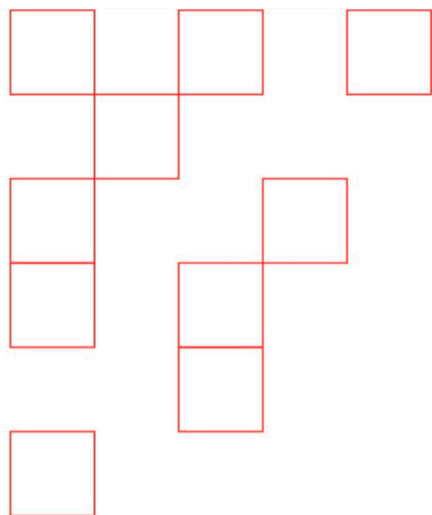




Universidad Europea CANARIAS



MASTER EN
ENERGIAS
RENOVABLES

TRABAJO FIN DE MASTER

TRABAJO FIN DE MASTER

Parque Eólico y Planta
Desalinizadora para
abastecimiento de agua
potable " JUTSÜIN PALA´A "

DIC 2023

Autores:

Andrea ÁLVAREZ VIDAL

Giovanny Mauricio BARRERO GONZÁLEZ

Dan IBARRA CAMPOS

Juan Manuel MANZANO SEGURA

Tutor o Tutora:

Dra. Pilar MONTAÑÉS RODRÍGUEZ

RESUMEN

Este proyecto de Fin de Máster -TFM se enfoca en la creación de un parque eólico mar adentro en las costas de Riohacha, La Guajira, Colombia, con el objetivo de aprovechar el enorme potencial eólico del lugar. La electricidad producida se utilizará para alimentar una planta desalinizadora para agua potable, 14.600 MWh, y el excedente para generar energía en la zona de influencia de este, propósito crucial para el progreso y bienestar de Riohacha, beneficiando a una población de 212.314 habitantes, según proyección DANE a 2023.

El parque eólico está compuesto por 20 aerogeneradores de última generación, diseñados para capturar eficientemente la energía eólica con capacidad total de 260 megavatios (MW). Este enfoque sostenible no solo contribuirá a la producción de energía limpia; sino también, tendrá un impacto positivo en la reducción de las emisiones de dióxido de carbono.

La parte distintiva de este proyecto radica en el uso de la energía generada para operar una planta desalinizadora que, mediante un sistema de osmosis inversa, potabiliza el agua de mar. El proyecto busca aumentar la cobertura tanto de energía eléctrica como de agua potable, lo que aborda la creciente necesidad de acceso a fuentes de agua seguras para uso doméstico en el municipio de Riohacha, la cual se estima es de 21.300 m³ diarios, aproximadamente.

Los resultados obtenidos indican la viabilidad del proyecto en el emplazamiento escogido, pues se cuenta con la disponibilidad del recurso eólico, permitiendo el funcionamiento eficiente del Parque Jutsüin Pala'a para producir la energía necesaria para la alimentación de la planta desalinizadora y un vertido en la red eléctrica local de la región. Adicionalmente, aunque el proyecto necesita una alta inversión económica, las proyecciones evidencian recuperación del capital y generación de utilidad en un plazo no mayor a 15 años.

ABSTRACT

The project focuses on the creation of an offshore wind farm off the coast of La Guajira, Colombia, with the central objective of harnessing the power of the wind to generate renewable energy. The electricity produced will be used to power a desalination plant for drinking water, 14,600 MWh, and the surplus to generate energy in the area of influence of this, a crucial purpose for the progress and well-being of the La Guajira region, benefiting a population of approximately 212.314 inhabitants, according to DANE 2023.

The wind farm is made up of 20 state-of-the-art wind turbines, designed to efficiently capture wind energy with a total generation capacity of 260 megawatts (MW). This sustainable approach will not only contribute to the production of clean energy, but will also have a positive impact on the reduction of carbon dioxide emissions.

The distinctive part of this project lies in the use of the energy generated to operate a desalination plant, using a reverse osmosis system to make seawater drinkable. The project seeks to increase coverage of both electrical energy and drinking water, which addresses the growing need for access to safe water sources in the small town of Riohacha, which approximately uses 21.300 m³ daily.

The results obtained indicate the viability of the project in the chosen location, since there is availability of the wind resource that allows efficient operation of the wind farm (allowing the functioning of the Jutsüin Pala'a Park) that produces the energy necessary to power the desalination plant and also allows discharge into the local electrical grid of the region. Additionally, despite being a project that requires a high economic investment, the projections show a recovery of the invested capital and the generation of income in a period of no more than 15 years.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	7
1.1. Justificación.....	7
1.2. Antecedentes	8
1.3. Marco teórico y metodológico.....	10
1.4. Objetivos Generales y particulares	10
1.5. Hipótesis de trabajo.....	11
1.6. Estado del arte	11
2. MEMORIA DESCRIPTIVA	13
2.1. Datos de partida	13
2.1.1. Ubicación y batimetría	13
2.1.2. Potencial eólico.....	14
2.1.3. Densidad del aire	16
2.1.4. Curva de potencia y coeficientes de empuje	17
2.1.5. Rosas de viento	19
2.2. Metodología	22
2.3. Estudio urbano, paisajístico y de impacto ambiental	22
2.4. Cálculo de las necesidades energéticas.....	26
2.5. Selección de componentes de la instalación	30
2.5.1. Aerogeneradores	30
2.5.2. Cimentaciones	32
2.5.3. Piezas de transición.....	34
2.5.4. Cables submarinos	35
2.5.5. Subestación costa afuera	35
2.6. Cálculo de la energía producida	36
2.7. Configuración del sistema	37
a. Descripción y diseño de las infraestructuras eléctricas de generación en baja y media tensión	37
b. Descripción de subestación. Sistema de alta tensión	44
2.8. Operación y mantenimiento de la instalación	44

2.9. Aspectos socioeconómicos	45
2.10. Estudio de seguridad y salud.....	46
2.11. Diseño de la planta de tratamiento de agua potable por osmosis inversa	46
2.12. Plazo de ejecución del proyecto	48
3. ASPECTOS ECONÓMICOS.....	49
3.1. Presupuesto de ejecución	49
3.2. Evaluación económica estimada: Inversión, financiación, costes de explotación, flujos de caja y rentabilidad	49
4. Análisis DAFO	50
5. CONCLUSIONES	52
5.1. Resultados	52
5.2. Comparativa hipótesis y resultado.....	53
5.3. Justificación de transformación	54
5.4. Consideraciones finales	55
5.5. Futuras líneas de investigación	56
5.5.1. Optimización del Rendimiento Eólico	56
5.5.2. Impacto socio económico a largo plazo	57
5.5.3. Obras por impuestos.....	57
5.5.4. Gestión de Energía y Agua	57
5.5.5. Participación Comunitaria y Educación Ambiental	57
5.5.6. Resiliencia ante Cambios Climáticos	57
5.5.7. Modelado de Impacto Ambiental a Largo Plazo	58
5.5.8. Respuesta de emergencia a tormentas tropicales y huracanes	58
6. WEBGRAFÍA	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Análisis de potencia y temperatura. [Autor propio]	16
Tabla 2. Especificaciones técnicas SG 11.0-200 DD [18]	17
Tabla 3. Especificaciones técnicas V164-9.0 MW [19].....	18
Tabla 4. Especificaciones técnicas Haliade-X [20].....	19

Tabla 5. Energía producida y pérdidas eléctricas. [Autor propio - WAsP]	37
Tabla 6. Líneas de generación [Autor propio]	38
Tabla 7. Especificaciones del transformador. [35].....	39
Tabla 8. Celdas de media tensión en las líneas de generación. [Autor propio]	40
Tabla 9. Características de las celdas de media tensión [36].....	41

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación y batimetría [15]	14
Figura 2. Zonas de interés [7].....	15
Figura 3. Rosa de viento de frecuencia a 150 m [Autor propio - Windographer]	20
Figura 4. Rosa de viento de velocidad a 150 m [Autor propio - Windographer]	20
Figura 5. Rosa de viento de energía a 150 m [Autor propio - Windographer]	21
Figura: 6. Rosa de viento de intensidad de turbulencia a 150 m [Autor propio]	21
Figura: 7. Impacto visual de los aerogeneradores. [21].....	23
Figura 8. Cableado submarino Costa Caribe. [7].....	25
Figura: 9. Ubicación del cableado al emplazamiento. [24].....	26
Figura: 10. Demanda energética en Colombia. [7]	28
Figura 11. Demanda energética en el país. [27]	29
Figura: 12. Partes del aerogenerador Haliade-X 13 MW [30]	30
Figura 13. Aerogenerador Haliade-X 13 MW. [31].....	31
Figura 14. Tipos de cimentación [32].....	33
Figura 15. Estructura de monopilote. [14].....	34
Figura 16. Pieza de transición para parques eólicos. [30]	35
Figura 17. Subestación costa afuera. [34]	36
Figura: 18. Celdas de protección. [36].....	40
Figura: 20. Análisis DAFO.....	50

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Histograma velocidad media a lo largo del año. [Autor propio].....	16
Gráfica 2. Curva de potencia del SG 11.0-200 DD [17]	17
Gráfica 3. Curva de potencia del V164-9.0 MW [17].....	18
Gráfica 4. Curva de potencia del Haliade-X [17].....	19
Gráfica 5. Proyección anual de demanda de energía. [7]	27
Gráfica 6. Diagrama de Gantt.....	48

1. INTRODUCCIÓN

En la última década, el uso de energías renovables ha aumentado exponencialmente a nivel mundial. La preocupación por el cambio climático y la necesidad de reducir la dependencia de recursos fósiles ha generado una búsqueda hacia una transición amigable y sostenible reduciendo al mínimo la huella de carbono.

La energía eólica offshore se distingue por la ubicación estratégica de sus aerogeneradores en aguas costeras y marinas, donde los vientos son más constantes y fuertes que en tierra firme. Esta característica permite la generación de electricidad limpia de manera más eficiente y constante, superando algunos de los desafíos asociados con la energía eólica terrestre, como la variabilidad de los vientos y la competencia por el uso del suelo.

1.1. Justificación

Colombia ha decidido unirse a esta tendencia global mediante la implantación de normativas e incentivos con el fin de convertirse en una de las potencias en energías renovables. El increíble potencial eólico de Colombia, en gran medida desaprovechado, ofrece una capacidad estimada de generación de energía eólica de 50 GW [1]. Esta capacidad rivaliza con regiones ya consolidadas como potencias eólicas, superando los niveles de viento disponibles en varios países europeos líderes en energía eólica. Por tal razón, en aras de aprovechar el potencial eólico Colombia se ubica entre los 3 mercados emergentes más importantes en el mundo que espera aumentar su capacidad eólica offshore hasta 2030. [1]

Para las comunidades, la más notable mejora está representada en la cobertura del servicio eléctrico del departamento. Según el CNPV 2018, el 39% de los hogares de La Guajira no cuentan con el servicio de energía eléctrica [2]; de igual manera el 53.4% no cuentan con acueducto y el 39.5% no tienen acceso a fuente de agua mejorada; siendo una de las razones por las que prolifera la pobreza en la región. Por otro lado, aunque se encuentre rodeada de agua, La Guajira posee una falta de agua dulce que ha generado un problema constante en esta región.

En un esfuerzo por aprovechar la potente energía eólica que poseen las costas de Riohacha, se plantea la construcción de un parque eólico en la región. La construcción de este parque eólico no solo representa una fuente limpia y sostenible de electricidad, sino también una respuesta ante la situación que presenta la zona sobre cómo proporcionar agua potable a una población en donde existe una región con fuentes de agua dulce limitadas.

La combinación de la generación de energía eólica y la desalinización del agua de mar en Riohacha tiene un impacto ambiental profundo y positivo. La utilización de energía eólica para la generación de electricidad reduce drásticamente las emisiones de gases de efecto invernadero

en comparación con las fuentes de energía tradicionales basadas en combustibles fósiles. Esto contribuye directamente a la mitigación del cambio climático, un problema global apremiante. [1]

Además de beneficios ambientales, este proyecto posee un impacto social y económico significativo en Riohacha y su comunidad. La disponibilidad de agua potable de calidad es fundamental para el bienestar de la población local y la reducción en la dependencia de fuentes de energía fósiles, que impactan directamente los costos de vida y desarrollo de la región.

A lo largo de este trabajo se expone el estado del arte en cuanto al recurso de eólica marina offshore. Se presentan tanto las características de la ubicación elegida, así como la viabilidad del proyecto. Por último, se plantean las conclusiones y posibles líneas futuras de investigación. Este estudio explora además cómo la innovación, la sostenibilidad y la colaboración pueden ser las claves para introducir una mejora social y económica de las zonas desabastecidas del municipio de Riohacha, departamento de La Guajira.

1.2. Antecedentes

La energía eólica marina, también conocida como energía eólica offshore, ha emergido como una fuente de energía renovable prometedora en todo el mundo. Esta forma de generación de energía aprovecha los vientos constantes y fuertes que soplan sobre los océanos y mares, ofreciendo un potencial significativo para satisfacer la creciente demanda de energía en un mundo que busca reducir su dependencia de los combustibles fósiles. Por lo anterior, es importante examinar los antecedentes de la energía eólica marina en el contexto mundial, latinoamericano y, en particular, en Colombia.

La historia de la energía eólica marina se remonta al siglo XIX; fue en el siglo XX cuando se produjeron avances significativos en la aplicación de la energía eólica offshore. Se llevaron a cabo proyectos experimentales en plataformas petroleras marinas y aplicaciones aisladas, lo que marcó los primeros pasos hacia la generación de energía eólica en alta mar. Estos proyectos iniciales demostraron el potencial de la energía eólica en entornos marinos y sentaron las bases para futuras innovaciones.

La década del 2000 marcó un punto de inflexión en la industria de la energía eólica marina, con Europa emergiendo como líder en este campo. Países como Dinamarca, el Reino Unido, los Países Bajos y Alemania lideraron el crecimiento de los parques eólicos marinos en aguas poco profundas. Se desarrollaron tecnologías avanzadas, como aerogeneradores de mayor capacidad de potencia, de fijación al lecho marino o flotantes con diversos sistemas de cimentación como son Monopilotes, Jackets, bases de gravedad, trípode; los cuales, se abordan más detalladamente en la sección 2.5 Selección de componentes de la instalación. Este crecimiento ha continuado a lo largo de los años y augura una industria en rápido crecimiento.

América Latina ha sido un testigo activo del crecimiento significativo de la energía eólica terrestre en la última década. Sin embargo, el desarrollo de la energía eólica marina en la región ha

progresado a un ritmo más. A pesar de contar con una vasta costa y recursos naturales favorables, la exploración costa afuera en América Latina ha sido relativamente limitada.

Dentro del contexto colombiano, la historia de la energía eólica es notablemente breve en comparación con naciones que han avanzado más en este campo. Su introducción se produjo en 2004 con el desarrollo del proyecto Jepírachi en La Guajira. Este proyecto, ejecutado por Empresas Públicas de Medellín (EPM), marcó un precedente como el primer parque eólico terrestre del país. [3]

En años más recientes, Colombia empezó a explorar su potencial en el ámbito de la energía eólica marina, particularmente en la costa Caribe colombiana. Este esfuerzo responde a diversos factores, entre los que se encuentran la búsqueda de alternativas energéticas más limpias y sostenibles, así como la necesidad de diversificar la matriz energética del país para garantizar su sostenibilidad. Un aspecto importante para resaltar es que, durante la Cumbre del Clima - COP 27, celebrado en Egipto el 8 de noviembre del 2022, Colombia se adhirió a la Alianza Mundial de la Energía Eólica Marina, comprometiéndose con la transición energética.

Teniendo en cuenta que en la última década se han desarrollado tecnologías que han permitido reducir los costes; sobre todo, para los países que cuentan con costa como es el caso de Colombia, se hace más probable la viabilidad de los proyectos. [4] Según el Informe de Registro de Proyectos de Generación de la Unidad de Planeación Minero-Energética UPME de la Subdirección de Energía Eléctrica del Ministerio de Minas y Energía MME de conformidad con las Resoluciones UPME No. 0520, No. 0638 de 2007 y No. 0143 de 2016 a 30 de junio de 2022 [5], se habían registrado un total de 59 proyectos para generación de energía a través de energía eólica desde el 2015, 7 de ellos, 2 en Uribe - La Guajira, de energía eólica costa afuera, los cuales se encuentran aún en fase de desarrollo.

Dadas las óptimas condiciones para el recurso eólico en la zona, existen actualmente numerosos proyectos en diferentes fases de desarrollo. En 2023 [6], se presentaron 70 proyectos de energía eólica. 28 vigentes, de los cuales 21 están en Fase 1 y 7 en Fase 2; 17 en La Guajira (Manauare 1, Riohacha 1, San Juan del Cesar 2, Uribe 13); con capacidad de potencia entre 50 y 825 MW los que se espera entren en operación, el primero, en diciembre del 2024 y, el último, en diciembre de 2034; de los cuales, 11 son costa afuera que se espera generen una potencia 5.035 MW.

Por otra parte, se debe destacar que, ya la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales - ANLA y Corpoguajira han otorgado licencias ambientales para la construcción y operación de parques eólicos en La Guajira. Es más, a pocos kilómetros de Riohacha, en el corregimiento de Camarones, la empresa Guajira Eólica I SAS está construyendo el Parque Eólico "EL AHUMADO" costa adentro con 50 MW de potencia que se espera empiece operación en diciembre de 2024. [7]

En lo que refiere a los recursos hídricos, hoy en día, la mayoría de los países están llevando a cabo una presión sin precedentes. Además de la creciente demanda, los recursos hídricos son

escasos en muchas partes del mundo. Las estimaciones indican que más del 40% de la población mundial vive en zonas con escasez de agua, y aproximadamente una cuarta parte del producto interno bruto mundial enfrenta este problema. Se prevé que para 2040, 1 de cada 4 niños vivirá en zonas con extrema escasez de agua. [8] Hoy en día, la seguridad hídrica es un desafío importante y en constante crecimiento para muchos países.

El cambio climático empeorará la situación al alterar los ciclos hidrológicos, hacer más impredecible la disponibilidad de agua y aumentar la frecuencia e intensidad de las inundaciones y sequías.

Gran parte del agua de Colombia no está distribuida uniformemente, por lo que pocas personas se benefician de ella; El departamento de La Guajira y su capital Riohacha, por su ubicación geográfica, no cuenta con agua para abastecer a toda la población. Es uno de los departamentos colombianos cuyos ingresos económicos dependen en gran medida de la explotación de recursos naturales, incluido el carbón, pero estos recursos no son suficientes para brindar una solución que permita a sus residentes acceder a un elementopreciado y necesario para la vida.

Del total de la población monitoreada en 2012 en la Guajira, el tamaño del consumo real fue del 25,5% que consumió agua potable (223.305 personas), considerando el porcentaje total de muestras obtenidas sin riesgo a nivel de ciudad, zona urbana y rural. El 17,4% de la población (152.058 personas) consumió agua potable, proporción total obtenida de muestras urbanas y rurales de riesgo bajo y moderado. En gran porcentaje, el agua consumida por los habitantes del Municipio de Riohacha y a lo largo del departamento de La Guajira no tiene un nivel de tratamiento o es muy bajo, involucrando muestreos de alto riesgo en varias zonas [9]

1.3. Marco teórico y metodológico

La metodología utilizada en el desarrollo de este trabajo de investigación destaca la revisión bibliográfica sobre la generación de energía a partir de la instalación de un parque eólico y una planta desalinizadora para la producción de agua potable de uso doméstico.

1.4. Objetivos Generales y particulares

A continuación, se describen los distintos objetivos generales y particulares reflejados en el presente proyecto; tanto en la implementación del parque eólico, como en la planta de desalinización. Estos objetivos se basan en cuestiones de: sostenibilidad energética, en el acceso al agua potable o en promover el bienestar de la comunidad local.

Los objetivos del proyecto son, en primer lugar, el estudio de viabilidad de un parque eólico marino, en la zona de la Guajira, con una capacidad de potencia de 260 MWh., **minimizando la emisión de gases invernadero** en la zona. En segundo lugar, se planteará una planta potabilizadora de agua, **energéticamente sostenible** mediante el parque eólico, capaz de **garantizar el acceso a agua potable** de la población circundante sin riesgo para su salud,

promoviendo el bienestar y el desarrollo económico de la comunidad local. Además, se tendrá en cuenta el impacto medioambiental y la viabilidad económica.

1.5. Hipótesis de trabajo

A continuación, se estudia la instalación del parque eólico offshore a partir de un sistema de aerogeneradores. Está ubicado en la costa de Riohacha, en la Guajira, concretamente en Colombia. La planta producirá 10.000 m³ de agua potable al día, cuyo destino final es el abastecimiento con agua potable de los núcleos poblacionales de Cruce, Playa y Polígono Industrial de Arinaga. Este estudio gira en torno al análisis, cálculo y dimensionado de los aspectos mecánicos y energéticos que forman parte del proceso de la generación de energía eléctrica a partir de los recursos eólicos disponibles y la desalación de agua de mar.

También se han realizado los apartados del estudio de aprovechamiento de energía, que tratan sobre la gestión del exceso de energía eólica marina producida. Se ha realizado un documento de introducción teórica a la desalinización en donde se explican, brevemente, los elementos tenidos en cuenta en este estudio y sus funciones en la planta de desalinización para producción de agua potable de uso doméstico.

1.6. Estado del arte

El potencial eólico offshore es la capacidad estimada de generar electricidad a partir del viento en el mar. Este potencial depende de factores como la velocidad, la dirección, la frecuencia y la variabilidad del viento, así como de la profundidad, la topografía y la distancia a la costa del lugar donde se instalarán las turbinas. Entre las fuentes consultadas que abordan este subtema, se encuentran:

- **Potencial de energía eólica offshore en el mar caribe colombiano** [10]

En este estudio se propone un enfoque metodológico para la evaluación del potencial eólico costa afuera en la región del Mar Caribe colombiano. Se utiliza un conjunto de datos de velocidad del viento proveniente de la base de datos global MERRA-2 y se emplea un modelo numérico WRF para llevar a cabo la estimación.

Los resultados obtenidos indican que el potencial eólico costa afuera en esta región se estima en 127 gigavatios (GW), y se identifican áreas de alta promesa en La Guajira, Magdalena y Atlántico como las de mayor potencial. [11] Se enfatiza la necesidad de futuros estudios que consideren variables adicionales, como la topografía submarina, la proximidad a la costa y la disponibilidad de infraestructura eléctrica existente.

- **Estudio del potencial eólico offshore de la zona costera caribe de Colombia** [12]

Este TFM propone una estrategia metodológica para la evaluación del potencial de energía eólica costa afuera en la costa de Riohacha, Colombia. Se hace uso de datos de velocidad del viento procedentes de la base de datos global ERA-Interim y se emplea un modelo numérico WRF para la evaluación. Los resultados obtenidos sugieren que el potencial eólico se estima en 96

gigavatios (GW), destacando áreas de alta promesa en La Guajira, Magdalena y Atlántico. Se enfatiza en la validación de estos resultados mediante mediciones en campo y aboga por un análisis integral que considere los aspectos técnicos, económicos y ambientales para la eventual implementación de esta tecnología.

Se puede observar que varias fuentes coinciden en que el potencial eólico offshore en el mar caribe colombiano es alto; sin embargo, se puede notar que hay diferencias en los valores estimados del potencial, debido a que utilizan diferentes bases de datos y modelos numéricos. Además, las fuentes reconocen las limitaciones de sus metodologías y sugieren realizar estudios más profundos que incluyan otros aspectos relevantes para el desarrollo de la energía eólica offshore.

Se puede observar que ambas fuentes coinciden en que el potencial eólico offshore en el mar caribe colombiano es alto; sin embargo, se puede notar que hay diferencias en los valores estimados del potencial, debido a que utilizan diferentes bases de datos y modelos numéricos. Además, ambas fuentes reconocen las limitaciones de sus metodologías y sugieren realizar estudios más profundos que incluyan otros aspectos relevantes para el desarrollo de la energía eólica offshore. Este es un análisis de la información presentada por los trabajos que han servido como referencia para el desarrollo del presente TFM. A continuación, se pondrán las referencias de los trabajos que abordan la información respecto a la energía eólica costa afuera en el país. El análisis anterior se basa en la información derivada de las fuente [7], [11], [12], [13], [14].

2. MEMORIA DESCRIPTIVA

2.1. Datos de partida

2.1.1. Ubicación y batimetría

Este estudio determina el recurso eólico en el emplazamiento mar adentro ubicado en el Mar Caribe, en la Costa Caribe Colombiana a aproximadamente 11 KM de la costa del municipio de Riohacha, La Guajira, Colombia para la instalación de un parque eólico. Esta área marítima escogida es una de las designadas por la *Hoja de ruta para el despliegue de la energía eólica costa afuera en Colombia* [7] en la cual se determina qué zonas del territorio marítimo colombiano pueden ser utilizados para proyectos de energía eólica costa afuera.

En los últimos años, la demanda de energía en Riohacha ha experimentado un marcado aumento, impulsada por el crecimiento de la población, el dinamismo económico y los avances en el sector turístico. Durante el año 2022, la demanda energética de Riohacha llegó a los 250 GWh, mostrando un incremento del 6% en relación con el año precedente. Adicionalmente, la costa caribe es la región del país con mayor demanda de energía, 17.601 GWh al año.

Por lo tanto, el parque eólico offshore que se requiere para cubrir la demanda de energía del municipio de Riohacha y de la región, tendrá una capacidad de potencia instalada de 260 MW. De acuerdo con las necesidades de infraestructura, el emplazamiento para la construcción del proyecto se encontrará ubicado en las coordenadas: latitud 11.656271° y longitud 72.936859°, Figura 1.

Las profundidades del lecho marino a lo largo de la costa colombiana son inferiores a los 70 metros, incrementándose a medida que se alejan de la costa. No obstante, en la zona seleccionada la profundidad es de alrededor de 9 metros, ya que se encuentra relativamente cercana a la costa, como se puede observar en la figura siguiente. Esta profundidad posibilita que la implementación del proyecto se lleve a cabo mediante cimentaciones fijas en el sustrato marino.

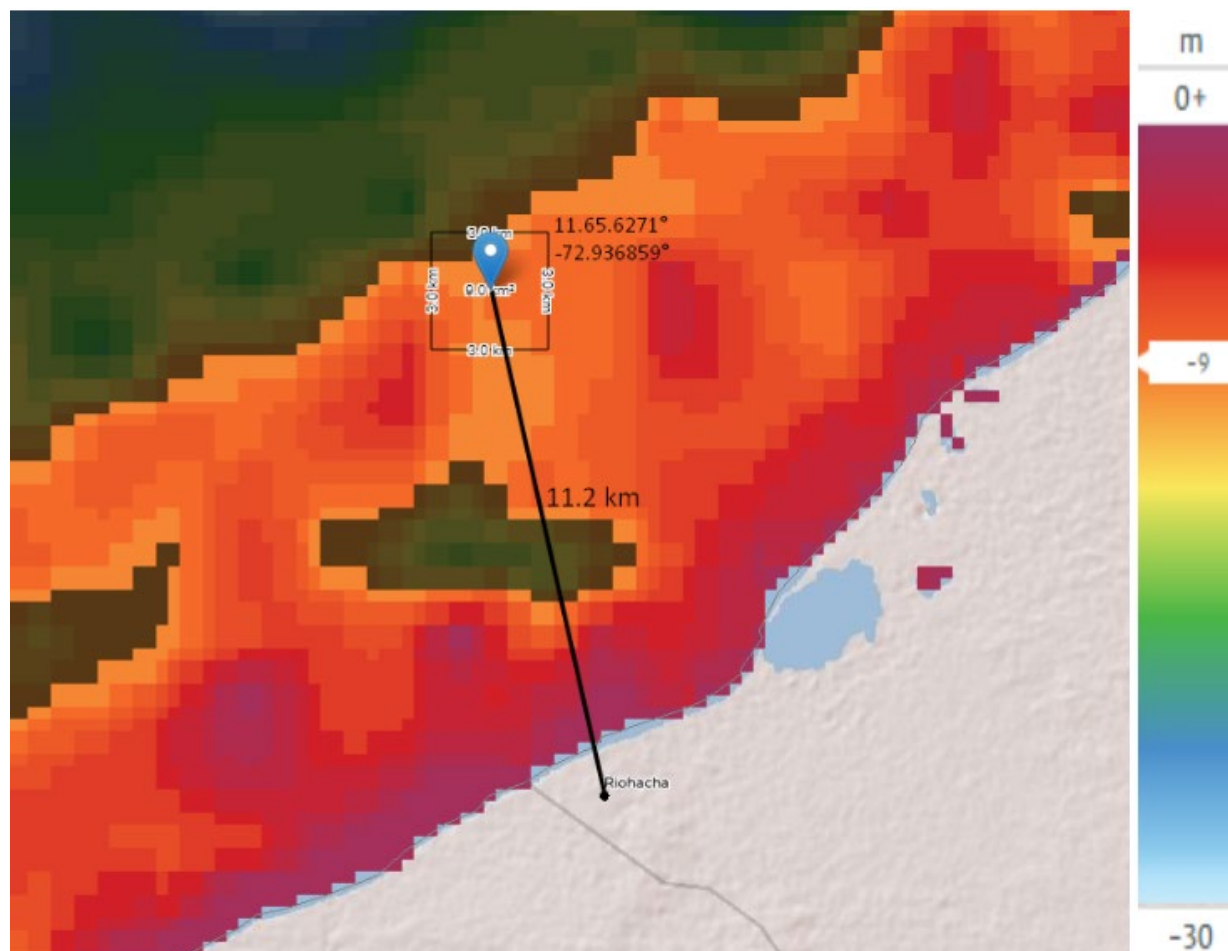


Figura 1. Ubicación y batimetría [15]

2.1.2. Potencial eólico

En la Figura 2 se puede ver el área marítima escogida. Es una zona del territorio marítimo colombiano determinada por la Hoja de ruta para el despliegue de la energía eólica costa afuera en Colombia [7], lo que favorece la viabilidad del proyecto.

Se escoge la zona central de La Guajira debido a su alto potencial eólico de despliegue, en específico el área FX-3 que se encuentra a una distancia entre 10 y 20 km de la costa de Riohacha, cuenta con extensas áreas para crecimiento eólico, impacto a las rutas de navegación bajo, desarrollo de proyectos con cimientos de fondo fijo representativo, Factor de Capacidad Neta - NCF entre 52% a 65,5%. [7]

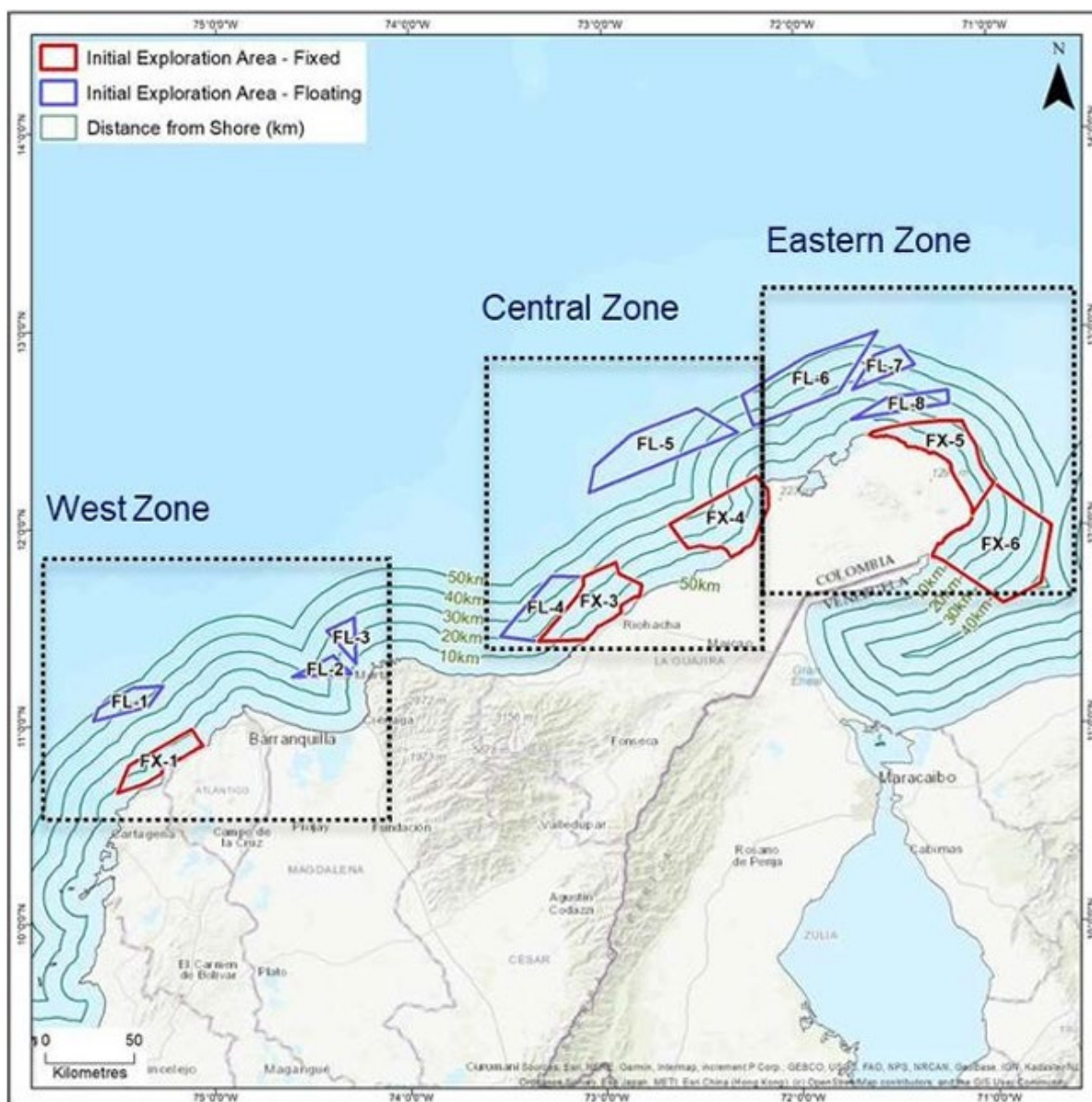
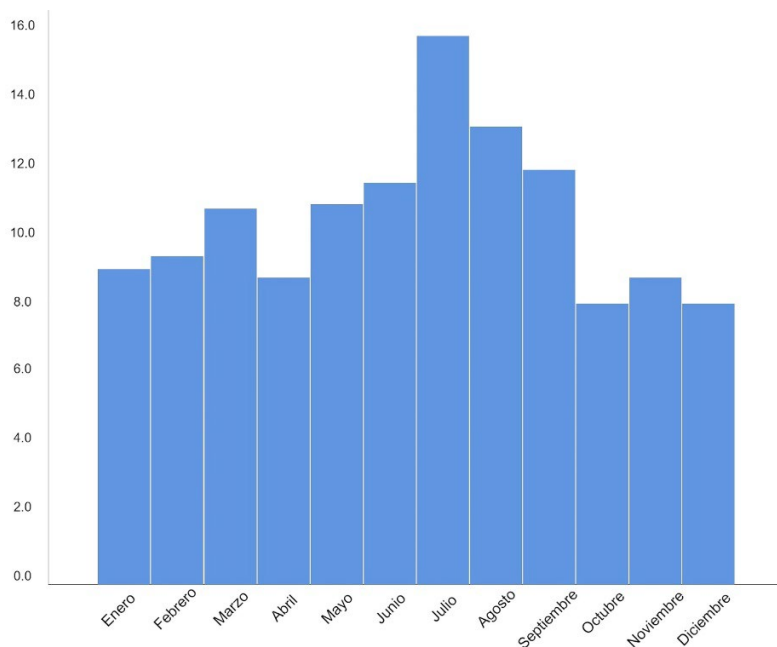


Figura 2. Zonas de interés [7]

La proximidad a un derecho de vía de transmisión existente en la Subestación de Riohacha; la cual contaba con 110 KV y fue mejorada aumentando su tensión a 220 KV entre el 2015 y 2019 por la empresa Celsia [16], con el fin de adaptarse a las necesidades del crecimiento constante que se está presentando en La Guajira, facilita la interconexión del parque eólico con la red eléctrica. Una línea de transmisión de 220kV es capaz de transportar una cantidad significativa de energía eléctrica, y tener acceso a una infraestructura de transmisión existente ahorra tiempo y costos en la expansión de la red eléctrica necesaria para conectar el parque eólico a la red principal.

Los datos de series temporales de viento en el emplazamiento recopilados del Global Wind Atlas [15] permiten determinar los valores de velocidades medias del viento durante el año como se observa en la Gráfica 1, mostrando una clara variación estacional en la velocidad media del viento.



Gráfica 1. Histograma velocidad media a lo largo del año. [Autor propio]

Los meses de julio y agosto tienen las velocidades medias más altas, con 15.8 m/s y 11.6 m/s, respectivamente. Estos son los meses más ventosos del año en esta ubicación específica.

2.1.3. Densidad del aire

Los datos de viento proporcionados por Windographer revelan los parámetros que se muestran en Tabla 1, entre los que se incluye la densidad del aire en la región al estimarla a una altura de 150 metros y que arroja una densidad del aire de 1.150 Kg/m³.

Variable	Valor
Latitud	N 11.656271
Longitud	W 72.936859
Elevación	0 m
Zona horaria	UTC*
Fecha inicial	1/01/2014 12:10
Fecha final	1/01/2018 0:00
Duración	1,460 days
En calma	3 m/s
Temperatura	26.37 °C
Densidad del aire	1.150 kg/m ³
Densidad de potencia a 50m	277 W/m ²
Clase de potencia	2 (Marginal)
Esponente ley potencial	0.426
Rugosidad superficial	10.6 m

Tabla 1. Análisis de potencia y temperatura. [Autor propio]

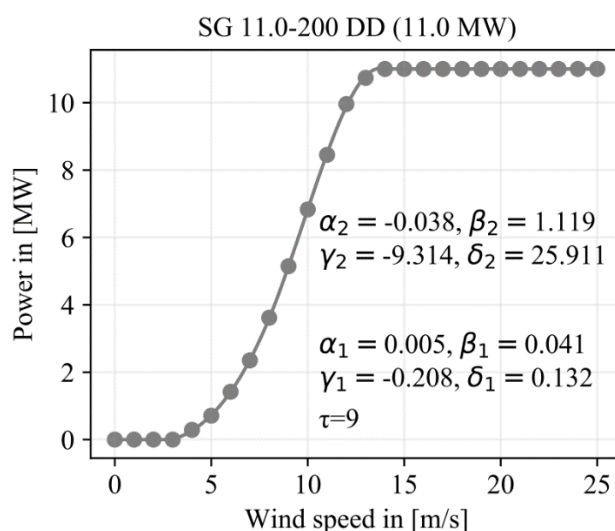
2.1.4. Curva de potencia y coeficientes de empuje

Se tendrán en cuenta 3 opciones de aerogeneradores para la instalación del parque eólico:

- **SG 11.0-200 DD**

Es un aerogenerador producido por la empresa Siemens Gamesa, tipo I, con un diámetro de rotor de 200 metros. Este aerogenerador tiene una potencia nominal de 11 MW y está diseñado para funcionar eficientemente en todas las velocidades del viento, Gráfica 2.

El aerogenerador SG 11.0-200 DD representa un avance significativo en la tecnología Direct Drive offshore.



Gráfica 2. Curva de potencia del SG 11.0-200 DD [17]

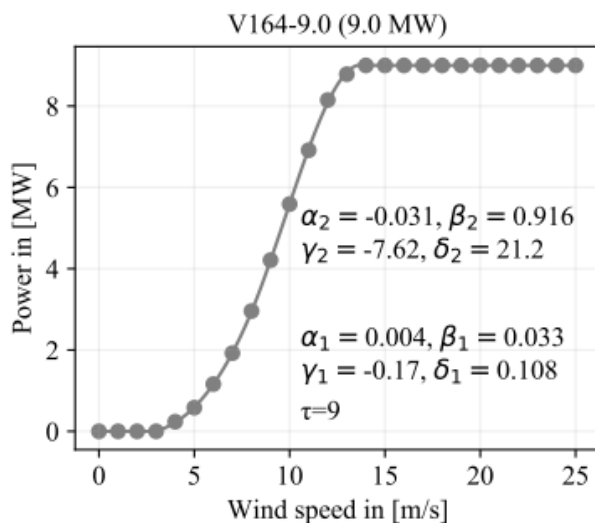
Este aerogenerador offshore, con una capacidad de 11 MW, Tabla 2, se distingue por su destacado desempeño, su rápida disponibilidad en el mercado y su confiabilidad en el sector de la energía eólica marina.

SG 11.0-200 DD	
Clase IEC	I, S
Potencia Nominal	11MW
Diámetro rotor	200m
Longitud de la pala	97m
Superficie de barrido	31.400m ²
Altura de buje	Según emplazamiento
Regulación de potencia	Regulación de paso, velocidad variable

Tabla 2. Especificaciones técnicas SG 11.0-200 DD [18]

- **V164-9.0 MW**

El aerogenerador ofrece un tren de transmisión conectado con bridas y componentes clave de fácil acceso, lo que simplifica las tareas de mantenimiento. Los cojinetes principales, el acoplamiento, la caja de cambios y el generador se pueden elevar por separado para facilitar labores de mantenimiento. Este aerogenerador tiene potencia nominal de 9.0 MW, Gráfica 3.



Gráfica 3. Curva de potencia del V164-9.0 MW [17]

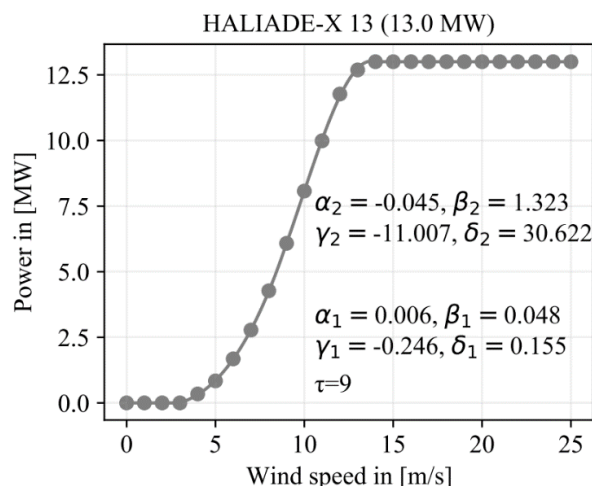
Además, cuenta con un generador de imanes permanentes y una góndola de dimensiones de 9,3 metros de altura, 20,7 metros de longitud y 8,8 metros de ancho, junto con un rotor de 164 metros de diámetro, Tabla 3. Esta turbina se basa en la plataforma de turbina V164, con mejoras en la caja de cambios, ajustes en el sistema de refrigeración y actualizaciones en el sistema de producción de energía, incluyendo un convertidor de escala completa que permite la conversión de 50/60 Hz a tensiones nominales de 33-35 o 66 kV.

V164-9.0 MW	
Clase IEC	I, S
Potencia Nominal	9MW
Diámetro rotor	164m
Longitud de la pala	82m
Superficie de barrido	21.124m ²
Altura de buje	Según emplazamiento
Factor de capacidad	60%

Tabla 3. Especificaciones técnicas V164-9.0 MW [19]

- **Haliade-X**

El aerogenerador marino Haliade-X es una turbina de alto rendimiento con capacidad de 13 MW, equipada con un rotor de 220 metros y una pala de 107 metros. Además, ofrece funcionalidades digitales avanzadas. Este aerogenerador tiene una potencia nominal de 13.0 MW, Gráfica 4.



Gráfica 4. Curva de potencia del Haliade-X [17]

Ha obtenido certificación independiente para producir hasta 13,6 MW, Tabla 4 incluso en condiciones de tifón, lo que la convierte en una opción financiable para proyectos eólicos. Destaca por su factor de capacidad que está entre el 60 - 64% [7] superando el estándar de la industria, lo que indica su eficiencia en la generación de energía.

Haliade-X 13MW	
Clase IEC	IB
Potencia Nominal	13MW
Diámetro rotor	220m
Longitud de la pala	107m
Superficie de barrido	38.000m ²
Altura de buje	Según emplazamiento
Factor de capacidad	60-64%

Tabla 4. Especificaciones técnicas Haliade-X [20]

2.1.5. Rosas de viento

En este apartado se observan las rosas de viento correspondientes a la campaña de medición con valores de una extrapolación a 150 metros para el periodo total. En adelante, podemos identificar la dirección del viento en diversas variables como son velocidad, frecuencia energía y turbulencia.

- **Rosa de vientos de frecuencia para el nivel de 150 metros**

De acuerdo con la Figura 3, la dirección NNE se destaca con una frecuencia del 36,512%, que equivale a 57,505 ocurrencias y una orientación de 22.5 grados, le sigue la dirección NE con una frecuencia del 16,772%, representando 26,415 ocurrencias. Asimismo, la dirección N muestra una frecuencia significativa del 14,328%, equivalente a 22,566 ocurrencias.

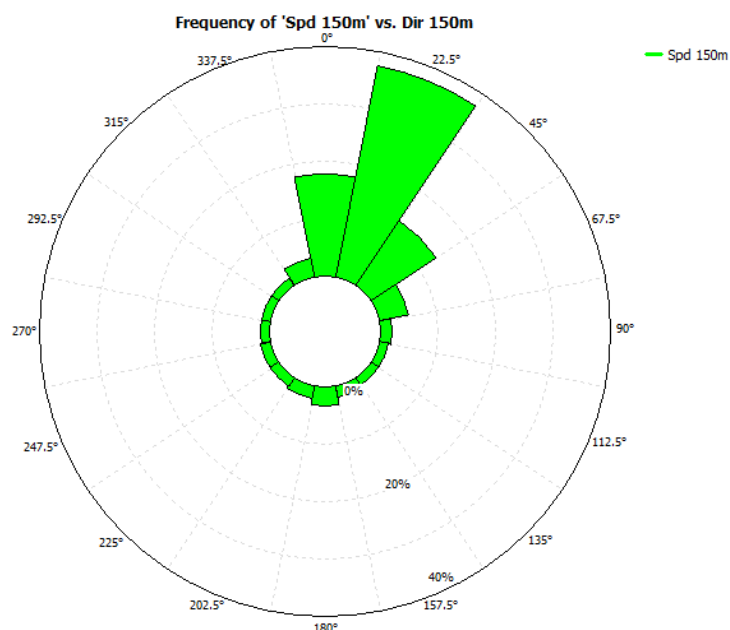


Figura 3. Rosa de viento de frecuencia a 150 m [Autor propio - Windographer]

- **Rosa de vientos de velocidad para el nivel de 150 metros**

Analizando la Figura 4, se concluye que la velocidad del viento más alta que se alcanza son los 14.023 m/s, dirigida hacia el NNE, seguida de velocidades de 11.480 m/s en dirección al NE y 11.467 m/s hacia el N

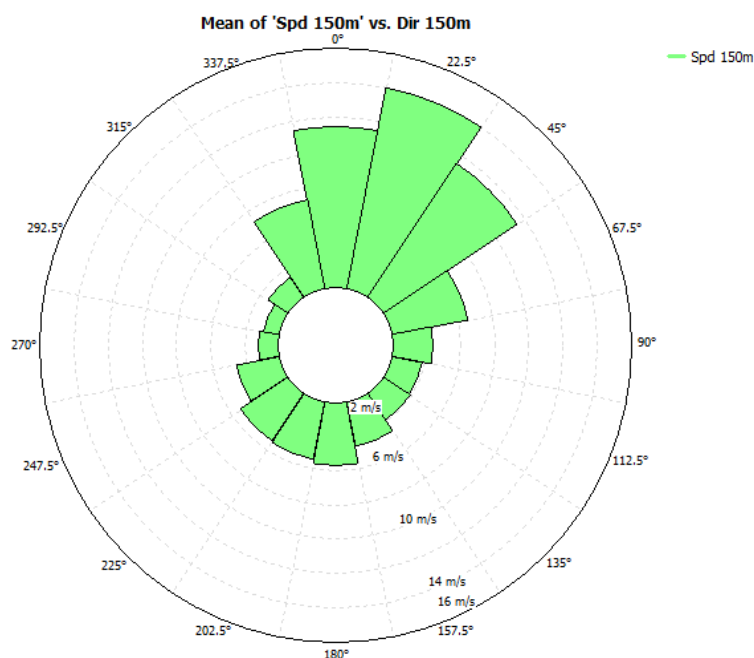


Figura 4. Rosa de viento de velocidad a 150 m [Autor propio - Windographer]

- **Rosa de vientos de energía para el nivel de 150 metros**

La Figura 5 nos proporciona una visión de la distribución de la energía total a nivel de 150 metros. En este análisis, se destaca que la dirección predominante para la energía es NNE con un notable 60.28%, seguida por NE con un 19.90%, y N con un 14.22%.

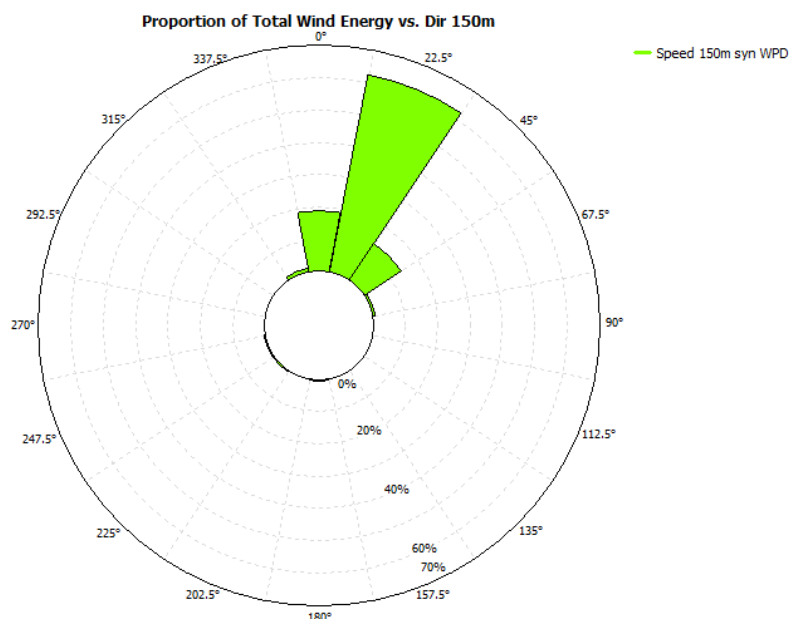


Figura 5. Rosa de viento de energía a 150 m [Autor propio - Windographer]

Finalmente, al observar la información sobre la intensidad de la turbulencia, Figura 6, se aprecia que existen valores de turbulencia con una dispersión significativa en direcciones predominantes hacia el WNW y NW, específicamente en el rango entre los 270° y los 337°. En estas direcciones, los valores de turbulencia se sitúan en aproximadamente 0.35 (m/s).

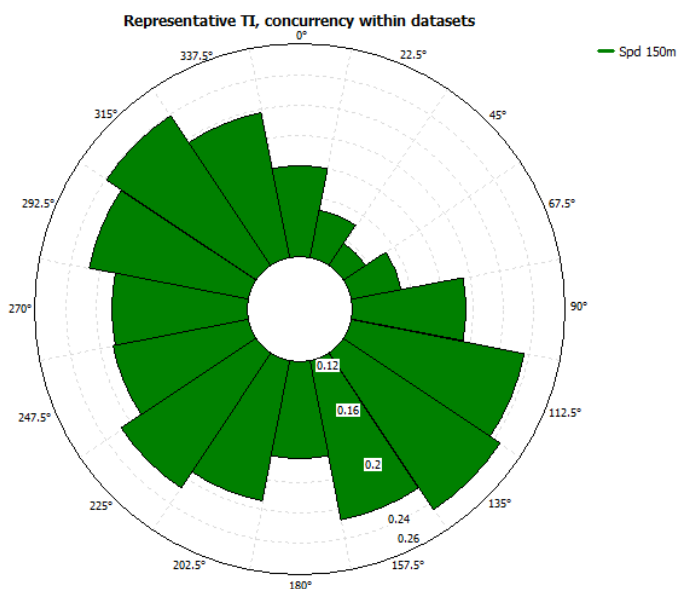


Figura: 6. Rosa de viento de intensidad de turbulencia a 150 m [Autor propio - Windographer]

2.2. Metodología

En primer lugar, se lleva a cabo un estudio exhaustivo de la ubicación específica para evaluar las condiciones del viento, la profundidad del agua y otros factores clave que influyen en la viabilidad del proyecto. Esto incluye la recolección de datos meteorológicos históricos y mediciones para determinar la velocidad y dirección del viento a diferentes alturas. Asimismo, se analizan las características del lecho marino para la planificación de las cimentaciones de los aerogeneradores, *ANEXO I*.

La segunda etapa se centra en el diseño y la planificación detallada del parque eólico costa afuera. Esto incluye la selección de aerogeneradores específicos, la disposición en el mar, la infraestructura de apoyo, como subestaciones eléctricas y cables submarinos, y la logística para la construcción y el mantenimiento. Adicionalmente, se realiza un análisis de impacto ambiental completo para evaluar los posibles efectos en la vida marina y definir medidas de mitigación.

Finalmente, se abordan los aspectos legales y regulatorios, asegurando la obtención de todos los permisos y concesiones necesarias; se realiza el estudio de seguridad y salud correspondiente y; por último, se lleva a cabo el estudio de la evaluación económica que aborda las estimaciones de costos y la identificación de fuentes de financiamiento. La colaboración con las autoridades locales y las partes interesadas será un componente fundamental de esta metodología para garantizar el éxito y la sostenibilidad del proyecto de energía eólica costa afuera en Riohacha, Colombia.

2.3. Estudio urbano, paisajístico y de impacto ambiental

Un punto principal para el estudio urbano es la distancia a la cual se encuentra el proyecto desde la costa. En este caso, el parque eólico costa afuera se ubica en las coordenadas de latitud 11.656271° y longitud -72.936859°, aproximadamente a 9 kilómetros de la costa del municipio de Riohacha, La Guajira, Colombia. La profundidad del fondo oceánico y sus características se establecen en el *ANEXO II: Estudio de impacto ambiental, Ecosistema marino*.

La influencia visual de un parque eólico puede tener una repercusión tanto favorable como desfavorable en las personas que lo observan. La valoración estética y la percepción visual son especialmente significativas en las áreas próximas a la costa. Colombia se caracteriza por su diversidad de paisajes, muchos de los cuales han sido designados como zonas de gran interés escénico debido a sus cualidades estéticas.

Es por esto por lo que, hay que identificar el límite de distancia desde la cual se podría observar un objeto, en este caso los aerogeneradores, con altura de 150 metros sobre el nivel del mar, por lo cual se utiliza la siguiente ecuación:

$$d = \sqrt{2Rh + h^2}$$

Ecuación 1

Donde d es la distancia en kilómetros, R es el radio de la Tierra (aproximadamente 6371 km), y h es la altura del objeto en kilómetros. Esta fórmula asume que la Tierra es una esfera perfecta y que no hay refracción atmosférica ni obstáculos en el camino. Si se aplica la Ecuación 1 para un objeto de 150 metros de altura, se obtiene:

$$d = \sqrt{2 * 6371 * 0.15 + 0.15^3}$$

$$d = 44.3 \text{ km}$$

Es decir, se podría ver el objeto desde una distancia de unos 44.3 kilómetros si el observador está al nivel del mar y no hay nada que interfiera con la visión. Sin embargo, esta distancia puede variar según las condiciones reales. Por ejemplo, si el observador está a una cierta altura sobre el nivel del mar, podrá ver más lejos. Incluso, si hay refracción atmosférica, que es el fenómeno por el cual la luz se curva al pasar por capas de aire con diferente densidad y temperatura, el objeto podrá verse desde una distancia mayor o menor, dependiendo del ángulo de incidencia y de la dirección de la curvatura.

De la misma manera, si hay nubes, niebla, humo o polvo en el aire, la visibilidad se reducirá y el objeto podrá verse desde una distancia menor; sin embargo, se puede observar un aproximado del impacto visual de los aerogeneradores según la distancia en la que se encuentran, pero es importante tener en cuenta la altura de los aerogeneradores.



Figura: 7. Impacto visual de los aerogeneradores. [21]

De igual manera, es necesario determinar las normativas y legislaciones que interceden en los procesos de construcción de parques eólicos en Colombia. Entre ellas está la Resolución 1312 del 2016, que establece los términos de referencia para la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental (EIA) [22] en Colombia. El objetivo de esta resolución es definir los lineamientos generales que deben seguir los solicitantes de una licencia ambiental para proyectos eólicos continentales, adaptando los términos de referencia a las particularidades de cada proyecto. La resolución contiene los siguientes aspectos:

- El marco normativo y conceptual que regula la energía eólica continental en Colombia y en el mundo.
- La descripción general de la tecnología eólica continental, sus componentes, su funcionamiento y sus beneficios ambientales y sociales.
- Los criterios para la selección del sitio, el diseño y la operación del proyecto eólico continental, considerando aspectos técnicos, económicos y ambientales.
- Los requisitos para la elaboración del Diagnóstico Ambiental de Alternativas (DAA) y el Estudio de Impacto Ambiental (EIA), incluyendo los aspectos a evaluar, las metodologías a aplicar, los indicadores a usar y los planes de manejo a proponer.
- Los anexos técnicos que soportan la resolución, como las fichas ambientales, las matrices de impacto, los mapas temáticos y las referencias bibliográficas.

Esta resolución busca facilitar el desarrollo de proyectos eólicos en Colombia, promoviendo el uso de energías renovables y contribuyendo al desarrollo sostenible del país.

Por otra parte, mediante la Resolución 204 de 2012, emitida por la Dirección General Marítima (DIMAR) [23], se establece un marco regulatorio que delimita áreas de seguridad a lo largo del trazado de cables submarinos en aguas jurisdiccionales colombianas. Según esta normativa, se define un área de seguridad que se extiende a 1/4 de milla náutica, es decir, alrededor de 500 metros, a cada lado de los cables submarinos.

Esta delimitación implica restricciones significativas, como la prohibición de fondear embarcaciones, llevar a cabo actividades de pesca de arrastre y realizar cualquier actividad marítima que implique contacto, total o parcial, con el lecho marino.

En este contexto, es necesario establecer una comunicación previa con la DIMAR para identificar la naturaleza y ubicación de la infraestructura submarina existente. Esto es esencial para evitar cualquier posible afectación a los cables submarinos y garantizar la seguridad y operatividad de estas infraestructuras críticas.

La colaboración y el entendimiento entre los promotores de proyectos eólicos y las autoridades marítimas son fundamentales para garantizar un desarrollo armonioso de las actividades en las aguas costeras colombianas y para cumplir con las regulaciones vigentes en materia de seguridad marítima.

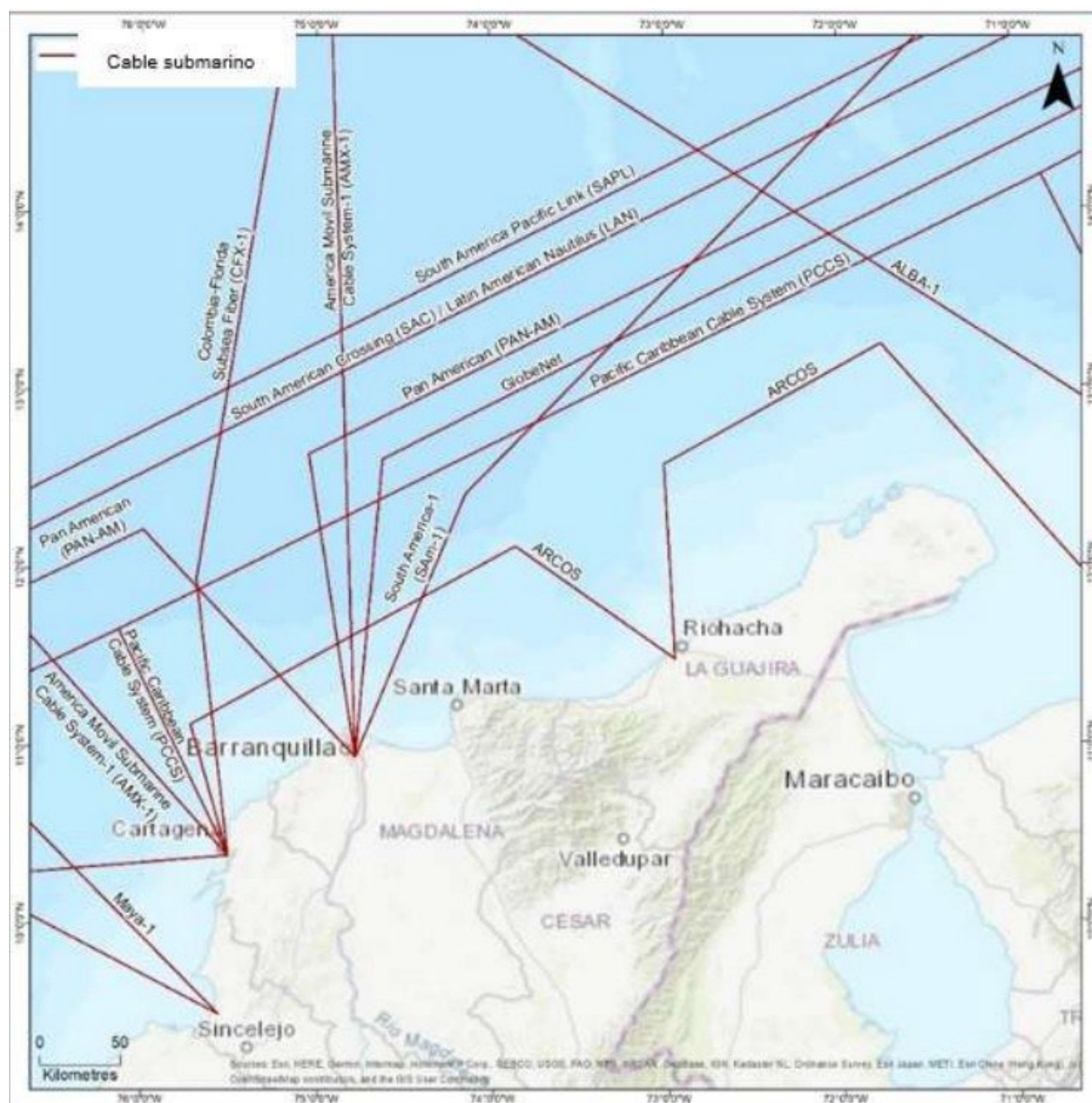


Figura 8. Cableado submarino Costa Caribe. [7]

Como indica la resolución, la distancia mínima para garantizar la viabilidad de un proyecto debe ser de alrededor de 500 metros, a cada lado de los cables submarinos. Para el emplazamiento seleccionado en este proyecto se tiene que el cable submarino ARCOS es el más cercano y la distancia más próxima al parque eólico es de más o menos 4 kilómetros, tal como se muestra en la Figura 9.



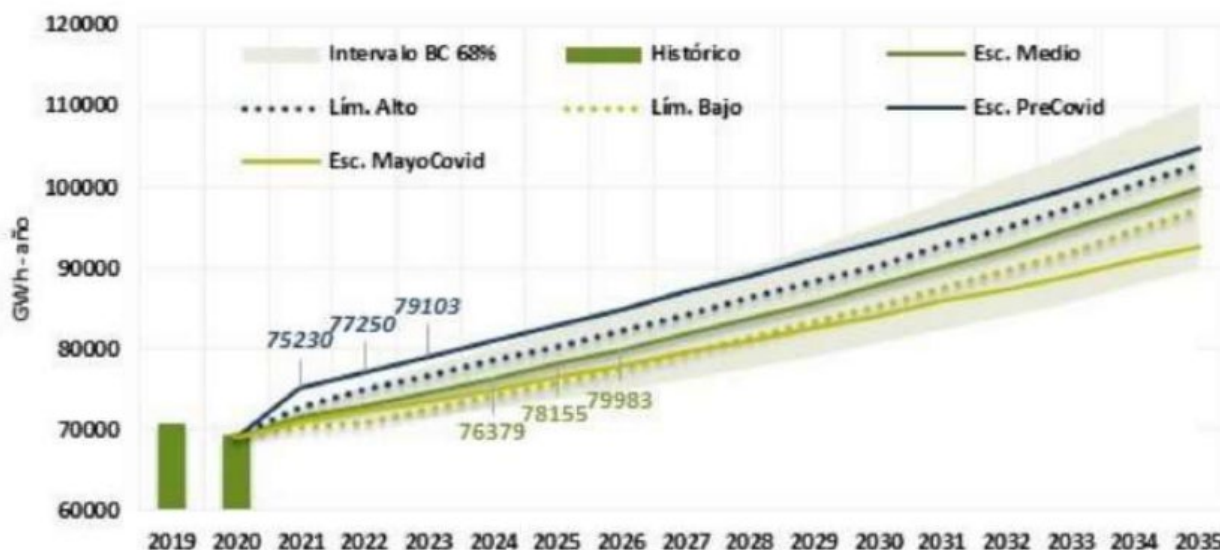
Figura: 9. Ubicación del cableado al emplazamiento. [24]

2.4. Cálculo de las necesidades energéticas

Históricamente, Colombia ha confiado, en gran medida, en fuentes de energía convencionales, principalmente, la hidroeléctrica y térmica para satisfacer su demanda energética. Las energías renovables como la energía solar fotovoltaica y la eólica en tierra no han sido utilizadas en una escala significativa en el país. No obstante, diversos factores están impulsando un cambio en esta tendencia. La aparición de sequías recurrentes, la creciente importancia de los objetivos ambientales y la necesidad de diversificar el suministro de energía están generando un aumento anticipado en la capacidad de generación de energía renovable en Colombia.

Para comprender este cambio, es esencial analizar la combinación histórica y actual de fuentes de generación de energía y electricidad en Colombia; ya que, se prevé un aumento sustancial en la demanda de electricidad en el futuro debido al crecimiento demográfico, económico y social del país, Gráfica 5. En este contexto, se están desarrollando diversos escenarios energéticos a

largo plazo que proponen posibles trayectorias hacia el año 2050, y que indican como Colombia podría avanzar hacia una mayor incorporación de fuentes de energía renovable en su matriz energética. [7]



Gráfica 5. Proyección anual de demanda de energía. [7]

Este cambio hacia las energías renovables representa una oportunidad significativa para reducir la dependencia en Colombia de fuentes de energía convencionales, mitigar los riesgos asociados con sequías y contribuir a los esfuerzos globales para abordar el cambio climático. La transición hacia una matriz energética más diversa y sostenible es un proceso clave para el futuro energético del país y puede tener un impacto positivo tanto en la seguridad energética como en el medio ambiente. En comparación con otros países, la demanda de electricidad en Colombia se considera relativamente baja por habitante. En el año 2014, el consumo promedio per cápita fue de aproximadamente 1312 kWh, ubicando al país en el puesto 129 a nivel mundial en este aspecto [25].

Según las proyecciones de la Unidad de Planeación Minero-Energética - UPME de Colombia, se espera que la demanda eléctrica nacional en el año 2021 se sitúe en un rango de 70,000 GWh a 75,000 GWh anuales. Se anticipa un aumento significativo para el año 2035 cuando se espera que la demanda alcance entre 90,000 GWh y 110,000 GWh por año. Este incremento en la demanda eléctrica se deriva de varios factores, incluyendo la electrificación planificada en el sector energético colombiano, una mayor adopción de vehículos eléctricos y el crecimiento de la población [26].

La demanda de electricidad en Colombia muestra disparidades significativas en las diferentes regiones del país, Figura 10, con las zonas de la Costa Caribe y el Centro experimentando los niveles más altos de consumo en 2020, registrando 17,601 GWh y 16,492 GWh, respectivamente, mientras el Sur registra 1,982 GWh. Por otro lado, en otras áreas de Colombia,

la demanda eléctrica es notablemente menor. En la región del Noroccidente, que es la siguiente en términos de consumo más alto, se utilizó un total de 9,598 GWh de electricidad durante el mismo año. Esta distribución desigual de la demanda de electricidad refleja de cerca la distribución de la población en el país, lo que sugiere que las áreas más densamente pobladas tienden a requerir una mayor cantidad de energía eléctrica para satisfacer sus necesidades [26]

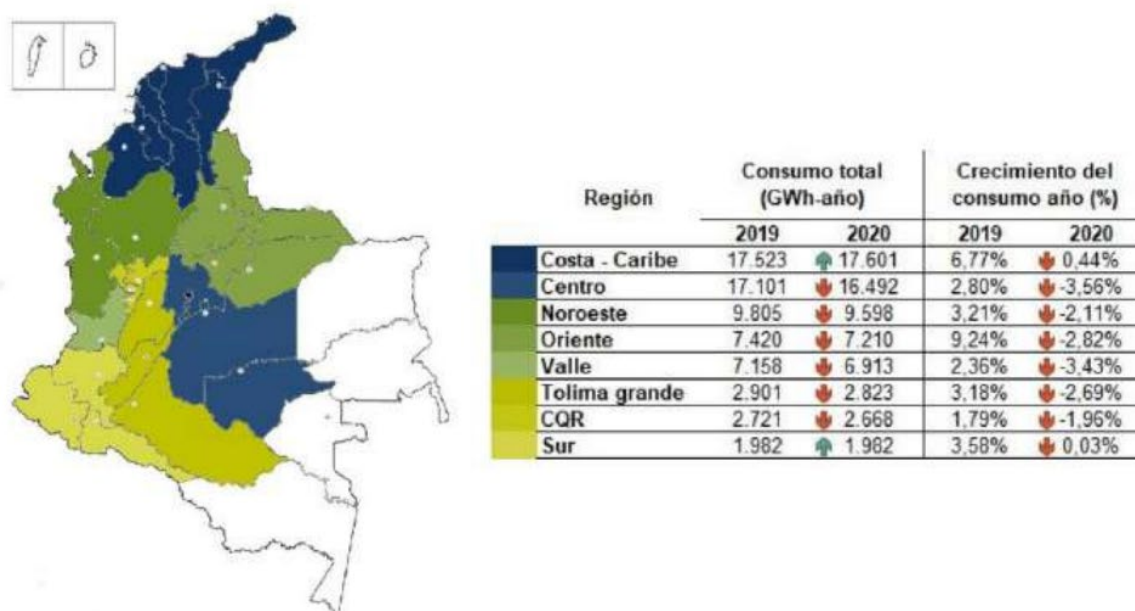


Figura: 10. Demanda energética en Colombia. [7]

En 2019, Colombia tenía una capacidad de generación de electricidad de 18 gigavatios (GW) [26], lo que excedía significativamente la demanda máxima. Esta capacidad adicional se consideraba necesaria para acomodar la variabilidad de los recursos energéticos, las fluctuaciones estacionales y los momentos de alta demanda.

A medida que se preveía un aumento en la demanda de energía, se esperaba que la capacidad de generación también se incrementara para mantener un equilibrio adecuado. Según la Unidad de Planeación Minero-Energética - UPME, se estimaba que la demanda máxima de energía estaría en el rango de 10 GW a 11 GW en 2021. Por otra parte, se pronosticaba que esta demanda aumentaría a un rango de 11 GW a 15 GW para el año 2035. Este aumento previsto a 15 GW representaría una tasa de crecimiento anual que oscila entre el 2% y el 4% [26].

El crecimiento proyectado de la capacidad de generación era necesario para asegurar que el suministro de electricidad pudiera satisfacer las crecientes necesidades del país a medida que la economía y la población continuaban expandiéndose. Esta planificación a largo plazo tenía como objetivo garantizar un suministro eléctrico confiable y sostenible a medida que Colombia avanzaba hacia el futuro.

Debido a que la generación de electricidad en Colombia se basa principalmente en fuentes de energía hidroeléctrica y térmica, las energías renovables distintas de las hidroeléctricas tienen una presencia limitada en la matriz energética actual. Estas energías renovables no hidroeléctricas suelen estar representadas por instalaciones de escala reducida, como sistemas de cogeneración, tecnología solar fotovoltaica y eólica, Figura 11. Para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y disminuir la dependencia de las fuentes hidroeléctricas y térmicas, se espera un marcado incremento en la implementación de energías renovables no hidroeléctricas en Colombia. [27]

El Plan Nacional de Energía - PNE de Colombia [3] establece metas ambiciosas para el crecimiento de las energías renovables no hidroeléctricas en el período que abarca desde 2020 hasta 2050. Estos objetivos incluyen la instalación de al menos aproximadamente 19 gigavatios de capacidad de energía renovable no hidroeléctrica para el año 2050 en cada uno de los cuatro escenarios propuestos por el PNE.

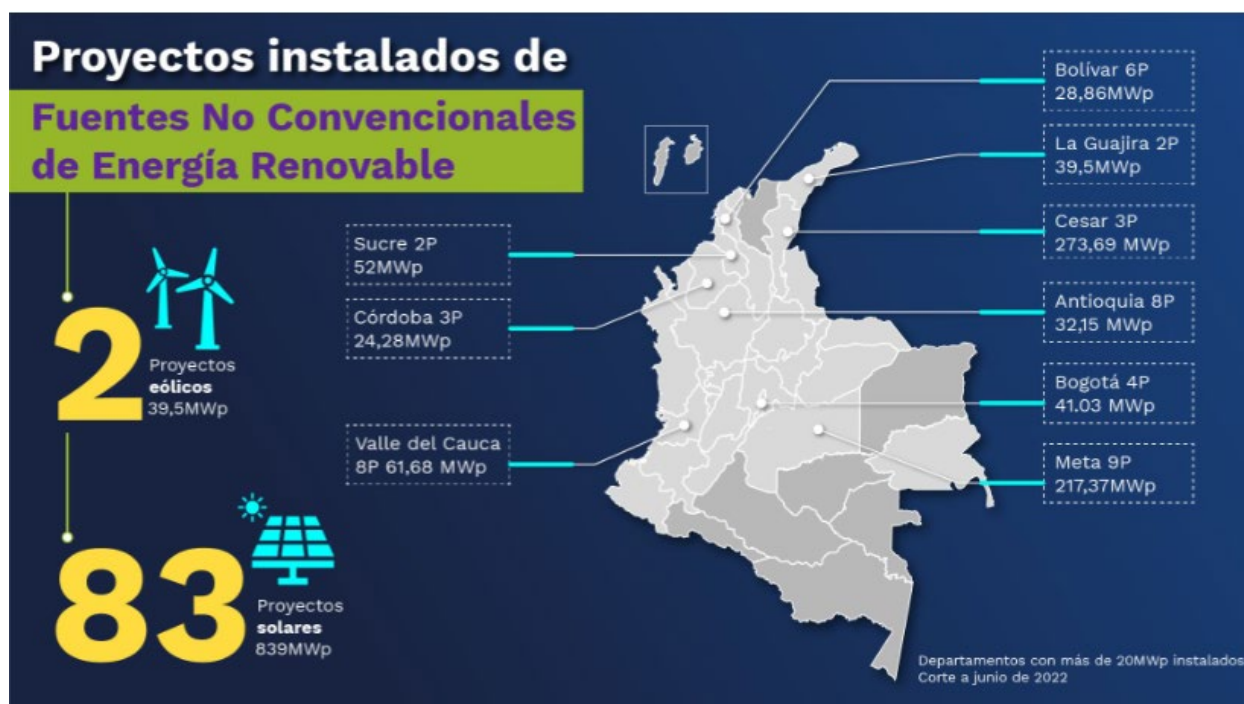


Figura 11. Demanda energética en el país. [27]

Este enfoque refleja el compromiso de Colombia con la transición hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles, con el fin de reducir las emisiones de carbono y diversificar la matriz energética del país. Se busca así aumentar la resiliencia del suministro eléctrico y contribuir a la mitigación del cambio climático a largo plazo.

En la actualidad, el departamento de la Guajira cuenta con dos proyectos de generación de energía renovable, el parque Eólico Jepírachi que contaba con una potencia de 19.5 MW, el cual se encuentra fuera de funcionamiento dado a la terminación de su vida útil. [28] Por otro lado, el

parque eólico Guajira I, inaugurado el 21 de enero del año 2022 con una capacidad de generación de energía de 20 MW.

Tras 17 años desde la puesta en funcionamiento de Jepírachi, el primer parque eólico de Colombia bajo propiedad de Empresas Públicas de Medellín - EPM, Guajira 1 [29] se sitúa como un logro notable debido a sus características excepcionales. Este parque, construido por ISAGEN, está marcando un hito en la industria. Cuenta con 10 aerogeneradores distribuidos en una superficie de 5,5 hectáreas y tiene una capacidad instalada de 20 MW (megavatios). Esta capacidad es equivalente al consumo de energía de 33,295 familias, lo que demuestra su significativo potencial para abastecer una gran cantidad de hogares. [3]

Guajira 1 también representa el primero de un ambicioso plan que prevé la construcción de un total de 14 parques eólicos en Colombia durante los próximos tres años [7]. Este proyecto es un paso crucial en la expansión de la energía eólica en el país, lo que contribuye a la diversificación de la matriz energética y a la generación de energía limpia y sostenible. La incorporación de parques eólicos como Guajira 1 representa un avance importante hacia un futuro más sostenible y una mayor independencia energética en Colombia.

2.5. Selección de componentes de la instalación

2.5.1. Aerogeneradores

En el *Anexo I. Estudio de caracterización del Recurso Eólico*, se concluye que el aerogenerador más adecuado para el proyecto es el Haliade-X, ya que cumple con todos los requisitos técnicos esenciales para la instalación del parque eólico. La Figura 12 muestra las partes del Haliade-X.

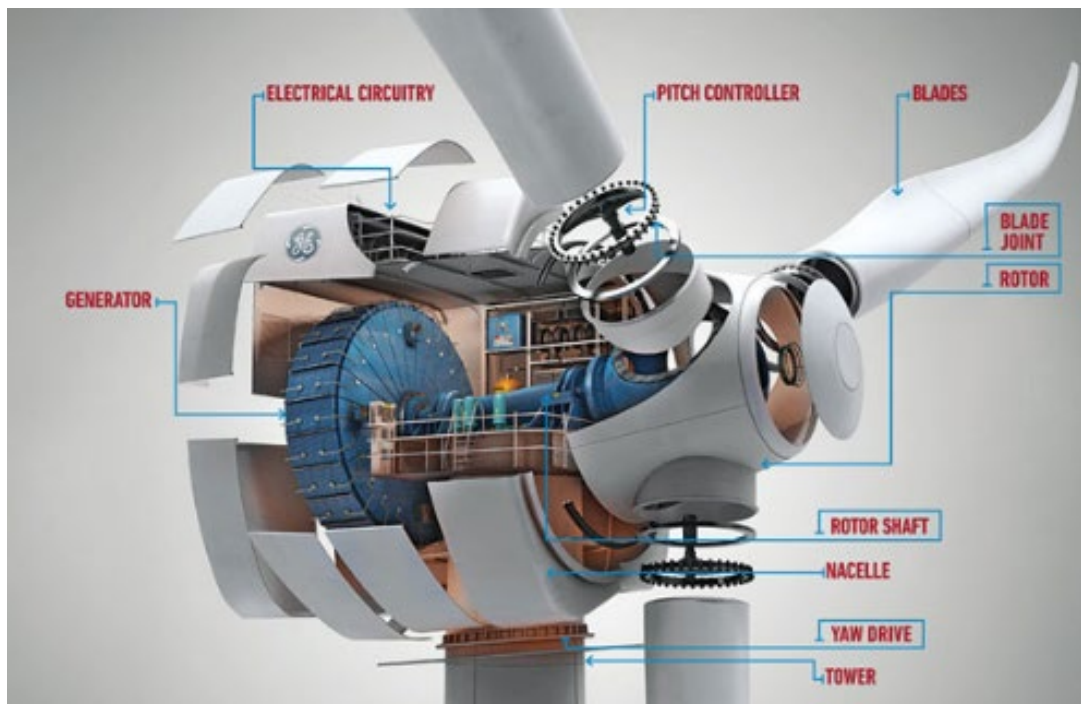


Figura: 12. Partes del aerogenerador Haliade-X 13 MW [30]

El Haliade-X tiene 3 hojas; capacidad de 13 MW; el rotor es de 220 metros.; la altura de 248 metros.; las palas son de 107 metros.; el área de barrida de 38.000 m²; Wind class (IEC) Ib; velocidad máxima 7U/min; velocidad de punta 81 m/s; altura del buje 133/150; caja de cambios direct drive; la tensión es de 6.600 V; la frecuencia de la red es de 50/60 Hz; conexión IGBT full power converter; densidad de potencia 1 es 342.1 W/m² y densidad de potencia 2 es 2.9 m²/kW. [30]. En la Figura 13 se puede observar un Haliade-X en instalación.



Figura 13. Aerogenerador Haliade-X 13 MW. [31]

Este parque eólico está compuesto por un total de 20 aerogeneradores dispuestos en dos hileras paralelas que se orientan hacia el Noreste, aprovechando al máximo la velocidad del viento en esa dirección. La separación entre los aerogeneradores en la misma hilera es de aproximadamente 750 metros, y la distancia entre las dos hileras paralelas es de unos 1800 metros, con el propósito de minimizar los efectos de la estela cuando se capturan los vientos.

Un aspecto destacado de este proyecto es que, al ubicarse costa afuera, no plantea los desafíos de distanciamiento de zonas habitadas o carreteras, ya que se encuentra a una distancia segura de 9 kilómetros de la población más cercana, que es el municipio de Riohacha. Esto elimina posibles conflictos con la comunidad y facilita la logística de instalación y operación del parque eólico en este emplazamiento marítimo.

2.5.2. Cimentaciones

Estas estructuras varían según factores como costos, ubicación, condiciones geotécnicas y profundidad, por lo cual se toman en cuenta las cimentaciones de fondo fijo, dado que, de acuerdo con la batimetría estas son las opciones más aptas debido a la profundidad del lecho marino. Las principales tecnologías de cimentación incluyen:

- **Monopilote**

Es la opción más común, representando aproximadamente el 80% de las instalaciones. Está diseñado para profundidades no superiores a 30 metros y consta de un pilote cilíndrico incrustado en el lecho marino. Su simplicidad y amplia experiencia en la industria son ventajas clave.

- **Chaqueta**

Compuesta por tres o cuatro pilotes de 2 metros de diámetro unidos e insertados en el fondo marino a través de un tubo de acero. Se utiliza a profundidades de 25 a 50 metros y puede reducir costos mediante geometrías eficientes.

- **Trípode**

Consta de tres estacas de 10 a 20 metros de profundidad, conectadas a una torre a través de un eje central de acero. Se recomienda para profundidades de hasta 50 metros y combina elementos del monopilote y la chaqueta. Es especialmente eficaz en condiciones extremas como huracanes.

- **Base de gravedad**

Emplea su propio peso para estabilizar la estructura y es adecuada para profundidades superiores a 20 metros. Por lo general, se compone de concreto con arena, roca y hierro, además de un eje central de concreto o acero que se conecta a la torre de la turbina.

- **Cubeta de Succión**

Ofrece una alternativa a la instalación tradicional con pilotes, ya que fija la columna al lecho marino mediante el bombeo de agua fuera de un cubo invertido. Las diferencias de presión permiten que la estructura quede asegurada sin la necesidad de martillado ruidoso.

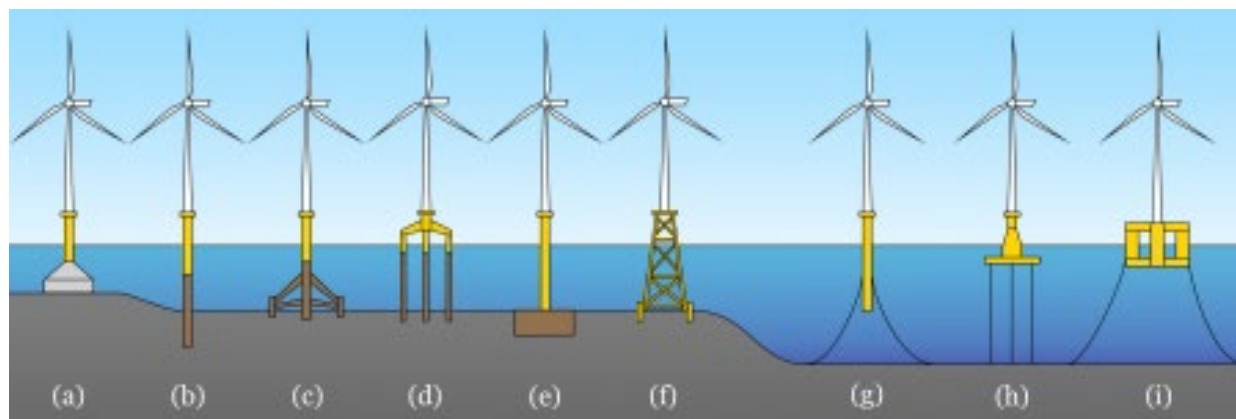


Figura 14. Tipos de cimentación [32]

Para el proyecto de instalación de los aerogeneradores, se opta por utilizar monopilotes como cimentaciones. La elección se basa en la profundidad del área de instalación, ya que esta alternativa es especialmente adecuada para lugares con estas características, además de tener en cuenta las condiciones climáticas de la zona; ya que, estas cimentaciones permiten a las torres de las turbinas soportar grandes flujos de viento en caso de tormentas o huracanes, comunes en la costa caribe.

Los monopilotes se destacan por su capacidad de adaptarse al lecho marino, garantizando una base segura y estable para los aerogeneradores. Esto resulta esencial para el parque eólico Jutsüin Pala'a, teniendo en cuenta que la composición del lecho marino en las costas de Riohacha presenta una gran variabilidad, caracterizada mayormente por la presencia de arenas terrígenas de grano fino a medio, con algunos sectores que contienen grava y cantos. Estas costas se encuentran en estrecha proximidad a áreas que presentan plataformas de abrasión, así como terrazas pertenecientes a las eras geológicas del Neógeno y el Jurásico. En términos generales, la diversidad en la composición de las arenas y la presencia de elementos como grava y cantos indican una morfología costera heterogénea en la región de Riohacha. [33]

El entorno costero se ve influenciado por la interacción de diferentes procesos geológicos a lo largo del tiempo, dando lugar a una variedad de características que definen la estructura y el aspecto de las playas locales. La coexistencia de diferentes tipos de sedimentos, desde arenas finas hasta materiales más gruesos como grava y cantos, refleja la complejidad geológica y la diversidad de procesos que han contribuido a la formación de las costas de Riohacha.

Su aplicación es particularmente idónea para parques eólicos ubicados costa afuera, en áreas con profundidades de agua que no superen los 50 metros. Además, los monopilotes pueden ser diseñados para soportar condiciones de carga extremadamente desafiantes, incluyendo huracanes, lo que los convierte en una elección segura y confiable para entornos marinos adversos, Figura 15.

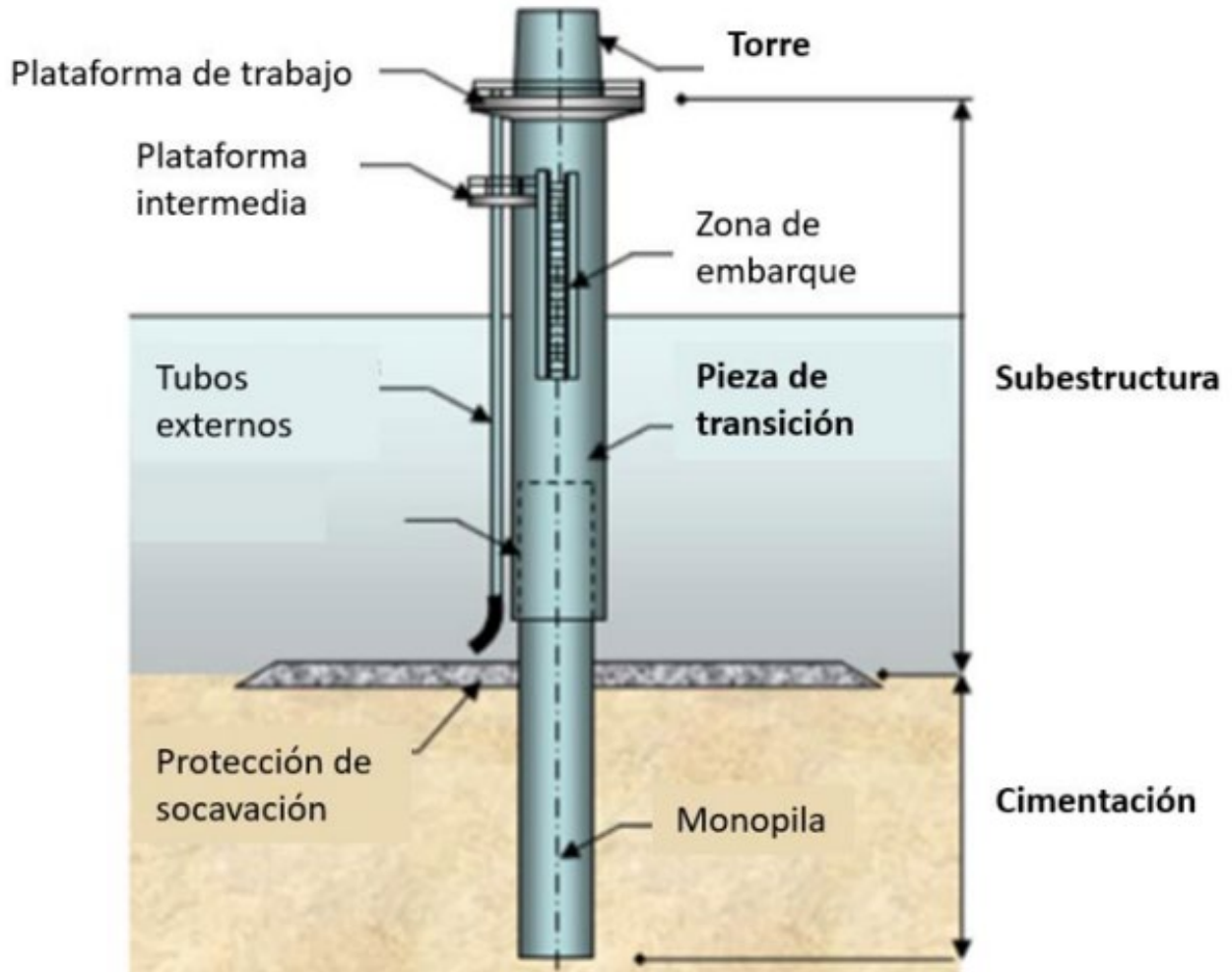


Figura 15. Estructura de monopilote. [14]

2.5.3. Piezas de transición

Las piezas de transición, conocidas como TP, son componentes estructurales que han tenido una aplicación común para vincular los aerogeneradores, las torres y las subestructuras de cimentación. Su función principal es garantizar la verticalidad de toda la estructura, incluyendo la torre y el propio aerogenerador, al tiempo que facilitan el acceso necesario para tareas de mantenimiento y conexiones de cables eléctricos.

Los TP suelen estar compuestos por un robusto tubo de acero con paredes de considerable espesor, con un diámetro que puede superar los 5 metros y una longitud que puede alcanzar aproximadamente los 20 metros. Además de la estructura principal, los TP incorporan diversos elementos secundarios de acero, como escaleras, pasamanos y otros accesorios, que contribuyen a la funcionalidad y seguridad de la instalación. [30]



Figura 16. Pieza de transición para parques eólicos. [30]

2.5.4. Cables submarinos

Los parques eólicos marinos deben contar con una infraestructura esencial para la conversión y transferencia de la energía generada. Esto implica la implementación de tres componentes críticos: cables de interconexión que conectan las turbinas a una subestación offshore, la subestación costa afuera que transforma la energía para su exportación, y un cable de exportación de alto voltaje que transmite la energía desde la subestación offshore hasta la red eléctrica en tierra firme. Estos elementos forman un sistema integrado que permite la recolección, transformación y transferencia eficiente de la energía eólica, facilitando su incorporación a la red eléctrica terrestre.

2.5.5. Subestación costa afuera

Las subestaciones costa afuera son estructuras de considerable tamaño diseñadas específicamente para realizar una conversión de la energía generada en los cables de interconexión a un nivel de voltaje más elevado, lo que facilita su exportación a la red eléctrica. Estas subestaciones marinas se componen de dos partes fundamentales: la parte superior y la base. La construcción, transporte e instalación de estas subestaciones comparten similitudes con los procesos utilizados en las plataformas marinas de petróleo y gas de gran envergadura.

En consecuencia, muchas empresas que han acumulado experiencia en la fabricación, transporte e instalación de estas plataformas en entornos marinos pueden aplicar habilidades

transferibles en el ámbito de las subestaciones marinas. Esta subestación costa afuera juega un papel fundamental en el proceso de transformación y transmisión de la electricidad producida por los aerogeneradores en el mar. Por lo tanto, su función principal es actuar como un punto de conexión clave entre el parque eólico en el mar y la red eléctrica en tierra firme.

La subestación costa afuera realiza la conversión de la energía eléctrica recolectada en los cables de interconexión que conectan todas las turbinas eólicas del parque offshore. Luego, eleva el voltaje de la electricidad para facilitar su transporte a través de un cable de exportación de alto voltaje hacia la subestación terrestre. Esta última etapa permite la integración de la energía eólica en la red eléctrica convencional, lo que la hace disponible para el suministro de energía a hogares, empresas e industrias en tierra firme.



Figura 17. Subestación costa afuera. [34]

2.6. Cálculo de la energía producida

De acuerdo con las especificaciones, selección del aerogenerador y datos de viento del emplazamiento escogido mar adentro en Riohacha, La Guajira, se ha realizado el cálculo de la energía producida por el parque, además de determinar la energía vertida a la red, considerando los factores de pérdidas, como se observa en la Tabla 5 y se detalla en el Anexo I. Estudio Micrositing.

	Total	Media	Min	Max
Total bruta AEP (GWh)	1210,697	60,535	60,535	60,535
Total neta AEP (GWh)	1181,955	59,098	57,71	60,354
Perdida de estela (%)	2,37	-	0,3	4,67
Factor de capacidad (%)	52,9	-	51,6	54
Velocidad media (m/s)	-	10,51	10,51	10,51
Velocidad media (estela reducida) (m/s)	-	10,33	10,16	10,48
Densidad del aire (kg/m3)	-	1,131	1,131	1,131
Densidad de potencia (W/m2)	-	1407	1407	1407

Tabla 5. Energía producida y pérdidas eléctricas. [Autor propio - WAsP]

La estimación de la energía vertida en la red, con pérdidas eléctricas previstas del 97% para la instalación eléctrica y del 95% para otros factores, muestra una proyección anual de 1,034.71 GWh. Este cálculo, junto con las horas equivalentes y el factor de capacidad del 45.4%, respalda la contribución sostenible y significativa del parque eólico a la red eléctrica.

2.7. Configuración del sistema

a. Descripción y diseño de las infraestructuras eléctricas de generación en baja y media tensión

- **Nivel de Media Tensión (20 o 30 kV)**

El nivel de media tensión se refiere al rango de tensiones eléctricas en el que operan los componentes del sistema de generación eólica. En parques eólicos, la elección típica es 20 kV o 30 kV. Esto depende de la capacidad del parque y de las regulaciones locales. El nivel de media tensión debe ser seleccionado considerando la capacidad de generación del parque eólico.

Parques más grandes con una mayor cantidad de aerogeneradores tienden a operar a 30 kV para reducir las pérdidas de transmisión y minimizar las caídas de tensión. Si se espera que el parque eólico tenga una gran capacidad, como es común en áreas eólicas, 30 kV podría ser una opción adecuada, por este motivo se escoge la tensión de 30 kV para este proyecto mar adentro de Riohacha, Colombia.

- **Cálculo del Número de Líneas de Generación**

Esto implica determinar cuántos aerogeneradores se agruparán en torno a una línea de generación. La interconexión entre aerogeneradores se hace a través de celdas de media tensión, y el número de circuitos (líneas de generación) depende de la capacidad del parque y de la disposición de los aerogeneradores.

La interconexión de los aerogeneradores se realiza a través de celdas de media tensión. En general, se busca minimizar las pérdidas de transmisión y mantener una tensión adecuada en todo el parque.

Para un parque eólico de esta capacidad, podría ser necesario tener varias celdas de media tensión para interconectar los aerogeneradores. La cantidad de celdas dependerá de la capacidad de cada celda y de cómo se divida la potencia entre ellas. Para determinar la intensidad nominal de un aerogenerador con una potencia nominal de 13 MW y una tensión nominal del sistema de 30 kV, se utiliza la Ecuación 2:

$$I = \frac{P_n}{\sqrt{3} * V * \cos\varphi}$$

Ecuación 2. Ley de Potencia Eléctrica

Siendo $P_n = 13000 \text{ kW}$, $V = 30 \text{ kV}$ y $\cos\varphi = 0.8$

$$I = \frac{13000}{\sqrt{3} * 30 * 0.8} = 312.80 \text{ A}$$

Por lo cual, se obtiene que la intensidad nominal es de 312.80 A con un factor de potencia de 0.8. Se requerirán 10 líneas de transporte de media tensión para conectar los 20 aerogeneradores a la subestación marina, Tabla 6. Esto se debe a que la capacidad máxima de las celdas de media tensión es de 630 A, y se ha optado por conectar grupos de 2 aerogeneradores en cada línea de generación con el propósito de distribuir de manera equitativa las cargas.

	Aerogeneradores
Línea 1	A01, A02
Línea 2	A03, A04
Línea 3	A05, A06
Línea 4	A07, A08
Línea 5	A09, A10
Línea 6	A11, A12
Línea 7	A13, A14
Línea 8	A15, A16
Línea 9	A17, A18
Línea 10	A19, A20

Tabla 7. Líneas de generación [Autor propio]

Por cada línea de generación circula una intensidad de 625,6 A.

- **Diseño de Cabinas de Media Tensión y Transformadores**

Dentro de cada torre del aerogenerador, se ha previsto la instalación de un centro de transformación cuya función principal es elevar la tensión de generación de la turbina a 30 kV, lo que permite facilitar su transporte a la subestación de convertidores. Este centro de transformación se compone de un transformador y las cabinas de media tensión correspondientes, las cuales se seleccionan y posicionan en función de la ubicación de cada aerogenerador en las líneas de generación. De esta manera, se logra un sistema eficiente de recolección y transporte de la energía generada desde las turbinas hasta el centro de control.

- **Transformador**

Transformador de potencia total de 3 niveles, 4Q, VSI-NPC, diseño sin fusibles, el cual soporta un rango de potencia del generador de hasta 15 megavatios y cuenta con un sistema de enfriamiento con refrigeración líquida con unidad de refrigeración de circuito cerrado, Tabla 7.

	Valores
Tensión nominal del convertidor	3,3 kilovoltios
Tensión del lado del generador	0 a 3,4 kV
Tensión del lado de la red	0 a 3,4 kV
Frecuencia nominal del lado del generador	0 a 120 Hz
Frecuencia del lado de la red	50/60Hz
Eficiencia en el punto nominal del convertidor	aprox. 98%
Du/dt del lado del generador	< 1,5 kV / μ s

Tabla 8. Especificaciones del transformador. [35]

- **Cabinas de media tensión**

Después de analizar el transformador, resulta imprescindible contar con celdas de Media Tensión que se dirijan hacia las líneas de generación. Estas celdas desempeñan un papel crucial al salvaguardar el transformador, el aerogenerador y la instalación de Media Tensión. Se identifican dos tipos de centros de transformación, Figura 19, cada uno compuesto por un módulo de celdas compactas de 2 o 3 unidades.

En el caso del Tipo 1, designado como "Final de línea", consta de una celda de remonte y una celda de protección (OL + 1V). Por otro lado, el Tipo 2, conocido como "Intermedia", comprende una celda de remonte, una celda de línea y una celda de protección (OL + 1L + 1V). Esta estructura asegura una gestión eficiente y segura de la energía, proporcionando una protección integral para los componentes esenciales del sistema de generación eólica.

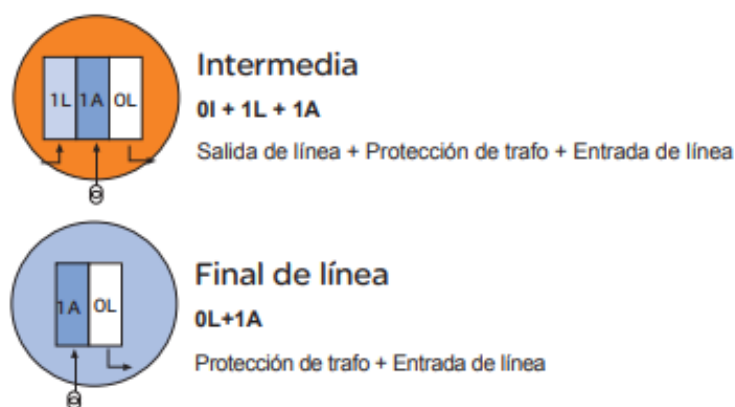


Figura: 18. Celdas de protección. [36]

Las celdas ubicadas al final de cada línea de generación están provistas de una protección para el transformador y una protección para la entrada de línea. Por otro lado, las celdas intermedias cuentan con una protección para el transformador y dos protecciones adicionales, una para la entrada y otra para la salida de la línea. Esta configuración asegura una salvaguarda completa y específica para cada componente crítico del sistema, brindando protección tanto a los transformadores como a las conexiones de entrada y salida de línea en el parque eólico.

A continuación, en la Tabla 8, se muestra la disposición de los celdas de media tensión según cada uno de los aerogeneradores distribuidos en las 10 líneas de generación:

		Celda
Línea 1	A01	OL + 1V
	A02	OL + 1L + 1V
Línea 2	A03	OL + 1V
	A04	OL + 1L + 1V
Línea 3	A05	OL + 1V
	A06	OL + 1L + 1V
Línea 4	A07	OL + 1V
	A08	OL + 1L + 1V
Línea 5	A09	OL + 1L + 1V
	A10	OL + 1V
Línea 6	A11	OL + 1V
	A12	OL + 1L + 1V
Línea 7	A13	OL + 1V
	A14	OL + 1L + 1V
Línea 8	A15	OL + 1V
	A16	OL + 1L + 1V
Línea 9	A17	OL + 1V
	A18	OL + 1L + 1V
Línea 10	A19	OL + 1L + 1V
	A20	OL + 1V

Tabla 9. Celdas de media tensión en las líneas de generación. [Autor propio]

Las características de las celdas que se muestran en la Tabla 9, proporcionada por el fabricante.

		DVCAS 36 kV
Tensión nominal	(kV)	36*
Frecuencia	(Hz)	50/60
Intensidad nominal	(A)	630
Intensidad de cortocircuito (valor eficaz)	(kA/s)	20/3
Intensidad de cortocircuito (valor cresta)	(kA)	50/52
Nivel de aislamiento		
A frecuencia industrial (50/60Hz-1 min)	(kV)	70
A onda de impulso tipo rayo	(kV)	170
Resistencia frente a arcos internos IAC AFL⁽¹⁾	(kA/1s)	20
Grado de protección		
Compartimento de MT	(IP)	67
Compartimentos BT y mandos**	(IP)	3X
Presión del gas de aislamiento SF6 a 20°C	(bar)	0.3
Temperatura de operación ⁽²⁾	(°C)	-40 a +40
Temperatura de almacenamiento	(°C)	-40/+50
Altitud ⁽³⁾	(m)	2000
Conectores		
Geometría		T
Apantallamiento (recomendado)		Puesto a tierra
Perfil interno		Tipo C
Conexión atornillada		M16x22mm

Tabla 10. Características de las celdas de media tensión [36]

- **Determinación de la Sección del Conductor de Media Tensión**

Para el diseño de la subestación, se ha tomado como referencia el modelo comercial de Siemens llamado Offshore Transformer Module (OTM). Este modelo presenta notables ventajas al ser más ligero y compacto, con una reducción de hasta el 30% en volumen y el 33% en peso en comparación con las subestaciones tradicionales. Además, se caracteriza por ocupar una única estructura con cimentaciones monopilotes, lo que facilita tanto su instalación como su mantenimiento, marcando una clara ventaja sobre las arquitecturas convencionales de subestaciones.

Los últimos diseños de la subestación OTM tienen la capacidad de exportar hasta 400 MW, lo que hace que un único módulo sea suficiente para satisfacer los requerimientos del presente proyecto. La subestación presenta una tensión nominal de 33 kV en el lado de conexión de los aerogeneradores, con hasta nueve entradas disponibles, de las cuales en este proyecto se

conectarán las seis líneas de generación. La tensión de transmisión a tierra de 220 kV se logra mediante un transformador elevador.

Una de las características destacadas de este modelo es su capacidad para instalar bancos de compensación de potencia reactiva de hasta 100 MVar. Esta función es crucial para evitar caídas de tensión derivadas del transporte de la energía a la costa. En resumen, el diseño de la subestación OTM no solo optimiza el espacio y el peso, sino que también incorpora características avanzadas que mejoran la eficiencia y la confiabilidad del sistema en el contexto específico de un parque eólico offshore.

Los componentes esenciales que integran la subestación estándar OTM se detallan a continuación:

- **Transformador Elevador 33/220 kV**

Este transformador tiene una potencia nominal de 320 MVA, permitiendo la conexión de hasta 290 MW de generación eólica. Su ubicación al aire libre, pero aislado, y su sistema de refrigeración mediante un éster sintético, en lugar de aceite mineral convencional, son características distintivas. El refrigerante utilizado es ignífugo, biodegradable y no contaminante. La ausencia de ventiladores de refrigeración y bombas de refrigerante contribuye a reducir su tamaño. Además, el transformador está protegido contra sobretensiones tanto en el lado de alta como de media tensión.

- **Celdas de Media Tensión de 33 kV**

Estas celdas están equipadas con interruptores automáticos y se incorporarán modelos de Siemens, como se detalló anteriormente.

- **Transformador para Servicios Auxiliares**

Un transformador dedicado con la función de proporcionar energía de 33 kV a 400V para los sistemas auxiliares de la subestación, como iluminación y ventilación.

- **Centro de Control de la Subestación**

Este centro alberga el sistema SCADA, encargado del monitoreo y control de las turbinas, comunicaciones, sistemas de medición y transmisión auxiliares. Además, cuenta con baterías, inversores y rectificadores para garantizar un suministro eléctrico estable a niveles de 400V AC, 110V AC y 110V DC.

- **Refugio de Emergencia**

Como medida de mitigación de riesgos, se incluye un refugio de emergencia equipado con primeros auxilios y equipos de rescate.

- **Interruptor en el Lado de Alta Tensión 220 kV**

Este interruptor forma parte del sistema en el lado de alta tensión del transformador, contribuyendo a la operación segura y eficiente de la subestación.

En conjunto, estos elementos conforman la infraestructura eléctrica de la subestación OTM, destacando su enfoque en la eficiencia, seguridad y capacidad de respuesta ante posibles emergencias.

- **Esquema Eléctrico Unifilar General**

El esquema eléctrico unifilar representa la disposición de los componentes y circuitos eléctricos en el parque eólico. Es una representación gráfica que muestra cómo se conectan los generadores, las celdas de media tensión y otros elementos del sistema. Este esquema se encuentra en el Documento 2. Planos, en este documento se encuentra la representación gráfica y la disposición de los componentes necesarios para la puesta en producción del parque eólico.

- **Cable de Red de Tierras**

La red de tierra representa una medida de seguridad destinada a prevenir descargas eléctricas provenientes de las partes activas de los aerogeneradores en situaciones de contacto. Un cable de tierra conectará todos los aerogeneradores con el centro de control, estableciendo una red interconectada. Esta infraestructura está diseñada para resistir la intensidad generada en casos de cortocircuitos que involucren derivaciones a tierra. La función esencial de esta red es garantizar la disipación segura de corrientes eléctricas no deseadas, salvaguardando así tanto a los aerogeneradores como a las personas que operan en su entorno.

La conexión efectiva de todos los aerogeneradores al centro de control fortalece la capacidad de respuesta ante posibles eventos eléctricos adversos, contribuyendo a la seguridad y eficiencia del sistema en su conjunto. La conexión a tierra de protección desempeña un papel fundamental al prevenir descargas eléctricas causadas por el contacto con partes metálicas no activas. Estas, son aquellas que no están directamente conectadas a la red, pero que, debido a una falla, pueden estar sometidas a una tensión específica.

Esta medida de seguridad busca evitar situaciones peligrosas en las que componentes metálicos que normalmente no llevan corriente puedan convertirse en conductores de electricidad inesperadamente, debido a un mal funcionamiento o avería en el sistema eléctrico. La puesta a tierra de protección es esencial para salvaguardar la integridad de las personas y garantizar un entorno seguro en situaciones inesperadas de tensión eléctrica.

- **Cable de Fibra Óptica**

Su función principal consiste en establecer la conexión entre los aerogeneradores y el sistema de control central de la subestación, permitiendo así la supervisión y gestión en tiempo real de la información generada por actuadores, sensores y dispositivos de medición. Se optará por utilizar

un tipo de fibra óptica de modo único (single mode) debido a las distancias considerables que debe cubrir.

Este componente es esencial para facilitar la comunicación efectiva y eficiente entre los elementos clave del parque eólico y la subestación. La fibra óptica de modo único se elige específicamente por su capacidad para transmitir datos a distancias más largas con menor pérdida de señal, lo cual es fundamental en entornos de parques eólicos donde las distancias entre los aerogeneradores y la subestación pueden ser considerables.

La elección de esta tecnología de comunicación refleja la necesidad de contar con una infraestructura robusta que garantice la transmisión confiable de datos críticos en tiempo real. Además, esta conexión desempeña un papel fundamental en el monitoreo y control continuo del rendimiento de los aerogeneradores, lo que contribuye a optimizar la eficiencia operativa y la respuesta ante cualquier eventualidad.

- **Sistema Eléctrico de Baja Tensión**

Este sistema se encarga de llevar la electricidad desde los aerogeneradores hasta la subestación del parque, adaptando las tensiones a niveles seguros y eficientes mediante el uso de cabinas de media tensión y transformadores de baja tensión. Además, se establece un centro de control y monitoreo para supervisar la operación del sistema y garantizar su eficiencia y seguridad.

El sistema de baja tensión al interior del parque se encuentra conectado a cargas locales esenciales con las cuales se da funcionamiento operativo a la instalación, tales como sistemas de iluminación, ventilación, equipos pequeños que no funcionan con media tensión. La presencia de dispositivos de protección, como interruptores automáticos y fusibles, asegura la integridad del sistema y previene posibles fallas o cortocircuitos.

El diseño y operación eficientes del sistema eléctrico de baja tensión son esenciales para maximizar la distribución de la energía generada en el parque eólico, adaptándola a las necesidades locales y contribuyendo a la seguridad y estabilidad general del sistema eléctrico.

b. Descripción de subestación. Sistema de alta tensión

La arquitectura de una subestación en un parque eólico abarca el diseño estructural y funcional de los equipos y dispositivos empleados en la recolección, transformación y transmisión de la energía eléctrica producida por los aerogeneradores. Esta subestación es la encargada de integrar la energía producida en la red eléctrica. Incluye una serie de componentes cuya funcionalidad se describe en el Anexo II. Descripción de la subestación.

2.8. Operación y mantenimiento de la instalación

Las operaciones y el mantenimiento de un parque eólico offshore en la costa de Riohacha son aspectos fundamentales para garantizar la eficiencia, la seguridad y la confiabilidad de la instalación a lo largo de su vida útil. Estas actividades abarcan un amplio rango de tareas que

aseguran el funcionamiento óptimo de los aerogeneradores y la infraestructura asociada.

- **Mantenimiento Preventivo**

Esta fase se enfoca en evitar posibles fallas y problemas en los componentes del parque eólico. Incluye inspecciones regulares de componentes clave, como las palas del rotor, el generador y el sistema de control. Estas revisiones programadas permiten identificar y abordar problemas potenciales antes de que se conviertan en fallas críticas. Además, el mantenimiento preventivo implica la limpieza periódica de las palas del rotor para eliminar acumulaciones de suciedad o hielo, lo que podría perjudicar el rendimiento general del parque eólico.

- **Mantenimiento Correctivo**

Cuando un componente del parque eólico presenta una falla, es necesario realizar mantenimiento correctivo. Esto abarca la reparación o el reemplazo de elementos defectuosos, como las palas del rotor, el generador o el sistema de control. La finalidad es restaurar la funcionalidad de los componentes para evitar interrupciones en la generación de energía.

El mantenimiento y la operación eficientes aseguran que el parque eólico funcione de manera óptima y cumpla con su capacidad de generación de energía. La gestión de mantenimiento es esencial para prolongar la vida útil de la instalación y garantizar su seguridad y confiabilidad a lo largo del tiempo. El equipo de mantenimiento debe estar capacitado y preparado para abordar una variedad de escenarios, desde inspecciones de retina hasta intervenciones correctivas inmediatas en caso de problemas inesperados.

Las operaciones y el mantenimiento involucran tareas de monitoreo, inspección en alta mar, reparaciones y mantenimiento de todos los componentes del sistema de parques eólicos costa afuera. Los requisitos específicos como la frecuencia y el tipo de inspecciones suelen basarse en regulaciones de alta mar y pueden estar influenciados por los fabricantes de equipos originales y sus garantías.

En ocasiones, las autoridades pueden exigir auditorías o inspecciones adicionales durante esta fase para garantizar la seguridad de las operaciones. En cuanto a la cadena de suministro, es importante contar con áreas de almacenamiento local para equipos de respaldo y una flota adecuada de buques de transferencia de tripulación.

2.9. Aspectos socioeconómicos

Para poder identificar el impacto que tendrá el proyecto del parque eólico y la desalinizadora, es importante entender los aspectos socioeconómicos de la región. De acuerdo con los datos del Censo Poblacional del 2018 [37], el departamento de La Guajira tiene una población de 825.364 habitantes, de los cuales el 47.5% reside en zona urbana y el 52.5% reside en zona rural. De estos habitantes la población indígena representa el 42.4%, de los cuales 436.357 personas son pertenecientes a la comunidad Wayuu.

El municipio de Riohacha es el municipio más poblado de La Guajira con una población de 176.830 personas, de los cuales 52.954 son pertenecientes a comunidades indígenas, 22.843 son negros, mulatos o afrodescendientes. Una vez en contexto de la densidad poblacional de la región es importante abordar los porcentajes de Necesidades básicas insatisfechas (NBI) de los habitantes, entendiendo las NBI como el indicador que ayuda a medir el nivel de pobreza la población, incluyendo temas de acceso al agua potable y cobertura de la energía eléctrica. Según los datos del Censo [37], el 71,34% de la población indígena de Riohacha cuenta con NBI.

A raíz de estos resultados, se puede entender la importancia de la creación de proyectos que beneficien a la población que habita el territorio. En primer lugar, dando cobertura eléctrica, brindando acceso y adicionalmente, permitiendo la generación de empleos en los procesos de construcción, operación y mantenimiento del parque eólico y la planta potabilizadora. En la actualidad, Riohacha es la cuarta ciudad con mayor desempleo del país con una tasa del 14.6% conforme con las cifras entregadas por el DANE [38], la llegada de estos proyectos a la región permite con una formación y capacitación adecuada la generación de empleos que permitan disminuir estas tasas.

El municipio de Riohacha cuenta con el Centro Industrial y de Energías Alternativas Regional La Guajira, el cual brinda cursos y formación en diferentes campos del conocimiento, esta formación permite que los habitantes de la región puedan ejercer en estos proyectos que benefician la región y el desarrollo de los habitantes. También es importante, tener en cuenta el diálogo que se debe tener con las comunidades indígenas del territorio, estableciendo mesas de trabajo que permitan llegar a acuerdos comunes para el desarrollo del proyecto, dando a entender la importancia de este y los beneficios que puede traer en el municipio y el departamento.

2.10. Estudio de seguridad y salud

Se realiza una evaluación general de la legislación relacionada con la seguridad y salud ocupacional en Colombia. con el objetivo de comprender cómo esta legislación se ajusta a los requisitos generales de trabajo y su aplicación en el contexto de las operaciones de energía eólica costa afuera, además de determinar los factores de riesgo y los planes de acción correspondientes para la mitigación de estos, este estudio se encuentra detallado en el Anexo V. Estudio de seguridad y salud.

2.11. Diseño de la planta de tratamiento de agua potable por ósmosis inversa

La planta potabilizadora de agua de mar propuesta para la costa caribe en el municipio de Riohacha se basa en un proceso integral para garantizar la seguridad y calidad del agua para el consumo humano. Comenzando con la captación de agua de mar mediante tomas y precauciones como el desbaste, se emplea un pretratamiento que incluye desarenado y tratamiento desincrustante para eliminar partículas y mejorar la solubilidad de sales. La fase central del proceso es la desalinización mediante ósmosis inversa, donde el agua de mar se presuriza y pasa a través de membranas semipermeables, generando agua dulce y salmuera.

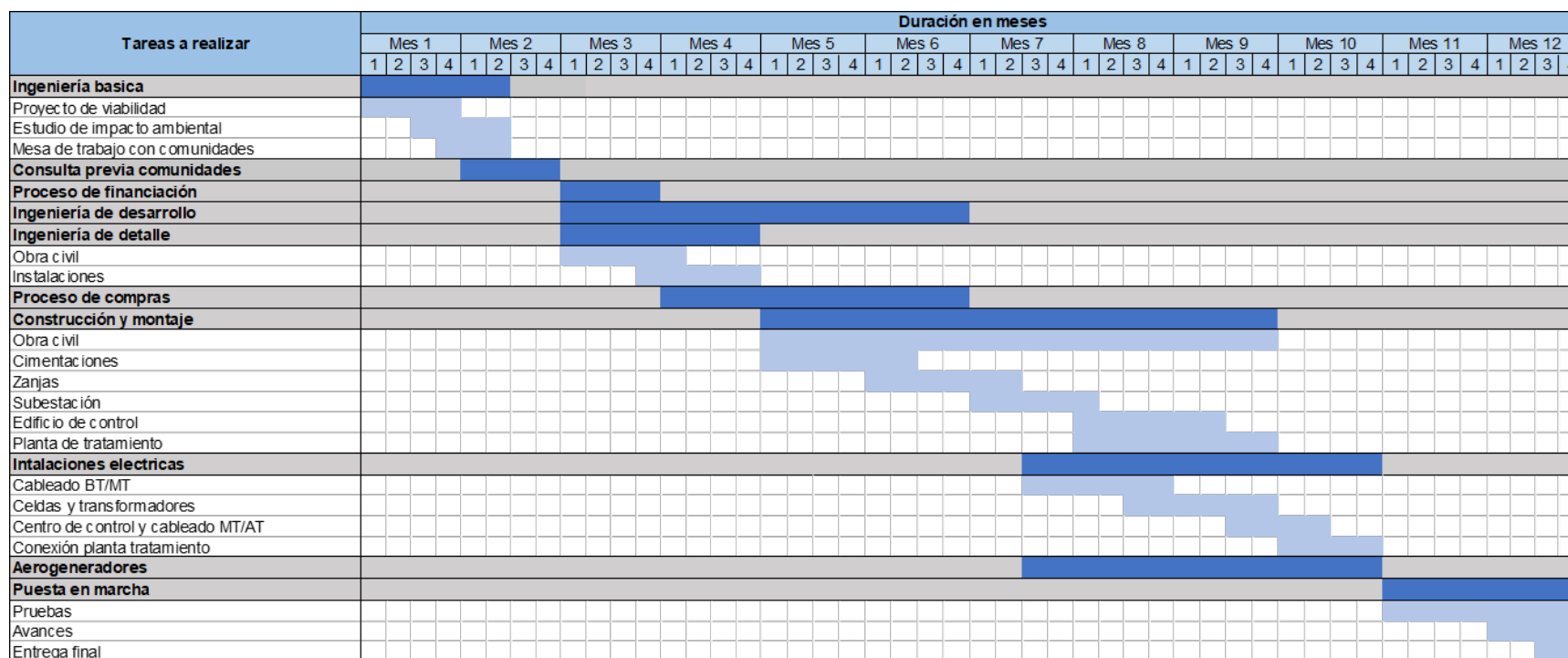
Después de la ósmosis inversa, se implementa un postratamiento que incluye la remineralización mediante lechos de calcita para reintroducir minerales esenciales y la cloración para asegurar la eliminación de posibles contaminantes biológicos. Este enfoque integral busca garantizar la calidad y seguridad del agua potable producida, contribuyendo así al abastecimiento de comunidades indígenas cercanas. Donde tendrá un caudal de alimentación de 10,000 m³, un caudal de permeado de 5,000 m³ y un caudal de rechazo de 5,000 m³ la planta busca atender las necesidades de aproximadamente 100,000 habitantes, priorizando la sostenibilidad y la eficiencia en el proceso de potabilización.

- **Ubicación**

A raíz de las necesidades del proyecto se determinó ubicar la planta a 1.5 km de la cabecera municipal de Riohacha y una distancia de aproximadamente 13 km del emplazamiento del parque eólico, en la coordenadas 18N UTMX: 23975,40 UTMY: 75815,70, Anexo VII.

2.12. Plazo de ejecución del proyecto

Se presenta el plazo de ejecución del proyecto del Parque Eólico y Planta Desalinizadora para abastecimiento de agua potable "JUTSÜIN PALA'A", con los tiempos estimados de cada uno de los procesos necesarios para el desarrollo, dentro de estos procesos se encuentra la concertación con mesas de trabajo de las comunidades y el proceso de consulta previa una vez realizados los acuerdos con la población. En la Gráfica 2, se muestra el Diagrama de Gantt con la presentación gráfica de dichos procesos.



Gráfica 6. Diagrama de Gantt

3. ASPECTOS ECONÓMICOS

A continuación, se presenta el presupuesto de ejecución del proyecto y la evaluación económica para determinar la viabilidad de este.

3.1. Presupuesto de ejecución

Se realiza el presupuesto de ejecución, material y por contrata para determinar la inversión inicial necesaria para poder dar inicio al proyecto del parque eólico, se especifica de conformidad con los capítulos necesarios estableciendo medidas y costos. Adicionalmente, se agrega el valor de la instalación de la planta desalinizadora. Los valores correspondientes a cada uno de los capítulos que se encuentran desglosados en el Documento 3. Mediciones y presupuesto de ejecución. Se determina que el presupuesto para la inversión inicial es de **€471.201.333,85** incluyendo valores de gastos generales y beneficio industrial.

3.2. Evaluación económica estimada: Inversión, financiación, costes de explotación, flujos de caja y rentabilidad

El análisis detallado para determinar la factibilidad del desarrollo del parque eólico y la planta desalinizadora ha requerido una evaluación exhaustiva de presupuestos, fuentes de financiación, depreciación de activos, costos operativos y varios factores económicos. Se ha propuesto un presupuesto inicial de €471.201.333,85 que incluye materiales, instalaciones y puesta en marcha. Los ingresos generados por el parque eólico, calculados a partir del valor del kWh en el país, junto con los ingresos de la planta desalinizadora, se han tenido en cuenta para evaluar la rentabilidad del proyecto.

Las fuentes de financiación propuestas incluyen un préstamo con una tasa de interés anual efectiva del 4%, que se pagará en 15 años. En términos de viabilidad económica, se ha planificado la amortización de los activos fijos utilizando un modelo de línea recta, y se han estimado los costos operativos, impuestos y flujos de efectivo. El análisis de flujo de efectivo ofrece una visión esencial de las fuentes de ingresos y los gastos operativos y financieros, lo que facilita la evaluación de la rentabilidad del proyecto.

Finalmente, se han evaluado indicadores económicos clave como el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Rentabilidad (TIR). Con una TIR del 11% y un VAN positivo de €470.236.962, el proyecto muestra una rentabilidad sólida, superando la tasa de descuento del 5%, lo que respalda su viabilidad financiera.

4. Análisis DAFO

La Figura 20 se presenta el Análisis DAFO que, muestra los factores internos y externos para identificar de forma resumida los aspectos generales tanto positivos como negativos en la instalación de un parque eólico mar adentro en Riohacha, La Guajira, Colombia.



Figura: 19. Análisis DAFO.

• **Factores positivos**

De acuerdo con nuestra matriz DAFO, Figura 20, la primera columna indica los factores positivos, oportunidades, fortalezas y la viabilidad del proyecto. En las fortalezas se plantea la innovación en la utilización de los recursos naturales para la generación de energía renovable obtenida del viento, para contribuir con la solución a las necesidades de la población de la zona correspondiente a la instalación del parque eólico.

Con gran oportunidad de crecimiento debido a la poca competencia. En su parte social generar calidad de vida, salubridad y empleabilidad a la comunidad es el pilar más importante, junto al incremento de la sostenibilidad en el sector energético, que permita el crecimiento turístico y económico; además del suministro de agua potable; lo que contribuye a la generación de un cambio de percepción y aceptación de la comunidad.

• **Factores negativos**

En la segunda columna, visualizamos los factores negativos que pueden dificultar de alguna manera la ejecución del proyecto. Las debilidades que se deben afrontar son la falta de formación, capacitación y experiencia tecnológica de la población; toda vez que se encuentra en una zona de alta vulnerabilidad. La restricción en los recursos financieros es otro factor que

puede obstaculizar el proyecto puesto que el gobierno no destina los recursos suficientes a proyectos sociales y sostenibles.

El último cuadrante corresponde a las amenazas que se deben anticipar cómo los conflictos que se puedan presentar con las comunidades, la variabilidad del viento, malos usos de la instalación o fallas operativas que pueden desenfocar y desviar el objetivo real del proyecto. Por último y no menos importante se deben prever las amenazas ambientales que puedan afectar directamente los vientos, las cuales deben preverse y darle la atención adecuada.

5. CONCLUSIONES

El parque eólico y Planta Desalinizadora para abastecimiento de agua potable "JUTSÜIN PALA'A", situado costa del caribe de Colombia, a aproximadamente 9 kilómetros mar adentro del municipio de Riohacha, La Guajira. Cuenta con 20 aerogeneradores Haliade-X 13 MW con una potencia total instalada de 260 MW, la cual proporcionará, anualmente, a la red eléctrica 1,034.71 GWh, de los cuales se utilizarán 14.600 MWh para el funcionamiento de una planta desalinizadora con una capacidad de tratamiento de 10.000 m³ al día.

5.1. Resultados

En primer lugar, se determina la velocidad del viento en el punto elegido para establecer el emplazamiento, dado que, este es el punto de partida para saber qué tan viable es el proyecto. La costa caribe colombiana se caracteriza por contar con vientos fuertes con velocidades por encima del 10 m/s. En el emplazamiento la velocidad media del viento de 10.47 m/s y los parámetros de Weibull identifican una distribución que resalta la consistencia de las velocidades medias, señalando un entorno altamente propicio para la generación de energía eólica. Este hallazgo es de suma importancia para la viabilidad del proyecto, ya que sugiere un flujo de viento constante y predecible, elementos fundamentales para la eficiencia y rendimiento sostenido del parque.

La dirección predominante del viento, orientada hacia el NNE, N y NE, agrega un componente adicional de estabilidad y eficiencia al diseño del parque. Este patrón direccionado implica que los aerogeneradores no requerirán ajustes frecuentes en su orientación para captar el viento predominante, optimizando así la eficiencia de generación de energía. La consistencia en la dirección del viento es un factor clave que contribuye a la confiabilidad operativa del parque a lo largo del tiempo. A partir de caracterizar el recurso eólico se da paso a establecer la idoneidad del emplazamiento elegido; el cual, cuenta con las características necesarias para el funcionamiento del parque eólico y el máximo aprovechamiento de su capacidad.

Al proceder con un análisis detallado del cálculo de la energía eléctrica vertida en la red revela una cifra anual sustancial de 1,034.14 GWh, cuidadosamente ajustada para contemplar pérdidas proyectadas y contar con un factor de capacidad del 45.4%. Esta cifra anual no solo es un indicador de eficiencia operativa, sino también un testimonio de la huella ambiental positiva del proyecto. Con 1,034.14 GWh anuales, el proyecto no solo abastece a miles de hogares, sino que también desempeña un papel crucial en la reducción de la dependencia de fuentes de energía convencionales y, por ende, en la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero.

Una vez determinada la viabilidad del proyecto y sabiendo la proyección de energía que será proporcionada a la red eléctrica, podemos saber los costes, ingresos y beneficios económicos del proyecto. En este sentido se tiene como resultado unos indicadores económicos favorables teniendo en cuenta la inversión inicial y los altos costes del proyecto; los indicadores como el

Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR), revelan una sólida rentabilidad, con un VAN positivo de €470.236.962 y una TIR del 11%, superando la tasa de descuento del 5%. Esta fortaleza financiera sugiere que la inversión en energía eólica en la región es acertada y puede generar rendimientos sostenibles a lo largo del tiempo.

Es importante también identificar los beneficios tributarios que se obtienen a raíz de la naturaleza de estos proyectos, por ejemplo, la exención de pago del Impuesto de valor agregado (IVA) de los insumos, materiales y turbinas que se van a adquirir para el proyecto, esto como un beneficio que busca incentivar el tránsito hacia las energías limpias.

Desde una perspectiva socioeconómica, el proyecto permite una contribución significativa al desarrollo local. La generación de empleo durante la construcción y operación impulsa la economía local, ofreciendo oportunidades laborales y mejorando las condiciones de vida de los residentes. Además, el enfoque en la participación comunitaria y la consideración de aspectos sociales, como la protección de las comunidades indígenas, resalta el compromiso del proyecto con la responsabilidad social y el respeto a la diversidad cultural.

El impacto ambiental positivo es otro aspecto destacado. Al generar energía de manera sostenible, el parque eólico contribuye a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y promueve un enfoque más ecológico para satisfacer las necesidades energéticas de la región, siendo también un factor importante el manejo de los impactos negativos que se puedan generar; los cuales, se han mantenido en lo mínimo, para de esta forma obtener un proyecto que beneficie las comunidades, pero sin afectar el ecosistema. Además, la construcción del parque ha catalizado el desarrollo de infraestructuras locales, mejorando la accesibilidad y la calidad de vida para las personas de la zona.

No obstante, para asegurar la sostenibilidad a largo plazo, es crucial establecer un sistema de monitoreo continuo que evalúe y ajuste las estrategias según sea necesario. Este enfoque proactivo garantizará que el proyecto continúe cumpliendo con sus objetivos socioeconómicos y medioambientales, manteniendo un equilibrio armonioso entre el desarrollo económico y la preservación del entorno, así como la interacción y armonía con la comunidad. En conjunto, este proyecto ejemplifica cómo la energía renovable puede no solo ser una inversión rentable, sino también un motor para el progreso sostenible y la mejora de la calidad de vida de las comunidades locales.

5.2. Comparativa hipótesis y resultado

Al realizar la comparativa de la hipótesis respecto a los resultados se observa una implementación en la cual se resalta la eficacia y relevancia de este proyecto. La capacidad del parque para abordar las necesidades energéticas locales y respaldar el proceso de desalinización se convierte en un aspecto fundamental para el progreso y desarrollo sostenible de la región. La continuidad en el suministro eléctrico a la planta de desalinización genera un impacto significativo en la disponibilidad de agua potable en la región, abordando de manera directa una de las necesidades más críticas de la comunidad y permitiendo mejora en la calidad

de vida de los habitantes, en especial una disminución de las tasas de necesidades básicas insatisfechas - NBI.

Además de generar energía para el funcionamiento de la planta desalinizadora, se contribuye en la cobertura de energía eléctrica. El aporte energético fortalecido no solo mejora la estabilidad y confiabilidad del suministro eléctrico local, sino que también posiciona a Riohacha como un contribuyente activo a la generación de energía limpia y sostenible a nivel regional.

Es por esto por lo que, al aprovechar la disponibilidad de un recurso eólico de esta manera se demuestra que los beneficios del parque eólico no se limitan a las zonas locales, sino que tienen un alcance más amplio al contribuir al desarrollo de comunidades vecinas y al avance de una red eléctrica regional más sostenible y transicional a las energías renovables limpias.

En resumen, la implementación exitosa del El parque eólico y Planta Desalinizadora para abastecimiento de agua potable "JUTSÜIN PALA'A" no solo ha cumplido, sino que ha superado las expectativas iniciales al abordar de manera integral las necesidades energéticas e hídricas de la región. Este proyecto emerge como un modelo de éxito en términos de sostenibilidad, autonomía energética y contribución positiva a la red eléctrica regional, destacando su importancia como catalizador para el progreso y la mejora continua en la calidad de vida de las comunidades locales y regionales.

5.3. Justificación de transformación

La transformación sustancial de energías convencionales a fuentes renovables, lograda en este proyecto, se sustenta en una serie de razones fundamentales que resaltan la importancia y la imperiosa necesidad de esta transición. En primer lugar, el compromiso con la sostenibilidad ambiental es evidente, ya que la generación de energía a partir de fuentes renovables contribuye significativamente a mitigar el impacto negativo asociado con las fuentes de energía convencionales, reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero y abordando la crisis climática.

Este cambio hacia energías renovables no solo responde a consideraciones medioambientales, sino que también aborda la necesidad de independencia energética. La diversificación hacia fuentes renovables disminuye la dependencia de recursos fósiles, reduciendo la vulnerabilidad ante fluctuaciones en los precios de estos combustibles y fortaleciendo la seguridad del suministro energético. Esta independencia no solo es estratégica desde el punto de vista económico, sino que también disminuye la exposición a riesgos geopolíticos asociados con la obtención de recursos no renovables.

Desde una perspectiva económica y financiera, la transición a energías renovables presenta beneficios a largo plazo. La disminución de costos asociados con la generación de energía renovable, la creación de empleo en sectores relacionados y la estabilidad en los precios de la energía contribuyen a un panorama económico más sólido y sostenible. Además, este cambio

impulsa la innovación tecnológica, promoviendo avances en eficiencia, almacenamiento de energía y redes inteligentes.

En consecuencia, al generar anualmente 1034 GWh de energía limpia, el parque eólico tiene el potencial de prevenir la emisión de alrededor de 517 mil toneladas métricas de dióxido de carbono (CO₂) cada año, según la estimación de intensidad de emisión mencionada. Esta cifra subraya de manera significativa el impacto ambiental positivo del proyecto, destacando su contribución sustancial a la mitigación del efecto invernadero y transición energética a energías limpias de forma sostenible.

La magnitud de la reducción proyectada en las emisiones de CO₂ resalta el valor intrínseco del parque eólico como una solución efectiva para abordar los desafíos asociados al cambio climático. Al evitar la liberación masiva de CO₂, el proyecto no solo cumple con los objetivos medioambientales, sino que también respalda los compromisos internacionales de Colombia en la lucha contra el calentamiento global. La relevancia de este logro se extiende más allá de los beneficios locales, contribuyendo a la preservación del medio ambiente a escala global y consolidando la posición del país como un defensor activo de prácticas sostenibles en el sector energético.

5.4. Consideraciones finales

El parque eólico Jutsüin Pala'a se presenta como una alternativa a la generación de energía en el país, en un escenario de un mundo cambiante en donde se vuelve prioridad dar un tránsito a las energías limpias que permitan un desarrollo sostenible y en concordancia con la naturaleza para la preservación de los recursos naturales. El proyecto no solo se enfoca en poder presentar una alternativa energética sino también entender la realidad que Colombia afronta actualmente, desafíos significativos en su trilema energético, que se centran en tres dimensiones clave: seguridad, sostenibilidad y equidad.

En términos de seguridad energética, el país muestra una dependencia excesiva de sus recursos hidroeléctricos, con aproximadamente el 67% de la electricidad generada a partir de esta única fuente. Esta situación expone a Colombia a posibles problemas durante crisis estacionales o meteorológicas, subrayando la necesidad de diversificar el suministro eléctrico para fortalecer la seguridad en el abastecimiento.

En el ámbito de la sostenibilidad, a pesar de la ventaja relativa de Colombia en términos de emisiones de carbono gracias al uso de recursos hidroeléctricos, el país se enfrenta a la necesidad de intensificar significativamente la generación de electricidad baja en carbono. La implementación de objetivos actualizados de Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDC) y la búsqueda de la neutralidad de carbono para 2050 demandarán una expansión considerable en la generación de energía renovable no convencional. Este desafío no solo implica superar obstáculos técnicos, sino también explorar oportunidades para diversificar la combinación de energías.

En cuanto a la equidad, aunque la gran mayoría de la población colombiana tiene acceso a una fuente básica de electricidad, se plantea el desafío de mantener precios estables y asequibles. La sobreexposición a fuentes únicas de electricidad, así como el posible aumento en la dependencia de energías como el carbón y el gas, podría afectar la estabilidad de los precios y aumentar la vulnerabilidad a las fluctuaciones en los mercados internacionales de materias primas. Por lo tanto, la equidad en el acceso y costo de la electricidad se presenta como un componente crítico para abordar de manera integral el trilema energético en Colombia.

Adicionalmente, los costos asociados a la energía eólica costa afuera están en constante disminución, y los notables beneficios derivados de la implementación a gran escala en mercados consolidados, como el norte de Europa, se están observando globalmente. La evidencia proveniente de licitaciones competitivas en mercados nuevos y en desarrollo ya ha indicado que los costos iniciales en estos mercados serán inferiores a los de los primeros mercados de energía eólica costa afuera. No obstante, se espera que estos costos converjan hacia los precios globales de la energía eólica costa afuera con relativa rapidez, especialmente cuando se implementan a gran escala y cuentan con marcos políticos transparentes.

En el contexto colombiano, tanto el potencial eólico disponible como la infraestructura existente presentan señales alentadoras que sugieren que un mercado eólico costa afuera a gran escala puede alcanzar niveles competitivos con prontitud. Todos estos factores presentan un panorama alentador en el proceso de transición energética en especial, la implementación de grandes proyectos que benefician el desarrollo económico y social de las comunidades de una población tan históricamente afectada como ha sido el territorio de La Guajira, estos proyectos son la puerta al desarrollo social y el mejoramiento de las condiciones de vida de las comunidades.

5.5. Futuras líneas de investigación

Los resultados del proyecto abren un panorama de oportunidades a la transición a las energías renovables no convencionales, generando perspectivas alentadoras para investigaciones futuras que puedan potenciar aún más el impacto y la eficacia de las iniciativas de energía renovable. Diversas áreas emergen como focos clave para una exploración más profunda y refinada, por ejemplo:

5.5.1. Optimización del Rendimiento Eólico

En primer lugar, la investigación en un área la cual se centra en tecnologías avanzadas de aerogeneradores, como diseños más eficientes y aerodinámicos, sistemas de control inteligente para adaptarse a variaciones en la velocidad del viento y el uso de materiales innovadores. La exploración de soluciones de almacenamiento de energía avanzadas, como baterías de última generación, también podría contribuir a mantener un suministro constante incluso en condiciones de baja generación eólica. Teniendo en cuenta la posibilidad de la misma manera de realizar ampliaciones al proyecto para de esta manera tener una mayor producción de energía y cubrir los requerimientos energéticos de la región caribe, la cual es una de las que más demanda genera, para así aprovechar la disponibilidad del recurso eólico que se tiene en la región.

5.5.2. Impacto socio económico a largo plazo

Un estudio exhaustivo del impacto socioeconómico podría incluir la evaluación de la creación de empleo a largo plazo, la mejora de la infraestructura local, el desarrollo de habilidades y que la comunidad pueda participar a la toma de decisiones. Se podría investigar cómo estas mejoras han influido en la calidad de vida de la población local y en el crecimiento económico sostenible. Además de contribuir al desarrollo de programas de formación y capacitación enfocados en la generación de empleo, lo cual permite una mejora en la calidad de vida de los habitantes de la región, permitiendo de la misma manera poder contribuir a la creación de proyectos de autoconsumo en los hogares a través de otras formas de producción energética como la solar fotovoltaica.

5.5.3. Obras por impuestos

La incorporación de programas específicos, como la reducción del impuesto a la renta a través de Obras por Impuestos, destaca el papel proactivo de la entidad en contribuir al desarrollo social y económico de la comunidad. Este enfoque va más allá de la simple generación de energía renovable al considerar el impacto positivo directo en la sociedad a través de medidas concretas.

5.5.4. Gestión de Energía y Agua

Explorar enfoques innovadores para la gestión integrada de la energía y el agua podría incluir la optimización de los ciclos de operación entre el parque eólico y la planta desalinizadora. Se plantea investigar la implementación de tecnologías de almacenamiento de energía específicas para garantizar un suministro continuo y eficiente de electricidad para el proceso de desalinización, además de poder ampliar la capacidad de la planta de manera óptima lo que permite una mayor cobertura hacia otras regiones del país.

5.5.5. Participación Comunitaria y Educación Ambiental

Desarrollar estrategias efectivas de participación comunitaria implica estudiar las mejores prácticas de involucramiento, identificando los canales de comunicación más efectivos y diseñando programas educativos que fomenten la comprensión y el apoyo de la comunidad. La investigación podría abordar cómo estas estrategias pueden adaptarse a diferentes contextos culturales y comunitarios.

5.5.6. Resiliencia ante Cambios Climáticos

La investigación debería evaluar cómo la infraestructura del parque eólico puede fortalecerse para resistir eventos climáticos extremos, como huracanes o tormentas. Esto podría incluir el desarrollo de tecnologías de anclaje mejoradas, diseño estructural resistente al clima y sistemas de monitoreo avanzados para prevenir daños.

5.5.7. Modelado de Impacto Ambiental a Largo Plazo

La investigación en esta área podría utilizar modelos avanzados para evaluar el impacto ambiental continuo del parque eólico en la fauna, la flora y los ecosistemas locales. Esto podría incluir la monitorización a largo plazo de patrones migratorios, cambios en la vegetación y la salud general del ecosistema. Se podrían proponer medidas de mitigación y adaptación en función de los resultados de este modelado.

Estas líneas son algunas de las oportunidades de desarrollo que se pueden tener a partir del desarrollo de este proyecto, se abre la puerta a diversas posibilidades que permiten el impulso de las energías renovables en la región además es necesario tener en cuenta y poner el foco en generar el interés de las industrias colombianas para contribuir en estos proyecto que mejoran las condiciones los colombianos y pueden posicionar a Colombia como un referente en la transición energética.

5.5.8. Respuesta de emergencia a tormentas tropicales y huracanes

El Caribe colombiano es propenso a experimentar tormentas tropicales y huracanes, generalmente durante junio a noviembre. En esta temporada, las condiciones atmosféricas y oceánicas son propicias para el desarrollo de tormentas tropicales y huracanes en la región.

Las tormentas tropicales pueden causar daños en las turbinas eólicas, interrumpir el suministro eléctrico, representar un riesgo para la seguridad y mantenimiento. Es importante tomar medidas adecuadas de construcción y mantenimiento para minimizar estos impactos y garantizar la resiliencia de los parques eólicos frente a las tormentas tropicales, haciendo un proceso constante de seguimiento y mantenimiento en la estructura y las cimentaciones de las torres.

A pesar de estas medidas de mitigación, los aerogeneradores offshore siguen siendo vulnerables a los efectos de las tormentas tropicales y los huracanes. Por ello, es importante que los operadores del proyecto tengan planes de respuesta a emergencias para hacer frente a los posibles daños causados por estos fenómenos meteorológicos, los cuales incluyen daños a las turbinas, los cables y la infraestructura circundante.

6. WEBGRAFÍA

- [1] GWEC, «Global Offshore Wind Report 2022.,» 2022. [En línea]. Available: <http://surl.li/nvcpv> . [Último acceso: 14 septiembre 2023].
- [2] DANE, «La información del DANE en la toma de decisiones de los departamentos, La Guajira.,» 2020. [En línea]. Available: <http://surl.li/nvcqj>. [Último acceso: 14 Septiembre 2023].
- [3] UPME, «Plan Energético Nacional 2020 - 2050. Bogotá D.C.,» [En línea]. Available: <http://surl.li/nvcqs>. [Último acceso: 14 Septiembre 2023].
- [4] Magazine Energías Renovables., « Colombia se adhiere a la Alianza Mundial de la Energía Eólica Marina.,» 2022. [En línea]. Available: <http://surl.li/nvcqx>. [Último acceso: 15 octubre 2023].
- [5] UPME. MME, «Informe de Registro de Proyectos de Generación.,» 2023. [En línea]. Available: <http://surl.li/nvcra>. [Último acceso: 15 octubre 2023].
- [6] UPME, MME, «Informe de Registro de Proyectos de Generación.,» 2023. [En línea]. Available: <http://surl.li/nvcrc>. [Último acceso: 15 octubre 2023].
- [7] World Bank Grupo y The Renewables Consulting Group, Grupo ERM., «Hoja de ruta para el despliegue de la energía eólica costa afuera en Colombia.,» 2019. [En línea]. Available: <http://surl.li/nvcre>. [Último acceso: 14 septiembre 2023].
- [8] Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de la UNESCO., «Alianzas y cooperación por el agua: Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2023,» UNESCO, 2023.
- [9] C. Doria, A. López y H. Deluquez, «Calidad del agua de las zonas rurales de la alta y media Guajira,» Editorial Gente Nueva., 2018.
- [10] S. Ortega, «Potencial de energía eólica offshore en el mar caribe colombiano.,» Escuela de Ingeniería de Antioquia, Envigado, 2015.
- [11] J. Rodríguez, «Estudio del potencial eólico en Colombia, viabilidad de un parque eólico.,» Universidad de Cartagena, Cartagena, 2019.
- [12] S. Estrada, F. Martínez y C. Vides, «Estudio del potencial eólico offshore de la zona costera caribe de Colombia. Ciencia e Ingeniería.,» Universidad de La Guajira, La Guajira, 2022.
- [13] J. Barney, «Por el mar y la tierra guajiros, vuela el viento Wayuu.,» Indepaz, 2023.
- [14] S. Castro, «Estudio del desarrollo de la Energía Eólica Costa Afuera en Colombia.,» Universidad de Los Andes, Bogotá, 2022.
- [15] DTU Wind Energy. , «Global Wind Atlas 3.0,» [En línea]. Available: <https://globalwindatlas.info/es>. [Último acceso: 14 septiembre 2023].

- [16] Celsia, Grupo Argos., «Plan 5 Caribe.,» 2022. [En línea]. Available: <http://surl.li/nvcrk>. [Último acceso: 25 septiembre 2023].
- [17] O. Grothe, F. Kachele y M. Watermeyer, «Analyzing Europe's Biggest Offshore Wind Farms: A Data Set with 40 Years of Hourly Wind Speeds and Electricity Production. Energies 2022.,» 2022. [En línea]. Available: <https://doi.org/10.3390/en15051700>. [Último acceso: 25 octubre 2023].
- [18] Siemens Gamesa, « SG 11-200DD Aerogenerador offshore.,» [En línea]. Available: <http://surl.li/nvcrs>. [Último acceso: 25 septiembre 2023].
- [19] Vestas, «V164-9.0 MW.,» [En línea]. Available: <http://surl.li/nvcrv>. [Último acceso: 25 septiembre 2023].
- [20] General Electrics, «GE presenta Haliade-X, la turbina eólica offshore más potente del mundo.,» [En línea]. Available: <http://surl.li/nvcrx>. [Último acceso: 25 septiembre 2023].
- [21] «Impacto visual de parques eólicos marinos (offshore),» [En línea]. Available: <http://surl.li/nvcsa>. [Último acceso: 12 octubre 2023].
- [22] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible., «Resolución No. 1312 del 11 de agosto de 2016.,» MinAmbiente, 2016.
- [23] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible., «Resolución 204 de 2012. Por la cual se establecen los requisitos y el procedimiento para la expedición de la licencia ambiental para proyectos de generación de energía eléctrica a partir de fuentes no convencionales de energía renovable.,» 2012. [En línea]. Available: <http://surl.li/nvcsf>. [Último acceso: 12 octubre 2023].
- [24] « Google Earth.,» [En línea]. Available: <https://earth.google.com/web/> . [Último acceso: 15 septiembre 2023].
- [25] B. Mundial, «Consumo de energía eléctrica 9kWh per cápita.,» 2014. [En línea]. Available: <http://surl.li/nvcsk>.
- [26] «Proyecciones de demanda.,» [En línea]. Available: <http://surl.li/nvcso>. [Último acceso: 14 octubre 2023].
- [27] MinEnergía, «Aumentar la capacidad de generación de energía eléctrica a partir de fuentes no convencionales de energía renovable.,» [En línea]. Available: <http://surl.li/nvcta>. [Último acceso: 14 octubre 2023].
- [28] El Colombiano, «EPM iba a desmontar su fallido parque eólico Jepírachi, pero ahora dice que se lo regalará a los Wayúu.,» [En línea]. Available: <http://surl.li/nvcte>. [Último acceso: 17 octubre 2023].
- [29] El Colombiano, « Entró en operación Guajira 1, el parque eólico más grande de Colombia.,» [En línea]. Available: <http://surl.li/nvcto>. [Último acceso: 17 octubre 2023].
- [30] El Periodico de la Energía, «Haliade-X, la turbina eólica más grande del mundo, ya tiene el récord de producción tras generar 262 MWh en un solo día.,» [En línea]. Available: <http://surl.li/nvcti> . [Último acceso: 18 octubre 2023].
- [31] General Electric, «General Electric Haliade-X 13 MW.,» [En línea]. Available: <http://surl.li/nvctl>. [Último acceso: 18 octubre 2023].

- [32] H. Zhu, Z. Du, J. Wu y Z. Sun, «nnovation environment and opportunities of offshore wind turbine foundations: Insights from a new patent analysis approach. World Patent Information,» 2022.
- [33] OCEANMET LTDA, «Estudio oceanográfico con base en la modelación de procesos hidro-morfodinámicos en las aguas someras frente a la ciudad de Riohacha, con el fin de determinar la factibilidad técnica de la construcción de una marina y sus parámetros de diseño.,» Cartagena de indias, 2012.
- [34] «Subestaciones marinas.,» [En línea]. Available: <https://onx.la/6d119>. [Último acceso: 18 octubre 2023].
- [35] ABB, «Medium voltage wind converters ABB wind turbine converters PCS6000, full power converter, up to 15 MW.,» [En línea]. Available: <http://surl.li/nvctt>. [Último acceso: 25 octubre 2023].
- [36] Mesa, «Celdas para Parques Eólicos.,» [En línea]. Available: <http://surl.li/nvcwl> . [Último acceso: 25 octubre 2023].
- [37] DANE, «Censo Nacional de Población y Vivienda. (2018),» 2018. [En línea]. Available: <https://onx.la/1bc95>. [Último acceso: 25 octubre 2023].
- [38] La Guajira Hoy, «Riohacha, la cuarta ciudad con mayor desempleo en el país.,» [En línea]. Available: <https://onx.la/dcfa8>. [Último acceso: 21 noviembre 2023].
- [39] Dra. Pilar MONTAÑÉS RODRÍGUEZ. (2023). Universidad Europea Canarias. Tutoría, orientación, diseño, estructura, logos y marcas del TFM.