcha de varios parques con distinta potencia, se inauguró el parque de Horns Rev, Fig VII.11, el más grande del mundo con 80 aerogeneradores y una potencia instalada de 160 MW.

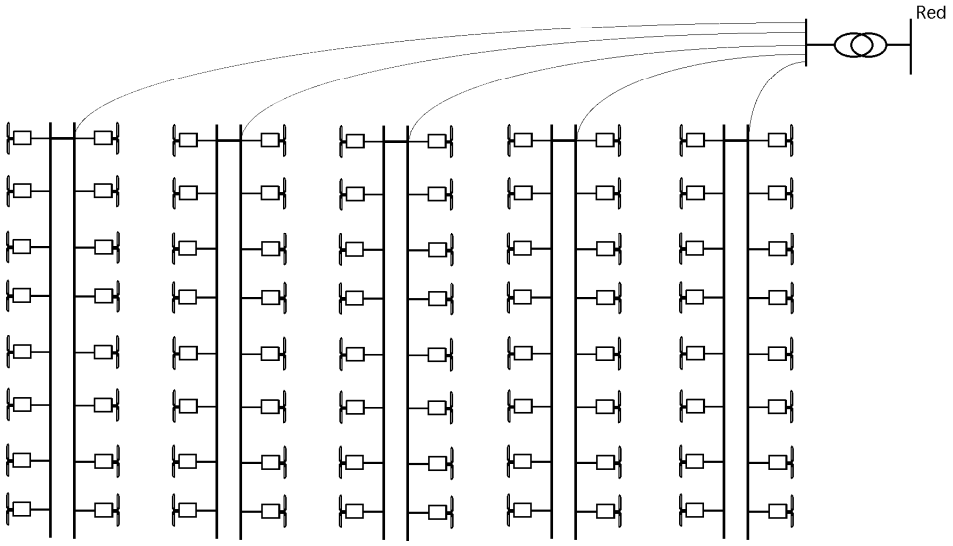
Tras años de uso de energía eólica marina en Dinamarca, aunque para ello se ha requerido una importante inversión económica, la producción de electricidad es más estable y un 20% superior a la energía eólica terrestre.

La vida útil del parque, con un buen mantenimiento, se puede llegar a duplicar. En la actualidad el 50% del consumo eléctrico familiar danés proviene de este tipo de energía.

En el resto de Europa destacan algunos proyectos, entre los que se encuentra la instalación en el

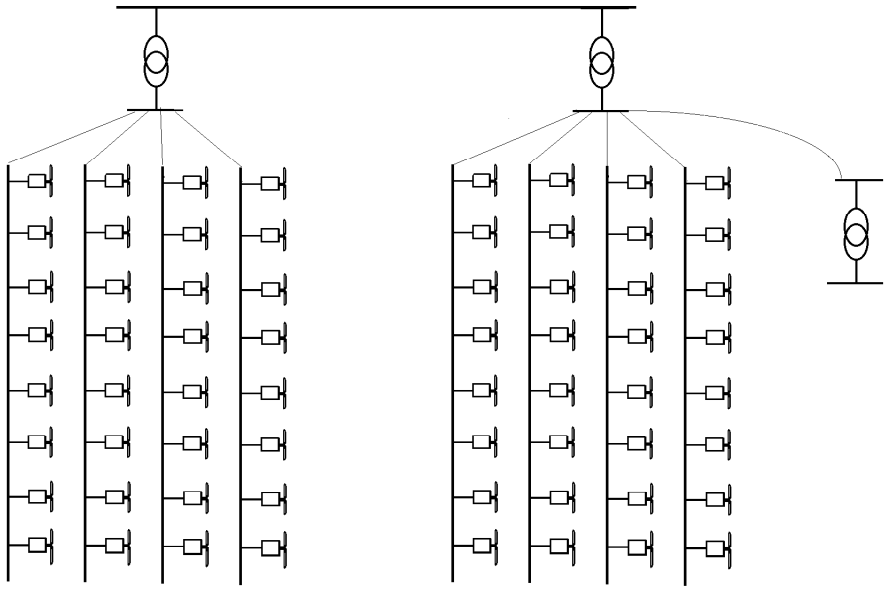
Reino Unido de 3.000 aerogeneradores en sus costas este y oeste con capacidad para abastecer al 15% de la población británica.

En Alemania se prevé la instalación de 60 GW antes de 2025 e Irlanda ha aprobado la construcción del mayor parque eólico del mundo en el mar de Irlanda, con una producción de 520 MW, equivalente al 10% de las necesidades energéticas del país.



(80 aeroturbinas de 2 MW, 160 MW), OFF-SHORE Horns Rev, Dinamarca

Fig VII.11.- Sistema generador de inducción de doble alimentación



(80 aeroturbinas de 2 MW, 160 MW), OFF-SHORE Rodsand, Dinamarca

Fig VII.12.- Sistema de aeroturbinas de 2 velocidades

Aerogeneradores flotantes (3ª generación).- Se ha desarrollado un nuevo concepto para transformar la energía en el mar, aplicando la tecnología usada en las estructuras flotantes de la industria del petróleo utilizadas en el Mar del Norte como base para la construcción de aerogenera-

dores, de forma que se pueda utilizar el viento donde sopla más, lejos de la costa hacia el mar. Un prototipo de aerogenerador flotante se instaló por primera vez en el mar de Marintek en Strondheim. Los resultados fueron prometedores y el siguiente paso consistió en instalar un aerogenerador flotante en el Mar del Norte, y demostrar que era posible construir parques flotantes en profundidades del mar más allá de los 200 m

El desarrollo de la tecnología de la energía del viento ha proporcionado las grandes aeroturbinas instaladas en tierra y en mar adentro en aguas bajas. Las aeroturbinas en el mar son una buena solución porque no afectan a las personas, aprovechan mejor las brisas y se alcanza un rendimiento energético mayor que en tierra. Hay desafíos técnicos en aguas bajas por cuanto los aerogeneradores modernos han llegado a ser tan grandes que exigen enormes fundaciones y obra civil, por lo que el usar determinadas estructuras flotantes, Fig VII.13, permite construirlos en tierra y remolcarlos al mar, en forma idéntica a como se ha hecho durante muchas décadas con las plataformas de extracción de petróleo. La instalación consiste en montar la aeroturbina de 120 m de alto sobre una estructura flotante cilíndrica con el lastre y sujeta al fondo del mar mediante anclajes. La corriente eléctrica generada sería transportada a la costa por cable

Los aerogeneradores se diseñan para profundidades entre 200÷700 m. El proyecto de demostración consistió en una aeroturbina con una capacidad de generación energética de 3 MW, 80 m sobre el nivel del mar y diámetro del rotor del orden de 90 m. La torre del aerogenerador iría sujeta a una estructura semisumergida a 12 m bajo el nivel del mar.

Se han construido aeroturbinas de 5 MW, con una generación anual de 22 GWh, diámetro del rotor 120 m, casco de 120 m, altura sobre el mar 80 m, peso global 8000 Tm, en profundidades del mar entre 200÷700 m; si se tiene éxito, sería factible imaginar parques off-shore con 200 turbinas y una capacidad global de 1.000 MW, de forma que vientos uniformes mar adentro podrían significar la implantación de parques produciendo más de 4 TWh por año.



Fig VII.13- Aerogeneradores sobre estructuras flotantes lastradas