
Análisis del impacto del cambio climático en los recursos de energía renovable eólica y undimotriz: panorama mundial y regional

Paula Serras | Profesora agregada, Escuela de Ingeniería de Bilbao (UPV/EHU)

Alain Ulazia | Profesor titular, Escuela de Ingeniería de Bilbao (UPV/EHU)

Gabriel Ibarra-Berastegui | Catedrático, Escuela de Ingeniería de Bilbao (UPV/EHU)

Jon Sáenz | Catedrático, Facultad de Ciencia y Tecnología (UPV/EHU)

Sheila Carreño-Madinabeitia | Profesora adjunta, Facultad de Farmacia (UPV/EHU)

Ganix Esnaola | Profesor agregado, Escuela de Ingeniería de Gipuzkoa (UPV/EHU)

Tema¹

En el presente artículo se analizan las repercusiones del cambio climático para la disponibilidad mundial y regional de los recursos de energía renovable eólica y undimotriz.

Resumen

La energía proporcionada por el viento y las olas se considera una de las fuentes energéticas más prometedoras para mitigar el cambio climático. Este artículo presenta distintos análisis efectuados mediante diferentes métodos para simular situaciones del pasado y hacer predicciones sobre el futuro. En ese sentido, se han analizado los recursos eólicos y undimotrices a nivel mundial y regional junto a su producción eléctrica asociada, recurriendo con frecuencia a dispositivos estándar² para ese fin. También se ha estudiado la posibilidad de combinar ambas tecnologías al buscar ubicaciones óptimas para la aplicación de esta combinación de viento y olas, además de considerar la posible fatiga mecánica que sufriría un aerogenerador flotante. En cualquier caso, la conclusión es que, salvo en regiones muy específicas (el océano Ártico y el Antártico o, a un nivel más local, el golfo de Guinea o el sur de Brasil), los recursos eólicos y undimotrices y su producción eléctrica asociada no se verán afectados de un modo destacable por el cambio climático a **largo plazo**, ni siquiera en el escenario más desfavorable analizado. Esta estabilidad supone una generación de energía constante, por lo que las centrales existentes de energía renovable eólica y undimotriz son fuentes fiables a largo plazo.

¹ Este estudio forma parte del proyecto PID2020-116153RB-I00, financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación y la Agencia Estatal de Investigación (MCIN/AEI/ 10.13039/501100011033, España).

² National Renewable Energy Laboratory (NREL), "5 MW wind turbines and spar-type flotation systems".

Análisis

1. Introducción

La energía marina es uno de los motores de la transición energética a medio y largo plazo a nivel nacional, europeo y mundial. No sólo presenta una gran regularidad y previsibilidad como recurso, sino también mucha versatilidad –para su implantación en tierra o en alta mar–, modularidad y escalabilidad para proveer de energía a una serie de sectores como, los puertos y las plantas desalinizadoras entre otros. Por lo tanto, el uso de la energía eólica y undimotriz es crucial para mitigar el cambio climático. Son fuentes de energía renovable limpias y sostenibles que no emiten gases de efecto invernadero (GEI), por lo que se erigen como la principal alternativa al uso de los combustibles fósiles que contribuyen al cambio climático. De hecho, durante la Cumbre del Clima de la COP28, celebrada en Dubái en noviembre y diciembre de 2023, se hizo un llamamiento específico para triplicar la capacidad energética renovable hasta 2030.³

Además, el desarrollo tecnológico e industrial de la energía eólica marina se está acelerando. Según proyecciones de la Agencia Internacional de la Energía Renovable (IRENA por sus siglas en inglés), para poder cumplir las metas del Acuerdo de París –mantener el incremento de las temperaturas a nivel mundial por debajo de 2°C e intentar limitar ese aumento a 1.5°C frente a los niveles preindustriales–, el total de la capacidad eólica marina requerida a nivel mundial será de 228GW en 2030 y de 1000GW en 2050.⁴ Asimismo, según la Agencia Internacional de la Energía (AIE), la energía eólica marina constituirá la mitad de la generación eólica de Europa para 2040.⁵

Por otra parte, la energía undimotriz también es un recurso marino prometedor, a pesar de que su evolución no ha sido tan rápida como se preveía. Según el Acuerdo de Implementación para Sistemas de Energía Marina de la AIE, el mundo alberga el potencial de desarrollar 300 GW de energía undimotriz y mareomotriz de aquí a 2050.⁶ Por su parte, la UE se ha fijado el ambicioso objetivo de alcanzar los 40 GW de capacidad instalada de energía undimotriz y mareomotriz para 2050, de modo que, para conseguirlo, la evolución necesaria de la capacidad instalada acumulada tiene que ser de 1GW en 2025 y de 10GW en 2030.

El análisis que se presenta a continuación está basado en la investigación de los autores sobre la disponibilidad mundial y regional de recursos de energía renovable eólica y undimotriz. De hecho, no se han analizado únicamente los recursos, sino también la producción de energía eléctrica. Asimismo, se ha analizado su variabilidad estacional y

³ COP28 – Dubái, https://unfccc.int/sites/default/files/resource/Co-Chairs_Summary_of_21_Feb_2024_HoDs.pdf.

⁴ IRENA (2019), https://www.irena.org/-/media/files/irena/agency/publication/2019/oct/irena_future_of_wind_2019.pdf.

⁵ IEA, “Offshore Wind Outlook 2019”, https://iea.blob.core.windows.net/assets/495ab264-4ddf-4b68-b9c0-514295ff40a7/Offshore_Wind_Outlook_2019.pdf.

⁶ Hoja de ruta eólica marina y energías del mar en España, https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/idae/tecnologias/energias_renovables/eolica/Hoja_de_Ruta_para_el_desarrollo_de_la_Eolica_Marina_y_de_las_Energias_del_Mar_en_Espa%C3%B1a_ES.pdf.

diaria y, por último, se ha estudiado la combinación óptima de los recursos eólicos y undimotrices, donde los análisis de fatiga han puesto de manifiesto una fuerte reducción de la vida útil de los aerogeneradores marinos a largo plazo, que afecta a la producción energética total durante su vida.

Estos análisis se han llevado a cabo aplicando distintos modelos, ya sea teniendo en consideración los datos históricos del pasado o vaticinando los resultados futuros.

En estos momentos, los modelos CMIP6⁷ proporcionan escenarios futuros para variables atmosféricas como la temperatura y el viento, en función de distintas vías de aquí a 2100. Estas vías combinan los cálculos futuros en torno a las emisiones de GEI y las políticas de adaptación y mitigación.

Se suelen tener en cuenta dos escenarios límite para describir esta evolución conjunta hasta 2100: el escenario SSP1-2.6 de bajas emisiones, que podría denominarse un escenario “verde”; y el escenario SSP5-8.5 de altas emisiones, que representa la evolución menos respetuosa con el medio ambiente de aquí a 2100.⁸

Es frecuente que se tenga en consideración que los escenarios intermedios (las políticas más probables en vista de las actuales que podrían dar lugar a un incremento de la temperatura en torno a 3°C) también conllevarán una evolución a medio camino entre los dos escenarios límite mencionados (en cuanto a producción energética eólica y undimotriz para este caso específico). Por lo general, se sigue este procedimiento cuando, como es el caso del estudio que nos ocupa, los resultados directos de los modelos del CMIP6 no arrojan estimaciones sobre la energía, por lo que resulta necesario procesar grandes cantidades de datos para calcular la producción energética a partir de datos de alta frecuencia.

2. Análisis de la producción eléctrica eólica y undimotriz en todo el mundo en el período 2015-2100

En esta sección, se procesan las estimaciones futuras del CMIP6 sobre el viento para obtener resultados de producción energética final generada por turbinas eólicas y dispositivos undimotrices. Con ese fin, se han seleccionado tipos estándar de aerogeneradores y convertidores undimotrices y se ha calculado su producción eléctrica

⁷ El Proyecto de intercomparación de modelos de clima acoplados (CMIP, por sus siglas en inglés) es un marco internacional de modelado del clima diseñado para comprender mejor los cambios pasados, presentes y futuros en el clima. Un modelo climático es un código informático complejo que genera un análogo digital a la Tierra. Este modelo digitaliza los procesos y las interacciones entre los distintos elementos del sistema climático de la Tierra: la atmósfera, el océano, la superficie terrestre, la criosfera y la biosfera. Véase <https://wcrp-cmip.org/cmip6/>.

⁸ Escenarios SSP: el escenario SSP1-1.9 es el de emisiones “muy bajas” y se asocia a un incremento de 1,9-1,8°C para 2100; el escenario SSP1-2.6 es el de emisiones “bajas” y se asocia a un incremento de 1,3-2,4°C para 2100.

El escenario SSP2-4.5 es el de emisiones “intermedias” y se asocia a un incremento de 2,1-3,5°C para 2100; el escenario SSP3-7.0 es el de emisiones “altas” y se asocia a un incremento de 2,8-4,6°C para 2100; el escenario SSP5-8.5 es el de emisiones “muy altas” y se asocia a un incremento de 3,3-5,7°C para 2100. Véase <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>.

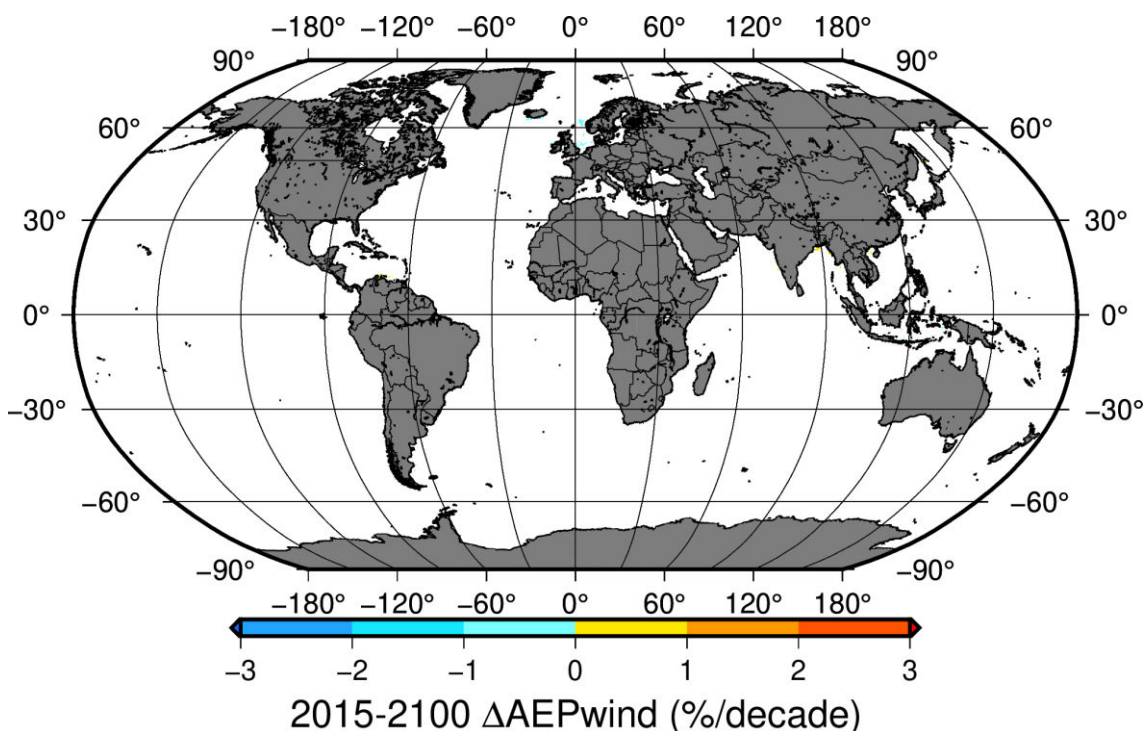
futura a partir de las estimaciones futuras sobre el viento y las olas. Se han proyectado las tendencias decenales mundiales para el período 2015-2100 en las zonas de litoral de todo el mundo donde, en vista de la evolución tecnológica actual, se podrían instalar los dispositivos eólicos y undimotrices.⁹

Las Figuras 1-3 y 4-6 muestran los resultados correspondientes a las tendencias decenales de la producción energética eólica y undimotriz, respectivamente. Las Figuras 3 y 6 corresponden a las tendencias intermedias (promedio) entre los escenarios límite SSP5-8.5 y SSP1-2.6.

Los resultados proporcionan un panorama casi estático, con tan sólo unas cuantas zonas en las que cabría esperar cambios significativos, si bien limitados, en la generación marina.

Estos resultados apuntan a que, pese los grandes cambios previstos en la temperatura de la Tierra de aquí a 2100, la producción futura de energía marina no correría peligro y solamente cabría esperar cambios moderados en unas pocas ubicaciones. Hay consenso en torno a que una de las formas de abordar el cambio climático es incrementar la cuota de energías renovables y reducir el uso de los combustibles fósiles. Este trabajo apunta a que la subida prevista de las temperaturas no será un obstáculo para las iniciativas de reducción de emisiones de GEI, al menos por lo que respecta a la generación marina renovable.

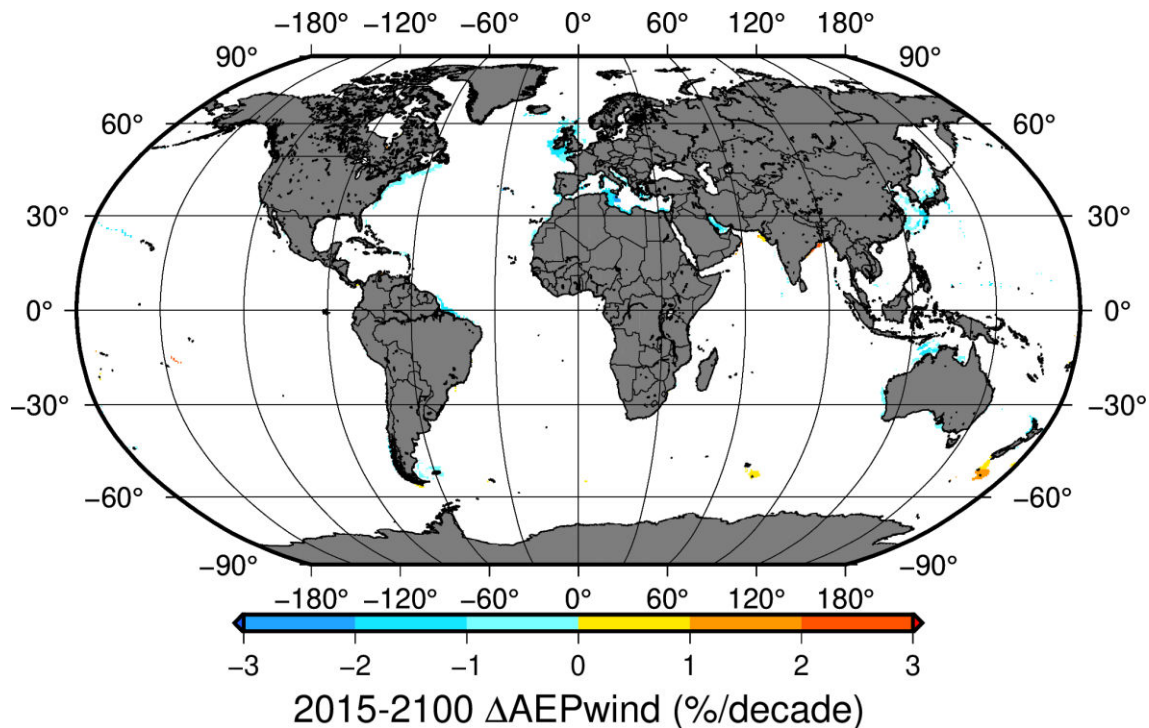
Figura 1. Tendencias en la producción de energía eólica: escenario SSP1-2.6



Fuente: elaboración propia.

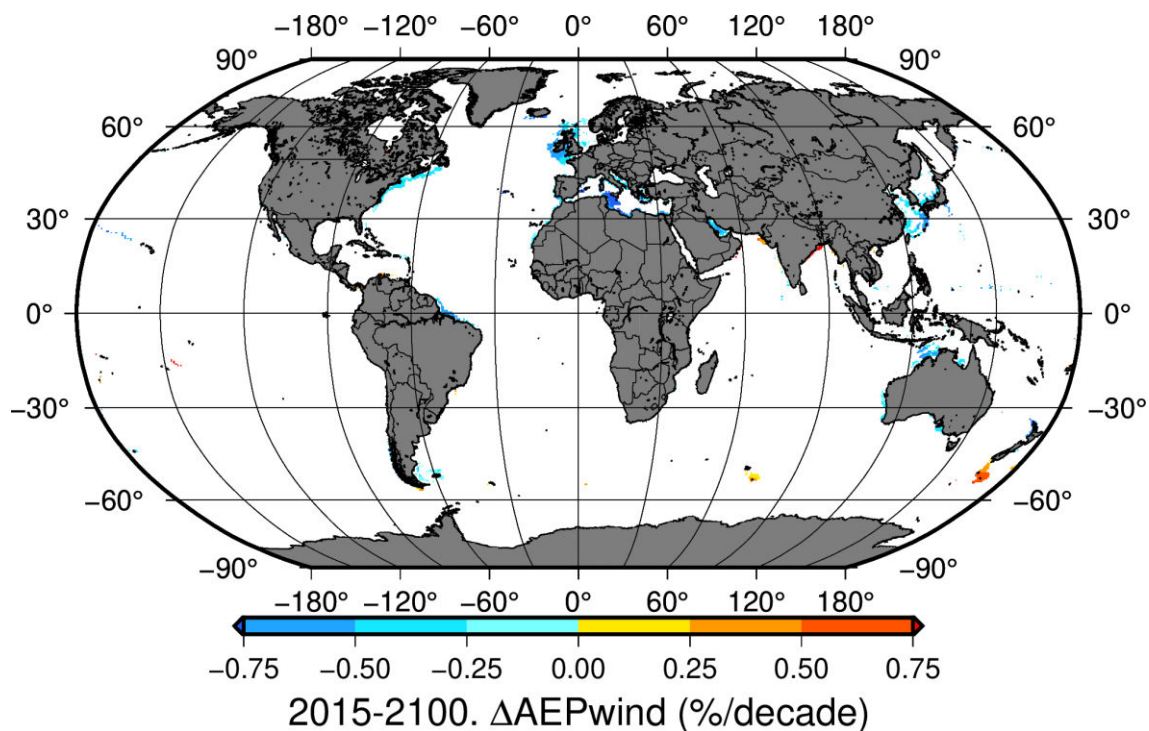
⁹ Ibarra Berastegi, G. *et al.*, (2023), <https://doi.org/10.1038/s41598-023-45450-3>.

Figura 2. Tendencias en la producción de energía eólica: escenario SSP5-8.5



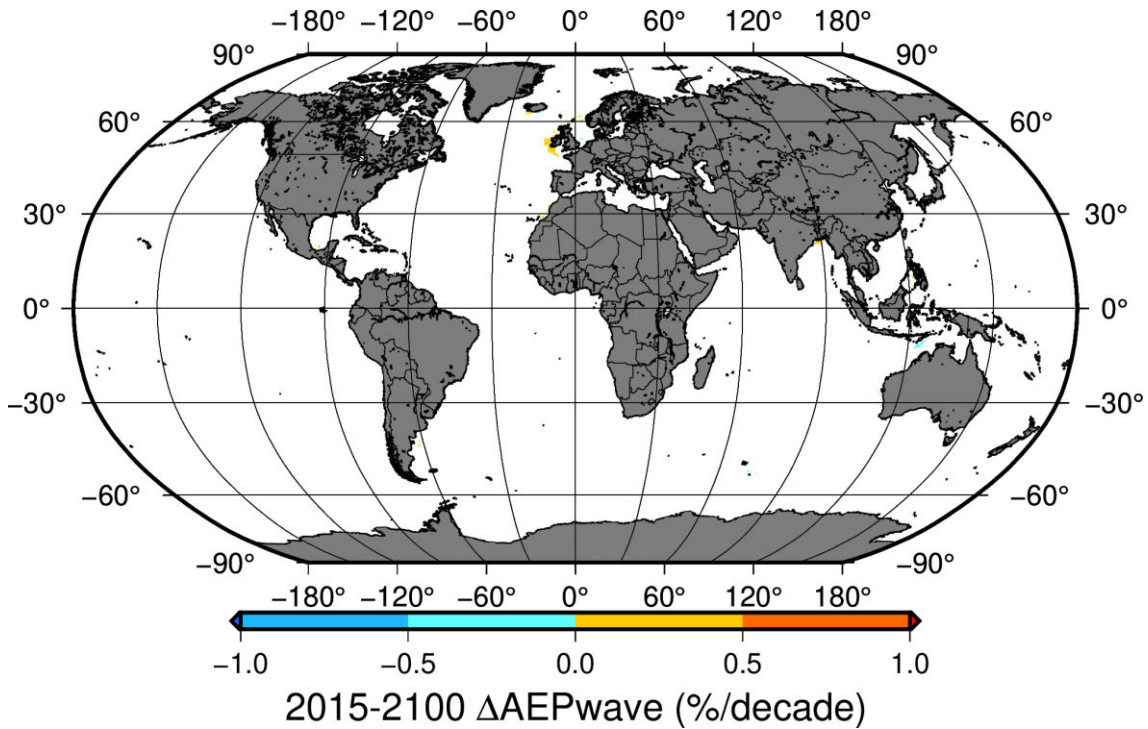
Fuente: elaboración propia.

Figura 3. Tendencias en la producción de energía eólica: escenario intermedio (media entre el SSP1-2.6 y el SSP5-8.5)



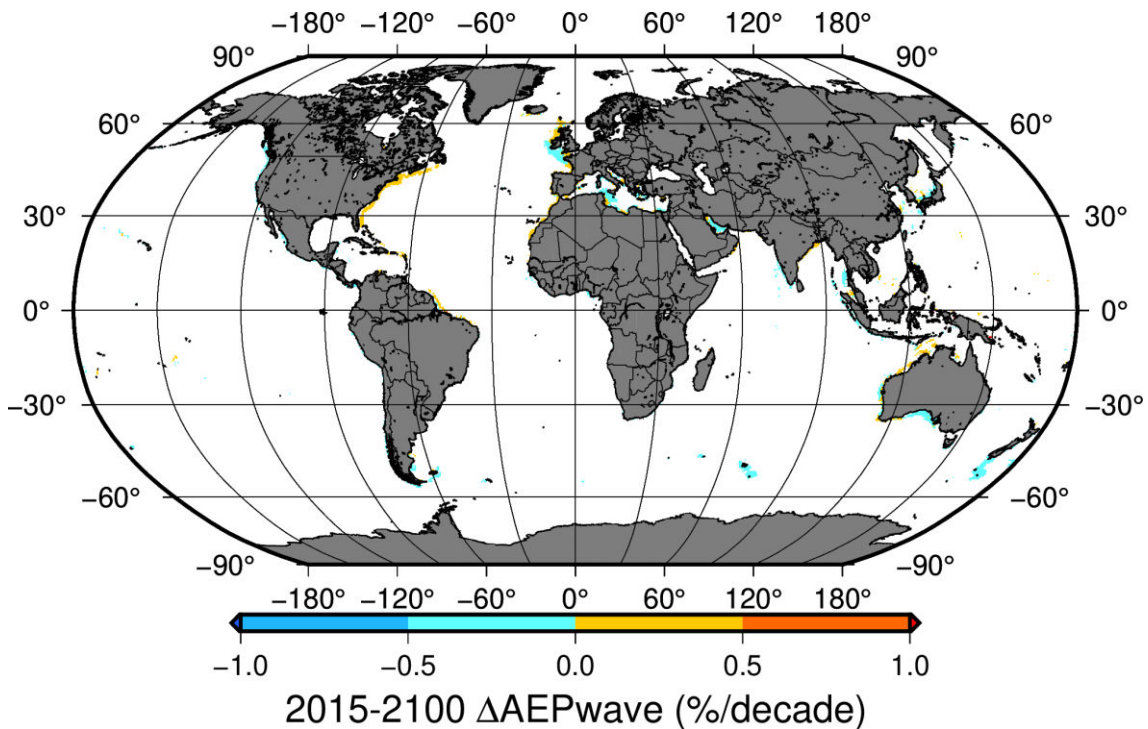
Fuente: elaboración propia.

Figura 4. Tendencias en la producción de energía undimotriz: escenario SSP1-2.6



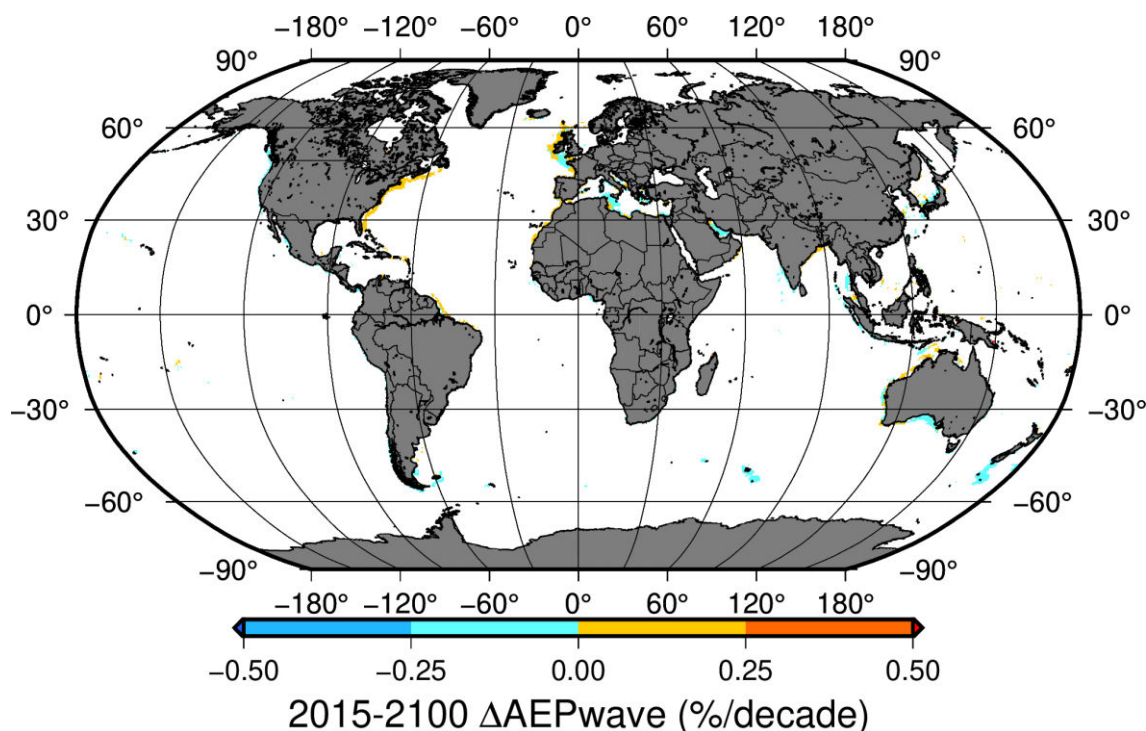
Fuente: elaboración propia.

Figura 5. Tendencias en la producción de energía undimotriz; escenario SSP5-8.5



Fuente: elaboración propia.

Figura 6. Tendencias en la producción de energía undimotriz: escenario intermedio (media entre el SSP1-2.6 y el SSP5-8.5)



Fuente: elaboración propia.

2.1. Análisis de la producción eléctrica para el período 2015-2100 en la central undimotriz de Mutriku

La central undimotriz de Mutriku se ubica en el golfo de Vizcaya, en la parte septentrional de la península Ibérica (España). Esta central está conectada a la red y se encuentra integrada en el rompeolas del puerto de Mutriku. Hay 16 cámaras de aire que dan paso a una turbina Wells con un generador eléctrico de 18,5kW para cada cámara, lo que arroja un total de 296kW de capacidad instalada. Hasta ahora, la central undimotriz de Mutriku ha aportado a la red más de 2.4GWh de electricidad.¹⁰

Para analizar la producción eléctrica durante el período 2015-2100 en este lugar en concreto, se ha recurrido a un conjunto de proyecciones de olas de CSIRO, derivadas de seis modelos climáticos diferentes que participan en las series de modelos del CMIP6.¹¹ Dos de estos modelos guardan relación con el escenario SSP1-2.6, mientras que los cuatro restantes corresponden al escenario SSP5-8.5.¹²

¹⁰ Ibarra Berastegi, G., *et al.*, (2018), <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.10.018>.

¹¹ Carreno-Madinabeitia, S., *et al.*, (2024), <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.116624>.

¹² Para hacer frente a posibles sesgos en los datos, se emplearon técnicas de emparejamiento de cuantiles y corrección de sesgos multivariante N-pdf, utilizando para tal fin los datos de reanálisis de ERA5 (Cannon, A.J., 2018, <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3580-6>). Además, se recurrió a una técnica de mapas autoorganizados para categorizar las frecuencias diarias del estado del mar y la producción energética (Ibarra Berastegi, G. *et al.*, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.108654>).

Las conclusiones obtenidas indican que la producción de energía undimotriz en el Golfo de Vizcaya se mantendrá estable durante el período de estudio de 2015 a 2100. El análisis de las frecuencias diarias del estado del mar y de la producción energética no mostró cambios reseñables. Esta estabilidad se traduce en una generación de energía constante, lo que garantiza el potencial del Golfo de Vizcaya como una fuente fiable a largo plazo de energía renovable. Cabe prever resultados similares para los escenarios intermedios.

3. Análisis de la producción eléctrica eólica en el período 2015-2100: la influencia de las variaciones en la densidad del aire

Casi todos los estudios sobre los recursos de energía eólica presentes y futuros se centran en la densidad de potencia eólica (DPE), calculada partiendo de una densidad del aire constante. Ahora bien, la densidad del aire depende inversamente de la temperatura del propio aire y, en menor medida, de la humedad. El incremento de la temperatura en el futuro conlleva un descenso de la densidad del aire y, por lo tanto, de la DPE. Se aprecia una variabilidad espacial, pero en general son muchos los estudios mundiales y locales que han descrito la disminución de la DPE en el futuro sobre la base de los modelos del CMIP5 y el CMIP6, en especial para escenarios SSP intermedios y altos. No obstante, esos estudios no tienen en cuenta el efecto del descenso de la densidad del aire, que podría presentar una coherencia espacial con los patrones decrecientes de la DPE y, por lo tanto, magnificarla, o bien inducir un efecto decreciente de la DPE en zonas donde no se prevea un descenso por la supuesta densidad constante. La falta de determinación de la producción anual o estacional de energía o la producción energética prevista de las turbinas instaladas son otros de los puntos débiles de los estudios anteriores, lo que implica tener que combinar los espectros de la velocidad futura del viento con las curvas de potencia reales de los aerogeneradores a nivel mundial. De este modo, se ofrece una visión más completa del problema de la producción de energía eólica en el futuro, lo que permite plantear cambios en todos los espectros y no sólo en condiciones promedio del viento. Además, esa estrategia se vería beneficiada en gran medida por el uso de la frecuencia temporal más alta disponible de las simulaciones futuras del CMIP para incluir el efecto de la variabilidad subdiaria del viento (empleando la mayor resolución temporal de tres horas del repositorio del CMIP6) en la determinación de los espectros del viento.

Este estudio¹³ publicado recientemente ha calculado los cambios futuros en la velocidad del viento, la densidad del aire, la DPE con consideración de la densidad del aire y, por último, la producción energética (anual y estacional) en comparación con los valores de referencia del período histórico para todos los escenarios SSP del CMIP6, presentándose aquí únicamente los resultados relacionados con los escenarios intermedios SSP2-4.5 y SSP3-7.0. Se han confirmado los resultados obtenidos en estudios anteriores sobre la velocidad del viento y la DPE, puesto que se muestra un descenso general en muchos puntos del hemisferio norte, entre ellos zonas con una industria de energía eólica bien desarrollada, y aparecen valores crecientes en las zonas polares. Asimismo, casi todos los cambios presentan una modulación estacional.

¹³ Esnaola, G. *et al.*, (2024), <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132706>.

Teniendo en cuenta la relación de los cambios con el forzamiento radiativo futuro, el patrón mundial de cambios aparece ya identificado con claridad en el escenario SSP2-4.5. Después, sólo queda magnificarlo en cuanto a tasa de variación y la extensión de las zonas afectadas al llevar a cabo el análisis del escenario SSP3-7.0.¹⁴

Los cambios futuros en la producción anual y estacional de energía coinciden con los cambios en la DPE, pero incluyen zonas con valores básicamente decrecientes, en especial sobre los océanos. A grandes rasgos, se prevé que los cambios en la producción anual de energía varíen del -20% al +15% para el escenario SSP2-4.5, mientras que la horquilla iría del -25% al +20% para el SSP3-7.0, en función de la zona y de la estación.

La conclusión es que está previsto que la producción de energía baje o se mantenga sin cambios en la mayoría de las ubicaciones incluso en los peores escenarios planteados, con alguna que otra excepción como sobre el Ártico y el océano Antártico, o a nivel más local en el golfo de Guinea y el sur de Brasil.

4. Análisis de la producción eléctrica eólica en el período 1950-2019: la influencia del hielo en las turbinas

Las temperaturas gélidas durante varios días en las regiones frías constituyen un reto considerable para los aerogeneradores. El hielo se acumula en sus componentes mecánicos e instrumentales, con las consiguientes pérdidas sustanciales para la producción anual de energía. En ese sentido, se ha analizado la frecuencia de temperaturas de congelación (FTC) a 100m en las regiones frías de latitudes altas [50°N, 75°N] para el período 1950-2019.¹⁵ El objetivo principal de este estudio ha sido calcular las pérdidas causadas por la acumulación de hielo en la producción anual de energía para mejorar las características de los parques eólicos.

El estudio revela una disminución media de 72,5 horas FTC por década en las regiones frías. Cabe destacar que la costa sudoriental de Groenlandia está experimentando la reducción más notable (621 horas por década). Además, las proyecciones para una ubicación específica de Escandinavia apuntan a una destacable reducción anual del 60% en las horas FTC. Asimismo, atendiendo a la clasificación determinada por la Agencia Internacional de la Energía, se ha proyectado un incremento máximo de la producción anual de energía de más del 26%, lo que implica que el aumento de la temperatura, lejos de poner en peligro la generación de energía eólica en las regiones frías, la favorece.

5. Análisis de la producción eléctrica eólico-undimotriz

En los últimos años, son muchos los estudios que se han llevado a cabo para analizar la combinación de fuentes de energía renovable eólica y undimotriz.

¹⁴ Meinshausen, M., *et al.*, (2020), <https://gmd.copernicus.org/articles/13/3571/2020/>.

¹⁵ Aizpurua Etxezarreta, M., *et al.*, (2022), <http://doi.org/10.3390/su14095630>.

5.1. Tecnología eólico-undimotriz para aplicaciones en alta mar (far offshore)

Hay amplias extensiones del océano en las que la disponibilidad de recursos marinos de energía renovable (viento y olas) es muy elevada. Sin embargo, al encontrarse a cientos o miles de kilómetros de distancia del litoral más cercano, es imposible integrar esa electricidad en la red de abastecimiento. Por consiguiente, se ha analizado la posibilidad de combinar la energía renovable eólica y la undimotriz para la generación *in situ* de hidrógeno que se podría transportar hasta el usuario final en un momento posterior.¹⁶

A tal fin, se han delimitado cuatro puntos en el océano Atlántico en los que se presume que podrían instalarse centrales mixtas de producción de hidrógeno empleando energía eólica y undimotriz. En esos cuatro puntos, se llevó a cabo una simulación de la energía producida por los parques eólicos y undimotrices con una resolución horaria durante la década de 2010-2019 a partir de información obtenida del reanálisis de ERA5.¹⁷ Los cuatro puntos se han elegido partiendo de la covarianza existente entre los recursos eólicos y undimotrices, que son representativos de puntos en los que la covarianza es muy alta y, a la inversa, en los que la covarianza es baja.

La metodología empleada nos ha permitido analizar de un modo realista la contribución de la combinación de distintos tipos de convertidores undimotrices a la energía generada por un aerogenerador para la producción de hidrógeno en ubicaciones remotas apartadas del litoral. Esta contribución serviría de complemento para la energía que la turbina dejase de producir durante sus períodos de parada. Los resultados apuntan a que se puede generar hasta un 6,28% más de hidrógeno con convertidores undimotrices que la cantidad generada únicamente por el aerogenerador, lo que supone una mejora de la eficiencia de los sistemas remotos de producción energética. Estos sistemas despliegan su máxima eficiencia en puntos donde la covarianza entre la energía eólica y la undimotriz es pequeña, ya que, en esas zonas, los aerogeneradores están parados en momentos en los que las olas siguen produciendo energía. Por lo que atañe al coste de este tipo de energía, y pese a que ya existen algunos artículos sobre esta cuestión,^{18,19} sigue siendo un aspecto que todavía debe estudiarse en profundidad.

¹⁶ Sáenz Aguirre, A., *et al.*, (2022), <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114914>.

¹⁷ ERA5, <https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47>. Se ha calculado la energía que produciría una turbina estándar teniendo en cuenta su curva de potencia con el viento existente durante esos 10 años. Además, se ha calculado la energía que producirían tres convertidores undimotrices diferentes (aparatos utilizados para producir electricidad a partir de la energía mecánica presente en el oleaje de la superficie del océano), de geometrías, masas y generadores diferentes, usando el método de los elementos finitos (conjunto de herramientas matemáticas que se suelen emplear para resolver numéricamente problemas complejos de física e ingeniería, en particular cuando entran en juego ecuaciones diferenciales parciales). El generador hace referencia al mecanismo que se encarga de transformar en electricidad la energía absorbida por el convertidor principal. Este convertidor, por regla general una cámara o una boya, absorbe la energía mecánica del oleaje oceánico y la transforma en energía mecánica. Esa energía mecánica aún hay que convertirla en electricidad, lo que se consigue por medio del generador.

¹⁸ Babarit, A., *et al.*, (2020), <https://doi.org/10.5194/wes-2019-101>.

¹⁹ Peter Hill, S.J., *et al.*, (2024), <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141162>.

5.2. Índice de energía eólico-undimotriz en las islas Canarias

Este estudio se ha centrado en el potencial combinado de la energía eólica y undimotriz cerca de las islas Canarias (España).²⁰

Se observó que la velocidad del viento ha aumentado a nivel histórico, pero no ha ocurrido lo mismo con la altura de las olas. Se trata de un hecho insólito que brinda la oportunidad de instalar parques conjuntos de energía eólica y undimotriz, de modo que los períodos sin disponibilidad de energía eólica puedan complementarse con la energía producida por los convertidores undimotrices. Este estudio ha utilizado datos para calcular un índice de viabilidad que muestra el potencial de crecimiento de este tipo de parques con el paso del tiempo. También se ha llevado a cabo este análisis en una ubicación específica y se ha puesto de manifiesto que es probable que la producción de energía eólica aumente, mientras que la undimotriz podría disminuir. Esa circunstancia pone aún más de relieve la disociación entre el viento y las olas y, por lo tanto, refuerza los argumentos a favor del nuevo enfoque.

5.3. Fatiga en aerogeneradores marinos flotantes

En general, la variación a largo plazo de la energía eólica y la energía undimotriz es insignificante, pero la combinación de ambas fuentes de energía y la proyección de las cargas de fatiga durante las últimas décadas sugieren la necesidad de estudiar con detenimiento estos aspectos para proyecciones posteriores.²¹

Esta investigación introduce un método novedoso para analizar la fatiga de los aerogeneradores marinos flotantes a lo largo de períodos prolongados en un punto relevante de la red al oeste de Irlanda.²² Este método utiliza datos históricos del viento y las olas con corrección de sesgos en una ubicación marina de alta energía. Para gestionar las exigencias computacionales, los estados del mar se han agrupado en distintas categorías que muestran sus cambios a lo largo de tres períodos climáticos que abarcan 90 años en total. Se ha utilizado el programa OpenFAST²³ para simular el comportamiento de los aerogeneradores (de dos tipos con potencia nominal diferente) en distintos estados del mar y, en estas simulaciones, se han evaluado los daños y el aumento de la fatiga a lo largo del tiempo, con la constatación de que algunos componentes específicos experimentan un aumento de la fatiga de entre el 5% y el 8%.

En líneas generales, este nuevo método ha utilizado datos históricos para crear un modelo que representa la evolución del estado del mar a largo plazo y la fatiga correspondiente, lo que resulta aplicable a las proyecciones a nivel mundial para los aerogeneradores marinos flotantes. Todo ello tendrá un gran impacto en un futuro cercano debido al incremento general de la fatiga previsto debido a los efectos del

²⁰ Ulazia, A., *et al.*, (2023), <http://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116890>.

²¹ Sáenz Aguirre, A., *et al.*, (2022), <http://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116303>.

²² Ulazia, A., *et al.*, (2023), <http://doi.org/10.1016/j.energy.2023.126632>.

²³ OpenFAST, <http://www.nrel.gov/wind/nwtc/openfast.html>.

cambio climático reduciendo así la producción energética durante la vida útil de los dispositivos.²⁴

Conclusiones

De aquí a 2100, teniendo en cuenta diferentes escenarios climáticos, no se prevén grandes variaciones anuales a nivel mundial en la producción de electricidad de los sectores de la energía eólica y la energía undimotriz.

En el campo de la energía eólica, los cambios más reseñables hasta 2100 se han percibido a nivel estacional, en especial en el Ártico y en el océano Antártico, o bien a nivel más local en el Golfo de Guinea o el sur de Brasil. Además, se ha observado que la reducción en el número de horas con temperaturas de congelación debido al calentamiento global puede generar un incremento considerable de la producción eólica en zonas como Islandia, Alaska, Escandinavia o el mar Báltico.

Uno de los problemas que afectan a las energías renovables es su carácter intermitente, por lo que el uso mixto de la energía eólica y undimotriz permite mitigar las consecuencias de dicho inconveniente. No cabe duda de que hace falta investigar más en este campo, combinando muchos tipos diferentes de energías renovables y abriendo la puerta también a la producción remota de hidrógeno para ampliar las zonas en las que se puede generar energía renovable, incluso sin conexión directa a la red eléctrica. En ese sentido, se han analizado los puntos calientes o lugares óptimos para la instalación de dispositivos que capturen la energía eólica y undimotriz.

Los análisis expuestos en las páginas anteriores se han llevado a cabo con la máxima resolución temporal disponible, lo que ha generado una gran cantidad de datos para su procesamiento. En un futuro próximo, se dispondrá de más datos específicos con los que las y los investigadores en este ámbito obtendrán resultados con una mayor resolución espacial, de modo que las conclusiones a nivel nacional serán más representativas.

Como ya se ha mencionado, el análisis de los recursos de energía renovable no muestra cambios significativos a nivel mundial en el futuro cercano. No obstante, son muchos los aspectos que hay que tener en consideración aparte de los recursos de energía renovable, como la posible fatiga mecánica en la tecnología eólica flotante por los cambios en el período de las olas, o incluso los fenómenos extremos que podrían ocurrir a medio y largo plazo y cuyo estudio queda fuera del alcance del presente trabajo.

²⁴ Ulazia, A., *et al.*, (2024), <http://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117424>.