

Introducción a la Energía Eólica

Energía y Medio Ambiente - S.Gil – UNSAM – mayo 2024

Introducción

La energía eólica ha tenido un rápido desarrollo en las últimas décadas, en casi todo el mundo. Las tasas de crecimiento son muy similares a la de la energía solar fotovoltaica (FV) y continúa en aumento, la tecnología sigue evolucionando y los costos disminuyendo. En esta sección, discutimos cómo aprovechamos la potencialidad del viento para transformarlo en energía viable y sostenible.

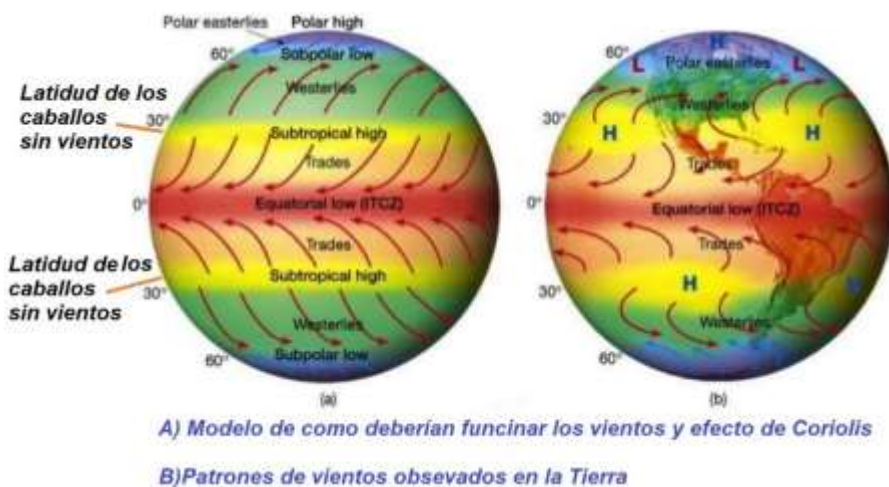


Figura 1. Modelos teóricos de los vientos (izquierda) y patrones realmente observados (derecha).



Figura 2. Brisas marinas: Durante el día, por lo general soplan hacia la tierra, generando lugares ideales para volar barriles, como se ve en la figura.

El origen de los vientos está intrínsecamente ligado al calentamiento desigual de la Tierra por el Sol. Este fenómeno crea diferencias de temperaturas y presiones atmosféricas que impulsan el movimiento del aire desde áreas de alta presión hacia áreas de baja presión, generando así los

vientos. La rotación terrestre también influye en este proceso a través del efecto Coriolis, desviando los vientos y contribuyendo a los patrones climáticos globales, ver **Figura 1**. [1] Estos patrones son esenciales para comprender el clima y las condiciones meteorológicas que afectan nuestro planeta a lo largo de las estaciones. De todos modos, es importante reparar, que es la energía del Sol, en definitiva, la que mueve las masas de aire en la tierra, que luego son aprovechadas para la explotación de la energía eólica en general.

Asimismo, existen fenómenos locales que originan estructuras particulares de vientos debido al calentamiento desigual de las masas de aire. Tal es el caso de las *brisas de tierra-mar*. Durante el día, se generan vientos desde el mar hacia la tierra a lo largo de la costa, revirtiéndose el proceso en horas nocturnas, como se ilustra en la **Figura 2**.

La Figura 3, muestra los vientos promedios en la superficie de la Tierra.

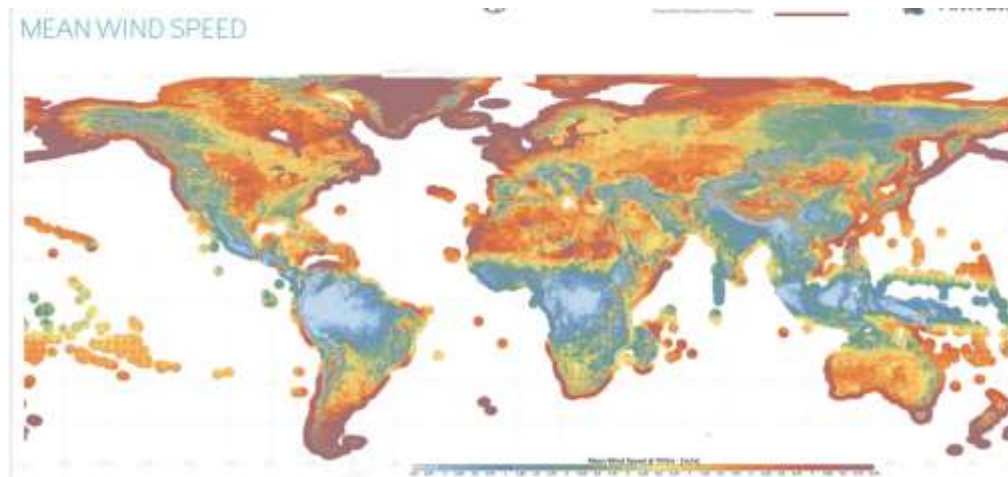


Figura 3. El mapa mundial de los vientos promedios en la superficie de la Tierra. Uno de los lugares más recursos eólicos dispone, es la Patagonia, junto a zonas costeras de Europa y América del Norte, las zonas coloreadas en violeta, con velocidades medias superiores 9 m/s. [2]

En la **Figura 4** se muestra las velocidades medias de los vientos (en *m/s*) en la República Argentina. [3] promedio, de la irradiación solar diaria sobre un plano horizontal, para dos meses del año.

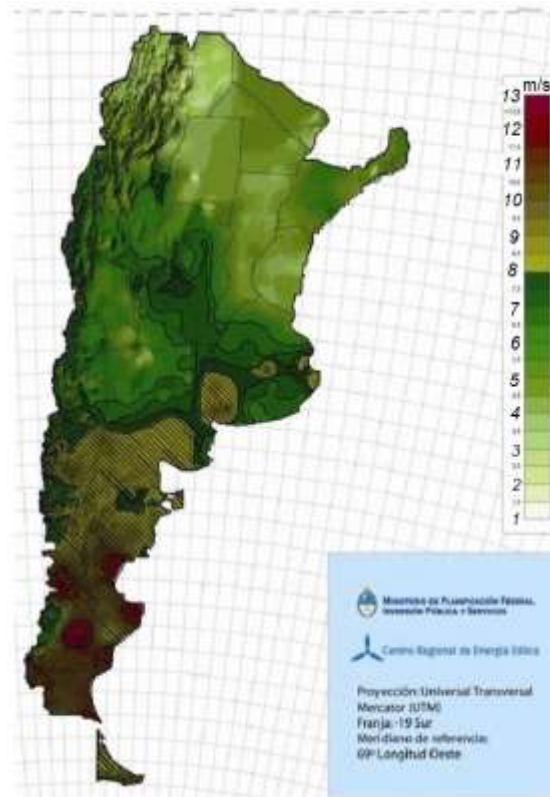


Figura 4. Distribución espacial promedio, de los vientos en Argentina, en *m/s*. En casi todo el territorio centro y sur, las velocidades medias son superiores a los 8 *m/s*, lo cual indica el enorme potencial eólico del país.



Figura 5. Uso de la energía eólica en el pasado. Arriba, navegación a vela en Egipto y el mundo antiguo. Abajo: Molinos de viento en la Mancha, España y en Holanda.

Un aerogenerador es similar a la hélice de un avión, pero funcionando al revés. En lugar de que el motor haga girar un rotor, en un molino de viento, este hace girar la hélice, que a su vez mueve

el eje de un generador eléctrico. En definitiva, de lo que se trata es de usar la energía contenida en una masa de aire en movimiento, en energía útil para generar electricidad, principalmente.

Existen varias tecnologías para transformar el viento en energía. Los generadores eólicos se presentan en dos categorías generales: eje horizontal y eje vertical. Las turbinas de eje vertical vienen en una amplia variedad de estilos. Suelen usarse en pequeñas aplicaciones. Tienen la ventaja que no tienen que ser orientado en una dirección preferencial respecto del viento, siempre que este sea horizontal. Por eso suelen funcionar bien en lugares donde los vientos cambian de dirección con frecuencia y rapidez, pero su potencial de generación es limitado.

La tecnología de los aerogeneradores ha avanzado enormemente, permitiendo que los rotores sean más grandes y eficientes. Aspas más grandes, permiten capturar mayor energía, ya que esta es proporcional al área que ellas barren. Al aumentar el tamaño de las aspas, las torres de los generadores eólicos deben tener mayores alturas, que a su vez permiten capturar corrientes de aire más fuertes. Además, al distribuir las turbinas en diferentes regiones, se captura el viento en distintos momentos y condiciones, asegurando una producción de energía más estable y confiable. Estas estrategias son vitales para integrar la energía eólica en nuestro sistema energético de manera efectiva.

La búsqueda de fuentes de energía más limpias y sostenibles ha sido una constante en las últimas décadas, especialmente con el reconocimiento del impacto ambiental de los combustibles fósiles y la energía nuclear. La energía eólica, en particular, ha experimentado un renacimiento, en las últimas décadas. Este impulso no solo busca mitigar los efectos del cambio climático, sino también ofrecer una respuesta a la volatilidad de los precios de los combustibles fósiles y brindar mayor seguridad energética. Así, la energía eólica se ha convertido en una pieza clave del mosaico energético del presente y futuro.

La energía eólica, al igual que la solar, depende de condiciones ambientales impredecibles. Por ello tanto la energía eólica como la solar tiene un *carácter intermitente*. Por eso, es crucial desarrollar sistemas de almacenamiento eficientes o combinarla con otras fuentes de energía más estables. Es decir, estas fuentes de energía *no son despachables*, es decir no se produce energía “*on-demand*” como si ocurres con la generación eléctrica con combustibles fósiles.

La energía eólica “*off-shore*” (en el mar) está asimismo en constante evolución en varios países, principalmente del norte de Europa. Aunque la energía eólica *off-shore* todavía tiene obstáculos económicos y tecnológicos importantes que superar. Sin embargo, en países con escasez de terrenos llanos y extensos, la explotación de los recursos eólico marinos puede ser una alternativa útil. Este es el caso de países con el Reino Unido, Dinamarca, Holanda, etc. Los vientos fuertes y constantes del mar pueden justificar la mayor inversión. Por otro lado, la energía eólica marina profunda, que utiliza turbinas en aguas más profundas, todavía enfrenta desafíos económicos más significativos que limitan su desarrollo.

Historia de usos de la energía eólica

La energía eólica ha acompañado a la humanidad a lo largo de la historia. Desde las antiguas civilizaciones del Cercano Oriente y Persia, donde se utilizaban molinos de viento de eje vertical para moler granos varios siglos antes de nuestra era, hasta la Edad Media en Europa, donde el diseño evolucionó hacia el molino de viento de eje horizontal, más eficientes y robustos. Estos molinos no solo transformaban el grano en harina, sino que también representaban un avance tecnológico

significativo, al convertir la energía del viento en un movimiento rotacional capaz de realizar trabajo mecánico.

El aprovechamiento de la fuerza de los vientos para mover embarcaciones ya era aprovechado por los antiguos egipcios y aún hoy lo es por los modernos veleros. Las velas han impulsado embarcaciones por mares y océanos por siglos. Aunque hoy se usan más en deportes y recreación, la navegación a vela sigue siendo un arte venerado y una tradición que conecta el presente con un pasado lleno de aventuras.



Molino de viento para bombear agua y tanque australiano para almacenar el agua

Figura 6. Los molinos de viento se difundieron en Argentina desde fines del siglo XIX, aun hoy son parte de del paisaje rural del país. Se estima que, en el sector rural nacional, hay cerca de unos 200 000 molinos.

En el siglo XIX, en los Estados Unidos se desarrolló una tecnología muy apta para el bombeo de agua, esencial en la agricultura y la vida en las vastas llanuras y praderas americanas. Estos fueron los famosos molinos multipalas para el bombeo de agua que se difundieron por todo el mundo, ver **Figura 6**. Esta tecnología tuvo gran recepción en Argentina y de hecho fue uno de los países pioneros en utilizar la energía eólica para transformar la energía cinética del viento en energía mecánica para el bombeo de agua del subsuelo muy usado desde finales del siglo XIX. Esta extracción de agua era utilizada principalmente para riego y bebedero de ganado. Además, asociado a los famosos *tanques australianos*, constituyeron ejemplos pioneros de sistema de generación y acumulación eólico. Los molinos de viento son parte cotidiano del paisaje rural argentino.

El uso de veletas (o *wind vane*), un dispositivo que permitía al molino orientarse automáticamente hacia la dirección del viento, fue una innovación clave que mejoró la eficiencia de estos sistemas. Hoy en día, la energía eólica sigue siendo un recurso vital, con modernas turbinas que generan electricidad para alimentar nuestras ciudades y hogares, demostrando que el ingenio humano y la fuerza de la naturaleza pueden trabajar juntos en armonía.

Física de la energía asociada al viento

Consideremos una masa de aire, de densidad ρ , moviéndose con velocidad \mathbf{V} . El volumen de análisis, es un cilindro a área A , con su eje paralelo a la velocidad \mathbf{V} , como se muestra esquemáticamente en la **Figura 7**. De los conceptos básicos de física [4], [5]

$$\text{Caudal Volumetrico} = \frac{dV}{dt} = Q = A \cdot v \quad (\text{xx.1})$$

y

$$\text{Caudal masico} = \frac{dm}{dt} = \dot{m} = Q_m = A \cdot \rho \cdot v. \quad (\text{xx.2})$$

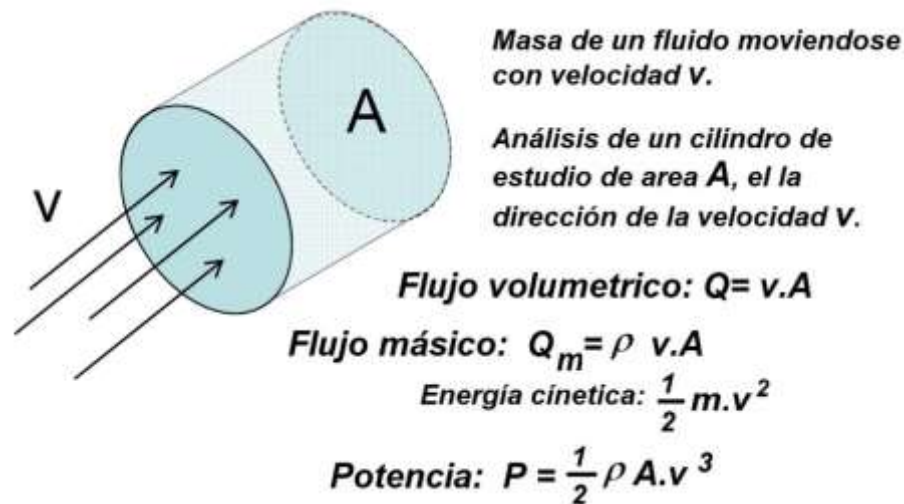


Figura 7. Masa de aire de densidad ρ , moviéndose con velocidad v . Volumen de análisis, un cilindro a área A , con su eje paralelo a la velocidad v . Q = flujo volumétrico que atraviesa el área A . P es la potencia o energía transportada por la masa de aire que pasa por el área A en la unidad de tiempo.

Por otra parte, la energía transportada por el aire a través del área A por unidad de tiempo, es decir la *potencia transportada* por el aire en movimiento será:

$$\text{Caudal de energía} = P = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} \dot{m} v^2 = \frac{1}{2} A \cdot \rho \cdot v^3. \quad (\text{xx.3})$$



Figura 8. Diagrama esquemático del cambio de velocidad de viento producido por la presencia de un aerogenerador.

Esta es la energía total asociada a una masa de aire que pasa por el área A . Si en el camino del aire interponemos un aerogenerador, como se muestra en la **Figura 8**. La velocidad del aire pasará de su valor inicial v_1 a otra menor, v_2 después del molino. Por conservación del flujo, el área A_2 , deberá ser mayor que el área A_1 inicial, ($v_1 \cdot A_1 = v_2 \cdot A_2$) como se ve en la **Figura 8**. Por balance energético, la máxima energía que el molino de área A puede extraer del viento de velocidad inicial v_1 , será:

$$\text{Máxima Potencia Aerog.} = P_{max} = \frac{1}{2} \rho \cdot (A_1 v_1^3 - A_2 v_2^3), \quad (\text{xx.4})$$

que también puede escribirse como:

$$\text{Máxima Potencia Aerog.} = P_{max} = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot A_{molino} v_{viento}^3 \quad (\text{xx.5})$$

Donde hemos supuesto que: $v_{viento} = v_1$. C_p es un coeficiente de aprovechamiento eólico, que lógicamente será menor que 1. Esto se debe a que v_2 , nunca puede ser nula, ya que significaría la detención de movimiento del aire. El valor de C_p en definitiva dependerá del tipo de tecnología del aerogenerador usado.

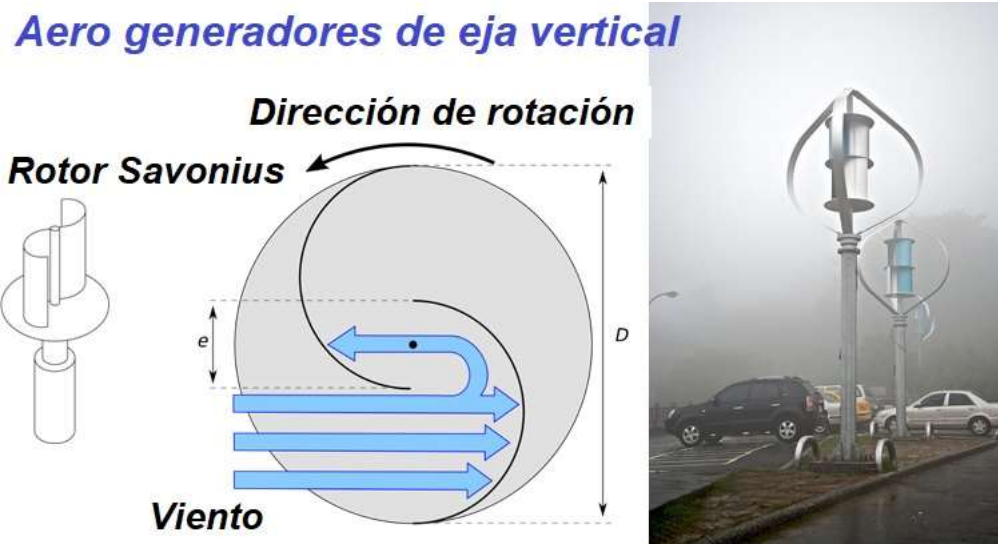


Figura 9. Aerogeneradores de eje vertical.

Por ejemplo, para molinos de eje horizontal, el valor de C_p , conocido como Límite de Betz, es del 0.59. Los aerogeneradores modernos pueden extraer entre un 75 % a un 80 % del límite de Betz, o sea alrededor del 45% de la energía del viento. Para un aerogenerador de eje vertical, ver **Figura 9**, el límite de Betz es de 0.18. Ver **Figura 10**. Como se indicó previamente, las turbinas de eje vertical representan una solución ingeniosa para la generación de energía en áreas donde los patrones de viento son impredecibles. Su diseño único les permite capturar el viento desde cualquier dirección, lo que las hace ideales para entornos urbanos o montañosos con vientos erráticos. Sin embargo, como se ve en la parte central de la **Figura 9**. El viento que impulsa con más efectividad en una dada dirección, también los hace, con menos efectividad, en el sentido opuesto. Lo que en definitiva causa que el valor de C_p sea en promedio, un tercio menor que el valor para una turbina de eje horizontal. Además, como el área interceptada de viento con un aerogenerador de eje horizontal se puede hacer más grande, simplemente agrandando el tamaño de las aspas. Con lo que es necesario hacer la torre más alta, lo que a su vez contribuye a tener vientos más intensos y estables. Por esta

razón, en los parques eólicos modernos, la opción preferida son los aerogeneradores de eje horizontal, ver **Figura 17**.

La aerodinámica de las turbinas eólicas ha evolucionado significativamente desde los días pioneros de Betz [6] y Joukowski, [7] a la teoría del impulso del elemento de pala de Glauert, que sigue siendo un pilar en el diseño de turbinas eólicas modernas. [8] Los avances en esta tecnología han sido muy grandes. [9]

En general, la potencia que puede obtenerse de un molino o turbina real, se puede escribir en forma simplificada, [9] teniendo en cuenta que hay una eficiencia característica de cada diseño ε_{dis} , que hace que un dado molino o turbina, en definitiva no tenga la máxima potencia posible, prevista por el límite teórico dada por la Ec.(xx.5), por lo tanto:

$$Potencia\ Turbina = \varepsilon_{dis} \cdot P_{max} = \frac{1}{2} \cdot \varepsilon_{dis} \cdot C_p \cdot \rho \cdot A_{Aero} v_{viento}^3 \quad (xx.6)$$

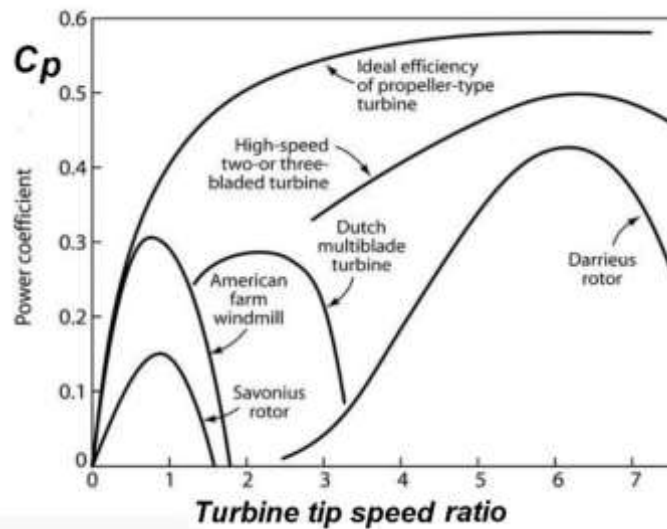


Figura 10. Comparación la variación de los coeficientes C_p para distintos aerogeneradores. El "tip speed ratio" (TSR) o relación de velocidad en la punta del asa y la velocidad real del viento. $TSR = \omega \cdot R_{aspa} / v_{viento}$.

Un hecho notable de esta expresión, es la dependencia de la potencia con el área barrida (A_{Aero}), razón por la cual, los aerogeneradores tienen aspas más grandes cada vez y son consecuentemente más altos. ¡Pero lo más notable es la variación de la potencia con v^3 ! Por lo tanto, si la velocidad del viento se duplica, ¡la potencia se multiplica por 8! Como regla general, la mayoría de los aerogeneradores comienzan a generar energía con vientos que superan los 3 m/s. Pero por lo general estas máquinas se apagan automáticamente a velocidades superiores a aproximadamente 25 m/s. Esto es una medida de seguridad. Estos límites garantizan que las turbinas funcionen dentro de parámetros seguros y eficientes, aprovechando al máximo los recursos naturales sin comprometer su integridad física y estructural.



Figura 11. Esquema de las componentes de una turbina eólica o aerogenerador

La evolución de las turbinas eólicas refleja un equilibrio entre la ingeniería y las demandas económicas. Un problema interesante en los aerogeneradores es el número de aspas o palas que un aerogenerador debe tener. Se recomienda un **número impar de aspas** por razones de estabilidad, pero desde el punto de vista económico, mientras menos aspas tenga el aerogenerador, menos costoso será. [10] Cuando menos palas tiene un aerogenerador, menor es su resistencia al girar en el aire. Sin embargo, las turbinas de tres palas dominan actualmente por su estabilidad y eficiencia, pero nuevas innovaciones en el diseño de turbinas de dos palas podrían revolucionar el mercado. De hecho, hay algunos diseños de una sola pala. Estas prometen reducir costos y mejorar la eficiencia energética, aunque con un ligero compromiso en la estabilidad general.



Figura 12. Componentes de una turbina moderna de eje horizontal. A la derecha vemos las principales componentes internas del Nacele o góndola.

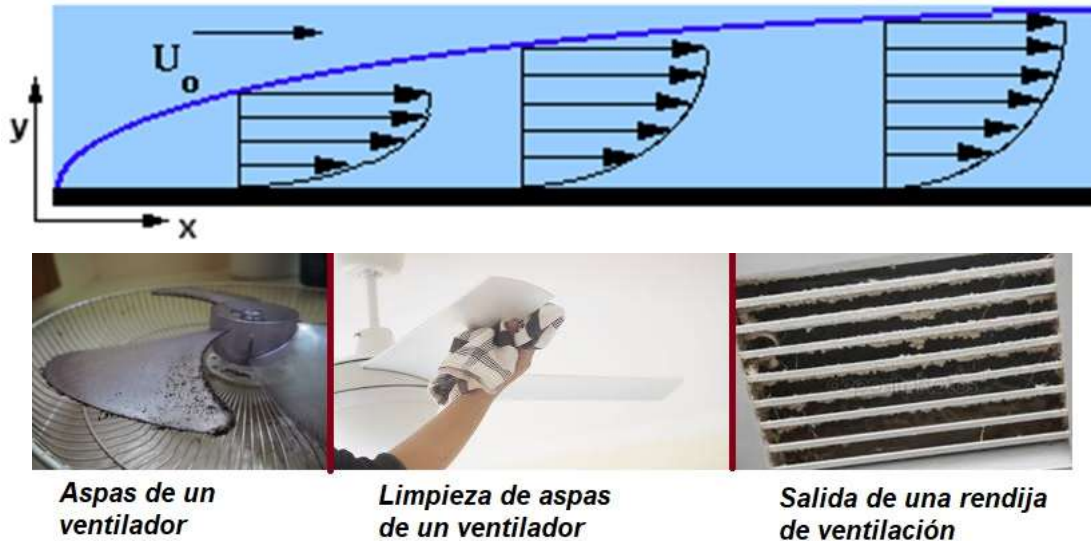


Figura 13. Capa límite. Arriba: perfil de velocidad de un fluido que circula hacia la derecha con velocidad U_0 , lejos de la superficie sólida inferior. Nótese que sobre la superficie sólida la velocidad es nula. Abajo: ilustraciones del efecto de la capa límite en diversas situaciones cotidianas.

Ejemplo1: Imaginamos que deseamos bombear agua de un pozo a 50 m de profundidad con un molino multipalas, (ver **Figura 6**) para abastecer un consumo de agua de 1000 litro/diarios. A) Calcular la potencia mecánica que tendrá el molino si tiene un con un rendimiento de diseño $\epsilon_{dis} = 70\%$. El molino de viento es de 8 pies[‡] (2,4 m de diámetro) y el viento sopla a unos 25 km/h al menos 6 horas por día.

Solución: según la **Figura 10**, para un *American farm windmill*, podemos adoptar un $C_p = 25\%$ (valor medio). Como tamaño de las palas es $R = 1.2$ m, el área barrida será $A = 4.5$ m². Para una velocidad $v = 25$ km/h = 6.9 m/s, la potencia que este aerogenerador puede desarrollar, con $\rho = 1.3$ kg/m³, según la Ec.(xx.5) sería:

$$Potencia Turbina = \frac{1}{2} \cdot \epsilon_{dis} \cdot C_p \cdot \rho \cdot A_{Molino} v_{viento}^3 = 338 \text{ W} \quad (xx.7)$$

Nótese que si la velocidad se reduce a 20km/h la potencia sería 173W!. Para extraer una masa m de agua de una altura: h , la energía que necesitamos es: mgh . Si esto lo hacemos con la el aerogenerador de $P = 338$ W, en un tiempo dt , tenemos: $mgh = P \cdot dt$, por lo que el tiempo de bombeo en estas condiciones, sería $dt(s) = 1000\text{kg} \times 9.8\text{ms}^{-2} \times 50\text{m} / 338\text{W} = 726 \text{ s} = 24$ min. Desde luego, aquí no hemos tenido en cuenta las pérdidas de energía en el bombeo, que desde luego siempre están presente. Pero, aun con una eficiencia de bombero del 75%, el tiempo serio: 32 min. Pero si la velocidad de viento se reduce a 20 km/h, este tiempo sería: 63 min.

Efecto de la rugosidad del terreno: La rugosidad del terreno es un factor crucial en la generación eólica, ya que influye en la velocidad y la turbulencia del viento. Este efecto está íntimamente relacionado con lo que se conoce como el efecto de *Capa Límite* o *Boundary Layer*. [11], [12] La capa límite es un concepto fascinante en la mecánica de fluidos, crucial para entender cómo los fluidos interactúan con las superficies sólidas. Cuando un fluido se mueve en contado con un sólido,

[‡] Los molinos de viento rurales se especifican por su diámetro en pies: así son comunes modelos de 6, 8, 10 hasta 16 pies.

las capas de fluido en contacto con él no se mueven, es decir la capa contigua a un sólido, está siempre en reposo relativa a éste, como se ilustra esquemáticamente en la Figura 13. Este efecto se observa en muchas situaciones cotidianas, por ejemplo, seguramente el lector habrá observado que muchas veces las aspas de un ventilador o la salida de una ventilación de una casa o edificio tienen polvo adherido. En principio, podría esperarse que el aire circulando a su alrededor lo remueva y los limpie. Pero sin embargo no es así. Para limpiar las aspas de un ventilador o una rendija de ventilación, es necesario en general removerlas fregando con una rejilla o esponja. Esto es así, porque debido al efecto de capa límite, el aire justo en contacto con estas superficies, no se mueve o se mueven solidaria con ella. De tal modo, que, sobre la superficie sólida, no hay corriente de aire moviéndose y las partículas de polvo y pelusas pueden permanecer sobre estas superficies sin ser perturbadas. En general, el espesor de la capa límite depende de las condiciones de velocidad del fluido y de la *rugosidad de la superficie*. Cuanto más rugosa es la superficie, mayor es el *espesor de la capa límite*. Asimismo, la fricción que sufre un fluido al circular por un caño depende críticamente de la rugosidad de la superficie interior del mismo. En general, a mayor rugosidad, mayor roce con el fluido. En parte, por la ausencia de obstáculos, es que los generadores *off-shore* tiene la posibilidad de capturar buenos vientos.

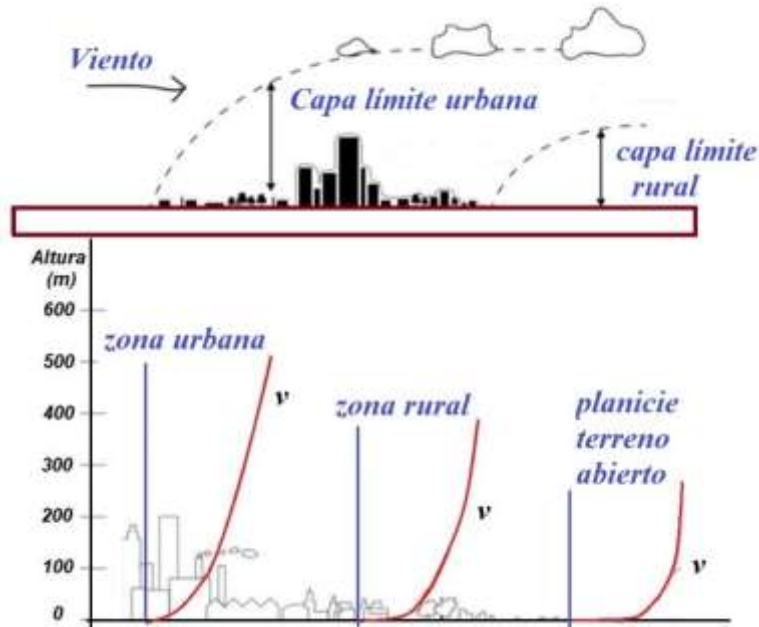


Figura 14. Perfiles de velocidad de viento en distintos tipos de terrenos: Ciudades con edificios, pequeños centros periurbanos y planicies o playas abiertas.

La interacción entre el viento y las estructuras urbanas es un factor crucial en la generación de energía eólica. La rugosidad de la superficie altera significativamente el perfil de velocidad del viento y el espesor de la capa límite, lo que a su vez puede influir en la cantidad de energía que se puede extraer del viento. Ver **Figura 14**. Los edificios pueden crear zonas de turbulencia que afectan la eficiencia de las turbinas eólicas, un fenómeno conocido como el efecto de estela. Además, la rugosidad del terreno, especialmente en áreas urbanas con edificios altos, puede alterar el perfil de velocidad del viento y la capa límite atmosférica, lo que impacta directamente en la cantidad de energía eólica capturable. Por lo tanto, es esencial considerar estos factores al diseñar y ubicar turbinas eólicas en zonas urbanas.

Sin embargo, la energía eólica se recolecta principalmente en terrenos llanos lejos de las ciudades y debe transportarse largas distancias desde su punto de origen. Esto plantea importantes desafíos para su transporte, tanto financieros y de ingeniería. La energía eólica urbana parece una solución innovadora, pero enfrenta obstáculos como la integración en la red y la aceptación ciudadana.

Por otra parte, como se indicó previamente, los terrenos llanos, como las praderas o pampas, zonas costeras o en alta mar, con buenos vientos, las condiciones de explotación del recurso eólico son en general promisorias. Desde luego, siempre se deben realizar estudios preliminares de relevamiento de recurso solar previamente, por al menos un año, antes de emprender un emplazamiento eólico, de modos de tener cierta certeza de que el recurso eólico es suficiente y también para poder optimizar el diseño de las la infraestructura a instalar. Ver **Figura 14**.



Figura 15. Molinos de viento en zonas rurales. Muchos molinos, son instalados en medio de zonas arboladas, o se foresta alrededor del molino, con lo que los vientos se atenúan y convierten a estos dispositivos inoperativos.

En zonas rurales, es frecuente encontrar molino de viento en medio o cerca de arbolada. Ver **Figura 15**. Estos molinos, así rodeados muy pronto deja de prestar su función y se vuelven inoperativos.

Energía eólica en ambientes urbanos

Varios estudios en entornos urbanos muestran que la colocación de aerogeneradores en terrazas de edificios puede ser efectiva, pero también riesgosa, además de la alteración de los patrones de viento que los edificios generan, hay varios impactos ambientales y visuales que los aerogeneradores producen en zonas urbanas, como ruidos, efecto de *flickering* de las aspas de los molinos, aunque depende significativamente de la altura y la disposición de los obstáculos cercanos. El efecto de *flickering* en las aspas de los molinos de viento se refiere a las fluctuaciones rápidas y repetitivas en la intensidad de la luz que puede ser causada por el movimiento periódico de las aspas cuando pasan frente al sol. Este fenómeno puede crear un patrón de sombras en movimiento que resulta en un efecto de parpadeo, el cual puede ser molesto o incluso perjudicial para algunas personas. [13]



Figura 16. Ejemplo de sistemas eólicos adaptados para ámbitos urbanos. Una apuesta que aún presenta diversos desafíos.

Retos de la Energía Eólica Urbana

- ✓ Edificios altos y agrupaciones eficientes pueden extraer mejor el potencial eólico.
- ✓ En edificios convencionales y el espacio estrecho entre ellos afectan la velocidad del viento.
- ✓ Se requiere una planificación urbanística específica para maximizar la eficiencia de sistemas de energía eólica.
- ✓ La efectividad de las turbinas varía según las condiciones del flujo de entrada en cada ubicación.

Impacto Ambiental de las Turbinas Eólicas: Colisiones

- ✓ Las aspas de las turbinas con los extremos de sus aspas moviéndose a gran velocidad, causan mortalidad y lesiones en aves y murciélagos.
- ✓ Las turbulencias creadas por los rotores desorientan a las aves.
- ✓ Las turbinas reducen la densidad de aves en áreas cercanas, alejándolas cerca de 1 km o más y disminuyendo su densidad.
- ✓ Las aves evitan volar cerca de las turbinas, afectando sus rutinas de vuelo y hábitat.
- ✓ Las aves deben realizar rodeos para evitar las turbinas, aumentando su gasto energético.
- ✓ Este efecto se amplifica en rutas migratorias y áreas de alta concentración de aves y murciélagos.

Energía eólica marina o Eólica *off-shore*

La energía eólica marina u *off-shore* tiene un potencial enorme, aprovechando los vientos consistentes y fuertes que se encuentran en el mar. Estas turbinas, al no ocupar espacio terrestre, evitan el impacto en tierras cultivables o en hábitats terrestres, lo que las hace particularmente atractivas para países con costas extensas, y escasos terrenos planos. Sin embargo, los desafíos de esta tecnología no son menores: ***los costos de instalación, operación y mantenimiento son significativamente más altos en comparación con las turbinas terrestres u on-shore***, además la construcción en el mar puede ser compleja, a esto se suma los ***efectos de corrosión*** de los diversos componentes en el mar y su impacto ambiental y ecológico en los ambientes marinos. A pesar de esto, países como el Reino Unido y Dinamarca están liderando la inversión en esta tecnología, reconociendo su potencial a largo plazo para contribuir a una matriz energética más limpia y sostenible. A medida que la tecnología avanza y se optimizan los procesos, es probable que veamos

un aumento en la adopción de la energía eólica marina en otros lugares, especialmente en áreas donde los recursos terrestres son limitados o ya están siendo utilizados intensivamente.



Figura 17. Izquierda, parque eólico “*on-shore*”. Derecha, parque eólico “*off-shore*”.

La energía eólica, con su capacidad para generar electricidad sin emisiones contaminantes, representa una fuente de energía renovable y sostenible que está ganando terreno en el panorama energético mundial. Su naturaleza inagotable y abundante la convierten en una opción atractiva para la diversificación energética y la seguridad energética de un país. Además, los avances tecnológicos continúan mejorando la eficiencia y reduciendo los costos, lo que contribuye a su creciente competitividad frente a las fuentes de energía tradicionales.

La estabilidad de las turbinas eólicas es un tema fascinante y complejo. Es interesante cómo el número de palas afecta directamente la resistencia y el balance. Con dos palas, la turbina enfrenta desafíos únicos debido a los cambios en el momento angular, pero con tres, se logra un equilibrio que permite un movimiento más fluido y constante. Este diseño ayuda a las turbinas a capturar eficientemente la energía del viento sin sacrificar la estabilidad. ¡La ingeniería detrás de estas máquinas es realmente impresionante!

Otro aspecto importante de tener en cuenta es el tema de la distancia mínima entre dos aerogeneradores. La distancia mínima entre dos aerogeneradores generalmente se establece para minimizar la interferencia aerodinámica entre ellos y optimizar la eficiencia del parque eólico. Una regla comúnmente aceptada es que la distancia debe ser de al menos 3 a 5 veces el diámetro del rotor en dirección perpendicular al viento predominante y de 7 a 10 veces el diámetro del rotor en la dirección del viento predominante. Sin embargo, varios estudios de la dinámica de los fluidos en la Universidad Johns Hopkins [14], [15] señalan que el espacio óptimo entre turbinas para obtener un mayor **rendimiento**, en grandes parques eólicos, *es de aproximadamente 15 veces el diámetro del rotor*. Así, una turbina de 3 MW, y 160 m de diámetro de paletas, debería separarse unos 1200 m una de otra, es decir, la densidad de energía producida, sería de unos 2 MW/km².

Reflexiones finales

A pesar de los desafíos iniciales, como la inversión de capital y la necesidad de infraestructura para la transmisión de energía, el potencial de la energía eólica para contribuir significativamente a un futuro energético limpio y sostenible es indiscutible. Con la implementación de políticas adecuadas y el apoyo a la innovación, la energía eólica puede superar sus desventajas y jugar un papel crucial en la transición hacia una economía baja en carbono.

Un concepto muy útil para comparar los costos de generación eléctrica de distintas tecnologías es el costo nivelado de la energía (LCOE). Esta es una métrica que toma en cuenta todos los costos a lo largo de la vida útil de una planta y dividirlos por la energía total generada, el LCOE ofrece una comparación estandarizada del costo por unidad de energía, lo que facilita la toma de decisiones informadas en la planificación de inversiones y la selección de tecnologías energéticas más convenientes.

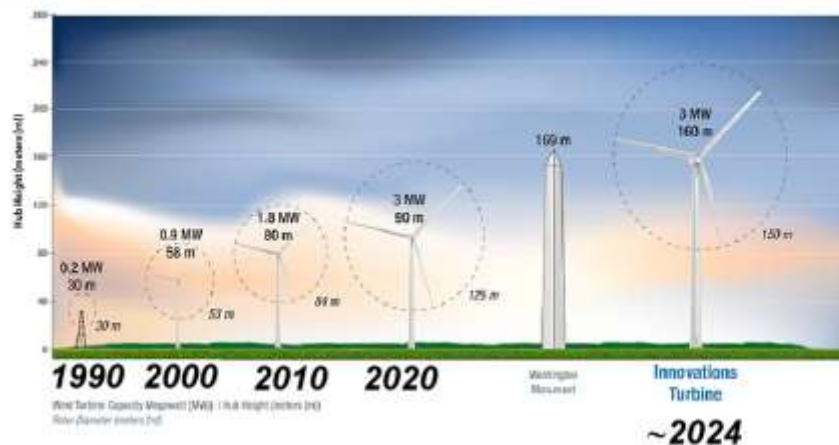
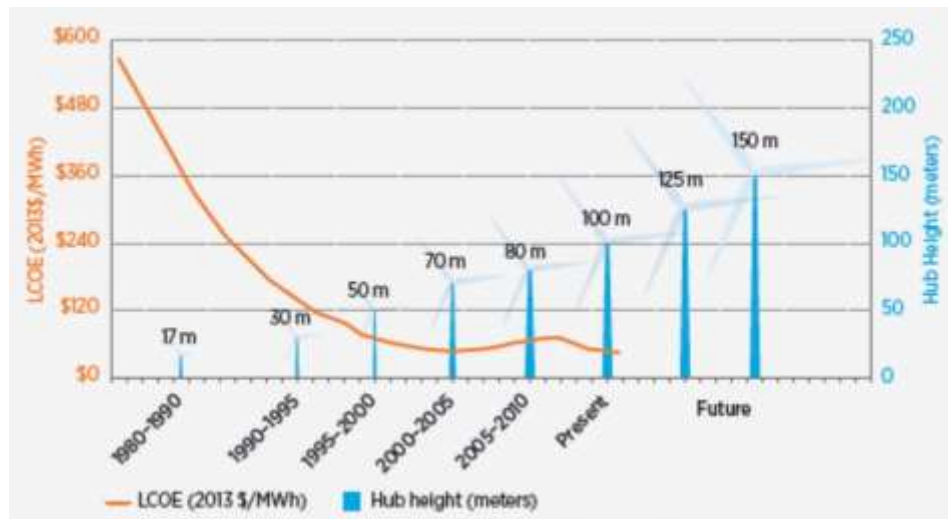


Figura 18. Arriba, Variación del LCOE de los generadores eólicos en el mundo y su tamaño a lo largo del tiempo. Abajo, variación de las dimensiones de los generadores eólicos “on-shore” y sus potencias características y diámetros de rotor a lo largo del tiempo. [16]

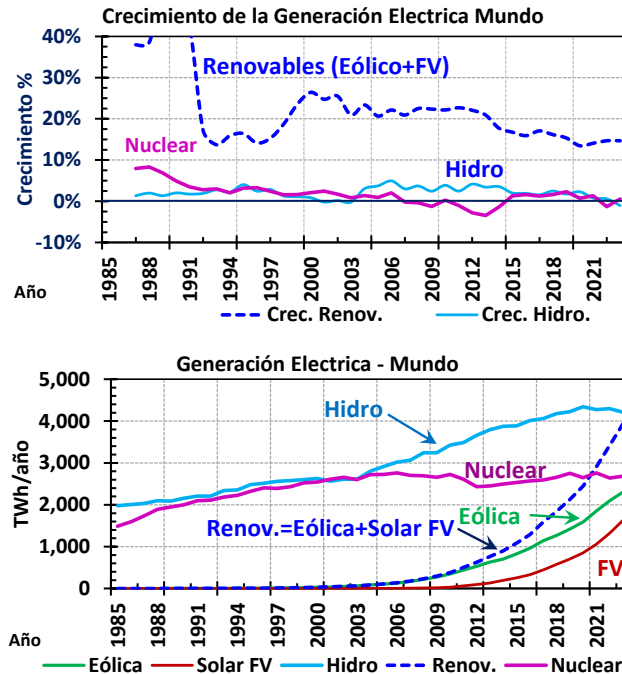


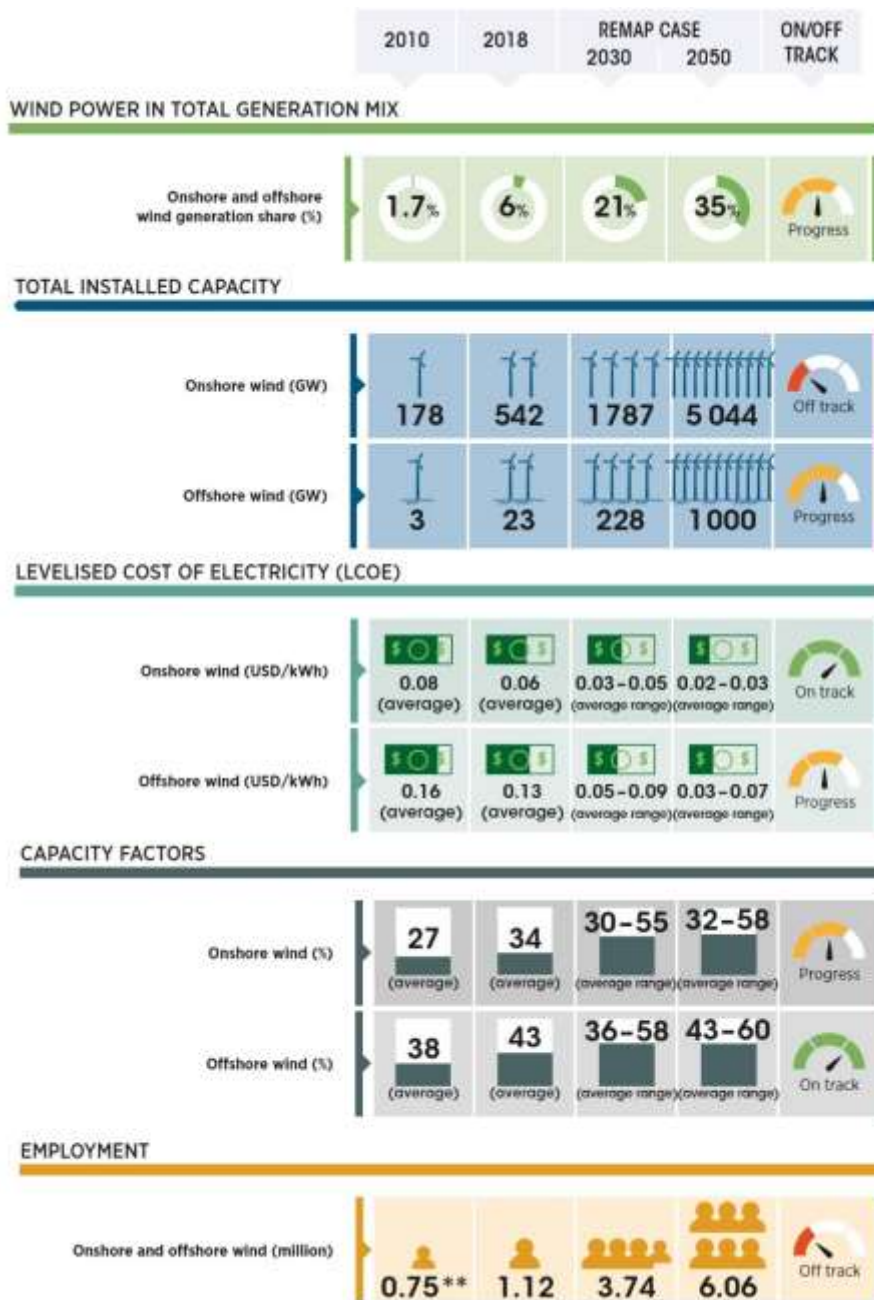
Figura 19. Variación de la generación eléctrica renovable y nuclear en el mundo, exceptuando las fósiles. Entre 1985 y 2022. Arriba, tasa de crecimiento anual. Nótese que las renovables (Eólica +Solar FV) son la de mayor crecimiento en las últimas décadas. Por otra parte, el crecimiento la generación nuclear (0%) e hidráulica (4%), han sido muy bajas en los últimos años. [17]

En las **Figura 18** y **Figura 19** se muestra a evolución de los costos nivelados de la generación eólica a lo largo de varios años, como se ve, la caída de precios es muy notable.

Contexto Actual de las Energía Eólica-Internacional

Estamos presenciando cambios significativos en el panorama energético mundial, evidenciados por un desplazamiento de las inversiones hacia fuentes renovables en detrimento de los hidrocarburos. En 2015, la capacidad renovable instalada generó suficiente energía para superar el incremento de demanda total de ese año, marcando un desplazamiento neto a favor de las renovables. La **Figura 19** muestran el notable crecimiento de la generación de electricidad renovables en el mundo.

Las ER están revolucionando la forma en que el mundo piensa sobre la electricidad. Con el poder del sol, el viento y el agua, muchos países están encontrando maneras innovadoras de combatir el cambio climático y llevar energía a muchas comunidades remotas. Las minirredes solares, en particular, están mostrando ser una solución prometedora para proporcionar energía sostenible y accesible, marcando un camino luminoso hacia un futuro más verde y equitativo para todos.



IRENA : Future of Wind Energy 2019

Figura 20. Infografía de IRENA (2019), Future of wind. Indica el estado actual de la industria y su proyección para el 2030.

El *factor de capacidad* es un concepto crucial para entender la eficiencia de las turbinas eólicas. No solo refleja la cantidad de energía generada, sino que también revela cómo factores externos e internos pueden influir en el rendimiento. Este parámetro refleja cuán bien una turbina convierte el viento disponible en energía eléctrica. Las turbinas marinas suelen tener un factor de capacidad más alto debido a la presencia de vientos más fuertes y constantes en el mar, lo que las hace particularmente valiosas para la generación de energía eólica.

El factor de capacidad se calcula usando la siguiente fórmula:

$$\text{Factor de Capacidad} = \frac{\text{Producción real de electricidad}}{\text{Producción máxima posible}} \quad (\text{xx.6})$$

Aquí tienes un desglose más detallado:

1. **Producción Real de Eletricidad:** Es la cantidad total de electricidad que la turbina eólica realmente genera durante un período específico, típicamente un año.
2. **Producción Máxima Posible:** Es la cantidad de electricidad que la turbina generaría si operara a su capacidad nominal máxima (o capacidad nominal) de manera continua durante el mismo período.

Por ejemplo, si una turbina eólica tiene una capacidad nominal de 2 megavatios (MW) y produce 4,380 megavatios-hora (MWh) de electricidad en un año, el factor de capacidad se puede calcular de la siguiente manera. Calculamos la producción máxima posible de energía: hay 8,760 horas en un año (24 horas/día * 365 días/año), así que la producción máxima posible de energía = 2 MW * 8,760 horas = 17,520 MWh. Por lo tanto el Factor de Capacidad = $(4,380 \text{ MWh} / 17,520 \text{ MWh}) \times 100\% \approx 25\%$. Esto significa que la turbina operó al 25% de su capacidad máxima posible durante el año. Las **Figura 20** muestra la evolución esperada del factor de capacidad de las distintas tecnologías de generación eólica.

La transición hacia energías renovables y eficiencia energética es crucial para alcanzar los objetivos climáticos globales. La energía eólica jugará un papel clave en este cambio, con el potencial de generar una porción significativa de la electricidad mundial de manera sostenible. Para 2050, se espera que tanto la energía eólica terrestre como la marina sean líderes en producción energética, requiriendo un aumento significativo en instalaciones y capacidad. Este esfuerzo colectivo no solo reducirá las emisiones de CO₂, sino que también promoverá un futuro energético más limpio y seguro. La International Renewable Energy Agency, IRENA, en su informe de 2019, muestra algunos aspectos actuales de la energía eólica y sus proyecciones para en futuro. Ver **Figura 20**. [18]

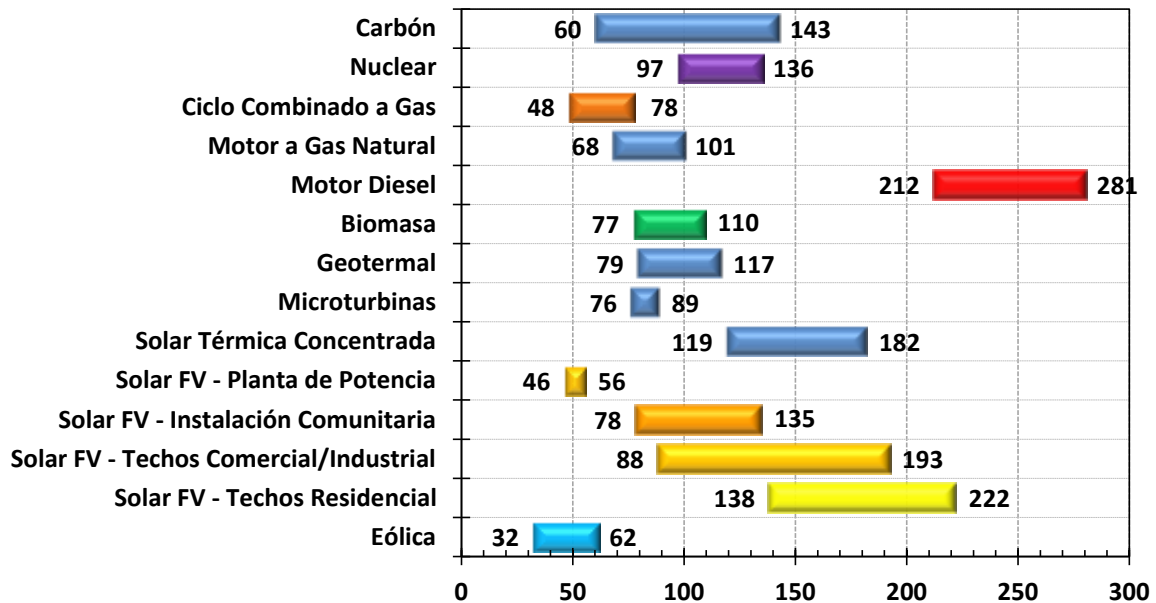


Figura 21. Costos nivelados de la energía para Estados Unidos (sin subsidios) calculado con datos de precios del año 2016 [19]. Es importante resaltar que los precios de los combustibles son menores que en Argentina, por lo que *Energía y Medio Ambiente - UNSAM 2024 - S. Gil* 36

la generación convencional en nuestro país debiera ser aún más cara (teniendo en cuenta que los combustibles representan aproximadamente el 80% del costo de generación convencional).

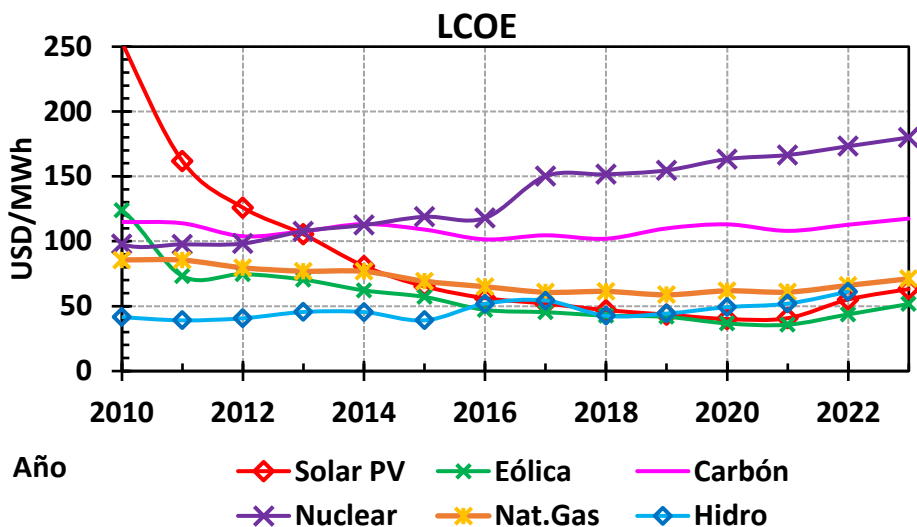


Figura 22. Costo nivelado de la electricidad, (LCOE) es un indicador del costo actual de la generación de la energía durante el ciclo de vida del sistema de generación eléctrica de 2009 a 2020. [20] De las principales tecnologías que alcanzaron maduras en la última década. En particular, la curva de gas natural corresponde a la tecnología de ciclos combinados.

En las **Figura 21** y **Figura 22** se muestra en el estado actual de los precios nivelados de la energía (LCOE) hacia fines de 2019 y su evolución. La energía eólica y solar fotovoltaica (FV) han alcanzado la paridad de costos con las energías fósiles, especialmente el gas natural, desde hace casi una década. La tendencia de precios decrecientes de las energías renovables continúa. Sin embargo, su intermitencia intrínseca impide que estas energías sean *despachables*, es decir, disponibles cuando se necesitan y no solo cuando el recurso está disponible. Esta es una de las grandes limitaciones actuales de las energías renovables.

Hasta que los sistemas de almacenamiento sean lo suficientemente grandes y económicamente accesibles, las centrales a gas seguirán siendo un complemento clave para satisfacer la demanda. Las centrales a gas pueden encenderse y apagarse rápidamente, lo cual es crucial para satisfacer la demanda eléctrica de nuestras sociedades. Así, en este contexto histórico, las energías renovables y las centrales a gas de ciclo combinado son piezas claves para satisfacer las demandas de energía en el mundo. Además, dado su costo accesible y menor impacto ambiental, el gas juega un rol crucial en la transición energética global.

La expansión de la energía eólica ha tenido una expansión sostenida. Con Asia, especialmente China, liderando. Con las inversiones proyectadas en aumento, el futuro de la energía renovable es prometedor. La disminución en el costo nivelado, ver **Figura 22**, de la electricidad hace que la energía eólica sea más atractiva y competitiva, iniciando una era donde la sostenibilidad y la economía van de la mano. Este crecimiento es vital para un futuro más verde y limpio.

La energía eólica marina (*off-shore*) es posible que se convierta en una de las fuentes de energía económica y sostenible. Para 2030, el Costo Nivelado de la Electricidad (LCOE) de la energía eólica

marina es previsible que disminuya significativamente, compitiendo con los combustibles fósiles. Para 2050, los costos podrían situarse entre USD 0,03 y 0,07 por kWh, mostrando el potencial de la energía eólica marina como una alternativa limpia y renovable en la matriz energética global.

A continuación, resumimos las Ventajas y Desventajas de la Energía eólica:

Ventajas de la Energía eólica:

- ✓ **Bajo impacto ambiental** que las energías convencionales.
- ✓ Es una fuente de energía segura y renovable.
- ✓ No produce emisiones a la atmósfera ni genera residuos, salvo los de la fabricación de los equipos y el aceite de los engranajes.
- ✓ Las instalaciones son móviles, y su desmantelación permite recuperar totalmente la zona.
- ✓ Tiene un rápido tiempo de construcción (inferior a 6 meses).
- ✓ Es una buena fuente de energía para sitios aislados.
- ✓ Proporciona beneficios económicos a los municipios afectados (canon anual por ocupación del suelo) y es un recurso autóctono.
- ✓ Su instalación es compatible con muchos otros usos del suelo.
- ✓ Se crean puestos de trabajo.
- ✓ Se **complementan bien con las centrales térmicas e Hidráulicas** (y bajo ciertas condiciones, con las nucleares).
- ✓ Fácil Transporte e Instalación

Entre las desventajas:

- ✓ **Intermitencia.** No garantizan la disponibilidad en todo momento.
- ✓ Algunas necesitan de un **gran espacio** para poder desarrollarse.
- ✓ **Impacto visual:** Su instalación genera una alta modificación del paisaje.
- ✓ **Impacto sobre la avifauna:** Principalmente por el choque de las aves contra las palas y efectos desconocidos sobre la modificación de los comportamientos habituales de migración y anidación.
- ✓ **Impacto sonoro:** El roce de las palas con el aire produce un ruido constante, por lo que

El ruido es un factor importante a considerar en el desarrollo de parques eólicos. Aunque es cierto que las turbinas de viento generan ruido, los avances tecnológicos están ayudando a reducirlo significativamente. Por ejemplo, el diseño de las palas y la optimización de la caja de cambios son áreas clave de innovación. Además, la planificación cuidadosa del sitio y las regulaciones de zonificación pueden minimizar el impacto del ruido en las comunidades cercanas. Así, mientras la energía eólica sigue siendo una fuente renovable prometedora, la gestión del ruido es un aspecto que continúa mejorando con la investigación y el desarrollo.

El uso de termoplásticos reciclables en la fabricación de palas para turbinas eólicas representa un avance significativo en la sostenibilidad de la energía renovable. Estos materiales no solo

permiten una mayor facilidad de reciclaje al final de su vida útil, sino que también ofrecen una resistencia adecuada frente a los desafíos ambientales.

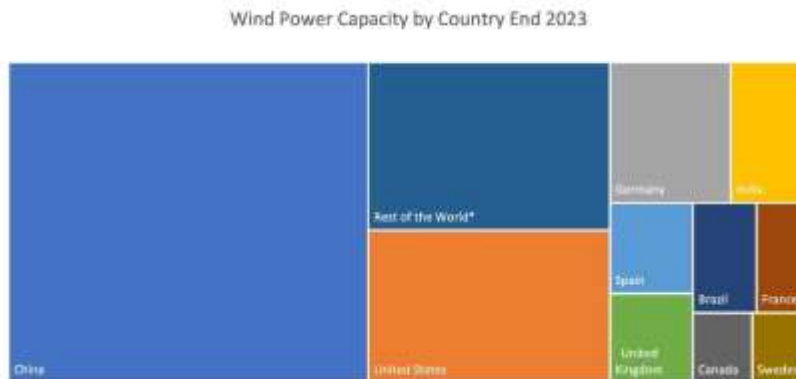


Figura 23. Distribución de la capacidad de generación eólica en el mundo a fines de 2023. [18]

La preocupación por los impactos ambientales de los aerogeneradores es un tema de gran importancia. Una de ellas es el **Impacto en la Fauna**.

- ✓ **Colisiones:** Las aves y los murciélagos pueden colisionar con las aspas, torres y otras estructuras de las turbinas. Las aspas, que se mueven a velocidades de hasta 300 km/h, son difíciles de evitar para estos animales.
- ✓ **Desplazamiento y Pérdida de Hábitat:** La presencia de parques eólicos puede reducir la densidad de aves en áreas cercanas, alejándolas hasta 1 km de las turbinas y disminuyendo su densidad. En instalaciones offshore, las aves evitan volar cerca de las turbinas, lo que afecta sus rutinas de vuelo y su hábitat.
- ✓ **Efecto Barrera:** Las aves deben realizar largos rodeos para evitar las turbinas, lo que aumenta su gasto energético. Este efecto se amplifica cuando los parques eólicos se ubican en rutas migratorias o cerca de áreas de concentración de aves o murciélagos.
- ✓ **Impacto Visual:** Los aerogeneradores pueden causar una alteración significativa del paisaje. Su altura y el movimiento constante de las aspas pueden afectar la estética de áreas naturales y rurales.
- ✓ **Impacto Sonoro:** El ruido producido por las turbinas, tanto por el movimiento de las aspas como por los mecanismos internos, puede ser molesto para las personas que viven cerca. Este ruido puede causar molestias y afectar la calidad de vida de los residentes cercanos.
- ✓ **Uso del Suelo:** Aunque los parques eólicos permiten otros usos del suelo como la agricultura y el pastoreo, requieren una cantidad considerable de espacio. La infraestructura adicional, como caminos y cables, también puede fragmentar el paisaje.
- ✓ **Efectos en el Suelo y Vegetación:** La construcción y el mantenimiento de parques eólicos pueden causar la compactación del suelo, la erosión y la pérdida de vegetación. Esto puede afectar la biodiversidad y los ecosistemas locales.
- ✓ **Impacto en los Recursos Hídricos:** En algunas áreas, la construcción de parques eólicos puede afectar los cursos de agua y los humedales cercanos, alterando los patrones de drenaje y afectando los hábitats acuáticos.
- ✓ **Emisiones de Carbono Asociadas:** Si bien la operación de las turbinas eólicas no produce emisiones, la fabricación, transporte e instalación de las turbinas sí generan una huella de

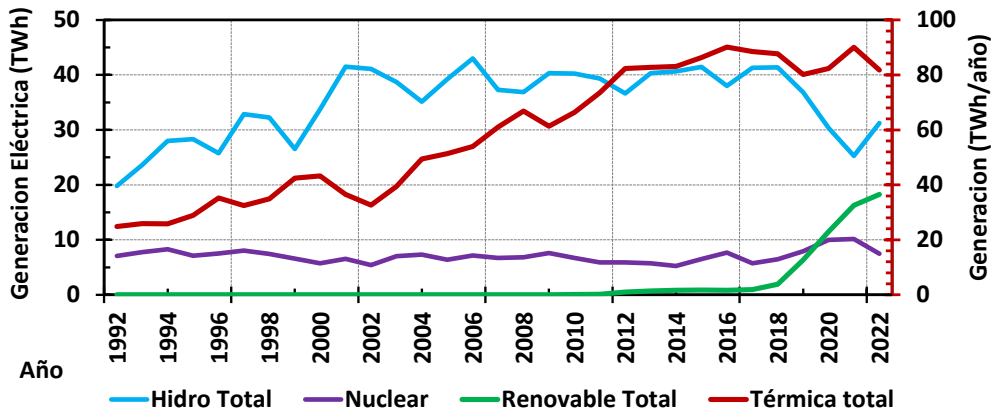
carbono. No obstante, esta es mucho menor en comparación con las fuentes de energía basadas en combustibles fósiles.

- ✓ **Interferencias Electromagnéticas:** Las turbinas pueden interferir con las señales de radio y televisión, así como con los sistemas de radar y telecomunicaciones.

A nivel global, se estima que las turbinas eólicas podrían causar la muerte de entre 140,000 y 500,000 aves anualmente. Aunque estas cifras podrían aumentar con la expansión de la energía eólica, son significativamente menores en comparación con otras amenazas antropogénicas. Por ejemplo, los edificios de vidrio y los vehículos matan a cientos de millones de aves cada año, y los gatos domésticos son responsables de la muerte de entre 1.3 y 4 mil millones de aves anualmente solo en Estados Unidos. [21]

Por lo tanto, mientras que la protección de la vida silvestre es fundamental, también lo es el desarrollo de energías renovables como la eólica, que es crucial para mitigar el cambio climático. La clave está en encontrar un equilibrio que permita la coexistencia de la vida silvestre y la generación de energía sostenible.

Generación eléctrica Argentina



Porcentaje de ER en la Matriz Eléctrica RA

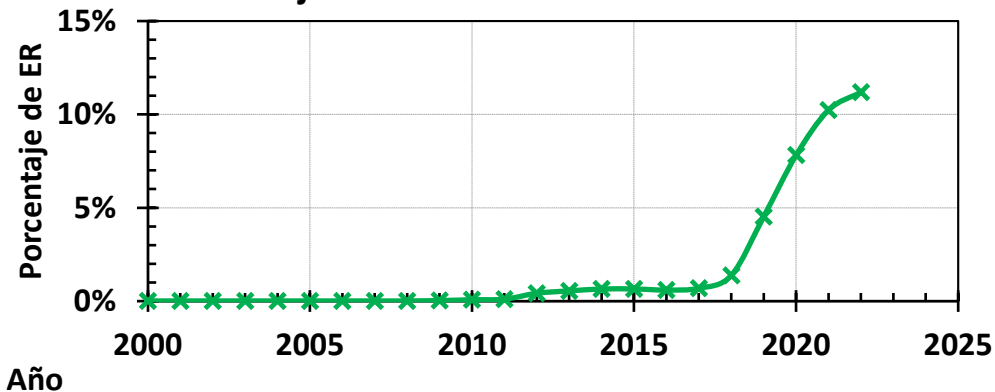


Figura 24. Arriba, variación de la composición de la matriz eléctrica argentina de 1992 a 2022. Abajo, porcentaje de las ER (fundamentalmente eólica y solar PV) en la matriz eléctrica.

Desarrollo de la Energía eólica en Argentina

El sector eléctrico argentino es el tercero más grande de América Latina, dependiendo principalmente de la generación térmica y la hidroeléctrica. La generación térmica se basa mayormente en la combustión de gas natural. Asimismo, Argentina acaba de unirse a la lista de países que promueven activamente la generación eléctrica mediante energías renovables (ER). Aunque aún es temprano para hacer una evaluación definitiva, los avances normativos son notables tras la promulgación de la Ley 27191, que modifica la Ley 26190, en octubre de 2015. La meta de esta ley era llegar a 20% de la generación eléctrica para 2025. Aunque es posible que dicha meta no llegue a cumplirse completamente, no hay duda de gran desarrollo acaecido en la última década en esta área, ver **Figura 24**. En la **Figura 25** se ve la potencia instalada en el año 2023. [22] Para este año la potencia instalada eólica era de 3.7 TW sobre una potencia instalada total de 43.8 TW, o sea el 8.5 % del total.

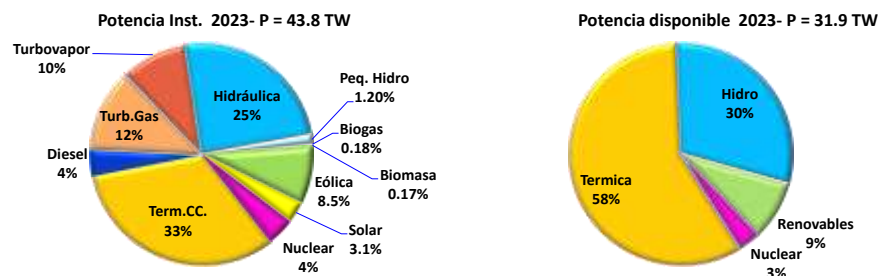


Figura 25. Izquierda, Potencia instalada total en Argentina al año 2023. Derecha, potencia efectivamente disponible en ese año. La diferencia se debe a que muchas veces algunas centrales paran por reparación o mantenimiento. [22]

Como vimos, Argentina posee recursos renovables muy significativos. A la reconocida calidad de los vientos de la Patagonia, se suman los del sur de Buenos Aires y algunas zonas del Noroeste. Asimismo, el nivel de radiación solar es apto para desarrollos comerciales en la mayor parte del territorio, con amplias áreas del Noroeste entre los mejores sitios del planeta. Además, los vastos recursos agropecuarios y forestales podrían servir como base para el aprovechamiento intensivo de biomasa, cuyos beneficios sociales y ambientales son significativos.

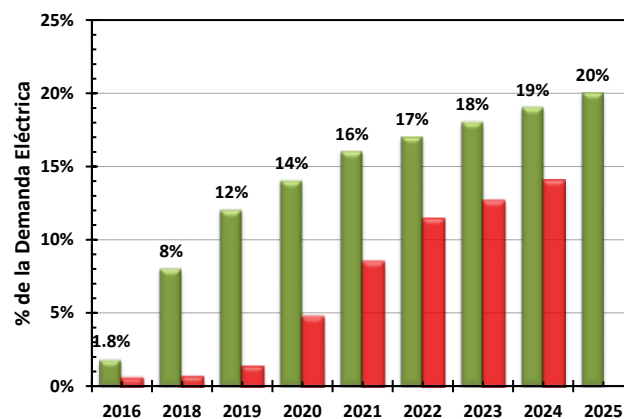


Figura 26. Costos nivelados de la energía Metas fijadas en la Ley 27191 de Fomento de las Energías Renovables (barras verdes). Barras rojas, porcentajes efectivamente alcanzado para esos años, hasta 2023. [22]

La Patagonia, a pesar de tener muy buenos vientos, esta lejos de los centros de consumo, por lo que para aprovecharla es necesario grandes inversiones en redes de transmisión. En ese sentido, usar

la energía eólica en esa zona para producir H₂ verde, puede ser una alternativa interesante hacia el futuro.

La producción eléctrica mediante energías renovables es más económica que la generada con combustibles fósiles líquidos, sean nacionales o importados. Ver **Figura 24**. Esto presenta una oportunidad para diversificar y robustecer la matriz eléctrica, generar empleo local, reducir emisiones y disminuir costos de transporte y distribución.

La Ley 27191 obliga a los Grandes Usuarios (GU), con potencias contratadas mayores a 300 kW, a incorporar una fracción creciente de electricidad de fuentes renovables, desde el 8% en 2018 hasta el 20% en 2026. La **Figura 26** muestra los objetivos propuestos y el nivel de cumplimiento de los mismos.

Conclusiones

El mundo está realizando una transición de combustibles fósiles a energías renovables. Esta transición no solo ayuda a preservar el medio ambiente, sino que también aporta beneficios adicionales en el marco de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por la comunidad internacional.

El año 2023 ha sido testigo de un crecimiento impresionante en el sector de la energía eólica, con China estableciendo un nuevo récord al añadir 75 gigavatios a su capacidad, lo que representa un dominio sin precedentes en el mercado global. Este avance coloca a China en camino de superar el medio *teravatio* de capacidad en 2024, marcando otro hito en el desarrollo de la energía eólica a nivel mundial. Mientras tanto, Brasil y la India también han hecho contribuciones significativas, con Brasil emergiendo como un líder en crecimiento y la India manteniendo su posición en el mercado. Este panorama refleja un cambio dinámico y una expansión acelerada en la adopción de energías renovables a nivel mundial. La energía eólica está tomando un papel protagónico en América del Sur, liderada por Brasil con su impresionante capacidad. Chile, Argentina y Uruguay también están haciendo contribuciones significativas, aprovechando los vientos fuertes y constantes de la región.

Desde un modesto comienzo hacia 2007, cuando la energía eólica casi no existía en la región, se ha visto un aumento significativo en la capacidad instalada y la producción de energía. Brasil sigue liderando el camino, con una expansión notable en la industria eólica (24.16 MW en 2022), seguido por Uruguay (con 4.80 MW, 2022), Chile (con 3.83 MW, 2022) and Argentina (3.1 MW, 2022) que también están haciendo avances significativos. Este cambio hacia fuentes de energía más limpias y renovables es un paso positivo para el desarrollo sostenible y la seguridad energética en la región.

En Argentina, la potencia eólica instalada al año 2023 era de 3.7 TW de un total de renovables de 4.4 TW. Los escenarios energéticos del Ministerio de Energía y Minería proyectan un incremento de la potencia renovable entre 9,4 y 11,3 GW para 2025. Este crecimiento, si se lograra, ayudaría a diversificar la matriz energética y reduciría la dependencia de la importación de gas, gasoil y electricidad, ayudando a cumplir las metas de reducción de emisiones.

Referencias

- [1] Wikipedia, «Viento,» 2024. [En línea]. Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/Viento>.
- [2] Global Wind Atlas-Banco Mundial, «Global Wind Atlas,» 2024. [En línea]. Available: <https://globalwindatlas.info/es/>.
- [3] CREE- REGATTA, «Centro Regional de Energía Eólica (CREE),» 2024. [En línea]. Available: <https://cambioclimatico-regatta.org/index.php/es/instituciones-clave/item/centro-regional-de-energia-eolica-cree>.
- [4] F. Sears, M. Zemansky, H. Young y R. Freedman, College Physics, NY: Pearson Ed., 2009.
- [5] J. D. Wilson, College Physics (7th Edition) 7th Edition, N.Y.: Pearson, 2009.
- [6] «The Maximum of the Theoretically Possible Exploitation of Wind by Means of a Wind Motor,» *Wind Engineering*, vol. 37, n° 4, pp. 441-446, 2013.
- [7] . G. van Kuik y et al., «The role of conservative forces in rotor aerodynamics,» *Journal of Fluid Mechanics*, n° 750, pp. 284-315., 2014.
- [8] H. Glauert , Airplane propellers, Berlin: Springer, 1935, p. 69–360.
- [9] F. Porté-Agel y et al., «Wind-Turbine and Wind-Farm Flows: A Review,» *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 174, pp. 1-59, 2020.
- [10] K. Adeseye Adeyeye y et al., «The Effect of the Number of Blades on the,» de *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2021.
- [11] Wikipedia, «Boundary layer thickness,» 2024. [En línea]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Boundary_layer_thickness.
- [12] Y. Cengel y J. Cimbala, Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications, N.Y.: McGraw Hill, 2017.
- [13] T. J. Ding y et al., «Advancements of wind energy conversion systems for low-wind urban environments: A review,» *Energy Reports*, vol. 8, p. 3406–3414, 2022.
- [14] Tha JHU Gazette, «New study yields better turbine spacing for large wind farms,» 11 Jan. 201. [En línea]. Available: <https://gazette.jhu.edu/2011/01/18/new-study-yields-better-turbine-spacing-for-large-wind-farms/>.
- [15] J. Meyers y C. Meneveau, «Johan Meyers Charles Meneveau,» *Wind Energy*, vol. 15, n° 2, pp. 305 - 317, 2012.
- [16] NREL, «Technology Advancements Could Unlock 80% More Wind Energy Potential During This Decade,» 2024.
- [17] Our World in Data, «Electricity Mix,» 2024. [En línea]. Available: <https://ourworldindata.org/electricity-mix>.
- [18] IRENA International Renewable Energy Agency, «Future of wind: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects,» Abu Dhabi., 2019.
- [19] Lazard, Levelized Cost of Energy Analysis 10.0, <https://www.lazard.com/media/438038/levelized-cost-of-energy-v100.pdf>, Dec. 2016.
- [20] Wikipedia, «Costo Nivelado de la Energía,» 2024. [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Coste_nivelado_de_la_energ%C3%ADa.
- [21] D. MacKay, Sustainable Energy – without the hot air, UIT Cambridge, 2019.
- [22] Cammesa, «Informe anual 2023,» Buenos Aires, 2023.
- [23] Informe Anual Cammesa 2023, «Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico S.A.,» 2024. [En línea]. Available: www.cammesa.com.ar.
- [24] INTI, «INTI Energías Renovables,» [En línea]. Available: <http://www.inti.gob.ar/e-renova/erSO/er25.php>.
- [25] Agencia de Noticias de San Luis, «ANSL,» 2017. [En línea]. Available: <http://agenciasanluis.com/notas/2014/10/06/san-luis-inaugura-su-primer-parque-solar-fotovoltaico/>.
- [26] H. Grossi Gallegos y R. Righini., «Atlas de energía solar de la República Argentina,» *Publicado por la Universidad Nacional de Luján y la Secretaría de Ciencia y Tecnología*, Mayo 2007.
- [27] M. Aghaei y et al., «Introductory Chapter: Solar Photovoltaic Energy,» de *Solar Radiation - Measurements, Modeling and Forecasting for Photovoltaic Solar Energy Applications*, 2024.

- [28] Wikipedia, «Swanson's law,» 2024. [En línea]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Swanson%27s_law.
- [29] Wikipedia, «Energía Solar Fotovoltaica,» 2024. [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_solar_fotovoltaica.
- [30] ENARSA, 2024. [En línea]. Available: <http://www.enarsa.com.ar/index.php/es/energiasrenovables>.

Preguntas

1. Explique es la matriz energética primaria de un país y el mundo. ¿Qué es la matriz energética secundaria? ¿Qué es la matriz Eléctrica? ¿Qué es la matriz de uso final de la energía? Muestre cuatro ejemplos de ellas, 1) Para el mundo, 2) para Argentina 3) para un país de la región, 4) EE.UU. o la U.E.
2. ¿Qué es la intensidad de carbono de un combustible o un insumo energético? Ver (Wikipedia Intensidad de Emisiones: https://es.wikipedia.org/wiki/Intensidad_de_emisi%C3%B3n)
3. Para los países: Argentina, Bolivia, Brasil, Chile, Paraguay y Uruguay (cada grupo elija dos países). A) Construya un gráfico de distribución de la **matriz energética primaria** para cada país. B) Construya un gráfico de distribución de la **matriz eléctrica** para cada país. C) Construya un gráfico de la **matriz energética primaria mundial y de la matriz energética electica global**. Como se compara con la de los países de América Latina elegidos. D) Para esos mismo países grafique los Intensidades de Carbono de sus respectivas matrices eléctricas (IC) en kg(CO₂)/MWh. E) Cuales son las emisiones de CO₂, por habitante de cada país analizado y como se compara con la global. (Ver: <https://ourworldindata.org/electricity-mix>, <https://www.iea.org/reports/world-energy-balances-overview>, <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/>)
4. Un aerogenerador de eje horizontal y tres palas, de 100 m de diámetro, se encuentra instalado en un campo con vientos que en promedio tienen 50 km/h y soplan regularmente unas 5 horas al día. Si su eficiencia de diseño es del 85%, A) calcular la potencia que podría generar esta turbina. B) la energía promedio que podría general por día y la que generaría anualmente. A un precio de 50USD/Mwh, que valor en dinero tendría la energía producida.
5. En un campo se dese bombear agua para el ganado a un tanque, consumo de agua 2000 litro/diarios. Se bombea agua desde unos 100 metros. A) Calcular la potencia mecánica necesaria para llenar el tanque en 5 horas con un rendimiento del 90%. B) si tiene un molino de viento de 8 pies (2,4m de diámetro) y el viento sopla a unos 20 km/h al menos 6 horas por día. ¿Se podrá bombear esta agua? C) Si desea hacer lo mismo con una bomba eléctrica conectada a paneles solares, que área de paneles necesitaría, si la eficiencia de su bomba eléctrica es del 90%. D) discuta las ventajas y desventajas de cada una de estas alternativas, incluyendo conectarse directamente a la red eléctrica.