

El futuro de los aerogeneradores *offshore*: evolución y perspectiva de las tecnologías *direct-drive* y con caja de cambios tradicional

The future of offshore wind turbine: evolution and perspective of direct-drive and traditional gear box technologies

■■■■
Ramón Miralbés-Buil y David Ranz-Angulo
Universidad de Zaragoza (España)

DOI: <https://doi.org/10.6036/10885>

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, la capacidad eólica instalada alrededor del mundo en instalaciones *offshore* es superior a los 60 GW[1], con un crecimiento muy superior a las instalaciones *onshore* tradicionales. Esto se debe a la inexistencia de barreras en alta mar por lo que el aire fluye a una velocidad mayor y de forma más regular, lo que permite generar una mayor cantidad de energía que las instalaciones en tierra tradicionales, pudiendo incluso duplicarla [2].

Adicionalmente, este tipo de instalaciones no generan impacto acústico ni visual y no crean molestias a la población ni consumen terreno. También debe señalarse que, en el mar, no existen las mismas limitaciones de transporte que en tierra por lo que se pueden utilizar aerogeneradores de mayor tamaño y potencia unitaria; es por ello que el tamaño y la potencia unitaria de este tipo de aerogeneradores aumenta de forma progresiva año a año. Cabe señalar que, actualmente existen modelos comerciales como la turbina de 11 MW de SG 11.0-193 DD Flex de Siemens-Gamesa [3] y proyectos experimentales de hasta 15 MW como las Haliade X de GE a situar en Vineyard Wind 1 (EE.UU.). Sin embargo, en este tipo de instalaciones, existe una mayor complejidad técnica para su construcción y mantenimiento.

En el caso de Europa, es en Reino Unido donde se concentra más de un tercio de las instalaciones operativas [4], mientras que en España, que, actualmente cuenta con 117 proyectos de instalaciones *offshore*, sólo 2 están operativas. Debe señalarse que España cuenta con una plataforma continental natural muy pequeña que supone una gran limitación en comparación con otros países por lo

que resulta de especial importancia el desarrollo de los aerogeneradores flotantes que permiten la instalación en aguas más profundas y alejadas de la costa con un potencial eólico superior a las zonas costeras. Sin embargo, actualmente suponen sólo el 0,4% de la potencia *offshore* instalada en Europa [5], pero debe señalarse que España es puntera en el desarrollo de esta tecnología con diversos proyectos como Saitec Offshore, X1 Wind y EnerOcean entre otros.

2. TECNOLOGÍAS UTILIZADAS

Si bien la reducción de peso, en especial el de los elementos de la góndola que genera un elevado momento al encontrarse a una elevada altura, es un factor crítico en el diseño de la estructura y la cimentación de los aerogeneradores *offshore* tradicionales, este aspecto resulta todavía más crítico en el caso de los aerogeneradores flotantes para aumentar la estabilidad.

Uno de los elementos instalados en la góndola con un mayor peso es la caja multiplicadora, con un peso en torno a 15 toneladas y que está compuesto de una elevada cantidad de piezas móviles. Este elemento permite transmitir la potencia del buje al generador adaptando la velocidad angular de salida del buje (15-25 rpm) a la requerida por el generador (1200-1800 rpm) utilizando engranajes; en este proceso el par en la salida de la caja se reduce en la misma proporción en la que aumenta la velocidad angular consiguiendo que el generador opere a alta velocidad angular y un par relativamente bajo. Estos generadores, con forma habitualmente cilíndrica, utilizan una cantidad baja de polos (cuatro o seis) lo que reduce considerablemente el tamaño, complejidad y peso del generador.

En el caso de la caja multiplicadora, normalmente cuentan con tres fases o etapas (normalmente son las de baja velocidad, planetaria y de alta velocidad) [6] pero que, en el caso de los aerogenerado-

res *offshore* que deben soportar una mayor velocidad de viento y potencia, puede incrementarse en una etapa adicional con el consiguiente aumento de peso. Debe señalarse también, que la mayor parte de las labores de mantenimiento se centran en la caja multiplicadora, así como la mayoría de los fallos de tipo mecánico que se producen en los aerogeneradores. Por otro lado, aunque la transmisión mediante engranajes tiene una alta eficiencia, se producen pérdidas de potencia en cada etapa de la multiplicadora tanto por el rozamiento de los cojinetes como por la transmisión de fuerza en los propios engranajes (en torno al 1% en caso de engranajes helicoidales y un 2% en engranajes rectos).

Este tipo de mecanismo empezó a utilizarse en los años setenta del pasado siglo, inicialmente con tecnologías de velocidad constante y generadores asíncronos que permiten un control simple y una alta fiabilidad; sin embargo, en los años noventa se adoptó de forma masiva la tecnología de frecuencia constante y velocidad variable combinada con un paso variable en las aspas y generadores síncronos. Con ello aumentó considerablemente el aprovechamiento de la energía eólica y por ende de la eficiencia, una buena adaptabilidad a posibles cambios de velocidad del viento y unos costes de producción mucho menores, pero necesitando sistemas de control mucho más complejos y sacrificando parte de la fiabilidad.

Además, conforme ha ido aumentando la capacidad unitaria de los aerogeneradores y, por ende, el tamaño de las cajas multiplicadoras, los problemas de fiabilidad se han acrecentado y, en muchos casos, se han observado fallos catastróficos prematuros en menos de cinco años que han obligado a la sustitución completa de la caja con el consiguiente coste económico (aproximadamente el 10% del coste del aerogenerador) y con el consiguiente lucro cesante [7]. Actualmente, estos problemas de fiabilidad se están solucionando mediante la implementación de un

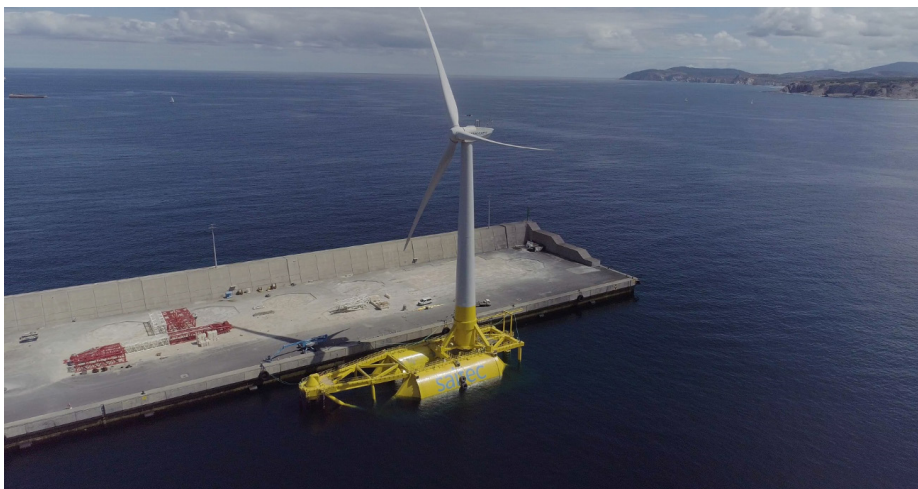


Fig. 1: Aerogenerador off-shore flotante DemoSATH. Fuente: Saitec Offshore Technologies.

adecuado mantenimiento predictivo, un mayor conocimiento de las cargas en los aerogeneradores en la fase de diseño que permite generar dispositivos más fiables, el uso de rodamientos reforzados y el desarrollo de nuevos sistemas de monitorización [8]

Por otro lado, en 1991 empezaron a aparecer aerogeneradores con la tecnología direct-drive, principalmente de mano de la empresa Enercom que ha dominado el mercado de este tipo de tecnología en la que prescinden de la caja multiplicadora conectando directamente el buje con el generador; con ello se reduce el número de partes móviles y el peso de los componentes instalados en la góndola. Para ello, resulta imprescindible utilizar generadores que funcionen a la velocidad del buje lo que implica utilizar generadores con una gran cantidad de polos (100 o más) para obtener la frecuencia de salida requerida por la red eléctrica (50 o 60 Hz). Este factor implica un aumento considerable de la complejidad del generador, así como un aumento de sus dimensiones y peso.

Si bien el aumento de peso y dimensiones es un factor negativo a tener en cuenta, puede utilizarse en el diseño para soportar el peso del buje y de las palas; por otro lado, debido al alto par que debe soportar el generador y la gran cantidad de polos necesaria se han adoptado formas toroidales. Dentro de la tecnología direct-drive se han utilizado dos tecnologías para generar los polos: imanes permanentes o bien electroimanes. En el primer caso son necesarios materiales raros y caros como en neodimio mientras que en el segundo se utilizan bobinas por las que, al pasar la electricidad se genera un campo magnético. Este segundo diseño implica una complejidad técnica mucho mayor, unas

necesidades mayores de mantenimiento, una menor fiabilidad, un mayor peso, unas pérdidas eléctricas debidas al uso del electroimán [9] y la necesidad de refrigerar el estator.

En los noventa, debido al alto coste de los imanes permanentes, se adoptó mayoritariamente el uso de electroimanes, pero conforme fueron bajando el precio de dichos imanes aumentó su popularidad hasta 2011 debido la crisis de los imanes permanentes. Actualmente se utilizan ambas tecnologías. Comparando las tecnologías mediante direct-drive y con caja multiplicadora para aerogeneradores de entre 1.5 y 10 MW [10], que, si bien en la primera se prescinde de la caja multiplicadora lo que implica un ahorro considerable de peso, el aumento del tamaño del generador no compensa dicha reducción de peso por lo que su peso final es superior en torno a un 25% [11]. Por otro lado, para este rango de potencia, el aumento del coste de las tecnologías direct-drive tanto por el precio de los materiales como por la fabricación suponía que sobrecoste de en torno al 30 % respecto de las tecnologías tradicionales.

Es por ello que se ha estimado que el punto en el que pueden empezar a resultar competitivas es a partir de los 5 MW. Por otro lado, la tecnología direct-drive permite que el rotor pueda trabajar a menores velocidades lo que permite maximizar la eficiencia al poder mantener la velocidad óptima de punta (tip speed) de la pala. Con ello se consigue no sólo aumentar la eficiencia del aerogenerador, sino también reducir el ruido aerodinámico que es la mayor fuente de ruido para aerogeneradores de gran tamaño. Debe remarcarse en este punto que, al prescindir de la caja multiplicadora, se reducen considerablemente las labores de mantenimiento,

más si cabe todavía si se utilizan imanes permanentes; este aspecto resulta especialmente importante en zonas de difícil acceso como las localizaciones offshore.

Por otro lado, el uso de una mayor cantidad de componentes eléctricos y electrónicos, que tienen una menor fiabilidad que los componentes mecánicos supone que, si bien existe una mayor posibilidad de fallo en las tecnologías direct-drive, la sustitución y reparación de componentes es mucho más simple y el tiempo en que la máquina permanece parada es muy inferior. Debe señalarse también que, al prescindir de la caja multiplicadora, se reduce considerablemente el ruido generado por los componentes mecánicos así como las vibraciones y tensiones sobre la estructura del aerogenerador [11]. Por otro lado, la tecnología direct-drive utiliza convertidores de potencia que utilizan un condensador DC que permiten desacoplar de la red el aerogenerador con lo que aumenta considerablemente la flexibilidad operacional y el rendimiento del aerogenerador: al desacoplarse el lado de la máquina del lado de la red, el primero puede alcanzar el punto de máxima potencia (maximum power point tracking o MPPT) ajustando la velocidad del generador síncrono en función de la velocidad del viento, mientras que el inversor del lado de la red permite alcanzar la frecuencia y potencia activa y reactiva requerida por la red eléctrica.

En este punto, debe mencionarse también que existen ciertas líneas de investigación prometedoras como el uso de cajas multiplicadoras de una o dos etapas combinadas con generadores con un mayor número de polos que podría solucionar los problemas y limitaciones de ambas tecnologías: reducir los problemas de fiabilidad al eliminar la etapa de alta velocidad en la multiplicadora y reducir el peso y las dimensiones del generador al reducir el número de polos. También resultan interesantes otros conceptos como la sustitución de las cajas multiplicadoras tradicionales por sistemas de transmisión hidráulicos, las transmisiones mecánicas variables, el uso de rodamientos magnéticos para aumentar la fiabilidad de las multiplicadoras o el uso de partidores de par o torque splitting.

CONCLUSIONES

Finalmente podemos indicar que, tal como establecen diversos autores [12], ambas tecnologías convivirán durante algún tiempo aunque existen discrepancias sobre el futuro de las mismas; por un lado

uno de los escenarios es que ambas prevalecerán y coexistirán en el mercado pero en aplicaciones diferenciadas, mientras que el otro escenario supondría que, con el desarrollo y perfeccionamiento de ambas tecnologías, llegará un momento en la que una prevalecería. En este escenario, los expertos parecen coincidir en que, si ocurriera, sería la tecnología direct-drive la que prevalecería, principalmente por la mayor fiabilidad y menor mantenimiento. Especialmente en instalaciones off-shore que se prevé que sean las que más se desarrollen en el futuro, por su mayor potencial de mejora frente al escaso potencial actual de las cajas multiplicadoras que han prácticamente alcanzado su punto de máxima eficiencia y por la mayor eficiencia de la tecnología direct-drive para ratios altos de potencia, aunque no deben descartarse los diseños híbridos anteriormente mencionados.

REFERENCIAS

- [1] Offshore Wind farms in Spain, Market leading intelligence for global offshore renewable energy

- markets. (2023). <https://www.4coffshore.com/windfarms/spain/> (accessed March 8, 2023).
- [2] QUÉ ES LA ENERGÍA EÓLICA MARINA ¿Sabes cómo funcionan los parques eólicos marinos?, Iberdrola. (n.d.). <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/como-funciona-la-energia-eolica-marina>.
- [3] <https://www.worldenergytrade.com/energias-alternativas/energia-eolica/siemens-gamesa-aumenta-la-capacidad-de-su-turbina-eolica-marina-mas-grande-a-11-mw>, WORLD ENERGY TRADE. (2019). <https://www.worldenergytrade.com/energias-alternativas/energia-eolica/siemens-gamesa-aumenta-la-capacidad-de-su-turbina-eolica-marina-mas-grande-a-11-mw> (accessed March 8, 2023).
- [4] Virgilio Márquez, Juan, Evolución y perspectivas de la eólica offshore en España, (2017). https://www.aeeolica.org/images/AEE_Opina/181001-CUADERNOS-DE-ENERGIA_Evolucion-y-perspectivas-de-la-eolica-offshore-en-Espana_JV-Marquez.pdf.
- [5] Fernández Munguía, Serfio, De la necesidad, virtud: cómo España se ha puesto a la cabeza en I+D de la energía eólica flotante, Xataka. (2022). <https://www.xataka.com/energia/necesidad-virtud-como-espana-se-ha-puesto-a-cabeza-i-d-energia-eolica-flotante> (accessed March 8, 2023).
- [6] R. Miralbés Buil, D. Ranz Angulo, COMPARISON OF THREE PREDICTIVE ANALYSIS METHODS FOR WIND TURBINE GEAR BOXES. A CASE STUDY

- OF SATELLITE BEARING WEAR AND GEAR TEETH SURFACE DAMAGES, DYNAL. 96 (2021) 254–259. <https://doi.org/10.6036/9685>.
- [7] V.L. Jantara, M. Papaelias, Wind turbine gearboxes: Failures, surface treatments and condition monitoring, in: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring Techniques for Renewable Energy Industrial Assets, Elsevier, 2020: pp. 69–90. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101094-5.00005-8>.
- [8] U. Bhardwaj, A.P. Teixeira, C.G. Soares, Reliability prediction of an offshore wind turbine gearbox, Renewable Energy. 141 (2019) 693–706. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.136>.
- [9] H. Polinder, J.A. Ferreira, B.B. Jensen, A.B. Abrahamsen, K. Atallah, R.A. McMahon, Trends in Wind Turbine Generator Systems, IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron. 1 (2013) 174–185. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2013.2280428>.
- [10] Wind Turbine Gearbox Technologies, (2010). <https://www.intechopen.com/chapters/16248>.
- [11] A. Bensalah, G. Barakat, Y. Amara, Electrical Generators for Large Wind Turbine: Trends and Challenges, Energies. 15 (2022) 6700. <https://doi.org/10.3390/en15186700>.
- [12] G. van de Kaa, M. van Ek, L.M. Kamp, J. Rezaei, Wind turbine technology battles: Gearbox versus direct drive – opening up the black box of technology characteristics, Technological Forecasting and Social Change. 153 (2020) 119933. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.119933>.

**BODEGAS
MURIEL**

EL CIEGO - RIOJA ALAVESA

Bodega fundada en 1926

Felicidades

Ctra. Laguardia s/n
01340 Elciego - Alava (España)
Tel 945 606 268 Fax 945 606 371
www.bodegasmuriel.com