

## CAPÍTULO 1

# Introducción

---

Desde los orígenes de la humanidad, el progreso en búsqueda de una mayor prosperidad, ha estado inevitablemente ligado al uso de la energía. Durante el largo camino recorrido hasta el día de hoy, el hombre ha desarrollado la habilidad de explotar las más diversas fuentes de energía: desde las más primitivas, como el uso del fuego para calentar la comida o la fuerza animal para el transporte, hasta las complejas tecnologías existentes hoy en día. Sin lugar a duda la energía eólica ha estado presente desde las más tempranas etapas de este viaje. La primera evidencia del uso de la energía eólica corresponde a una representación encontrada en Kuwait datada en el quinto milenio antes de Cristo [1].

La aparición de la navegación a vela supuso un enorme impulso en actividades como la pesca, el comercio o incluso en aplicaciones bélicas. El aprovechamiento de la fuerza del viento para realizar desplazamientos marítimos desencadenó el desarrollo del comercio en las culturas sumerias y egipcias sobre los ríos Tigris, Éufrates y Nilo.

Sin embargo, la explotación del viento en las civilizaciones antiguas no se centraba exclusivamente en su aplicación a la navegación. Los primeros indicios de conversión de energía eólica a mecánica aparecen en el siglo XVII a.C. cuando el rey de Babilonia Hammurabi planteó el uso de la energía eólica en un proyecto de irrigación [2]. En el libro clásico Arthasastra (siglo IV a.C.) aparecen referencias a un dispositivo para elevar agua mediante el aprovechamiento del viento [3]. Sin embargo, no se tiene la certeza de que tales artilugios fueran materializados en la práctica.

La primera aplicación documentada del uso de la energía eólica como fuente de energía primaria para su transformación en energía mecánica data de en torno al año 200 a.C. tiempos en los que los persas utilizaban el viento para moler el grano. Estos molinos eran de eje vertical; el cuerpo de las aspas era de madera sobre las que se montaban las velas. El uso de la energía eólica para moler el grano adquirió gran popularidad en Europa durante los siglos XII y XIII. En este caso, los molinos eran de eje horizontal con torres habitualmente construidas en ladrillo; provistos de un sistema de orientación manual y dotados de mecanismos para protegerse de fuertes vientos. Durante el siglo XVIII se extendió ampliamente la aplicación de la energía eólica para el bombeo de agua en instalaciones de regadío. Estas turbinas estaban dotadas de un gran número de palas metálicas de longitudes relativamente pequeñas, constituyendo los habitualmente

denominados molinos americanos.

En el año 1887 se construyó en Escocia la primera turbina destinada a la generación de electricidad [4]. La aplicación del viento para producir energía eléctrica se difundió por el mundo y en países como Dinamarca o Estados Unidos su uso se intensificó rápidamente. Gracias a esta gran expansión se produjeron continuas mejoras en el diseño apareciendo los aerogeneradores bipala y tripala, junto nuevas concepciones como los aerogeneradores de eje vertical Daerrieus y Savonius. La potencia nominal de las turbinas aumentó considerablemente y en el año 1931 se instaló en Rusia la primera instalación eólica marina consistente en un aerogenerador de 100 kW situado en el mar Caspio. Durante la década comprendida entre 1930 y 1940 se intensificó, sobre todo en Estados Unidos, la producción e instalación de turbinas relativamente pequeñas (con potencia nominal comprendida entre 200 y 3000 W) en instalaciones aisladas de la red eléctrica. Sin embargo, en los años siguientes, debido a la electrificación de las zonas rurales, el negocio de estos aerogeneradores dejó de ser rentable. En el año 1941 se instala en Estados Unidos el primer aerogenerador de gran potencia con una capacidad nominal de 1.25 MW. No obstante, como consecuencia del estado de desarrollo de los materiales de la época, la durabilidad de los componentes (sobre todo las palas) era extremadamente baja, por lo que el proyecto fue rápidamente desechado tras los primeros fallos mecánicos [5]. En el año 1958 se instala una turbina experimental de 800kW en Nogent le Roi (Francia). El proyecto es abandonado en el año 1963 debido nuevamente a los daños producidos en una de las palas [6]. Durante los años siguientes se sucedieron diferentes intentos fallidos. Sin embargo, es a partir de la crisis del petróleo de 1973 cuando la energía eólica sufre un nuevo impulso. En Estados Unidos la NASA junto con otras agencias estatales desarrolló numerosos prototipos y plantas experimentales. En Europa el interés por la energía eólica también estaba en auge y países como Dinamarca, Suecia y Alemania se embarcaron también en diferentes proyectos con el propósito de desarrollar la energía eólica como alternativa a los combustibles fósiles. De estos estudios surgieron las principales características de las turbinas modernas como el concepto de torre tubular, palas de material compuesto, control del ángulo de paso, etc. En los años siguientes, diferentes empresas privadas comenzaron a interesarse en la creciente rentabilidad de la energía eólica. Además, gobiernos como los de Estados Unidos y Dinamarca ofrecían ventajas fiscales y subvenciones para la implantación de proyectos eólicos. Por ello, a mediados de los años 80 comenzaron a surgir las primeras explotaciones privadas compuestas por agrupaciones de aerogeneradores de relativamente baja potencia nominal.

En España se pone en marcha, en el año 1979, un plan de investigación y desarrollo para la aplicación de la energía eólica en la producción de electricidad. El primer prototipo es instalado en Tarifa en el año 1981. La potencia nominal del aerogenerador era de 100 kW con un diámetro de pala de 20 m. El primer aerogenerador conectado a la

red se instaló el 10 marzo de 1984 en Vilopriu (Gerona) con una potencia nominal de 15 kW, mientras que el primer parque eólico fue inaugurado el 9 de abril de ese mismo año en el municipio de Garriguella (también en la provincia de Gerona). Dicho parque estaba constituido por tres aerogeneradores con una potencia nominal de 24 kW.

## 1.1 Situación actual de la energía eólica

La energía es uno de los factores que más influencia tiene sobre el desarrollo económico de las sociedades modernas. Concretamente, el nivel de consumo de energía por parte de un país es un buen indicador de su nivel de desarrollo. En la actualidad la demanda de energía a nivel mundial es cubierta mediante diferentes fuentes de energía primaria: los combustibles fósiles como el carbón, el petróleo o el gas natural suponen aproximadamente el 87.0 % de la energía primaria consumida, la energía nuclear cubre un 5.2 %, la energía hidráulica aporta un 6.46%, mientras que las energías renovables como la solar y la eólica suponen un 1.3 % [7]. En la Figura 1 se muestra la evolución del consumo mundial de energía primaria (en millones de toneladas equivalentes de petróleo) dividido según las diferentes fuentes. Como puede observarse, el consumo global de energía crece anualmente con una tasa que está comprendida entre el 2 y el 5%. El protagonismo asumido por cada una de las fuentes de energía ha sido similar durante las últimas décadas. Por otro lado, aunque la incidencia de las energías renovables es todavía relativamente reducida a nivel mundial, su tasa de crecimiento es muy elevada situándose en los últimos años por encima del 10%.

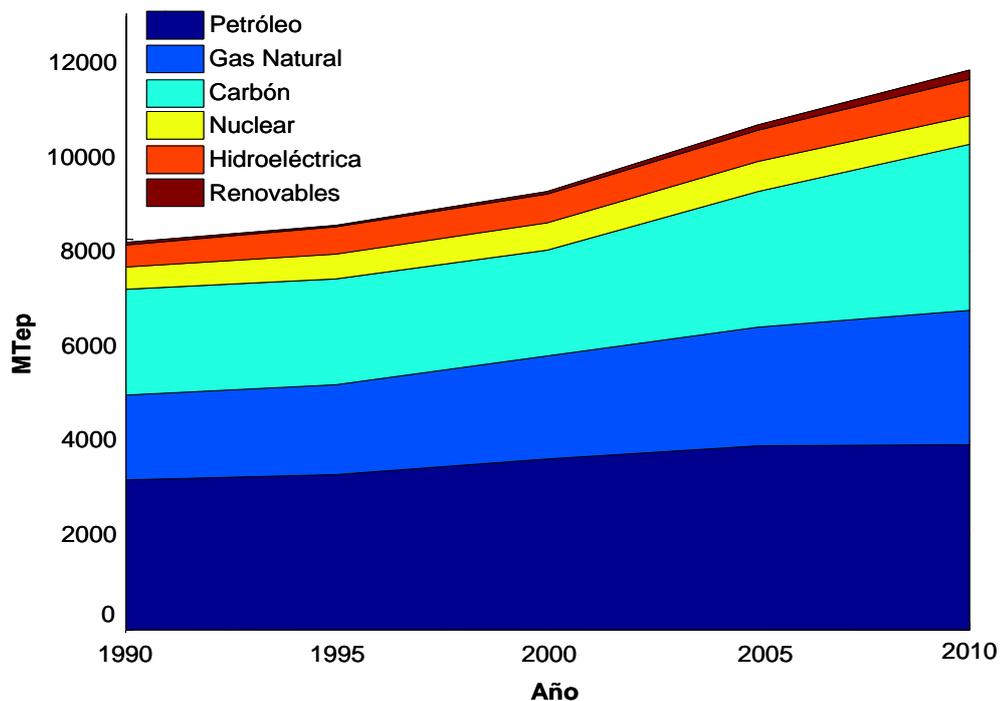


Figura 1. Evolución del consumo mundial de energía primaria.

Tabla 1. Distribución de la potencia eólica instalada por áreas geográficas.

Zona Geográfica		Periodo		
		Finales de 2012	Instalado durante 2013	Finales 2013
África y Oriente Medio	Egipto	550	0	550
	Marruecos	291	0	291
	Etiopía	81	90	171
	Túnez	104	0	104
	Otros	115	0	115
	Total	1165	90	1255
Asia	China	75324	16100	91424
	India	18421	1729	20150
	Japón	2614	50	2661
	Taiwán	571	43	614
	Corea del Sur	483	79	561
	Tailandia	112	111	223
	Otros	71	16	87
	Total	97715	18228	115939
Europa	Alemania	31270	3238	34250
	España	22784	175	22959
	Reino Unido	8649	1883	10531
	Italia	8118	444	8552
	Francia	7623	631	8254
	Dinamarca	4162	657	4772
	Portugal	4529	196	4724
	Suecia	3746	724	4470
	Polonia	2496	894	3390
	Turquía	2312	646	2959
	Holanda	2391	303	2693
	Rumania	1905	695	2600
	Irlanda	1749	288	2037
	Grecia	1749	116	1865
	Austria	1378	308	1684
	Resto de Europa	4956	832	5737
Total	109817	12031	121474	
América	Brasil	2508	953	3461
	Chile	205	130	335
	Argentina	142	76	218
	Costa Rica	148	0	148
	Nicaragua	146	0	146
	Otros	381	76	457
	Estados Unidos	60007	1084	61091
	Canadá	6204	1599	7803
	Total	71278	4298	75575
Oceanía	Australia	2584	655	3239
	Nueva Zelanda	623	0	623
	Otros	12	0	12
	Total	3219	655	3874
Total Mundo		283194	35301	318117

De entre todas las energías renovables, a día de hoy, la energía eólica es la que ha alcanzado mayor grado de desarrollo y madurez tecnológica. Como muestra, la potencia eólica instalada en el mundo a finales de 2010 asciende a un total de 197.04 GW. La Tabla 1 muestra la distribución por zonas geográficas de la potencia eólica instalada. A finales de 2013, China, Estados Unidos y Alemania son los tres países que lideran el panorama eólico mundial. En este ranking España ocupa el cuarto lugar con 22.96 GW instalados. Mención especial merece el caso de China que durante el transcurso del año 2013 incremento su capacidad en 16.10 GW, perfilándose en los años venideros como el país hegemónico en cuanto a producción de energía eólica.

En los próximos años se espera que las tecnologías renovables, en especial la energía eólica, ganen protagonismo en el escenario mundial de generación de electricidad. Esto se debe a diferentes factores. Por un lado, el amplio desarrollo de la tecnología en los últimos años ha conducido a un gran estado de madurez que hace de la energía eólica una de las fuentes de energía más prometedora en los años venideros. Y por otro lado, diferentes aspectos socioeconómicos juegan a favor de la expansión de las energías renovables. Entre dichos aspectos cabe destacar los siguientes:

- La creciente preocupación social sobre la emisión de gases de efecto invernadero y sus posibles efectos sobre el clima hace que las fuentes de energía renovables libres de emisiones como la energía eólica, fotovoltaica y solar térmica resulten cada vez más atractivas como alternativa a las fuentes de generación basadas en combustibles fósiles.
- Los riesgos que supone la energía nuclear y el tratamiento de sus residuos ha provocado que parte de la sociedad muestre un rechazo creciente hacia dicha tecnología.
- El carácter perecedero de las fuentes de energía basadas en combustibles fósiles hace necesario la búsqueda y mejora de nuevas fuentes de generación de energía.
- El gran impacto ambiental asociado a la construcción de grandes centrales hidroeléctricas junto a la saturación de las cuencas hidrográficas provoca que la producción de energía mediante esta tecnología se mantenga prácticamente constante con el transcurso de los años.

En la Figura 2 se muestra la tendencia esperada del consumo mundial de energía primaria en los próximos años [9]. Puede observarse el acusado aumento de energía consumida en el horizonte temporal comprendido hasta el año 2030. En dicha gráfica puede apreciarse el fuerte incremento de protagonismo de las energías renovables situándose al nivel de fuentes como la nuclear o la hidroeléctrica. Por otro lado, se espera un crecimiento de las fuentes de generación basadas en combustibles fósiles. Sin embargo, éste será cada vez menor a favor de las fuentes de energía no convencionales.

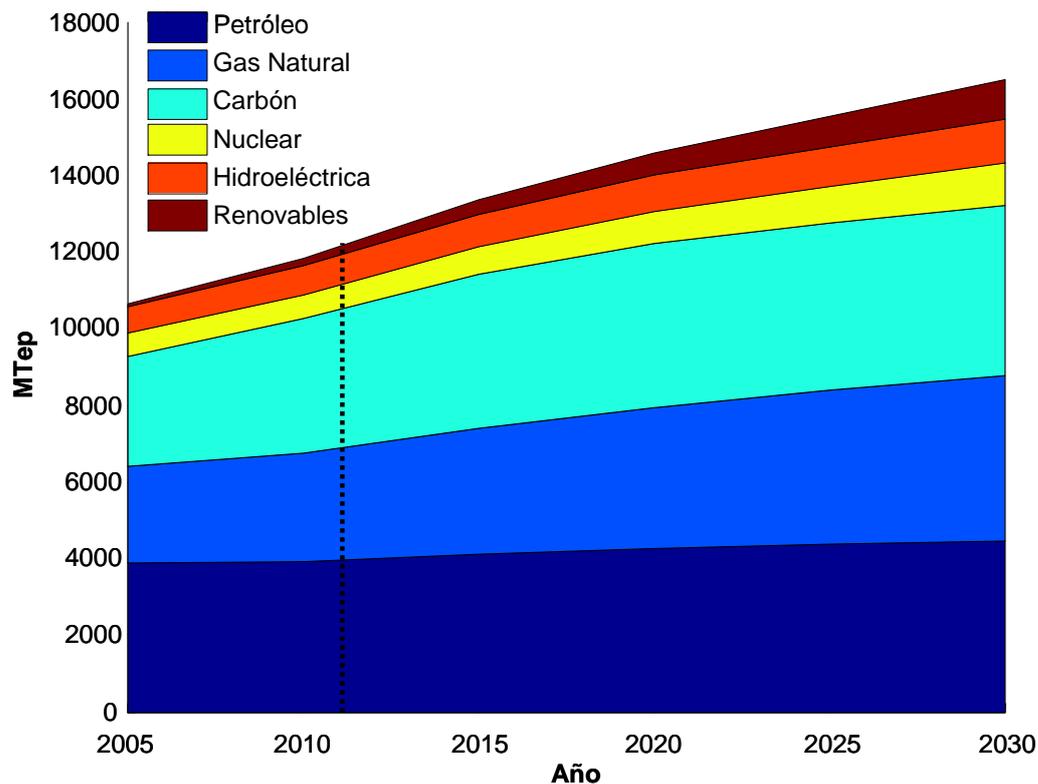


Figura 2. Evolución esperada en los próximos años del consumo mundial de energía primaria.

La Figura 3 muestra la evolución anual de la potencia eólica instalada a nivel mundial. Como puede observarse, el aumento de la potencia en los últimos años ha sido notable con una tasa de crecimiento situada en valores comprendidos entre el 20 y el 25% [8].

Las expectativas de futuro en los próximos años auguran un crecimiento constante de la capacidad instalada, de forma que ésta se verá duplicada cada 4 - 5 años. Las previsiones señalan al mercado asiático como total dominador en el futuro seguido por Europa y Estados Unidos [8].

Por otro lado, además del extraordinario crecimiento de la energía eólica en el mundo, en términos de potencia instalada, cabe destacar el cambio producido en las características de las instalaciones eólicas. El continuo progreso de la tecnología ha permitido el desarrollo de turbinas con cada vez mayor potencia nominal y al mismo tiempo la construcción de parques compuestos por mayor número de aerogeneradores. Esta tendencia ha impulsado en los últimos años la implantación de grandes parques eólicos marinos.

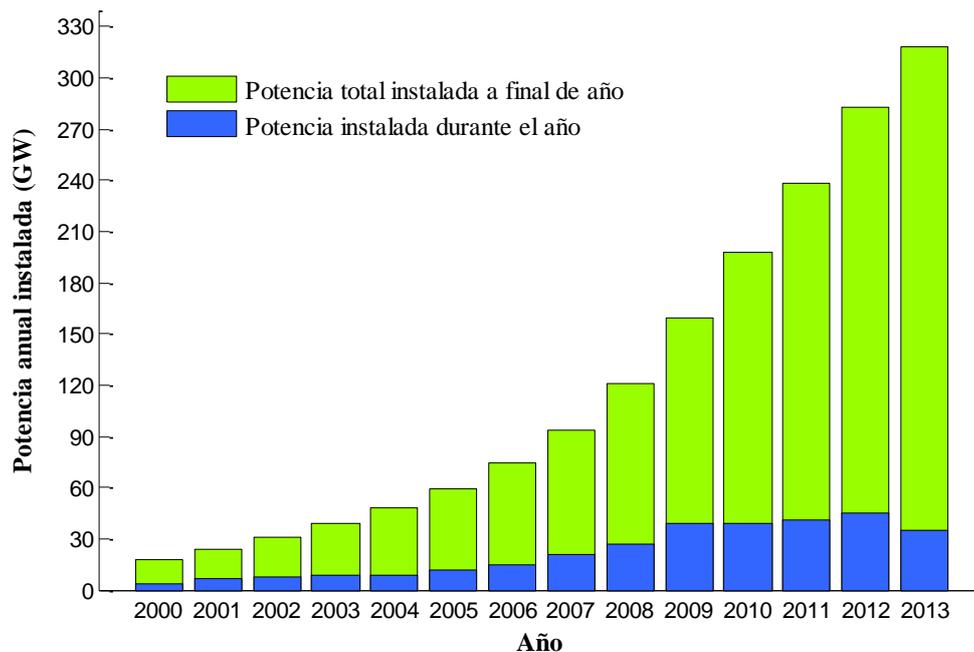


Figura 3. Evolución anual de la potencia eólica instalada a nivel mundial.

La explotación de la energía eólica en el mar presenta diversas ventajas sobre las instalaciones en tierra: las mejores condiciones de viento existentes en el mar (debido a la menor fricción existente entre el aire y el agua) hacen que los valores medios de velocidad de viento sean mayores que en tierra firme y consecuentemente la energía producida también es mayor. Además, en el mar el aire es menos turbulento, debido a la ausencia de obstáculos, lo que finalmente implica una reducción en la fatiga de los elementos mecánicos de la turbina y, por tanto, una mayor fiabilidad del aerogenerador. Por otro lado, la disponibilidad de grandes áreas en el mar hace posible la implantación de un elevado número de turbinas permitiendo su explotación de forma intensiva. Adicionalmente, presenta otras ventajas como el reducido impacto sonoro y visual que exhiben este tipo de instalaciones al situarse alejadas de la costa.

El primer parque eólico marino fue Vindeby construido en el año 1991 en Dinamarca compuesto por 11 aerogeneradores de 450 kW de potencia nominal. A finales de 2013 un total de 2.080 turbinas de viento estaban instaladas y conectadas a la red eléctrica a través de 69 parques eólicos marinos pertenecientes a 11 países de toda Europa. La capacidad total instalada a finales de 2013 llegó a 6.562 MW, la producción de 24 TWh en un año de viento normal, suficiente para cubrir el 0,7% del consumo eléctrico de la UE. En la Figura 4 se muestra la evolución de la potencia eólica marina en los últimos años a nivel europeo [12]. A medida que la tecnología se desarrolla cada vez más, el tamaño medio de los parques eólicos aumenta junto a la distancia a la costa y la profundidad a la que las turbinas son instaladas. A finales de 2013, la profundidad

media del agua en los parques eólicos marinos fue de 16 m, y la distancia media a la costa de 29 km [12].

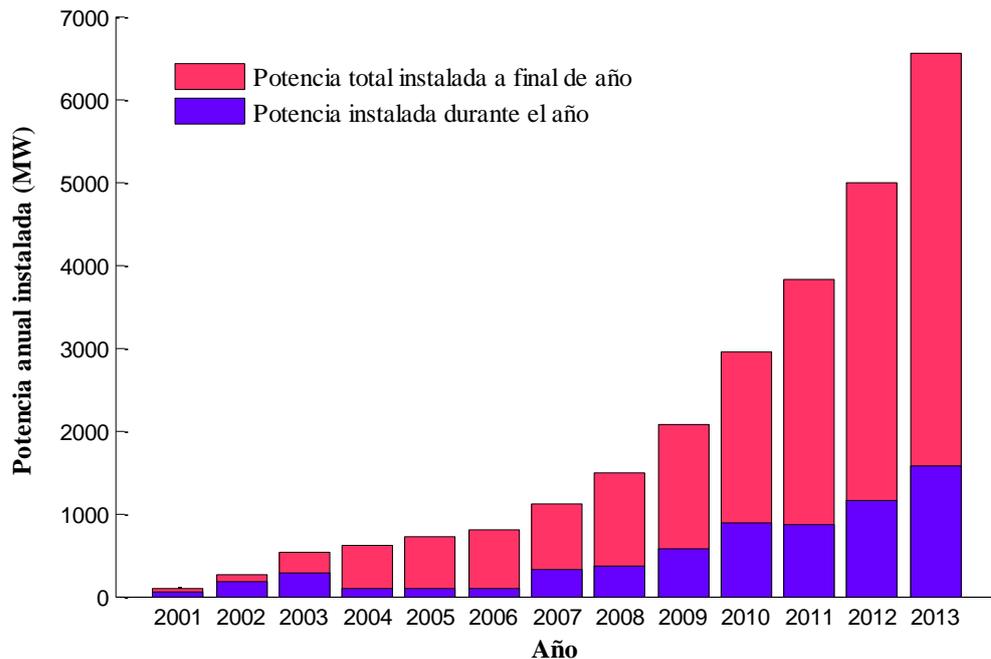


Figura 4. Evolución de la potencia eólica marina instalada en la UE

La previsión en los próximos años apunta a que la potencia instalada a través de parques eólicos marinos continúe creciendo a una tasa de crecimiento del 25 % al menos en los tres próximos años.

## 1.2 Conexiones submarinas

La construcción de parque eólicos marinos presenta una fuerte desventaja frente a los construidos en tierra firme, el transporte de la energía generada hacia los puntos de consumo. Dicha energía no puede ser entregada directamente a la red de consumo sino que es necesaria la instalación de una red eléctrica submarina propia que conecte al parque con la red eléctrica de tierra. Este hecho hace que se incurra en una inversión que normalmente se halla entre el 15 y el 25 % de la inversión total necesaria para la construcción del parque. En muchos casos este incremento no se ve recompensado con las posibles mejores condiciones que presenta el viento en alta mar. Sin embargo gracias al desarrollo de la tecnología sobre todo en corriente continua, HVDC, en los sistemas de transmisión eléctrica, cada vez son más factibles sistema con amplias longitudes. Aun así el gran problema que acarrea el uso de la tecnología HVDC es su alto coste frente a la tecnología en corriente alterna, HVAC, para distancias no superiores a 70-80 km.

El primer enlace eléctrico submarino se realizó en 1954 y conectó la isla sueca de Gotland con el continente. Este enlace de 100 kV y potencia nominal 20 MW, tenía 98 km de longitud y fue el primer enlace eléctrico de los muchos que se han construido hasta día de hoy [14].

En España la última interconexión submarina y primera construida usando tecnología en corriente continua, se puso en marcha en Agosto del año 2012. Este enlace une la Península Ibérica y las Islas Baleares asegurando el suministro eléctrico al sistema balear, está constituido por dos subsistemas de pequeño tamaño y eléctricamente aislados, uno para el flujo de energía hasta las Islas Baleares y otro de retorno. El sistema completo consta de tres cables de 237 km cada uno, con un nivel de tensión de 250 kV y con una potencia nominal de 200 MW [15]. En la Figura 5 se muestran un esquema de la interconexión de ambos sistemas eléctricos a través de este enlace.

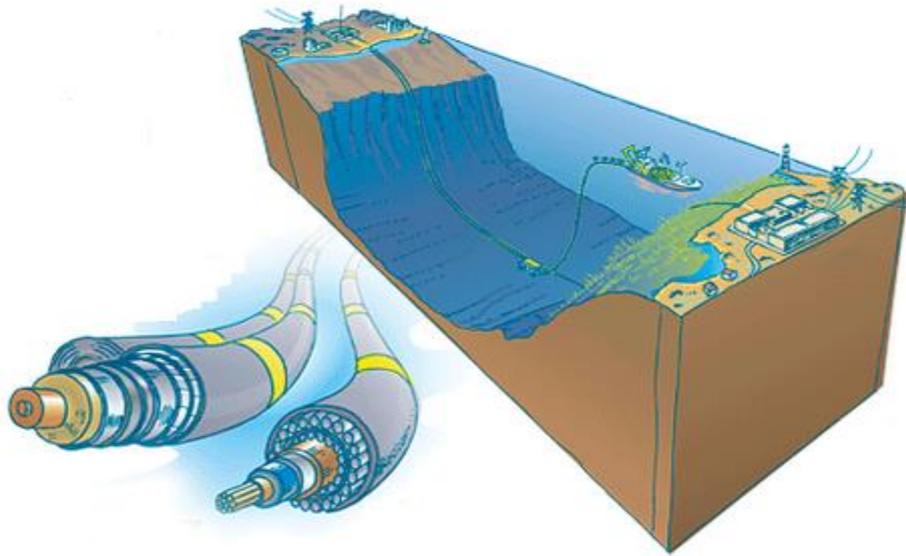


Figura 5. Conexión típica entre dos sistemas eléctricos a través de un enlace eléctrico submarino

En 2008 se finalizó la construcción de la conexión eléctrica más larga hasta el momento que conecta los sistemas eléctricos de Noruega y Holanda. Tiene una longitud total de 580 km y una potencia nominal de 700 MW, la tecnología empleada es HVDC de 450 kV. Gracias a esta interconexión el sistema eléctrico noruego podrá dar salida a su generación de energía hidroeléctrica y Holanda podrá reducir el consumo de combustibles fósiles [13].

Los sistemas de transmisión usados para el transporte de energía eléctrica en los parques eólicos marinos hasta la red existente en tierra firme, no gozan de longitudes tan amplias como las comentadas anteriormente para los enlaces entre sistemas eléctricos. Esto se debe a que el desembolso en el que se incurre por la construcción de la línea

eléctrica recae únicamente sobre el propietario del parque eólico. Hecho que supone en torno al 15-25 % de la inversión si consideramos un parque alejado unos 29 km de media de la costa y empleando tecnología en corriente alterna. Aumentar estas distancias en el sistema que une un parque eólico marino con el sistema eléctrico en tierra firme, supondría el uso de tecnología en corriente continua para minimizar las pérdidas, lo que supondría un desembolso aún mayor pues esta tecnología es más cara. Sin embargo el continuo aumento de proyectos para la creación de parques offshore y los ya existentes, hace que se replantee si el modelo de interconexión entre parques marinos y tierra firme es el idóneo.

Hace tiempo que se viene hablando de la posibilidad de formar en el futuro una red de transporte eléctrico submarina que pueda unir varios países europeos. Esta situación sería un marco idílico para los nuevos proyectos de parque eólicos situados en alta mar, puesto que en este caso no sería necesaria la instalación de un enlace eléctrico individual para transportar la energía generada por el parque eólico a la red eléctrica actual. Bajo esta condición los nuevos proyectos se desarrollarían en las proximidades de la red eléctrica submarina con el objetivo de evitar cualquier desembolso en materia de transporte eléctrico.

Dado el emplazamiento de la mayoría de parques offshore europeos situados en Reino Unido, véase Figura 6, y a las condiciones litográficas que presenta la zona del Mar del Norte. Espacio donde la profundidad del lecho marino es relativamente baja permitiendo el anclaje de las plataformas o soportes sobre los que descansan los molinos. En esta situación el Mar del Norte es la zona con mayor probabilidad para la creación de esta gigantesca red eléctrica submarina. Esta red no solo impulsaría la formación de nuevos parques y por tanto la generación de energía renovable, sino que daría solución a diversos problemas hoy presentes en varios países de la Unión Europea a nivel energético y al conjunto de la Unión. Las principales ventajas que presentaría la construcción de este proyecto serían:

- Esta red permitiría el flujo de energía entre países cuyos modelos de generación pueden ser muy distintos como son; Reino Unido y el consumo de materiales fósiles, Francia y la energía nuclear, Noruega y la energía hidroeléctrica o los países situados más al norte que tiene una fuerte dependencia del gas ruso. Esta red eléctrica permitiría solventar estados de crisis como puede ser hoy en día el conflicto generado entre la Unión Europea y Rusia por la independencia de Ucrania. Situación en la cual la volatilidad de los precios del gas son preocupantes.
- Las limitaciones de distancia con respecto a tierra firme a las que están sometido los parques offshore en este momento desaparecerían. Puesto que los nuevos parques serían proyectados de forma que su localización no distara mucho de una de las ramas de esta red, para reducir la inversión por la construcción de un

enlace eléctrico propio. Esto desde el punto de vista de generación eólica supondría una mejora del rendimiento por las mejores condiciones de viento a distancias más alejadas de la costa. En la Figura 6, donde se observa la distribución de los parques eólicos marinos actuales, se puede apreciar que dada la distribución de estos parques los primeros enlaces podrían unir países como Reino Unido, Holanda e incluso Francia.

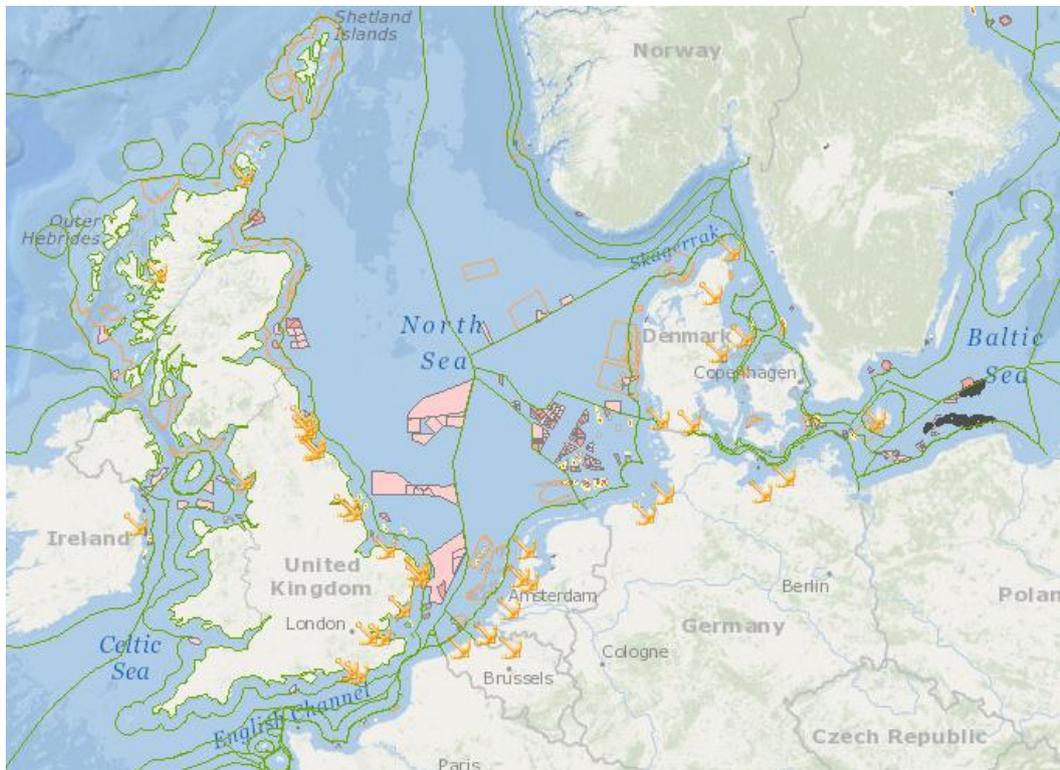


Figura 6. Localización principales parques offshore en Europa

- Se permitiría un flujo mayor de energía renovable entre países con el objetivo de alcanzar los límites marcados por la UE para el 2020. En los cuales se fija que en el año 2020 un 20 % del consumo de energía debe provenir de fuentes renovables. Esto permitiría aprovechar por ejemplo el exceso de generación de energía hidráulica en Noruega para solventar la escasez de energías renovables en países como Francia. Además de la importante aportación por parte de parques eólicos offshore.
- Al ser un proyecto a nivel europeo podría darse el caso de que las tarifas asociadas al transporte de energía renovables estuvieran en parte financiadas por la Unión en cuyo caso las rentabilidades de los parques serían aún mayores.

