Parques eólicos en el Caribe colombiano: evaluación económica para la gestión de la transición energética

Wind Farms in the Colombian Caribbean: Economic Assessment for Energy Transition Management

Recibido: febrero 2026
Evaluado: febrero 2026
Aprobado: marzo 2026

Joseph Sosapanta Salas[1]
Institución Universitaria Pascual Bravo, Colombia
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2035-9323

1 Ingeniero Electricista. Magíster en Ingeniería Eléctrica y Magíster en Administración de Organizaciones por la Universidad Nacional de Colombia. Investigador en energías renovables, sistemas eléctricos de potencia, transición energética y evaluación técnico-económica de proyectos energéticos. Correo electrónico: j.sosapantasa@pascualbravo.edu.co. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2035-9323.

RESUMEN

Introducción: La transición energética demanda la incorporación de fuentes renovables que contribuyan a diversificar la matriz energética y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. En este contexto, el Caribe colombiano presenta un importante potencial para el desarrollo de proyectos eólicos costa afuera, lo que requiere análisis que respalden la toma de decisiones de inversión y planificación energética. *Metodología:* La investigación desarrolló una evaluación técnico-económica mediante modelación matemática integrada, considerando variables meteorológicas, técnicas, ambientales y financieras. Para ello se empleó el software RETScreen Expert como herramienta de simulación y análisis de desempeño energético y económico. *Resultados:* Los resultados evidencian escenarios de rentabilidad con tasas internas de retorno concentradas entre el 17 % y el 21 %, así como una reducción significativa de emisiones, pasando de 22.080,5 tCO_{2e} anuales en el escenario base a 1.766,4 tCO_{2e} con la implementación de los proyectos evaluados. *Conclusiones:* Los parques eólicos en el Caribe colombiano presentan condiciones favorables para fortalecer la transición energética nacional, combinando beneficios económicos y ambientales que respaldan la planificación y ejecución de nuevas inversiones en energías renovables.

Palabras clave: transición energética, energía eólica, evaluación económica, energías renovables, planificación energética, Caribe colombiano.

ABSTRACT

Introduction: The energy transition requires the incorporation of renewable sources that contribute to diversifying the energy matrix and reducing greenhouse gas emissions. In this context, the Colombian Caribbean offers significant potential for offshore wind energy development, creating the need for analyses that support investment decisions and energy planning. *Methodology:* The research conducted a techno-economic assessment through integrated mathematical modeling, considering meteorological, technical, environmental, and financial variables. RETScreen Expert was employed as the simulation and evaluation tool. *Results:* Findings indicate profitability scenarios with internal rates of return concentrated between 17% and 21%, together with a significant reduction in emissions, decreasing from 22,080.5 tCO_{2e} annually in the baseline scenario to 1,766.4 tCO_{2e} following project implementation. *Conclusions:* Wind farm

development in the Colombian Caribbean presents favorable conditions for strengthening the national energy transition by combining economic and environmental benefits that support planning and investment in renewable energy projects.

Keywords: energy transition, wind energy, economic assessment, renewable energy, energy planning, Colombian Caribbean.

INTRODUCCION

La transición energética global desde los combustibles fósiles hacia fuentes de energía renovable constituye uno de los mayores desafíos del siglo XXI. A pesar de los avances tecnológicos y de la creciente conciencia sobre los efectos del cambio climático, persisten barreras significativas que dificultan la adopción masiva de energías limpias. Entre estas barreras se encuentran la intermitencia de las fuentes primarias de energía, los costos de almacenamiento energético, la limitada infraestructura disponible y la resistencia de mercados altamente dependientes de los combustibles fósiles. Estos continúan siendo la principal fuente de energía a nivel mundial, contribuyendo de manera directa a la actual crisis climática. Paralelamente, la demanda energética global sigue en aumento, y la falta de acción o una transición lenta podrían generar consecuencias ambientales irreversibles, además de perpetuar la dependencia de recursos no renovables. De ahí la necesidad de investigar soluciones energéticas basadas en Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER), considerando su integración en los sistemas eléctricos actuales y sus impactos económicos y sociales.

Una de las alternativas de FNCER es la energía eólica, la cual se fundamenta en la conversión de la energía cinética del viento en energía eléctrica mediante aerogeneradores, que transforman el movimiento del aire en energía mecánica de rotación y, posteriormente, en electricidad a través de un generador. En el caso de la energía eólica costa afuera, los aerogeneradores se instalan en el mar, donde los vientos son más intensos, constantes y menos turbulentos que en tierra firme, lo que permite alcanzar mayores factores de capacidad y una producción energética más estable. Además, esta tecnología posibilita el aprovechamiento de amplias extensiones sin competir por

el uso del suelo. Sin embargo, también plantea desafíos técnicos, económicos y ambientales asociados con la instalación, operación y conexión a las redes eléctricas en entornos marinos.

La reducción de costos y los avances tecnológicos en la energía eólica costa afuera refuerzan su viabilidad como una alternativa renovable económicamente competitiva. Gracias a su capacidad para sustituir y complementar de manera eficiente la generación convencional a gran escala, esta tecnología se posiciona como un componente fundamental de la transición energética. Asimismo, el sector incorpora innovaciones como plataformas flotantes para aerogeneradores y sistemas avanzados de monitoreo, que contribuyen a mejorar la eficiencia operativa y a minimizar las afectaciones ecológicas. En consecuencia, se prevé que los riesgos percibidos asociados con los parques eólicos marinos sean menores en comparación con los proyectos eólicos terrestres, especialmente al considerar la huella ecológica y las implicaciones sociales derivadas de las instalaciones en tierra (Minenergía, 2022).

El desarrollo de la energía eólica costa afuera en Colombia se perfila como un importante motor de dinamización económica. De acuerdo con el escenario de desarrollo planteado por Minenergía (2022), hacia el año 2050 esta tecnología tendría la capacidad de sostener hasta 26.000 empleos y contribuir con cerca de US$ 3.000 millones anuales a la economía nacional. A ello se suma el potencial de inserción de Colombia en las cadenas globales de valor de la industria eólica, cuyo acelerado crecimiento internacional abre oportunidades de exportación para proveedores locales.

La costa Caribe colombiana posee un amplio potencial para el desarrollo de la energía eólica costa afuera, con una capacidad técnica total estimada de 109 GW, que incluye tanto instalaciones de base fija como flotante (Minenergía, 2022). Al considerar diversas restricciones y factores ambientales, sociales y técnicos, se han identificado zonas viables para el desarrollo de proyectos con un potencial conjunto cercano a los 50 GW (Minenergía, 2022). Estas áreas se muestran en la Figura 1 y corresponden a cinco zonas costeras aptas para instalaciones de base fija (color rojo) y ocho zonas mar adentro aptas para instalaciones de base flotante (color morado).

En Minenergía (2022) se establecen los principales escenarios para el desarrollo futuro de la energía eólica costa afuera en Colombia. Asimismo, se presentan consideraciones generales relacionadas con los aspectos ambientales, sociales, la cadena de suministro y el marco regula-

cc BY NC SA

torio. No obstante, se evidencia la ausencia de análisis técnico-económicos sustentados en un modelado integral de esta tecnología. En respuesta a esta necesidad, el presente trabajo propone desarrollar un análisis basado en variables meteorológicas, aspectos técnicos, factores ambientales y consideraciones financieras, mediante el uso del software RETScreen Expert. A partir de este ejercicio, se implementará un modelo energético que incorpora variables económicas y ambientales para evaluar el potencial de la energía eólica costa afuera en Colombia.



Figura 1. Mapa de áreas de exploración inicial para energía eólica costa afuera (Minenergía, 2022).

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

La energía eólica se obtiene mediante la conversión de la energía cinética del viento en energía eléctrica a través de aerogeneradores. Estos sistemas están compuestos por diversos elementos mecánicos, eléctricos y de control que permiten captar, transformar y transportar la energía producida. El conocimiento de sus componentes y de su funcionamiento resulta fundamental para comprender los procesos de generación eólica y los modelos empleados en la simulación y evaluación de su desempeño. La Figura 2 presenta los principales componentes de una turbina eólica de eje horizontal con tres aspas.

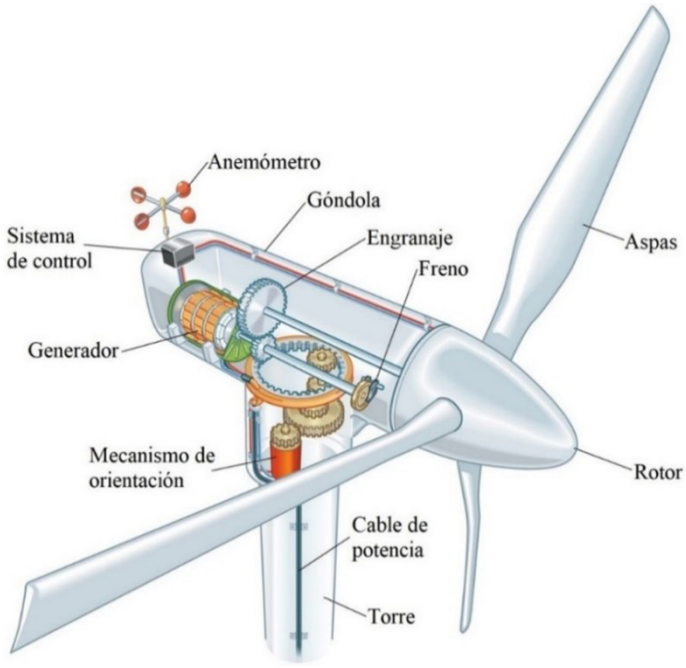


Figura 2. Partes turbina eólica (Sosapanta, 2020).

En primer lugar, las aspas y el rotor constituyen la parte móvil de la turbina eólica. Por otra parte, la góndola corresponde a la carcasa donde se alojan el engranaje, el generador y los sistemas de control. El mecanismo de orientación permite que la góndola se alinee con la dirección del viento y que las aspas ajusten su posición para regular la cantidad de potencia extraída. Asimismo, el anemómetro y la veleta tienen la función de medir la velocidad y la dirección del viento, respectivamente. La torre actúa como soporte estructural de la turbina y, en general, a mayor altura se pueden aprovechar velocidades de viento más elevadas. En el caso de las turbinas eólicas costa afuera, también se incorpora un sistema de cimentación o soporte, que puede estar constituido principalmente por monopilotes para instalaciones de base fija o por plataformas flotantes para instalaciones de base flotante.

Con respecto al proceso de conversión de energía, la energía cinética del viento impacta las aspas y se transfiere al eje del rotor, donde se transforma en energía mecánica. Posteriormente, el engranaje se encarga de acoplar y transmitir dicha energía desde el eje de baja velocidad hasta el eje de alta velocidad. El proceso de conversión culmina en el generador eléctrico, que produce

energía eléctrica mediante el principio de inducción electromagnética. Finalmente, el cable de potencia transporta la energía generada desde cada turbina del parque eólico hasta la subestación transformadora, donde se realiza la conexión con la red eléctrica principal (Sosapanta, 2020).

Para realizar simulaciones, es posible emplear un modelo simplificado del rotor sin considerar la geometría específica de las aspas y utilizando un valor único de velocidad del viento. Bajo este enfoque, la potencia extraíble de la turbina depende principalmente de la velocidad del viento y puede expresarse de la siguiente manera:

$$Pw = 1/2\ \rho A v_w^3 \qquad (1)$$

donde ρ es la densidad del aire y A es el área barrida por las aspas. El área barrida se ilustra en la Figura 3 y se calcula empleando

$$A = \pi R^2 \qquad (2)$$

donde R es el radio del área barrida.

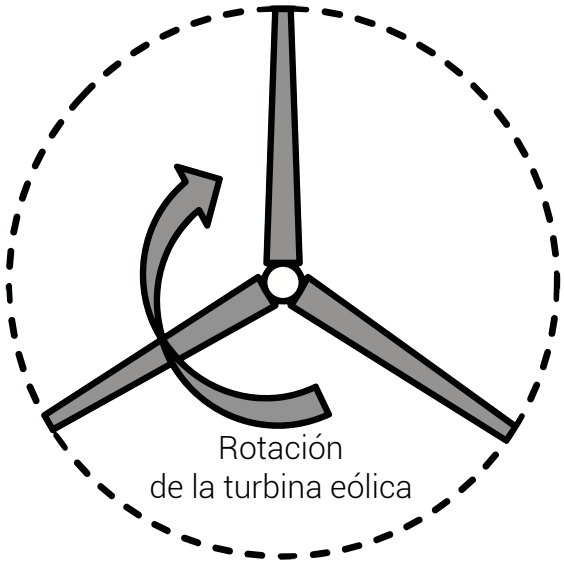


Figura 3. Área barrida por el aspa de la turbina eólica (Sosapanta, 2023).

Por su parte, el eje de la turbina eólica puede modelarse mediante un conjunto de masas acopladas. Dependiendo del nivel de precisión requerido, pueden emplearse modelos de una, dos o tres masas. Entre ellos, el modelo de dos masas es uno de los más utilizados debido a que ofrece un equilibrio adecuado entre complejidad y precisión. Este modelo se presenta en la Figura 4, donde la masa ubicada en el lado izquierdo representa las aspas y el eje de baja velocidad, mientras que la masa del lado derecho representa el engranaje, el eje de alta velocidad y el rotor del generador.

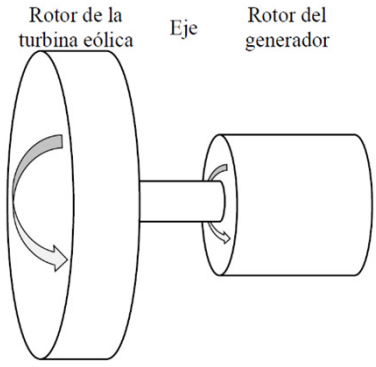


Figura 4. Modelo de dos masas para la turbina eólica (Sosapanta, 2023).

REVISIÓN DE LA LITERATURA

La literatura reciente evidencia un creciente interés por la energía eólica costa afuera como una alternativa estratégica para sistemas energéticos caracterizados por una alta vulnerabilidad climática y una marcada dependencia de los recursos hídricos. En el contexto colombiano, Rueda-Bayona (2019) identifica la región Caribe como un territorio con condiciones favorables de viento y destaca el potencial de la energía eólica costa afuera como una opción clave para diversificar la matriz energética nacional. Esta perspectiva es reforzada por Castro (2023), quien desarrolla un análisis de viabilidad específico para el Caribe colombiano mediante una evaluación multicriterio espacial, identificando zonas óptimas al considerar criterios técnicos, ambientales y socioeconómicos. A escala regional, Shadman (2023) presenta una revisión sobre la energía eólica costa afuera en Sudamérica, señalando que, pese al elevado potencial identificado, el desarrollo de este tipo de proyectos continúa limitado por vacíos regulatorios, barreras tecnológicas y la ausencia de una planificación marítima integrada, aspectos particularmente relevantes para países como Colombia.

Desde la perspectiva de la caracterización del recurso y la evaluación técnica, Bethel (2021) aporta un análisis detallado del potencial eólico costa afuera en el Caribe, incluyendo estimaciones espaciales y temporales del recurso eólico que resultan fundamentales para estudios de prefactibilidad. Estos aportes se complementan con investigaciones desarrolladas en otros contextos, como la realizada por Satir (2018), donde se evidencia la necesidad de integrar información relacionada con el recurso eólico, la batimetría, los costos de instalación y la conexión a la red eléctrica para obtener evaluaciones realistas de proyectos eólicos marinos. En la misma línea, Odoi-Yorke (2023) presenta una evaluación técnico-económica de un parque eólico de gran escala, aportando indicadores financieros y criterios de selección tecnológica potencialmente transferibles a países con estructuras de mercado y niveles de desarrollo similares a los de Colombia.

Adicionalmente, Majdi Nasab (2020) explora enfoques de integración tecnológica y alternativas de diseño, analizando la complementariedad entre la energía eólica y la energía mareomotriz, con beneficios asociados a una mayor estabilidad del suministro eléctrico. Posteriormente, Majdi Nasab (2021) profundiza en la optimización de microrredes conectadas a la red eléctrica que integran múltiples recursos energéticos. Por su parte, Neira (2021) evalúa la viabilidad de parques eólicos flotantes, destacando esta tecnología como una alternativa adecuada para zonas de mayor profundidad y ampliando el conjunto de soluciones técnicas disponibles para el aprovechamiento del recurso eólico marino.

En conjunto, la revisión de la literatura evidencia que aún existe una brecha de conocimiento respecto a la evaluación integral de la viabilidad del potencial eólico costa afuera en el Caribe colombiano. En consecuencia, persiste la necesidad de desarrollar investigaciones contextualizadas que articulen la normativa marítima vigente, la caracterización del recurso eólico y la evaluación técnico-económica, con el fin de aportar elementos que respalden la toma de decisiones y la planificación de futuros proyectos en la región.

METODOLOGÍA

La presente investigación se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo, con alcance descriptivo-propositivo y un diseño no experimental de corte transversal. Este enfoque permite analizar de manera sistemática las variables técnicas, económicas y ambientales asociadas al desarrollo de proyectos de energía eólica costa afuera, mediante el uso de herramientas de modelado computacional orientadas a la simulación y evaluación de escenarios. Asimismo, facilita la generación de insumos técnicos que contribuyan a la toma de decisiones y a la formulación de propuestas fundamentadas para el aprovechamiento del recurso eólico en el Caribe colombiano.

La metodología se estructura en una serie de etapas interrelacionadas que permiten abordar de forma integral los componentes normativos, técnicos, energéticos y económicos asociados al desarrollo de parques eólicos costa afuera. En una primera etapa se identifican y analizan las posibles zonas de exclusión, considerando las restricciones normativas, ambientales y operativas que condicionan la localización de este tipo de proyectos. Este análisis permite establecer un marco de referencia para la planificación técnica y reducir la incertidumbre asociada a las etapas posteriores de evaluación.

Posteriormente, se realiza la caracterización del recurso eólico costa afuera mediante la recopilación, depuración y análisis de información meteorológica y oceanográfica proveniente de fuentes oficiales y bases de datos especializadas. A partir de estos insumos se desarrollan análisis estadísticos y espaciales orientados a identificar las áreas con mejores condiciones para el aprovechamiento energético del recurso, proporcionando criterios técnicos para la selección de zonas potenciales de desarrollo.

Una vez definidas las áreas de interés, se procede a la construcción de escenarios de desarrollo que integran variables técnicas, económicas y ambientales representativas de proyectos eólicos marinos. Dichos escenarios son evaluados mediante el software RETScreen Expert, herramienta que permite estimar indicadores energéticos, económicos y ambientales, así como analizar el comportamiento de los proyectos bajo diferentes condiciones de operación. Complementariamente, se realizan análisis de sensibilidad con el propósito de identificar las variables con mayor influencia sobre la viabilidad técnica y financiera de los proyectos.

CC BY NC SA

Finalmente, los resultados obtenidos son integrados para formular recomendaciones orientadas a apoyar los procesos de planificación, evaluación e implementación de parques eólicos costa afuera en el Caribe colombiano. La Figura 5 presenta el diagrama de flujo metodológico que resume las etapas desarrolladas en la investigación.

Una vez definidos los parámetros técnicos, las variables de análisis y el entorno de simulación, los resultados obtenidos se presentan y discuten en la siguiente sección.

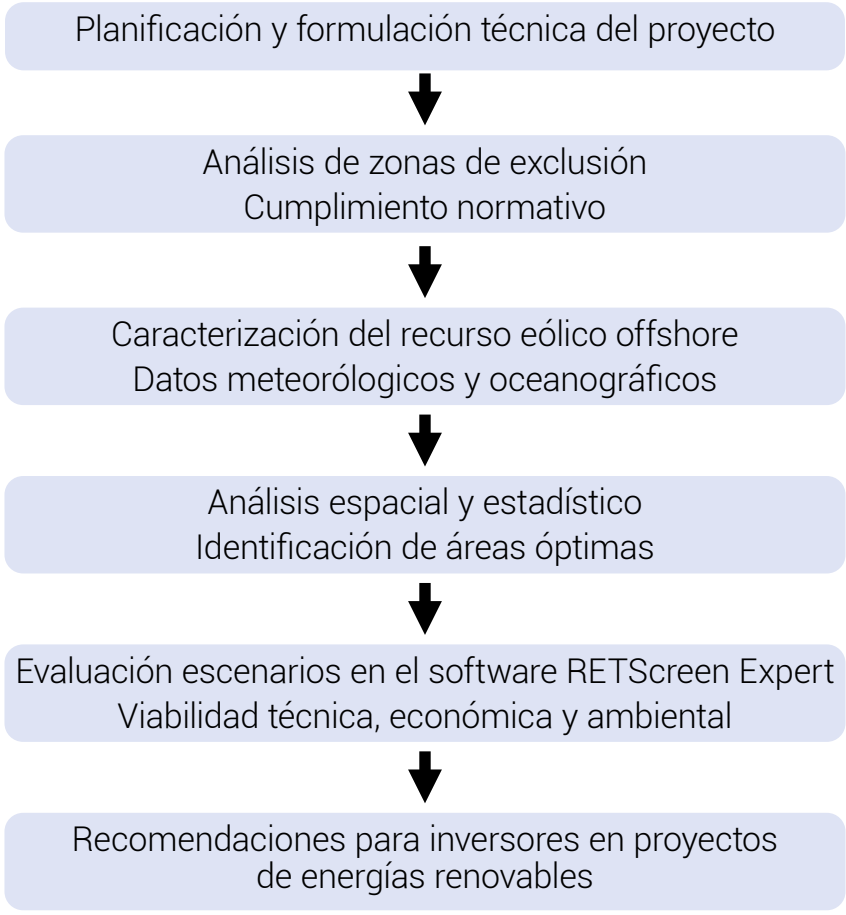


Figura 5. Diagrama de flujo metodológico.
Fuente: elaboración propia

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como parte de la evaluación del potencial eólico costa afuera en el Caribe colombiano, se realizó la caracterización del régimen de viento para el sitio seleccionado, considerando su comportamiento promedio a lo largo del año. La velocidad del viento constituye una de las variables más relevantes en el análisis de viabilidad de proyectos eólicos, debido a su influencia directa sobre la producción energética, los factores de capacidad y el desempeño económico de la instalación. En este sentido, la determinación de patrones estacionales y niveles de estabilidad del recurso permite establecer una base técnica para el dimensionamiento y la simulación de los sistemas de generación propuestos.

La Figura 6 presenta la distribución anualizada de la velocidad promedio del viento para la zona de estudio. Los resultados muestran un comportamiento relativamente estable durante el año, con velocidades favorables para el aprovechamiento energético y una variabilidad moderada entre los distintos meses. Estas condiciones sugieren la existencia de un recurso eólico consistente, aspecto que favorece la predictibilidad de la generación eléctrica y reduce la incertidumbre asociada al desempeño operativo del parque eólico.

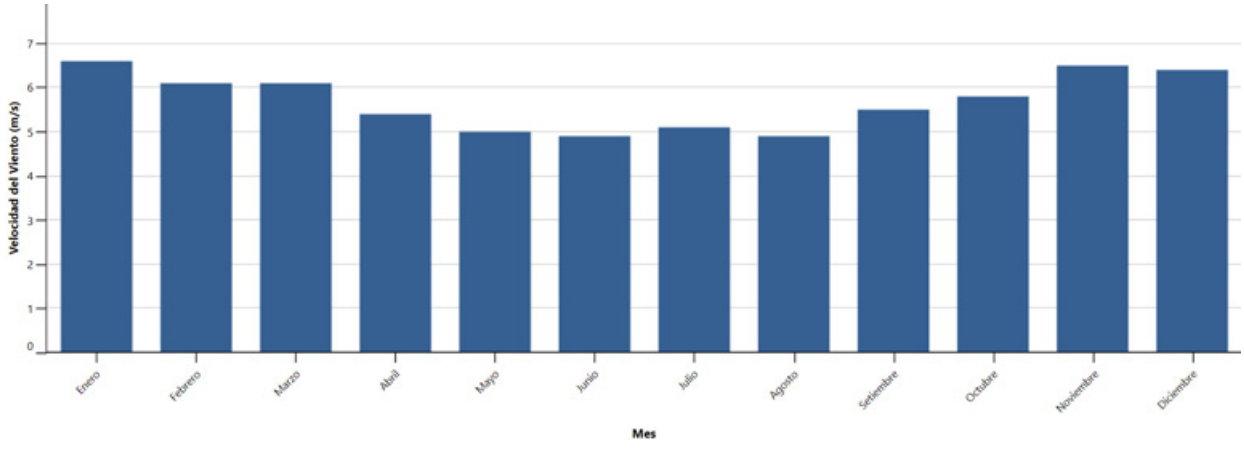


Figura6. Velocidad del viento.
Fuente: elaboración propia

Si bien las bases de datos meteorológicas utilizadas constituyen una fuente robusta y ampliamente validada para la caracterización preliminar del recurso eólico, es importante señalar que la determinación definitiva del potencial energético de un emplazamiento requiere campañas de medición en campo mediante torres anemométricas u otras tecnologías especializadas de monitoreo. Este proceso permite reducir la incertidumbre asociada a las estimaciones iniciales y obtener información más precisa sobre las condiciones reales de operación. Asimismo, estas mediciones adquieren especial relevancia en etapas avanzadas de desarrollo, particularmente durante los procesos de estructuración financiera y evaluación de riesgos, donde la exactitud de los datos influye directamente en las estimaciones de generación eléctrica, los ingresos proyectados y la viabilidad económica del proyecto.

Con base en la caracterización del recurso eólico obtenida para la zona de estudio, se desarrolló la simulación técnico-económica del sistema mediante el software RETScreen Expert. La Figura 8 presenta el resumen de los principales resultados técnicos, energéticos, económicos y ambientales asociados al escenario evaluado, considerando la exportación total de la energía generada hacia la red eléctrica.

El modelo contempla una capacidad instalada de 40 MW, seleccionada por representar una escala intermedia dentro de los desarrollos eólicos costa afuera y por ofrecer condiciones adecuadas para evaluar la factibilidad de proyectos en etapas iniciales de implementación. Esta capacidad permite analizar el comportamiento del sistema bajo condiciones realistas de operación, manteniendo un equilibrio entre los requerimientos de inversión, el potencial de generación y la representatividad del caso de estudio. En consecuencia, la elección de esta potencia instalada fortalece la consistencia técnica del análisis y proporciona una referencia útil para futuras iniciativas de aprovechamiento eólico marino en el Caribe colombiano.

Como se observa en la Figura 7, el sistema presenta una producción anual estimada de 100.565 MWh, resultado que evidencia el potencial energético del recurso eólico disponible en la zona analizada. Asimismo, la simulación estima una inversión inicial de 26,1 millones de USD, junto con los correspondientes ingresos derivados de la comercialización de la energía eléctrica, parámetros fundamentales para evaluar la viabilidad financiera del proyecto.

	Capacidad	Electricidad	Costos iniciales	Ingresos por exportación de electricidad	Costo del combustible	Costos de O y M (ahorros)	Pago simple de retorno del capital
Electricidad exportada a la red	kW	MWh	USD	USD	USD	USD	año
Electricidad							
Turbina - eólica	40.000	100.565	26.100.000	5.732.194	0	905.083	5,4
Total	**40.000**	**100.565**	**26.100.000**	**5.732.194**	**0**	**905.083**	**5,4**

Figura 7. Modelo de energía.
Fuente: elaboración propia

Como se observa en la Figura 8, el sistema presenta una producción anual estimada de 100.565 MWh, resultado que confirma el potencial energético del recurso eólico disponible en la zona analizada y su capacidad para aportar de manera significativa a la generación de electricidad a partir de fuentes renovables. La simulación estima una inversión inicial de 26,1 millones de USD y unos ingresos anuales proyectados por la venta de energía de 5.732.194 USD.

Dado que la generación eólica no requiere combustible para su operación, los costos asociados a este concepto son nulos, situación que constituye una de las principales ventajas competitivas de esta tecnología frente a las fuentes convencionales de generación. En consecuencia, los gastos de operación se concentran principalmente en actividades de administración, monitoreo, mantenimiento preventivo y correctivo de la infraestructura, los cuales fueron estimados en 905.083 USD anuales. Bajo las condiciones técnicas y financieras consideradas, el proyecto alcanza un período simple de recuperación de la inversión de 5,4 años, indicador que evidencia una perspectiva favorable de rentabilidad y respalda la viabilidad económica de la alternativa evaluada.

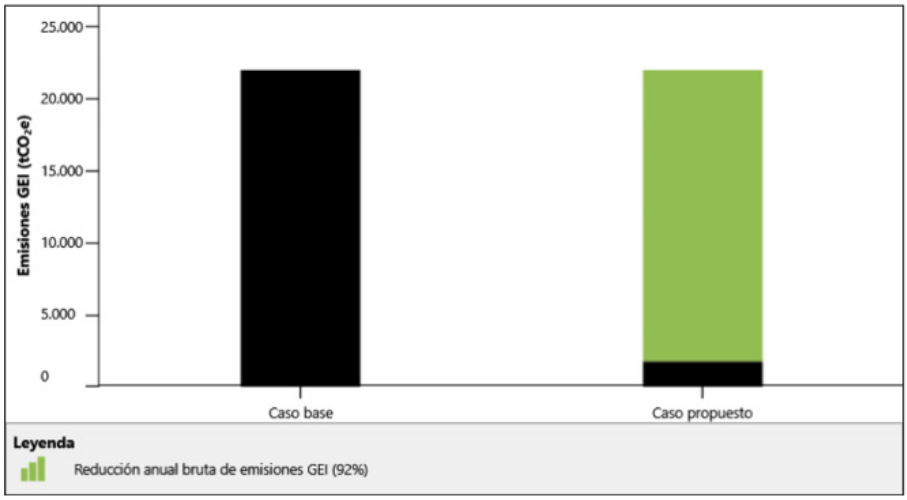
Complementariamente, se realizó la evaluación ambiental del proyecto con el fin de cuantificar los beneficios asociados a la sustitución parcial de fuentes convencionales de generación eléctrica. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 9, donde se compara el escenario base con el escenario que incorpora generación eólica costa afuera.

Los resultados muestran una reducción sustancial de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), pasando de 22.080,5 tCO_{2e} anuales en el escenario de referencia a 1.766,4 tCO_{2e} anuales en el escenario con el proyecto implementado. Esto representa una reducción anual bruta de 20.314,1 tCO_{2e}, equivalente aproximadamente a retirar de circulación 3.720,5 automóviles y

vehículos livianos cada año. Como se aprecia en la Figura 8, la incorporación de energía eólica costa afuera permite alcanzar una disminución cercana al 92 % de las emisiones asociadas al sistema de referencia, resultado que evidencia el importante aporte de esta tecnología a los procesos de descarbonización del sector energético y al cumplimiento de las metas de sostenibilidad y mitigación del cambio climático.

Con el propósito de evaluar la solidez financiera del proyecto, la Figura 9 presenta los principales parámetros económicos considerados en el modelo. El análisis se desarrolló bajo una tasa de inflación del 5,1 % y una vida útil proyectada de 25 años, valores acordes con las características de este tipo de infraestructura energética.

De acuerdo con los resultados obtenidos, la inversión total requerida asciende a 52.379.409 USD, valor que incorpora tanto los costos asociados al sistema de generación como los componentes adicionales definidos dentro de la estructura financiera del proyecto. Asimismo, se contemplan incentivos y donaciones por un monto de 680.000 USD, los cuales contribuyen a mejorar las condiciones económicas iniciales y a fortalecer la viabilidad financiera de la iniciativa. En conjunto, estos resultados evidencian que el desarrollo de proyectos eólicos costa afuera en el Caribe colombiano puede constituir una alternativa técnica, económica y ambientalmente atractiva dentro de las estrategias de transición energética del país.





Emisiones GEI		
Caso base	22.080,5	tCO_2e
Caso propuesto	1.766,4	tCO_2e
Reducción anual bruta de emisiones GEI	**20.314,1**	**tCO_2e**

Figura 8. Análisis de emisiones.
Fuente: elaboración propia

En términos operativos, el análisis del flujo de caja del primer año evidencia que los egresos del proyecto se concentran principalmente en las actividades de operación y mantenimiento, las cuales se estiman en 905.083 USD anuales. Asimismo, el escenario evaluado no contempla pagos asociados al servicio de deuda durante el periodo analizado. Por su parte, los ingresos provienen fundamentalmente de la exportación de energía eléctrica y de otros beneficios económicos incorporados en el modelo, alcanzando un valor total de 7.992.694 USD anuales. Como resultado, se obtiene un flujo de efectivo neto de 7.087.610 USD para el primer año de operación.

Los indicadores financieros derivados de la simulación muestran un comportamiento favorable del proyecto. En particular, se obtiene una tasa interna de retorno (TIR) antes de impuestos del 18,8 %, un período simple de recuperación de la inversión de 7,3 años y un tiempo de repago del capital de 6,1 años. Estos resultados reflejan una adecuada capacidad de generación de valor económico y evidencian que, bajo las condiciones técnicas y financieras consideradas, el proyecto presenta niveles atractivos de rentabilidad y una perspectiva favorable para su desarrollo e implementación.

Parámetros financieros

Tasa de inflación	%	5,1%
Tiempo de vida del proyecto	año	25

Costos | Ahorros | Ingreso

Costos iniciales			
Costo inicial	49,8%	USD	26.100.000
Definido por el usuario	50,2%	USD	26.279.409
Costos iniciales totales	**100%**	**USD**	**52.379.409**
Incentivos y donaciones		USD	680.000
Flujo de caja anuales - Año 1			
Costos anuales/pagos de deuda			
Costos de O y M (ahorros)		USD	905.083
Pagos de la deuda		USD	0
Costos anuales totales		**USD**	**905.083**
Ahorros e ingresos anuales			
Definido por el usuario		USD	2.260.500
Ingresos por exportación de electricidad		USD	5.732.194
Ahorro en reducción de GEI		USD	0
Ingresos y ahorros anuales totales		**USD**	**7.992.694**
Flujo de efectivo neto anual - Año 1		**USD**	**7.087.610**

Viabilidad financiera

TIR antes de impuestos - activos	%	18,8%
Pago simple de retorno del capital	año	7,3
Repago - capital	año	6,1

Figura 9. Análisis financiero.
Fuente: elaboración propia

La Figura 10 presenta los resultados del análisis de sensibilidad y riesgo realizado para el proyecto eólico costa afuera, mediante la evaluación del comportamiento de la tasa interna de retorno (TIR) antes de impuestos frente a variaciones en las principales variables del modelo. El gráfico de impacto permite identificar que la electricidad exportada a la red y la tarifa de exportación de energía constituyen los factores con mayor incidencia positiva sobre la rentabilidad del proyecto. Por el contrario, los costos de inversión inicial representan la variable con mayor efecto negativo, lo que evidencia la importancia de optimizar la estructura de costos durante las etapas de diseño e implementación. En comparación, los costos de operación y mantenimiento presentan una influencia relativamente menor sobre el desempeño financiero global del proyecto.

Por otra parte, el histograma de distribución de probabilidades permite visualizar la variabilidad de la TIR obtenida a partir de los escenarios considerados en la simulación de incertidumbre. Como se observa en la Figura 10, la mayor concentración de resultados se ubica en un intervalo aproximado entre el 17 % y el 21 %, lo que indica una distribución relativamente estable de la rentabilidad esperada y una baja probabilidad de desviaciones extremas respecto al valor central estimado.

En conjunto, estos resultados evidencian que la rentabilidad del proyecto mantiene un comportamiento favorable incluso bajo condiciones de incertidumbre asociadas a las variables críticas del modelo. Por lo tanto, el análisis de riesgo respalda la robustez financiera de la propuesta y refuerza la viabilidad de la energía eólica costa afuera como alternativa de inversión dentro de las estrategias de transición energética en Colombia.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos demuestran que la implementación de parques eólicos costa afuera en el Caribe colombiano constituye una alternativa técnicamente viable y con perspectivas favorables desde los ámbitos energético, económico y ambiental. La caracterización del recurso eólico evidenció condiciones adecuadas para el aprovechamiento energético, permitiendo alcanzar niveles significativos de generación eléctrica asociados a una fuente renovable con bajos costos operativos y sin requerimientos de combustible durante su operación.

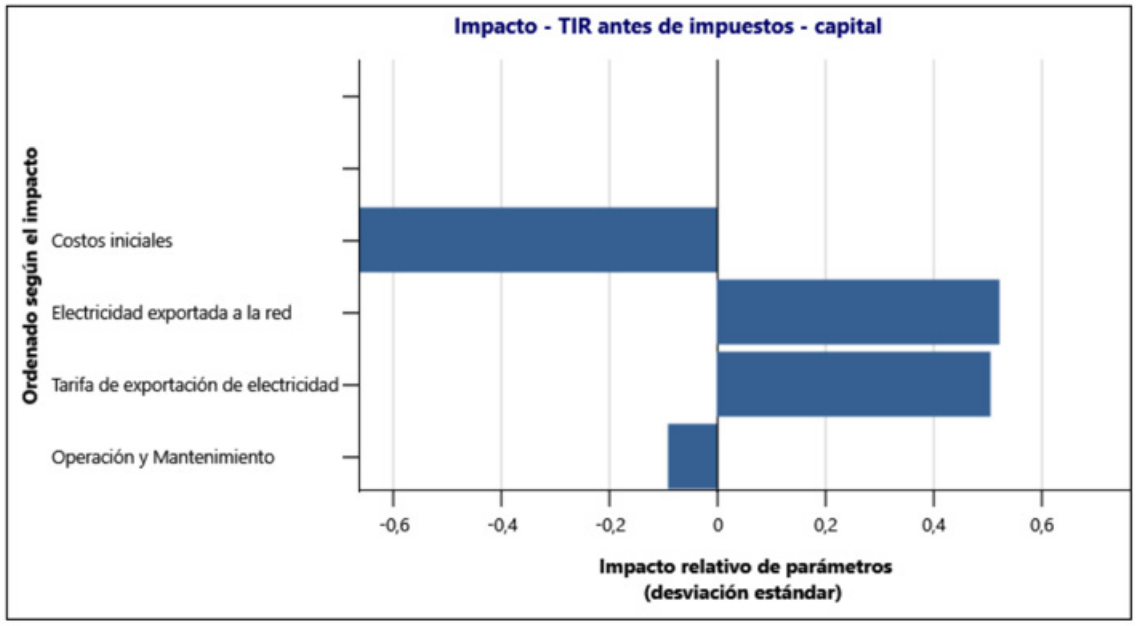
CC BY NC SA

Desde la perspectiva financiera, los indicadores obtenidos mediante la simulación muestran niveles atractivos de rentabilidad, reflejados en una tasa interna de retorno favorable y períodos de recuperación de la inversión competitivos. Asimismo, el análisis de sensibilidad y riesgo permitió identificar las variables con mayor incidencia sobre la rentabilidad del proyecto, evidenciando que la viabilidad económica se mantiene estable ante variaciones razonables en los parámetros principales, particularmente aquellos relacionados con la energía exportada a la red, la tarifa de venta de electricidad y los costos iniciales de inversión.

En el ámbito ambiental, la incorporación de generación eólica costa afuera permite reducir de manera significativa las emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con los escenarios convencionales de generación eléctrica. Esta reducción contribuye al cumplimiento de los objetivos de descarbonización y fortalece las estrategias orientadas a la mitigación del cambio climático y a la consolidación de una matriz energética más sostenible.

En conjunto, los resultados obtenidos respaldan el potencial estratégico del Caribe colombiano para el desarrollo de proyectos eólicos costa afuera y aportan evidencia técnica, económica y ambiental que puede servir de apoyo para la formulación de políticas públicas, la planificación energética y la toma de decisiones relacionadas con la transición energética del país. Asimismo, el estudio proporciona una base metodológica que puede ser utilizada como referencia para futuras evaluaciones de proyectos eólicos marinos en Colombia y en otros contextos con características similares.

Impacto



Distribución

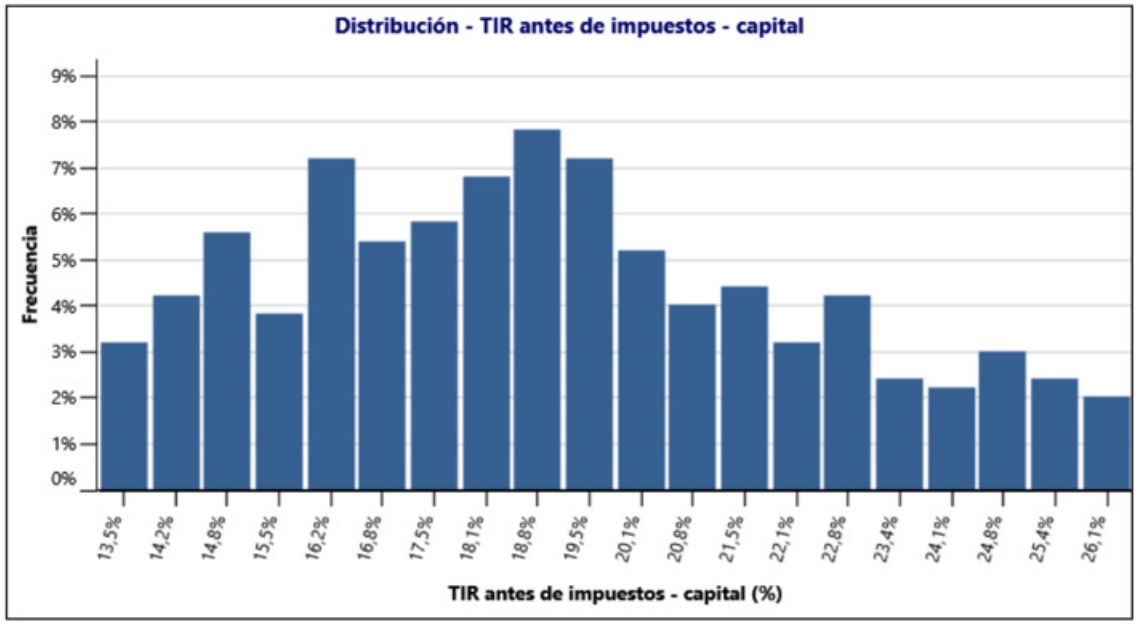


Figura 10. Análisis de riesgo.

En síntesis, la integración de los resultados técnicos, económicos, ambientales y de riesgo permite concluir que el escenario analizado presenta condiciones favorables para el desarrollo de proyectos eólicos costa afuera en el Caribe colombiano. Los hallazgos obtenidos evidencian que esta tecnología puede contribuir simultáneamente a la diversificación de la matriz energética, la reducción de emisiones y la generación de valor económico. En este sentido, los resultados constituyen una base de referencia para futuras evaluaciones de factibilidad y para la formulación de estrategias orientadas a la incorporación progresiva de la energía eólica marina dentro de los planes de transición energética del país.

DECLARACIONES Y TRANSPARENCIA DEL ARTÍCULO

Ítem	Declaración
Agradecimientos	El autor expresa su agradecimiento a la Institución Universitaria Pascual Bravo por el apoyo brindado durante el desarrollo de esta investigación y por facilitar las condiciones académicas necesarias para su ejecución.
Declaración de conflicto de intereses	El autor declara que no existen relaciones personales, profesionales, laborales, comerciales o financieras que hayan influido de manera inapropiada en la elaboración, desarrollo o publicación de este artículo.
Contribución de los autores	Joseph Sosapanta Salas: participó en la concepción del estudio, el diseño metodológico, la ejecución de la investigación, la administración del proyecto, la recopilación y análisis de datos, así como en la redacción, revisión y aprobación final del manuscrito. El autor es responsable del 100 % del contenido del artículo.
Información sobre financiación	Esta investigación no recibió financiación específica de organismos públicos, entidades privadas ni organizaciones sin ánimo de lucro.
Declaración sobre investigación con seres humanos / animales	Este artículo no reporta investigaciones empíricas con participantes humanos ni experimentación con animales.
Declaración sobre uso de datos de personas / consentimiento informado / protección de privacidad	No se utilizaron datos personales ni información proveniente de participantes humanos durante el desarrollo de esta investigación.
Descargo de responsabilidad	Las opiniones, interpretaciones y conclusiones presentadas en este artículo son responsabilidad exclusiva del autor y derivan de su trabajo académico e investigativo. Estas no representan necesariamente la posición oficial de la institución de afiliación ni de otras entidades relacionadas. El autor asume plena responsabilidad por el contenido, los resultados y los análisis presentados.
Declaración sobre el uso ético de tecnologías de inteligencia artificial / herramientas asistidas por IA	No se utilizaron herramientas de inteligencia artificial generativa ni sistemas automatizados de asistencia para la elaboración, análisis o redacción del presente manuscrito.

DISCLOSURE BOX

Item	Statement
Acknowledgements	The author expresses gratitude to Institución Universitaria Pascual Bravo for the support provided during the development of this research and for facilitating the academic conditions necessary for its completion.
Conflict of Interest Statement	The author declares that there are no personal, professional, employment-related, commercial, or financial relationships that could have improperly influenced the preparation, development, or publication of this article.
Author Contributions	Joseph Sosapanta Salas: contributed to the conception of the study, methodological design, research execution, project administration, data collection and analysis, as well as the drafting, review, and final approval of the manuscript. The author is responsible for 100% of the article's content.
Funding Information	This research received no specific funding from public agencies, private entities, or non-profit organizations.
Statement on Research Involving Humans and/ or Animals	This article does not report empirical research involving human participants or experimentation with animals.
Statement on Personal Data Use / Informed Consent / Privacy Protection	No personal data or information from human participants were used during the development of this research.
Disclaimer	The opinions, interpretations, and conclusions presented in this article are the sole responsibility of the author and derive from their academic and research work. They do not necessarily represent the official position of the affiliated institution or any related organizations. The author assumes full responsibility for the content, results, and analyses presented in the manuscript.
Statement on the Ethical Use of Artificial Intelligence Technologies / AI-Assisted Tools	No generative artificial intelligence tools or automated assistance systems were used in the preparation, analysis, or writing of this manuscript.

REFERENCIAS

Bethel, B. J. (2021). Caribbean Sea offshore wind energy assessment and forecasting. Journal of Marine Science and Application, 20, 558–571. https://doi.org/10.1007/s11804-021-00216-z

Castro, A. O., Robles-Algarín, C., Hernández-Callejo, L., Muñoz Maldonado, Y., & Cordero, A. M. (2023). Feasibility analysis of offshore wind power projects in the Caribbean region of Colombia: A case study using FAHP–GIS. Sustainability, 15, 16620. https://doi.org/10.3390/su152416620

Majdi Nasab, N., Islam, M. R., Muttaqi, K., & Sutanto, D. (2021). Optimization of a grid-connected microgrid using tidal and wind energy in Cook Strait. Fluids, 6, 426. https://doi.org/10.3390/fluids6120426

Majdi Nasab, N., Kilby, J., & Bakhtiaryfard, L. (2020). The potential for integration of wind and tidal power in New Zealand. Sustainability, 12(5), 1807. https://doi.org/10.3390/su12051807

Ministerio de Minas y Energía. (2022). Hoja de ruta para el despliegue de energía eólica costa afuera en Colombia. The Renewables Consulting Group.

Neira, E., Fuentes, M., Salgado, F., & Jelves, L. (2021). Floating offshore wind power: A case study for Concepción Bay, Chile. In 2021 IEEE Chilean Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON) (pp. 1–6). IEEE. https://doi.org/10.1109/CHILECON54041.2021.9702952

Odoi-Yorke, F., Adu, T. F., Ampimah, B. C., & Atepor, L. (2023). Techno-economic assessment of a utility-scale wind power plant in Ghana. Energy Conversion and Management: X, 18, 100375. https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2023.100375

Rueda-Bayona, J. G., Guzmán, A., Cabello Eras, J. J., Silva-Casarín, R., Bastidas-Arteaga, E., & Horrillo-Caraballo, J. (2019). Renewable energies in Colombia and the opportunity for offshore wind technology. Journal of Cleaner Production, 220, 529–543. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.174

Satir, M., Murphy, F., & McDonnell, K. (2018). Feasibility study of an offshore wind farm in the Aegean Sea, Turkey. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 81, 2552–2562. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.063

Shadman, M., Roldan-Carvajal, M., Pierart, F. G., Haim, P. A., Alonso, R., Silva, C., Osorio, A. F., Almonacid, N., Carreras, G., Maali Amiri, M., et al. (2023). A review of offshore renewable energy in South America: Current status and future perspectives. Sustainability, 15, 1740. https://doi.org/10.3390/su15021740

Sosapanta, J. C. (2020). Energía eólica en Colombia: Panorama y perspectivas bajo la triple cuenta de resultados. (S. D.). https://repository.unad.edu.co/handle/10596/38193

Sosapanta, J. C. (2023). Simulación de la influencia de la generación de energía eólica en la estabilidad transitoria. (S. D.). https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/83058