



Universidad del  
**Rosario**

Escuela de Ingeniería,  
Ciencia y Tecnología

**SISTEMAS DE TRANSMISIÓN HÍBRIDOS AC/DC Y  
MODELO PRECONCEPTUAL PARA EL ANÁLISIS DE  
ALTERNATIVAS PARA LA TRANSMISIÓN DE  
ENERGÍA DE PARQUES EÓLICOS OFFSHORE A  
REDES TERRESTRES EN COLOMBIA**

Presentado para obtener el título de

**MAGÍSTER EN ENERGÍAS RENOVABLES**

Bernardo Diego Acevedo Rojas

Dirección:

David Felipe Celeita Rodríguez, PhD

Codirección:

Andrés Mauricio Pérez Gordillo, PhD

Universidad del Rosario

Escuela de Ingeniería, Ciencia y Tecnología

Maestría en Energías Renovables

## DEDICATORIA

A mi adorada esposa Marcela Ambrosio, por su amor incondicional, comprensión y apoyo constante, que siempre han sido un pilar fundamental para cumplir mis metas y sueños.

A mis hijos Sergio y Juan Camilo, a quiénes con mi ejemplo anhelo dejar un legado que los inspire a superar grandes retos en sus vidas personales y profesionales.

A mis padres, que constantemente me motivaron a ser mejor persona y que con esfuerzo me proporcionaron unas bases sólidas para emprender con integridad, respeto, compromiso y responsabilidad todos los desafíos que la vida me ha presentado.

A la Escuela de Ingeniería, Ciencia y Tecnología de la Universidad El Rosario, a los profesores y mentores, quiénes con su trayectoria y sabiduría han contribuido significativamente a mi formación académica y personal.

A mis compañeros y profesionales del sector energético, que con valentía, perseverancia y resiliencia se esfuerzan por construir un futuro mejor en tiempos que marcan un desafío histórico para la preservación de la humanidad.

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, quiero agradecer a mi director de tesis, el Ingeniero David Felipe Celeita Rodríguez por su orientación experta, paciencia y dedicación a lo largo de este proceso. Sus consejos y retroalimentación fueron invaluable para dar forma a este trabajo y alcanzar resultados significativos.

Agradezco a mis compañeros de maestría y colegas, especialmente a los Ingenieros Jairo Tobacia Camelo, Oscar Tobacia Velandia, Gustavo Osorio Madiedo y Anderson Martínez Lizarazo, por su tiempo, comentarios, discusiones útiles y aportes que enriquecieron este trabajo y ayudaron a mejorarlo.

## ABSTRACT

El propósito de este trabajo consiste en validar los fundamentos básicos y diferentes configuraciones de sistemas de transmisión híbrida CC/CA implementados a la fecha en parques eólicos costa afuera (offshore) a redes eléctricas terrestres a nivel global, y sus principales tendencias, de manera que permitan establecer un modelo preconceptual basado en parámetros de ingeniería, que coadyuve al proceso de estructuración y dimensionamiento de cualquier proyecto eólico offshore con capacidad inferior a 1600 MW, incluyendo la posible solución de transmisión híbrida CC/CA, el cual será comprobado con un caso real a nivel global y utilizado para la evaluación de un caso práctico en Colombia, que podría ser implementado en cualquier proyecto eólico offshore.

El modelo preconceptual desarrollado en el presente trabajo de grado consiste en una aplicación en Python, de libre acceso, que permite obtener un dimensionamiento simplificado de un parque eólico offshore, sin tener en cuenta todas las variables y complejidades que pueden estar presentes en cada proyecto específico. Esta metodología puede ser aplicada por académicos y expertos multidisciplinarios, para dimensionar el área del parque eólico, tipo y distribución de aerogeneradores, tipo y cantidad de cables de interconexión y exportación, voltaje y posibles configuraciones para las redes de transmisión, que podría ser usada de referencia para el desarrollo de la ingeniería básica y detallada, en fases subsecuentes.

The purpose of this work is to validate the fundamentals and different configurations of DC/AC hybrid transmission systems implemented to date in offshore wind farms to onshore power grids globally, and their main trends, to establish a pre-conceptual model based on engineering parameters, to assist in the structuring and sizing process of any offshore wind project with a capacity of less than 1600 MW, including the possible solution of hybrid DC/AC transmission. This model will be tested with a real global case and will be used for the evaluation of a practical case in Colombia, which could be implemented in any offshore wind project.

The preconceptual model developed in this degree work consists of a freely available Python application that allows obtaining a simplified dimensioning of an offshore wind farm, without

considering all the variables and complexities that may be present in each specific project. This methodology can be applied by academics and multidisciplinary experts to size the wind farm area, type and distribution of wind turbines, type and quantity of interconnection and export cables, voltage, and possible configurations for transmission networks, which could be used as a reference for the development of basic and detailed engineering in later stages.

**ACRÓNIMOS**

CA	Corriente Alterna
CC	Corriente Continua
EPR	Ethylene Propylene Rubber (Aislamiento de Etileno Propileno)
HVAC	High Voltaje Alternating Current (Alta Tensión en Corriente Alterna)
HVDC	High Voltaje Direct Current (Alta Tensión en Corriente Directa)
Km	Kilómetro
KV	Kilovoltio
LCC	Line Commutated Converter (Convertidor conmutado de línea)
MI	Mass Impregnated (Aislamiento de papel impregnado)
MVA	Megavoltiamperio
MW	Megavatio
OF	Oil Filled (Aislamiento de aceite)
OWT	Offshore Wind Turbines (Turbinas Eólicas marinas)
SVC	Static Var Compensator (Compensador estático de reactivo)
VSC	Voltage Source Converter (Convertidor de fuente de tensión)
XLPE	Cross Linked Polyethylene (Aislamiento tipo sólido)

## TABLA DE CONTENIDO

vii

INTRODUCCIÓN .....	11
Capítulo 1 OBJETIVOS .....	13
1.1 Objetivo general.....	13
1.2 Objetivos específicos .....	13
Capítulo 2 PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN.....	14
Capítulo 3 MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.....	15
3.1 La energía del viento.....	16
3.2 Parques eólicos offshore .....	17
3.2.1 Infraestructura de conexión eléctrica .....	17
3.2.2 Turbina eólica o aerogenerador .....	18
3.2.3 Tecnología de los aerogeneradores.....	19
3.2.4 Distancia entre aerogeneradores .....	22
3.2.5 Cimentación Turbinas eólicas.....	22
3.2.6 Cableado de los parques eólicos offshore.....	24
3.2.7 Estabilidad de la tensión en los sistemas de transmisión a orilla.....	28
3.2.8 Zanjado y tendido del cable .....	29
3.3 Paramétricos costos.....	31
3.4 Energía eólica offshore en el mundo .....	32
3.5 Energía eólica offshore en Colombia.....	35
3.6 Beneficios, efectos, impactos y medidas de protección.....	37
Capítulo 4 METODOLOGÍA .....	39
4.1 Tendencias en los sistemas de transmisión a nivel global y tecnologías disponibles... 40	
4.2 Identificación de principales parámetros y variables de ingeniería preconceptual..... 42	
4.3 Definición de rangos y especificaciones de los parámetros o variables que influyen en el diseño preconceptual..... 42	
4.4 Desarrollo de modelo preconceptual .....	44
4.5 Evaluación del modelo con base en parámetros de un parque eólico real .....	45
4.6 Aplicación del modelo a un caso práctico en Colombia.....	47
Capítulo 5 RESULTADOS.....	49
5.1 Evaluación del modelo con base en parámetros de un parque eólico real .....	49
5.2 Aplicación del modelo a un caso práctico en Colombia.....	51
Capítulo 6 CONCLUSIONES .....	54
REFERENCIAS.....	56
APENDICE.....	61
7.1 Tipos de aerogeneradores .....	61
7.2 Resumen de tipos de cimentaciones, profundidades y frecuencia de uso.....	62
7.3 Comparación de la tecnología actual usada en las diferentes soluciones de transmisión en los parques eólicos offshore: .....	63
7.4 Tipo de cable y comparación del tamaño .....	64
7.5 Tipos de cables submarinos genéricos.....	65
7.6 Capacidad de transmisión cable de cobre submarino 26/35 KV AC.....	66
7.7 Capacidad de transmisión cable de cobre submarino 66 KV AC.....	67
7.8 Capacidad de transmisión cable de cobre submarino 300 KV AC.....	68
7.9 Capacidad de transmisión cable de cobre submarino 200 KV DC.....	69
7.10 Capacidad de transmisión cable de cobre submarino 420 KV DC.....	70

7.11	Posibles configuraciones redes de transmisión.....	71viii
7.12	Resultado Evaluación modelo preconceptual y resultado de un caso práctico en Colombia.....	76
7.13	Código Python .....	85

**LISTA DE TABLAS**

Tabla 1: Principales fabricantes turbinas eólicas. Elaboración Propia [16] [17].....	22
Tabla 2: Evolución de la energía eólica y tendencia futura. Adaptación [5].....	33
Tabla 3: Crecimiento de parques eólicos en Europa. Adaptación [25].....	33
Tabla 4: Instalaciones marinas HVAC y HVDC. Adaptación [27].....	35
Tabla 5: Aspectos, Impactos y medidas de mitigación. Elaboración Propia .....	37
Tabla 6: Caracterización parámetros más relevantes para el diseño preconceptual del parque eólico offshore. ....	43
Tabla 7: Cuadro comparativo del Plan y Construcción de Atlantic Shores versus salidas del software preconceptual. Elaboración Propia [8].....	46
Tabla 8: Datos conocidos del proyecto Vientos Alisios SAS. Elaboración propia .....	48
Tabla 9: Cuadro comparativo entre los datos reales del proyecto Atlantic Shores versus salidas del modelo preconceptual .....	49
Tabla 10: Datos de entrada y salida del modelo preconceptual para el proyecto Vientos Alisios SAS .....	51

## LISTA DE FIGURAS

x

Figura 1. Dirección del viento. [6].....	16
Figura 2. Layout simplificado de un parque eólico offshore. [9] .....	17
Figura 3. Configuración típica de un parque eólico offshore. [10].....	18
Figura 4. Componentes de la turbina eólica o aerogenerador. [11] .....	18
Figura 5. Curva típica de potencia de las turbinas. [12] .....	20
Figura 6. Evolución global de los aerogeneradores. [14] .....	20
Figura 7. Capacidades instaladas y planificadas de turbinas marinas hasta 2025. [12].....	21
Figura 8. Capacidad eólica marina flotante acumulada. [12] .....	21
Figura 9. Cimientos parques eólicos offshore y límites de profundidad. [21].....	23
Figura 10. Esquema tendido de cables en parques eólicos offshore. [9] .....	24
Figura 11. Clasificación de los sistemas de transmisión a la orilla. Adaptación [1] .....	25
Figura 12. Alternativas de conexión para parques eólicos offshore. [1] .....	26
Figura 13. Rango de utilización de las diferentes soluciones de transmisión. [1].....	26
Figura 14. Componentes simplificados de un parque eólico offshore. [22] .....	28
Figura 15. Embarcaciones típicas para tendido de cables (A) y métodos de instalación de cables: Chorro (B), Arado con chorro (C) y Zanjas mecánicas (D). Adaptación [8, p. 142] .....	31
Figura 16. Comparativo de costo por longitud y eficiencia por longitud para sistemas HVAC y HVDC transmisión. Adaptación [23] .....	31
Figura 17. Distribución de costos para la vida útil de un parque de 450 MW con una inversión total de 2600 millones de libras esterlinas. Adaptación [24].....	32
Figura 18. Tendencias parámetros tecnología eólica marina de fondo fijo. [26, p. 53] .....	34
Figura 19. Despliegue aerogeneradores eólicos a nivel global a 2026. [12] .....	34
Figura 20. Mapa velocidad del viento en Colombia (m/s).[30].....	36
Figura 21. Principales parámetros de ingeniería para parques eólicos Offshore. Adaptación[25] .....	42
Figura 22. Diagrama de flujo del modelo preconceptual para diseño de parques eólicos offshore. .....	45
Figura 23. Ubicación geográfica parque eólico Atlantic Shores en EE.UU. Adaptación[8].....	46
Figura 24. Ubicación geográfica parques eólicos en el Caribe Colombiano. [31] .....	47

## INTRODUCCIÓN

Los parques eólicos costa afuera (offshore) tienen un gran potencial para convertirse en una fuente de energía a gran escala para la producción de electricidad, sin embargo, se tienen varios desafíos, incluidos la exposición de componentes a ambientes más agresivos, las distancias de redes de transmisión y el mantenimiento de turbinas en altamar.

Los futuros proyectos para parques eólicos offshore tendrán un rango de capacidad instalada de 250 MW hasta 2000 MW, por lo que han de desarrollarse nuevos conceptos para todo el sistema eléctrico, incluyendo la transmisión dentro del parque, hacia la costa y la integración con la red eléctrica. Sin embargo, los costos de inversión para implementar los parques eólicos offshore son muy elevados en comparación con las instalaciones que se podrían realizar en tierra. El sistema de transmisión hacia la costa implica casi el 30% de la inversión total de los parques eólicos offshore. Por lo tanto, su adecuado diseño es un factor muy importante que debe ser considerado. A medida que las distancias a la orilla se incrementan, también se incrementan los costos de los cables en corriente alterna (C.A.), volviéndose prohibitivos al superar ciertas distancias. Los cables en corriente alterna de gran longitud producen grandes cantidades de potencia reactiva capacitiva y, por lo tanto, disminuyen la capacidad de transmisión. La interconexión mediante sistemas de transmisión HVDC pueden ofrecer en estas aplicaciones algunas ventajas cuando se compara con las conexiones HVAC.

[1]

El presente trabajo pretende comparar diferentes sistemas de transmisión de parques eólicos offshore para generar un modelo preconceptual que facilite la toma de decisión para la transmisión de energía de parques eólicos a redes terrestres y su aplicación a un caso práctico en Colombia.

El contenido de este trabajo se presenta en seis capítulos. En el primer capítulo se propone el objetivo general y los objetivos específicos para generar un modelo preconceptual que permita dimensionar los componentes básicos de un parque eólico offshore, incluida la posible configuración de las redes de transmisión y su aplicación a un caso práctico en

Colombia. En el segundo capítulo se hace una descripción del problema relacionado con los sistemas de transmisión offshore y la justificación de llevar a cabo la investigación. En el tercer capítulo se presenta la conceptualización, tendencias y estado del arte que fundamenta y contextualiza el tema de investigación, relacionado con la estructuración de un modelo preconceptual para el dimensionamiento de principales variables de parques eólicos offshore, incluyendo las redes de transmisión a redes terrestres. En el capítulo cuarto, se presenta la metodología propuesta, para el dimensionamiento y caracterización de los parámetros más relevantes del parque eólico offshore y su aplicación a un caso práctico en Colombia. En el capítulo 5, se presenta el análisis de resultados. Finalmente, en el capítulo 6, se resaltan las principales conclusiones del trabajo de grado.

## **Capítulo 1**

### **OBJETIVOS**

#### **1.1 Objetivo general**

Analizar diferentes sistemas de transmisión de parques eólicos offshore a redes eléctricas terrestres implementados en los últimos 15 años, para generar un modelo preconceptual que permita dimensionar los principales componentes y su aplicación a un caso práctico en Colombia.

#### **1.2 Objetivos específicos**

- i. Revisar el estado de arte de los fundamentos de funcionamiento y diferentes configuraciones de sistemas de transmisión híbrida CC/CA para interconexión de parques eólicos offshore a redes eléctricas terrestres.
- ii. Comparar las diferentes configuraciones de sistemas de transmisión CC/CA, para la interconexión de parques eólicos offshore a redes eléctricas terrestres.
- iii. Establecer un modelo preconceptual para dimensionar el área del parque eólico, tipo y distribución de aerogeneradores, tipo y cantidad de cables de interconexión y exportación, voltaje y posibles configuraciones para las redes de transmisión, que podría ser usada de referencia para el desarrollo de la ingeniería básica y detallada, en fases subsecuentes.
- iv. Aplicar el modelo preconceptual a un caso real a nivel global y en un caso práctico en Colombia.

## Capítulo 2

### PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

Latinoamérica y el Caribe cuentan con una de las redes eléctricas más limpias de todo el mundo, debido a su exuberante energía hidroeléctrica y una presencia creciente de generación eólica y solar. La región está escribiendo un futuro energético más verde, que contribuirá a su desarrollo por medio de la diversificación de fuentes y precios más bajos por medio de mecanismos como subastas y la atracción de novedosas inversiones. Según datos de la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), Latinoamérica y el Caribe tienen un 25% de renovables en la estructura de su matriz primaria de energía. Un 59% de la generación de electricidad procede de fuentes renovables y su ambición es conseguir el 70% antes del 2030 en línea con los objetivos de desarrollo sostenible ODS propuestos desde las Naciones Unidas, lo que convierte a Colombia en un importante actor para generación de energía eólica offshore y transmisión eléctrica terrestre. [2]

La pertinencia de la investigación se fundamenta en la necesidad de analizar diferentes sistemas de transmisión híbrida CC/CA de parques eólicos offshore a redes eléctricas terrestres, para generar un modelo preconceptual, que coadyuve al proceso de estructuración y dimensionamiento de cualquier proyecto eólico offshore con capacidad inferior a 1600 MW, incluyendo la posible solución de transmisión híbrida CC/CA, el cual será comprobado con un caso real a nivel global y utilizado para la evaluación de un caso práctico en Colombia, que podría ser implementado en cualquier proyecto eólico offshore.

De igual modo, la investigación en este campo puede generar conocimientos útiles para la industria energética en general, fundamentado en criterios de ingeniería, que podrían contribuir en el proceso de estructuración y dimensionamiento de cualquier parque eólico costa afuera, basado en experiencias implementadas en otras zonas geográficas, y que pueden servir como referencia a los profesionales y expertos, durante los procesos de maduración y estructuración de proyectos.

### Capítulo 3

#### MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

Desde los inicios de la energía eléctrica, los cables y líneas de transmisión en corriente directa (CC) han sido menos costosos que los cables y líneas para transmisión trifásica en corriente alterna (CA). La corriente alterna, sin embargo, ha sido más ventajosa que la corriente continua para la generación, distribución de bajo voltaje, y para el consumo de la energía eléctrica.

Hasta el siglo XX toda la energía eléctrica era producida en forma de corriente continua. La aparición de los transformadores y de las máquinas de inducción a principios de ese siglo impulsaron el desarrollo de la corriente alterna, dejando a la corriente continua en un segundo plano, aunque prosiguió estudiándose en países nórdicos.

Con la aparición de los conmutadores de arco de mercurio, a comienzos de la década de 1950, los sistemas de transmisión de alta tensión a corriente directa (HVDC) se volvieron económicos en casos particulares (líneas de transmisión aéreas superiores a 500 Km y subterráneas o submarinas superiores a 50 Km). En 1954 entra en servicio la primera línea de transmisión en corriente continua con fines comerciales, que conectaba la isla de Gotland, en el mar Báltico y la red de la península sueca. Consistía en una línea submarina con retorno por tierra, de 98 Km de longitud con una potencia de 20 MW a 100 KV CC.

Con el desarrollo de los convertidores a base de tiristores (conmutadores electrónicos), la transmisión HVDC se volvió aún más atractiva. La primera aplicación de un sistema HVDC que utilizó tiristores fue entre los sistemas de potencia de Quebec y New Brunswick, Canadá en 1970. La disminución tanto del costo como en el tamaño de los equipos de conversión CA a CC y CC a CA, acompañada de su creciente confiabilidad, ha suscitado un incremento constante en el uso de transmisión HVDC. [3]

La energía eólica está firmemente consolidada como una tecnología madura para la generación de electricidad, con un enorme potencial, especialmente en altamar. La industria eólica offshore ha estado en una constante búsqueda por mejorar el aprovechamiento del

recurso eólico y su forma de transmitirlo a la red eléctrica; por un lado, se han desarrollado diferentes tecnologías que permiten un mayor aprovechamiento del recurso en función de la velocidad del viento. Mientras que por otra parte se ha buscado la disminución en las pérdidas de energía durante la recolección en altamar y la transmisión a la red troncal. [4]

En el presente capítulo se darán a conocer algunos fundamentos, antecedentes y estado del arte de sistemas de transmisión de parques eólicos offshore a redes eléctricas terrestres en los últimos 15 años, que será la base para estructurar un modelo conceptual que permita el dimensionamiento de parques eólicos offshore y su aplicación a un caso práctico en Colombia.

### 3.1 La energía del viento

La generación de energía eólica se produce por la diferencia de calor en la superficie terrestre, causada por el sol. El aire caliente sube, reduciendo la presión atmosférica en la superficie terrestre y aspira aire frío para reemplazarlo, lo que origina el viento. Las regiones alrededor del Ecuador, a  $0^\circ$  de latitud, se calientan más que las regiones en los polos. Entonces, el viento surge del Ecuador y se mueve hacia el norte y el sur en las capas más altas de la atmósfera. En los polos debido al enfriamiento del aire, la masa del aire desciende y regresa al ecuador. La rotación terrestre y la radiación solar diferencial determina las direcciones predominantes del viento en la tierra.[5]

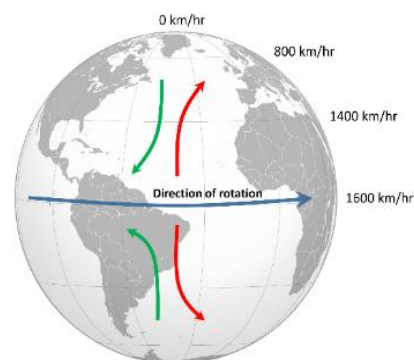


Figura 1. Dirección del viento. [6]

### 3.2 Parques eólicos offshore

Los parques eólicos offshore son fuentes de generación eólica ubicadas en alta mar, lo que requiere de estructuras de transmisión capaces de transportar la potencia eléctrica a las orillas donde se encuentran los centros de consumo. Estos sistemas de transmisión deben ser confiables y cumplir con los requerimientos técnicos básicos para la interconexión a redes eléctricas terrestres, teniendo en cuenta que la ubicación de los parques eólicos offshore puede estar a distancias mayores a 100 km de la orilla y con capacidades mayores a los 100 MW.[7]

La construcción en alta mar puede requerir diferentes tipos de embarcaciones, incluidas embarcaciones de transporte pesado, embarcaciones de carga pesada, remolcadores y barcas, embarcaciones auto elevables, embarcaciones para tendido de cables, embarcaciones de transferencia de tripulación y embarcaciones de operaciones de servicios.[8, p. 8]

#### 3.2.1 Infraestructura de conexión eléctrica

La definición de infraestructura de conexión eléctrica para un parque eólico offshore incluye tres características genéricas: la velocidad media del viento en el lugar, la potencia nominal del parque eólico y la distancia a la costa. Actualmente la transmisión de la energía eléctrica en corriente alterna presenta varias dificultades para los sistemas eléctricos de potencia, las cuales han puesto en riesgo la estabilidad y seguridad de estos a medida que crecen.

El diseño óptimo de los parques eólicos implica la determinación de configuraciones que sean viables técnica y económicamente. En general, la configuración de un parque eólico se puede representar como se muestra en la Figura a continuación:

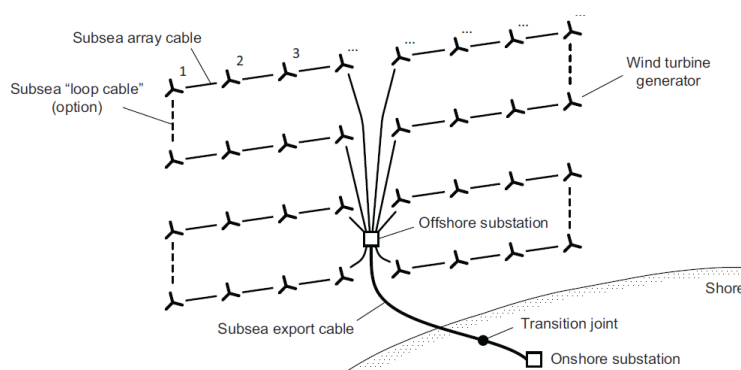


Figura 2. Layout simplificado de un parque eólico offshore. [9]

Un parque eólico está conformado por:

- Un arreglo de turbinas eólicas.
- Un punto colector.
- Un sistema de transmisión.
- Una interfaz del parque eólico en el punto de acople común (PCC).

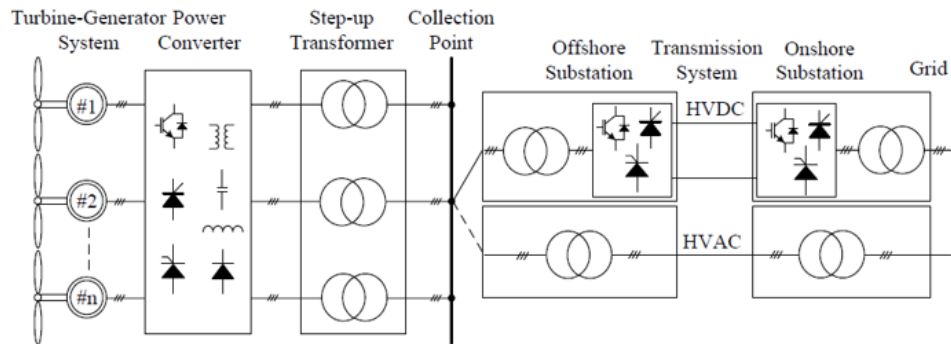


Figura 3. Configuración típica de un parque eólico offshore. [10]

La red de turbinas es conectada al punto colector, donde se incrementa el voltaje a un nivel apropiado para la transmisión. La energía es entonces transmitida hasta la interfaz del parque eólico offshore, en donde se adapta la tensión, frecuencia y potencia reactiva del sistema de transmisión a los valores que la red eléctrica demanda en el punto de acople común.

### 3.2.2 Turbina eólica o aerogenerador

La siguiente figura ilustra los principales componentes de una turbina eólica.

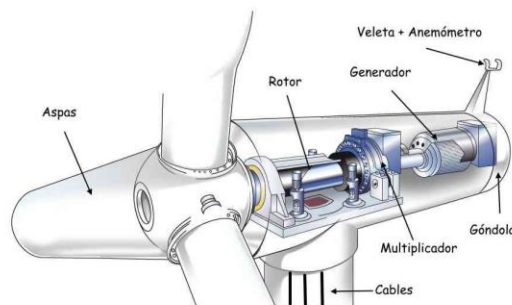


Figura 4. Componentes de la turbina eólica o aerogenerador. [11]

Los componentes de las turbinas eólicas incluyen:

- **Aspas:** Dispositivo para captar la energía del viento. En esta parte la energía cinética del viento se transforma en un par mecánico.
- **Multiplicador (engranaje):** Convierte la rotación lenta y alto torque de la turbina en alta rotación y bajo torque.
- **Generador eléctrico:** Dispositivo para transformar la energía mecánica en energía eléctrica. En los aerogeneradores modernos, el generador debe operar con fluctuaciones de potencia de acuerdo con las variaciones de la velocidad del viento. Entre los generadores más empleados en los parques eólicos están los generadores asíncronos y los generadores síncronos. Actualmente, la mayoría de los aerogeneradores están equipados con generadores asíncronos, tanto de rotor jaula de ardilla como de rotor devanado. [1]
- **Electrónica de potencia:** Parte del aerogenerador donde se adapta la energía eléctrica a la frecuencia y amplitud de tensión de la red. Hoy en día se puede controlar la potencia activa y reactiva de salida del aerogenerador dentro de un amplio rango de velocidades, así como limitar la velocidad en rampa positiva de la máquina, controlar la tensión y garantizar la continuidad del suministro.
- **Anemómetro y veleta:** Dispositivos para medir la velocidad y dirección del viento.
- **Transformador:** Las turbinas cuentan con su propio transformador para aumentar el nivel de tensión de la turbina eólica al de la línea de media tensión.

### 3.2.3 Tecnología de los aerogeneradores

Existen en el mercado tres tipos de tecnologías predominantes de aerogeneradores, las cuales se describen en el apéndice 7.1

Las curvas de potencia de los aerogeneradores representan la potencia eléctrica teóricamente producida a diferentes velocidades del viento. Estas curvas son proporcionadas por los productores de los aerogeneradores. Las curvas de potencia están basadas en mediciones de laboratorio o zonas de experimentación con una baja intensidad de turbulencias.

Las simulaciones se realizan con análisis de tipo estacionario, partiendo normalmente desde 3 m/s, por ser la velocidad a la que la turbina comienza a generar, hasta una velocidad de

hasta 25 m/s, que corresponde al valor donde la turbina deja de generar energía, por motivos de seguridad del propio aerogenerador, como se representa en la curva a continuación.

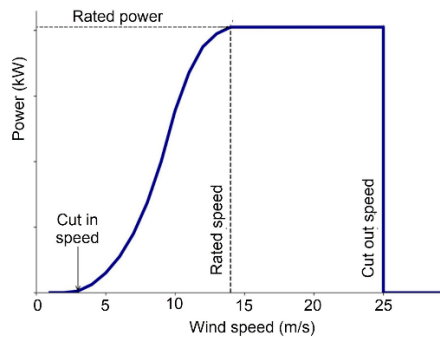


Figura 5. Curva típica de potencia de las turbinas. [12]

Por otra parte, y debido a la puesta en servicio de unidades eólicas flotantes, a los últimos avances tecnológicos, al crecimiento significativo y a la mejora en los aerogeneradores, se estima que el desarrollo de la capacidad de energía eólica marina aumente más rápido que en las últimas dos décadas. Se prevé que la capacidad total instalada de energía eólica marina, que actualmente es de 35 GW, sea de aproximadamente 382 GW para 2030 y aproximadamente 2002 GW para 2050. [13]

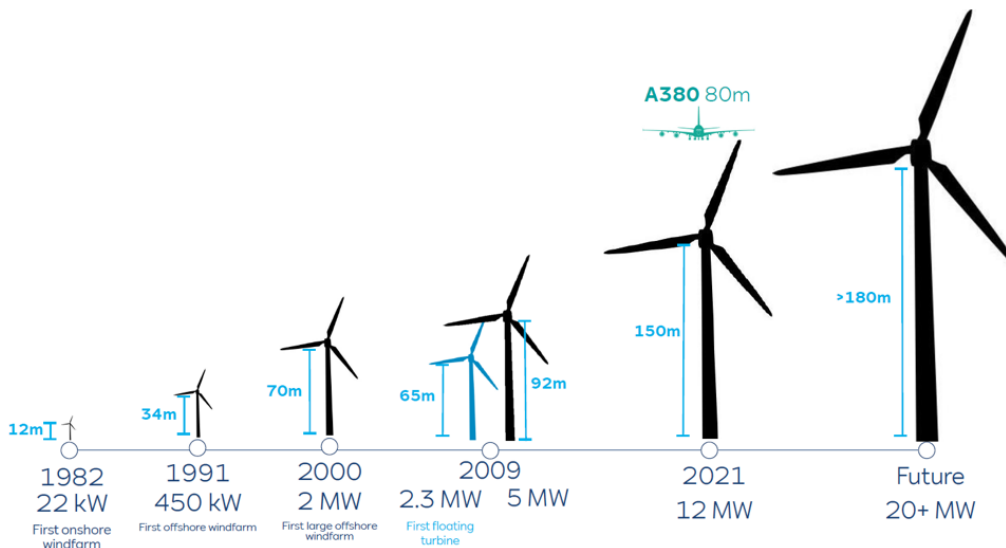


Figura 6. Evolución global de los aerogeneradores. [14]

El camino natural de los fabricantes es el desarrollo de turbinas más grandes en los próximos años. En general, la potencia y el tamaño de las turbinas aumentan los costos de las cimentaciones, sin embargo, este aumento de la potencia nominal y del tamaño de las turbinas

eólicas reduce el número de unidades necesarias, por lo tanto, el costo total por MW tiende disminuir. En la figura a continuación se presentan las capacidades instaladas y planificadas de turbinas marinas hasta el 2025.

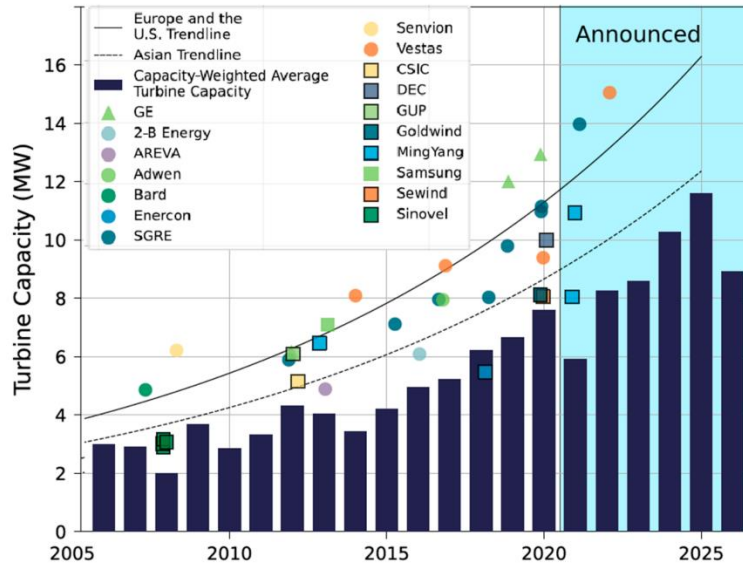


Figura 7. Capacidades instaladas y planificadas de turbinas marinas hasta 2025. [12]

La figura a continuación muestra el despliegue acumulado de turbinas eólicas marinas flotantes. De los 3.688 MW de aerogeneradores marinos flotantes que se instalarán hasta 2026, la mayoría estarán ubicados en Corea del Sur (2.300 MW), Arabia Saudita (500 MW), España (365 MW) y Francia (132 MW). Otros parques eólicos se distribuirán uniformemente en Europa, algunos de los cuales aún se encuentran en fase de planificación. [12]

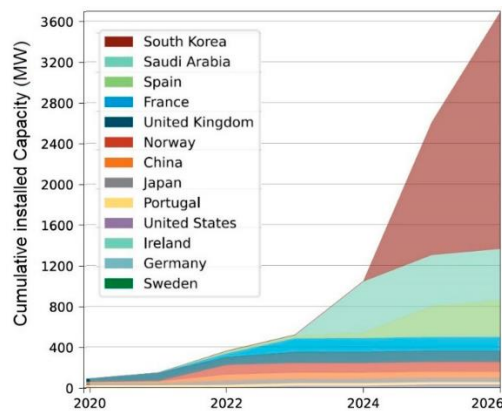


Figura 8. Capacidad eólica marina flotante acumulada. [12]

En la siguiente tabla, se incluyen los dos principales fabricantes de aerogeneradores: VESTAS (danesa), es el mayor fabricante de turbinas eólicas del mundo, ha instalado más de 145 GW de aerogeneradores en 85 países, tiene en su gama turbinas eólicas terrestres y marinas. La turbina terrestre más grande tiene una potencia nominal de 6,8 MW y la turbina marina más grande tiene una potencia nominal de 15 MW. El otro fabricante es SIEMENS GAMESA (hispano-germana), subsidiaria de SIEMENS ENERGY; ha instalado 109,6 GW de aerogeneradores, de los cuales, 94,6 GW son aerogeneradores terrestres y 15 GW marinos.[15]

Tabla 1: Principales fabricantes turbinas eólicas. Elaboración Propia [16] [17]

<b>Fabricante</b>	<b>Referencia</b>	<b>Potencia (MW)</b>	<b>Diámetro (m)</b>
<b>VESTAS</b>	V80-2.0 MW	2.0	80
	V90-3.0 MW	3.0	90
	V117-4.2 MW	4.2	117
	V164-8.0 MW	8.0	164
	V164-10.0 MW	10.0	164
	V236-150 MW	15.0	236
<b>SIEMENS</b>	SG 8.0-167 DD	8.0	167
	SG 11.0-200 DD	11.0	200
<b>GAMESA</b>	SG 14.0-222 DD	14.0	222
	SG 14.0-236 DD	14.0	236

### 3.2.4 Distancia entre aerogeneradores

La distancia entre aerogeneradores aguas abajo y laterales se calcula utilizando el diámetro del rotor y la dirección predominante del viento que es un vector que se descompone en latitud y longitud. Para emplazamientos que tengan dirección predominante de viento se puede distribuir las turbinas de manera uniforme con distancias aguas abajo de 10 diámetros entre filas y 4 diámetros a los lados en la misma fila, en dirección perpendicular a la dirección del viento y en configuración al tresbolillo entre filas. [18] [19]

### 3.2.5 Cimentación Turbinas eólicas

El tipo de cimentación más común para las turbinas eólicas marinas (OWT) es el monopilote: un solo pilote de seis a ocho metros de diámetro y de 20 a 30 m de largo debajo del lecho marino. Representa aproximadamente el 80% de las cimentaciones OWT instaladas. Según

la información sobre los proyectos planificados, las cimentaciones por gravedad aumentarán su participación en el mercado porque se adaptan mejor a suelos rocosos donde puede resultar difícil hincar monopilotes. [20]

La mayoría de los proyectos de parques eólicos flotantes prevén una subestructura semisumergible. La ventaja de este tipo de subestructura es un calado relativamente pequeño y una hidrodinámica durante el funcionamiento estable de la turbina eólica. Esto permite la instalación en el muelle y el remolque al sitio sin el uso de embarcaciones pesadas.

Los factores a tener en cuenta para evaluar la idoneidad del tipo de cimentación, incluye las condiciones del fondo marino, las características de los sedimentos, las condiciones meteorológicas y oceanográficas y la profundidad de la lámina de agua.

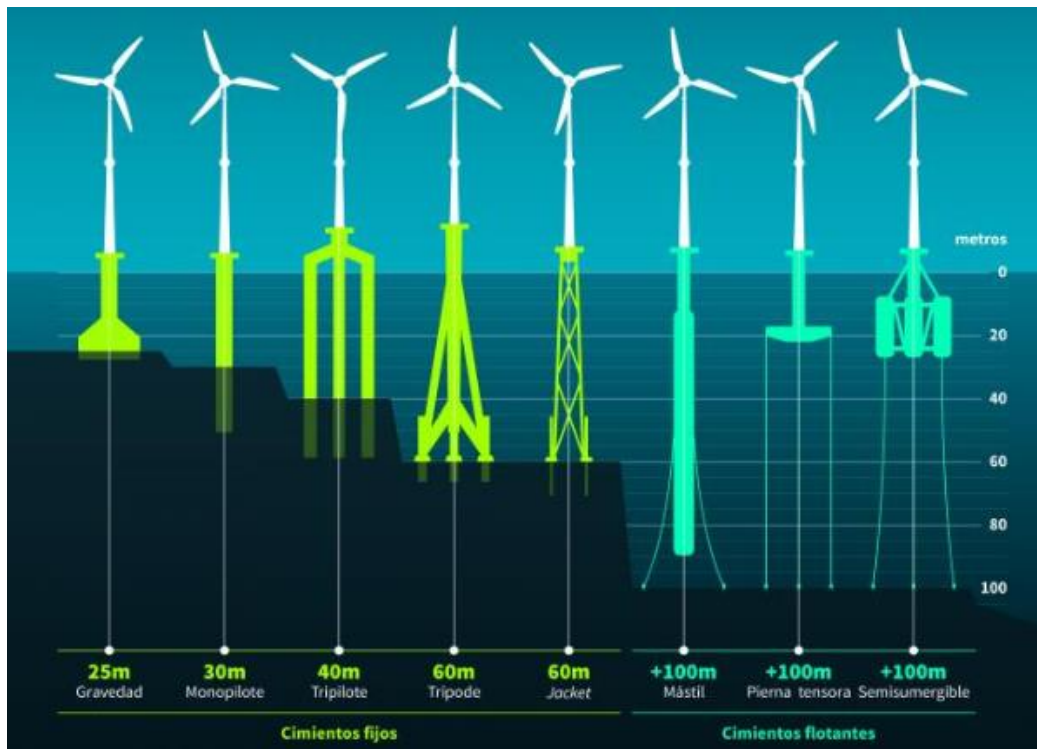


Figura 9. Cimentos parques eólicos offshore y límites de profundidad. [21]

### 3.2.6 Cableado de los parques eólicos offshore

Los aerogeneradores están interconectados mediante cables en serie (array cables), y los cables de exportación transmiten la energía eléctrica desde las subestaciones hasta el punto de conexión a la red terrestre.

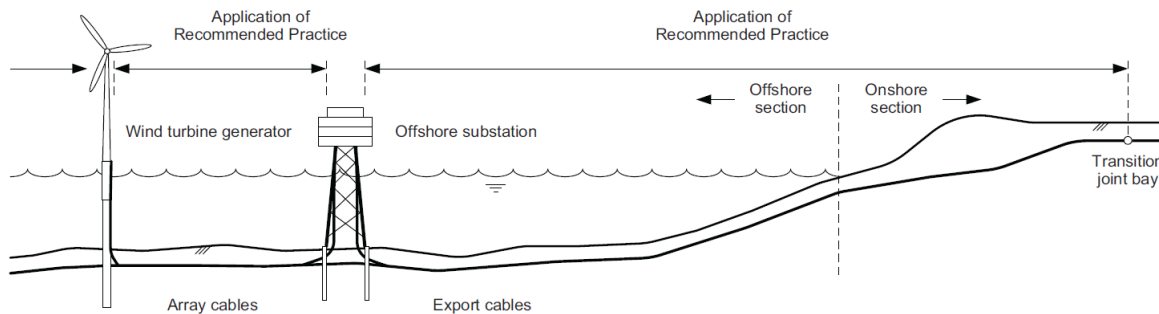


Figura 10. Esquema tendido de cables en parques eólicos offshore. [9]

La instalación exitosa de cables comienza con una planificación eficaz de la ruta que mitigue el riesgo. Una vez establecida la distribución de los aerogeneradores, se deben definir las mallas de interconexión. Dependiendo de la carga y capacidad requerida, es común que existan múltiples cables de exportación en paralelo para parques eólicos de gran escala.

En la transmisión de potencia, hay dos opciones, Corriente Alterna (CA) y Corriente Continua (CC). Dado que los cables de exportación deben transmitir la electricidad desde los parques eólicos hasta la costa, es relevante minimizar las pérdidas eléctricas. Por lo tanto, las subestaciones Offshore aumentan los voltajes desde 33 kV o 66 kV hasta al menos 115 kV, y comúnmente, a rangos entre 245-290 kilovoltios. A medida que las distancias y la potencia de los parques eólicos aumentan, se requieren cables de exportación de corriente alterna de alto voltaje (HVAC), competente hasta aproximadamente 420 kV. Cuando se habla de distancias mayores a 70 km, la potencia reactiva, que fluye debido a la alta capacidad del cable C.A., limitará la distancia de transmisión máxima posible, es decir, la corriente capacitiva suministrada a la línea de transmisión cargará completamente el cable y no dejará margen para transmitir potencia activa. La transmisión de corriente continua no tiene esta limitación, lo que convierte a la transmisión HVDC en la única alternativa técnica viable para

largas distancias. Para las conexiones HVDC existen actualmente dos opciones técnicas: el HVDC basado en un convertidor conmutado por red LCC (line commutated converter), y el HVDC basado en un convertidor de fuente de tensión VSC (voltage source converter). En la Figura a continuación se muestra la clasificación de los sistemas de transmisión a la orilla disponible para los parques eólicos offshore.

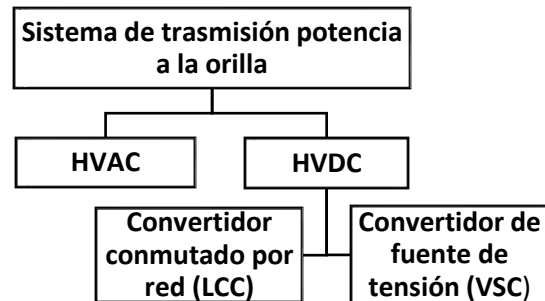


Figura 11. Clasificación de los sistemas de transmisión a la orilla. Adaptación [1]

Tanto en corriente alterna como en corriente continua, los cables tienen diferentes capacidades de transmisión dependiendo de la solución de transmisión seleccionada. En los Apéndices 7.3, 7.4 y 7.5, se muestran los tres diferentes sistemas de transmisión: HVAC, HVDC-LCC y HVDC-VSC.

Para grandes proyectos (250MW) localizados a mayor distancia de la orilla, probablemente se requerirá un número considerable de subestaciones de transformación offshore. Una de las particularidades técnicas de mayor discusión es el diseño del trazado del cable alta tensión HVAC (high voltage alternating current), o a un convertidor, si es una conexión en corriente continua a alta tensión HVDC (high voltage direct current). Al incluir una sola línea de evacuación (ver Figura 12 «A») el diseño se hace más barato. Sin embargo, su fiabilidad es baja debido a que, si ocurre una falta en el cable, puede haber una pérdida total del parque eólico.

Otra opción es conectar cada subestación de manera independiente a la orilla (ver Figura 12 «B»). Una de las líneas sería de respaldo, entrando en funcionamiento en operaciones de emergencias ante fallas. Sin embargo, el costo de un segundo cable de conexión sería muy elevado. Además, llevarlo a la práctica sería muy difícil debido a las restricciones

medioambientales que supondría conseguir una segunda ruta del cableado y la disponibilidad de un segundo punto de conexión común (PCC) a la red de transmisión o distribución.

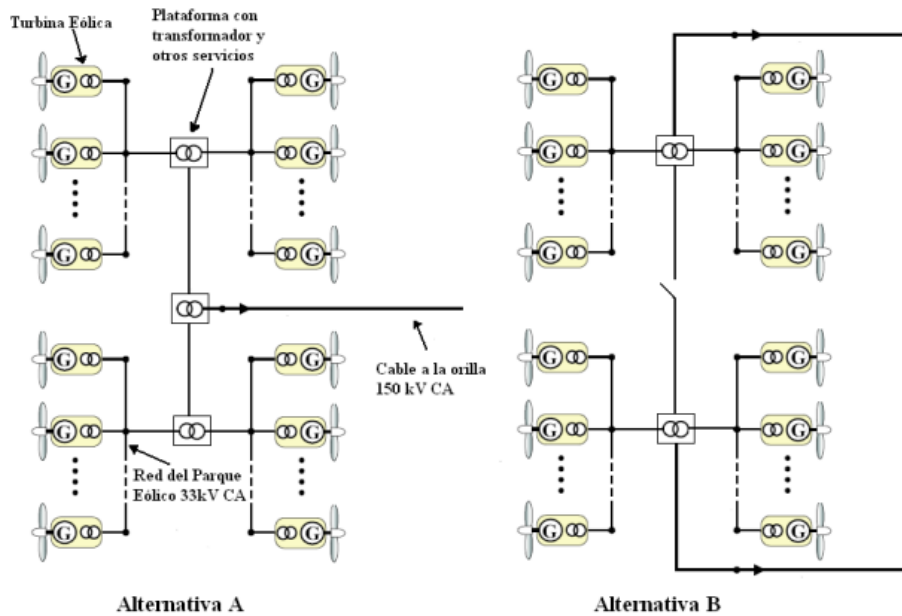


Figura 12. Alternativas de conexión para parques eólicos offshore. [1]

Cuando se excede la distancia de 250 km, la solución HVDC-VSC es, al menos en teoría, más factible técnicamente hablando. La solución HVAC es viable si se utilizan plataformas para colocar los equipos de compensación, lo que eleva el costo de inversión y hace que deje de ser económico. A continuación, el rango de utilización para diferentes soluciones de transmisión:

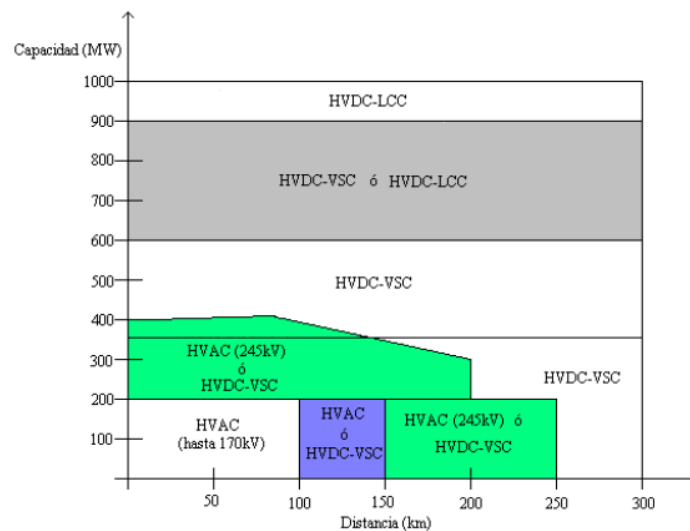


Figura 13. Rango de utilización de las diferentes soluciones de transmisión. [1]

La transmisión en corriente continua a alta tensión (HVDC) tiene la ventaja de la ausencia de potencia reactiva dentro del enlace. Esta característica inherente en la transmisión HVDC hace que los cables sean más eficientes y puedan aumentar la distancia en los sistemas de transmisión de potencia hacia la orilla.

### **3.2.6.1 Propiedades del cable**

Las recientes mejoras en los procesos de fabricación de cables, la tecnología de conversión de energía de CC y los métodos de instalación de cables han visto un aumento en su uso para proyectos de transmisión de energía. Las aplicaciones modernas incluyen el suministro de energía a islas, la conexión de redes autónomas, parques eólicos marinos, el suministro de plataformas marinas y en cruces de corta distancia para transportar energía a través de ríos, canales o bahías.

Los aspectos más relevantes con respecto al cableado tienen que ver con la longitud, la corriente capacitiva y las pérdidas. El espesor del aislante se incrementa con la tensión nominal del sistema, y debe ofrecer una elevada resistencia al paso de la corriente, así como ser capaz de soportar los esfuerzos dieléctricos. La sección del conductor se incrementa con la corriente nominal del sistema. Para una cierta sección la máxima corriente está determinada por la capacidad del aislamiento de evacuar el calor producido por el paso de la corriente. Por lo tanto, la corriente máxima se determina por el espesor del aislamiento, la conductividad del conductor y las propiedades térmicas del suelo donde se entierran los conductores. Un excesivo calentamiento del cable produce un deterioro del aislamiento y acelera el proceso de envejecimiento del cable.

En sistemas CA, la industria marina utiliza un cable que integra las tres fases, lo que permite reducir las rutas y aumentar la velocidad en el zanjado y tendido de cable. Por otra parte, la corriente continua de alto voltaje (HVDC), requiere un solo conductor en caso de monopolar o más comúnmente dos en el caso de sistemas bipolares. En el caso de sistema bipolares, se instalan simultáneamente los dos cables de manera agrupada.

Los conductores de cables submarinos normalmente son de cobre trenzado, ya que tiene mejor conductancia y resistencia a la corrosión que el aluminio. El cable con aislamiento tipo sólido o XLPE es el más utilizado para cableado submarino y tiene un rango de hasta 400kV. Este tipo de cable tiene baja pérdida dieléctrica, y casi no requiere mantenimiento. El cable XLPE también tiene baja capacitancia en relación con los cables de aislamiento de

papel impregnado (MI mass impregnated) y aislamiento de aceite (OF oil filled), lo que simplifica, de esta forma, los requerimientos para compensación de potencia reactiva. Además, en instalaciones subterráneas este último cable tiene la desventaja de limitar su longitud a unos 100 km, debido a la necesidad de hacer circular el líquido refrigerante a lo largo del cable (estaciones de bombeo). La temperatura máxima permitida para los cables es de 90 grados Celsius (°C).

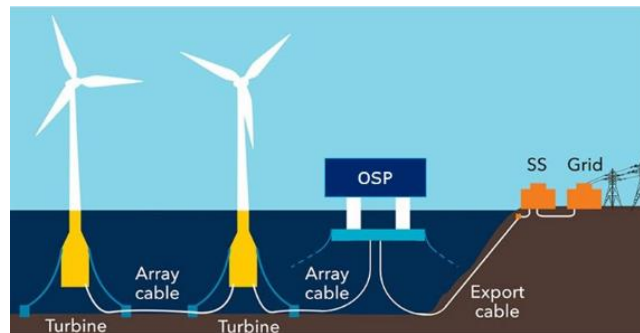


Figura 14. Componentes simplificados de un parque eólico offshore. [22]

#### 3.2.6.1.1 Cables interconexión generadores (Array cables)

Los aerogeneradores están interconectados mediante cables en serie (array cables), que son de corriente alterna de media tensión, blindados, de tres hilos.

#### 3.2.6.1.2 Cables de exportación

Los cables de exportación transmiten la energía eléctrica desde la Subestación Offshore hasta el punto de conexión a la red terrestre. La potencia y la distancia desde la tierra determina el número y dimensionamiento de los cables de exportación. Sin embargo, es común tener dos o más cables de exportación paralelos en parques eólicos offshore.

Los cables de exportación generalmente contienen al menos un conductor de fibra óptica, que es usada para control, monitoreo y adquisición de datos (SCADA).

### 3.2.7 Estabilidad de la tensión en los sistemas de transmisión a orilla

La estabilidad de tensión es la capacidad del sistema eléctrico de mantener dentro de un rango aceptable las tensiones en todas las barras del sistema antes y después de una perturbación. El sistema entra en un estado de inestabilidad de tensión cuando la perturbación incrementa la demanda en la carga o reconfigura el sistema, lo que provoca una caída de tensión en todas las barras a valores inaceptables denominada colapso de tensión. La principal razón para la inestabilidad de tensión en el sistema es el desequilibrio entre la demanda y la alimentación

de la potencia reactiva. El criterio para la estabilidad de tensión se cumple si la magnitud de la tensión en la barra se incrementa al mismo tiempo que se incrementa la inyección de potencia reactiva en la barra. Un sistema es inestable cuando la magnitud de tensión decrece en al menos una barra al incrementar la inyección de potencia reactiva al sistema.

### 3.2.8 Zanjado y tendido del cable

Entre los estudios a considerar para el tendido de cables, se incluyen: estudio geotécnico, estudios de sísmica, arqueología, estudio de fauna y flora marina, evaluación de alternativas y definición del trazado, selección del cable submarino y disponibilidad, y evaluación de riesgos de zanjado e instalación, entre otros.

Los cables submarinos normalmente son enterrados de 1 a 4 metros dentro del fondo del mar para reducir el riesgo de daños ocasionados por equipos de pesca, anclas y fuertes corrientes marinas. Para baja y media tensión los conductores trifásicos están integrados dentro de un cable sencillo (tripolar). Los centros de los conductores forman un triángulo dentro del cable sencillo. Sin embargo, algunos fabricantes utilizan una configuración plana o de un mismo nivel que mejora el manejo de las propiedades térmicas del cable. Para alta tensión en un sistema trifásico cada fase está compuesta por un cable que está separado alrededor de 1 m con respecto a la siguiente fase, dependiendo del tipo de suelo y del aislamiento. Las fuentes de datos y los criterios incluyen:

- **Consideraciones Técnica del terreno:** En la evaluación de cada ruta se deben considerar los atributos físicos del cable, como el radio de curvatura, la longitud y la distancia a peligros.

Los peligros incluyen: afloramientos rocosos, áreas con sedimentos, infraestructura sumergida y otras estructuras u objetos que presentan un peligro para la navegación de los buques, campos con municiones y explosivos, y áreas militares dadas consideraciones de seguridad, entre otras.

- **Características del sitio:** Se deben utilizar mapas de profundidad del agua para confirmar la viabilidad de las herramientas de instalación de cables y para identificar áreas con pendientes pronunciadas, que podrían presentar limitaciones en la instalación.

La instalación de cables debe maximizar la probabilidad de lograr profundidades de enterramiento entre 1,5 a 2,0 m. Los suelos saturados (como los que se encuentran en el fondo marino), proporcionan un mejor ambiente de enfriamiento que el que ocurre en tierra, pero al aumentar la profundidad de la zanja, puede causar sobrecalentamiento. Se debe buscar un equilibrio entre la profundidad de enterramiento de los cables y la protección de factores externos.

La selección del equipo más adecuado para la tarea es un proceso iterativo que implica revisar las condiciones del fondo marino, las propiedades de los cables, las combinaciones de tendido y excavación, los sistemas de zanjado y el rendimiento previsto. Las tres principales herramientas de instalación de cables son:

- **Zanjas con chorro:** Los sistemas de chorro de agua se pueden utilizar para zanjado y tendido simultáneo en suelos blandos como limo o arena suelta/mediana. La excavación de zanjas por chorro crea una zanja de aproximadamente 0,4 a 1,0 m de ancho y opera a una velocidad de zanjado de 250 a 350 m por hora.
- **Arado con chorro:** Normalmente utilizado para zanjado y tendido simultáneo, el mecanismo de arado corta el lecho marino abriendo una zanja, el cable pasa a través de la herramienta y cae en la zanja abierta a la profundidad deseada. Algunos mecanismos de arado están equipados con boquillas con chorro de agua para aumentar el rendimiento. El arado crea una zanja de aproximadamente 0,5 m de ancho y opera a una velocidad de zanjado de 100 a 200 m por hora.
- **Zanjas mecánicas:** Las zanjas realizadas con corte mecánico se pueden utilizar para operaciones de zanjado y tendido simultáneo en terrenos más firmes, como arcillas o arenas densas. El corte mecánico crea una zanja de aproximadamente 0,6 m de ancho y opera a una velocidad de zanjado de aproximadamente 150 a 250 m por hora.

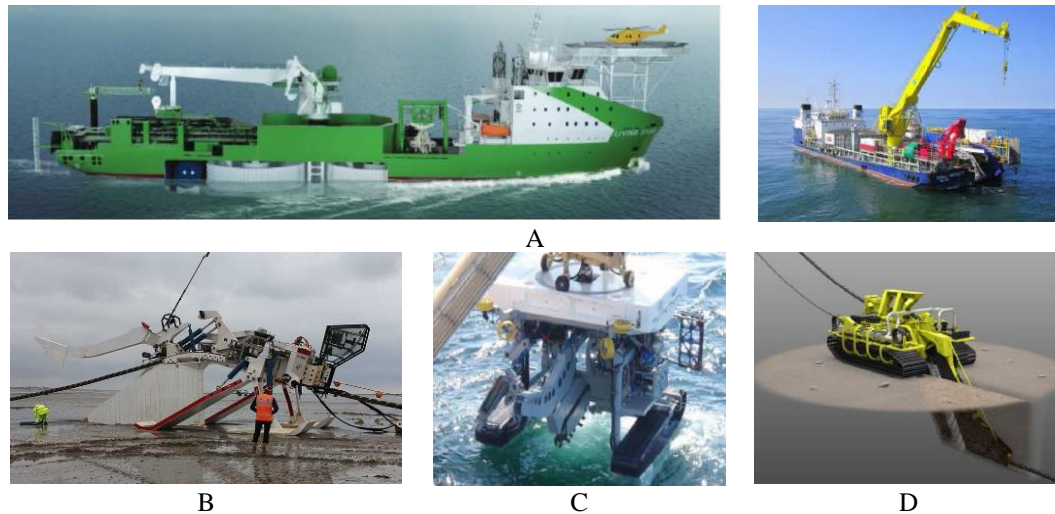


Figura 15. Embarcaciones típicas para tendido de cables (A) y métodos de instalación de cables: Chorro (B), Arado con chorro (C) y Zanjas mecánicas (D). Adaptación [8, p. 142]

El estándar para la separación mínima entre cables es generalmente dos veces la profundidad del agua. Sin embargo, con una planificación y diseño adecuado, esta separación se puede reducir, excepto para aguas poco profundas, donde es posible que sea necesario aumentar la separación.

### 3.3 Paramétricos costos

Existen los sistemas HVDC y HVAC. La elección de un sistema u otro depende de varios factores, siendo determinantes la potencia a transportar y la distancia. La corriente alterna presenta el problema de que se encuentra limitada por la distancia ya que los efectos capacitivos del cable podrían suponer unas pérdidas muy importantes, que generan calentamientos en el conductor y pérdida de la eficiencia del sistema, tal como se observa en la siguiente figura. [23]

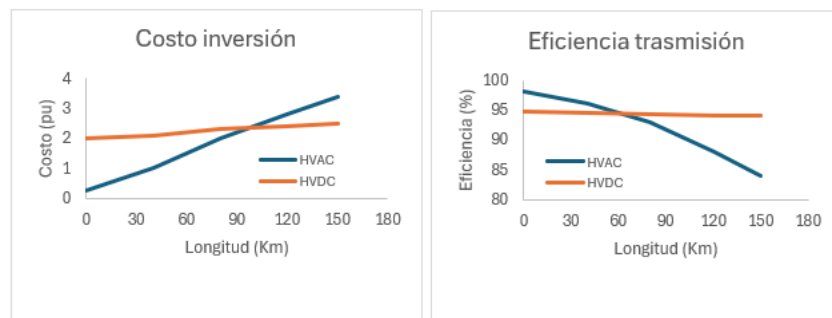


Figura 16. Comparativo de costo por longitud y eficiencia por longitud para sistemas HVAC y HVDC transmisión. Adaptación [23]

Los costos de los cables de interconexión, cables de exportación y accesorios representan típicamente el 5% aproximadamente del costo total de proyecto, incluyendo los costos de operación y mantenimiento. Este costo puede variar en función de las condiciones ambientales, configuración del parque (layout) y la cimentación utilizada.

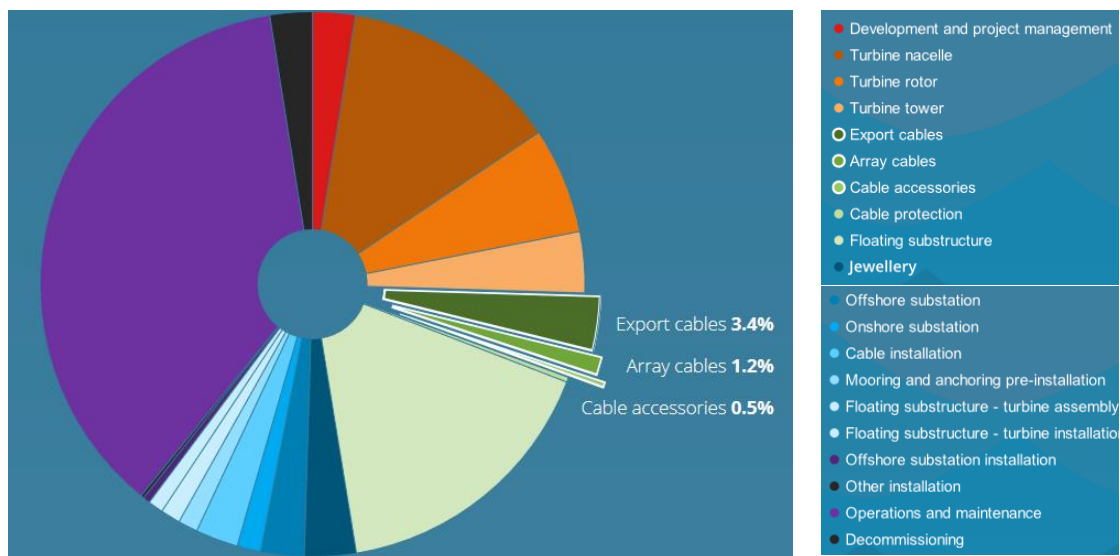


Figura 17. Distribución de costos para la vida útil de un parque de 450 MW con una inversión total de 2600 millones de libras esterlinas. Adaptación [24]

### 3.4 Energía eólica offshore en el mundo

Hoy en día los parques eólicos offshore, en general, funcionan con redes internas en CA que adoptan, como solución práctica, un nivel de tensión de hasta 36kV, como es el caso de los parques eólicos offshore daneses, indicados a continuación:

- Horns Rev (160MW): trabaja con un nivel de tensión de 36kV, y la subestación de transformación offshore eleva la tensión a 156kV para alimentar el cable CA de 18km de longitud hasta la orilla.
- Nysted (165,6MW): trabaja con un nivel de tensión de 33kV, y la subestación de transformación offshore eleva la tensión a 132kV para alimentar el cable CA de aproximadamente 10km de longitud hasta la orilla.

Cabe destacar que Horns Rev fue el primero en usar una plataforma offshore para colocar la subestación de transformación, seguido por Nysted.

En la siguiente tabla se presenta resumen de la tendencia creciente de la energía eólica offshore en la matriz energética mundial.

Tabla 2: Evolución de la energía eólica y tendencia futura. Adaptación [5]

	<b>90s</b>	<b>2000s</b>	<b>2010-2030</b>
<b>Países con energía eólica offshore</b>	3	7	+20
<b>Tamaño promedio parque eólico</b>	6 MW	90 MW	>500 MW
<b>Promedio anual capacidad instalada</b>	3 MW	230 MW	6000 MW
<b>Tamaño de turbina promedio</b>	<0.5 MW	3 MW	5-6 MW
<b>Promedio diámetro del rotor</b>	37 m	98 m	125-130 m
<b>Promedio lámina de agua</b>	5 m	15 m	>30 m

En Europa se observa un crecimiento considerable de los parques eólicos marinos a gran escala (OWF), debido principalmente a avances en aerogeneradores y estructuras de cimentación, que han mejorado sus condiciones económicas y que han contribuido a la implementación de plantas offshore. Se espera que la capacidad instalada siga aumentando, ya que la Unión Europea aspira a alcanzar unos 100 GW de capacidad eólica marina para 2030. Once países europeos contribuyeron a la capacidad instalada de OWF hasta 2019, donde destacan Reino Unido y Alemania con la mayor capacidad. [25]

Tabla 3: Crecimiento de parques eólicos en Europa. Adaptación [25]

<b>Años</b>	<b>2010</b>	<b>2015</b>	<b>2020</b>	<b>2025</b>	<b>2030</b>
<b>Número de parques eólicos offshore</b>	45	80	112	139	172
<b>Número de turbinas</b>	1136	3230	6651	11126	16850
<b>Capacidad instalada (GW)</b>	2.95	11.03	25.3	47.4	76.0
<b>Potencia promedio en (MW)</b>	155.3	337.9	630.0	849.0	1080.0

En la figura a continuación se presentan cuatro tendencias en parámetros observados en la tecnología eólica marina de fondo fijo relacionadas con la profundidad de la lámina de agua,

distancia desde la costa, estado y tamaño del proyecto. Los proyectos están codificados según su estado.

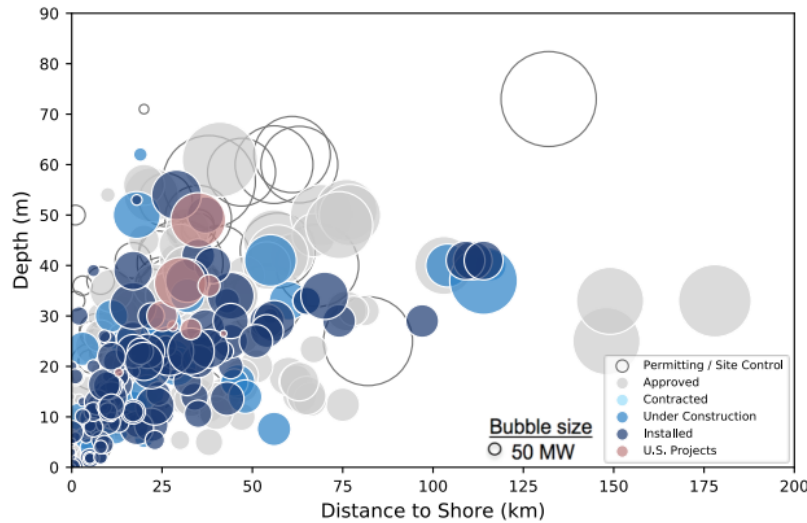


Figura 18. Tendencias parámetros tecnología eólica marina de fondo fijo. [26, p. 53]

La figura a continuación muestra el despliegue acumulado de aerogeneradores flotantes marinos. De los 3.688 MW de aerogeneradores flotantes marinos que se instalarán de aquí a 2026, la mayoría se ubicarán en Corea del Sur (2.300 MW), Arabia Saudí (500 MW), España (365 MW) y Francia (132 MW). Otros parques eólicos se distribuirán uniformemente por Europa, algunos de los cuales aún están en fase de planificación.

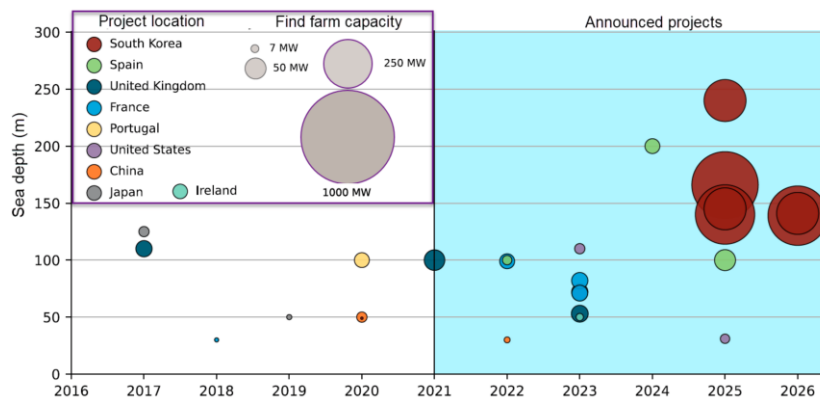


Figura 19. Despliegue aerogeneradores eólicos a nivel global a 2026. [12]

En la tabla a continuación se muestran algunos parques eólicos a nivel global con redes de transmisión HVAC y HVDC. En los sistemas de transmisión HVAC la potencia reactiva aumenta con la tensión, la longitud del cable y las largas distancias de transmisión que hace que se requieran grandes equipos de compensación reactiva en ambos extremos de la línea.

Los sistemas HVDC permiten el control instantáneo de la potencia y no hay límite en la distancia de transmisión a diferencia de los HVAC. [27]

Tabla 4: Instalaciones marinas HVAC y HVDC. Adaptación [27]

<b>Proyecto</b>	<b>Potencia (MW)</b>	<b>Sistema de transmisión (Km)</b>	<b>Voltaje (KV)</b>
HVAC Horns Rev Wind Farm (Dinamarca)	160	21	170
HVAC Samsø Wind Farm (Dinamarca)	20	8	36
HVAC Nysted Wind Farm (Dinamarca)	165	55	132
HVAC Q7 Wind Farm (Países bajos)	120	28	170
HVAC Lillegrund Wind Farm (Suecia)	110	33	145
HVAC Utgrunden Wind Farm (Suecia)	10	11	24
HVDC Basslink (Australia–Tasmania)	500	290	400
HVDC Greece link (Italia)	500	163	400

En Estados Unidos, el foco inicial de la industria está a lo largo del Atlántico, la mayor concentración de proyectos está entre Nueva Jersey y Massachusetts. La generación de energía eólica offshore será extremadamente efectiva en esta región debido a: (1) la proximidad entre los centros de carga y la ubicación de los parques eólicos, y (2) las profundidades de agua poco profundas, que son propicias para el uso de tecnología de cimentación fija.

### 3.5 Energía eólica offshore en Colombia

En Colombia, existe un creciente interés en la energía eólica offshore, que sigue una hoja de ruta que estima 1 GW de capacidad para el 2030, 3 GW para el 2040 y 9 GW para el 2050. Según el registro de proyectos de la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), los proyectos propuestos tendrían una potencia instalada combinada de 4.835MW. Están previstos los siguientes proyectos:

- Dos proyectos en Uribe-Guajira (OWF Astrolabio y OWF Barlovento, cada uno de 825 MW).
- Dos proyectos en Santa Marta-Magdalena (OWF Bergantín y Goleta OWF, cada uno de 825 MW).

- Un proyecto en Cartagena-Bolívar (OWF Bitácora de 510 MW).
- Un proyecto en Santa Catalina-Bolívar (Vientos alisios de 200 MW).
- Un proyecto en Barranquilla Atlántico (OWF Galeón de 825 MW).

El proyecto más avanzado es el complejo de 200MW Vientos Alisios, planificado frente a las costas del municipio de Santa Catalina en Bolívar. El desarrollador español BlueFloat Energy ya aseguró una conexión a la red para la iniciativa, que debiera estar en pleno funcionamiento en agosto de 2025. [28]

Sin embargo, La Guajira es considerada la mejor de Sudamérica para el desarrollo de parques eólicos offshore, dado que los mayores vientos alisios que recibe el país durante todo el año se concentran en este sector, con velocidades promedio del viento cercanos a los 9 m/s a 80 metros sobre el nivel del mar, predominando en dirección este-oeste. Se estima que el potencial energético representativo de la Guajira se puede convertir en 18 GW de electricidad de capacidad instalable (UPME & Ministerio de Minas y Energía Colombia, 2015), lo que contribuye a la diversificación y estabilidad en el suministro de energía. [2]

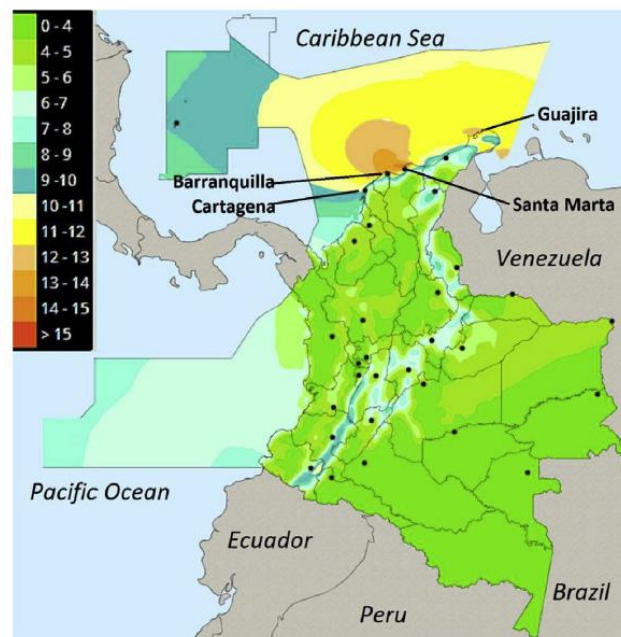


Figura 20. Mapa velocidad del viento en Colombia (m/s).[30]

Por otra parte, la presentación de documentos para obtener habilitación por parte de ANH en la Primera Ronda “Colombia de Energía Eólica Costa Afuera”, estará vigente hasta el 26 de

septiembre de 2024, y se estima la comunicación de áreas nominadas y comunicación al proponente nominador el 27 de noviembre de 2024. [29]

### 3.6 Beneficios, efectos, impactos y medidas de protección

Los proyectos eólicos offshore proporcionan energía limpia y renovable, que contribuye a diversificar la matriz energética, a reducir las emisiones de GEI, reportadas como equivalentes de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>e), y a mitigar efectos adicionales del cambio climático, que incluyen el aumento del nivel del mar, cambios en la distribución de las especies, aumento en los costos del sistema energético, la lluvia ácida, la acidificación de los océanos y el ozono/smog a nivel del suelo.

Este tipo de proyectos proporciona beneficios económicos y comunitarios, incluida la creación de nuevas oportunidades de empleo sustanciales, educación y entrenamiento, cadenas de suministro locales, ingresos e impuestos, sin embargo, durante la evaluación y el ciclo de maduración de los proyectos eólicos offshore, se debe realizar la identificación y/o revisión de los efectos potenciales a las propiedades históricas, relacionadas con tamaño del parque, ubicación geográfica u otras restricciones a la construcción y ubicación de instalaciones y actividades, y las posibles medidas de mitigación que se deben analizar en el Estudio de Impacto Ambiental, que pueden incluir formas de evitar, minimizar o tratar de otro modo, para resolver efectos adversos sobre propiedades históricas. A continuación, algunos impactos y medidas de mitigación relevantes para proyectos eólicos offshore:

Tabla 5: Aspectos, Impactos y medidas de mitigación. Elaboración Propia

Impactos	Estudios y medidas de mitigación
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ruido.</li> <li>▪ Cambio de uso del suelo.</li> <li>▪ Campos electromagnéticos.</li> <li>▪ Flora y fauna marina (arrecifes naturales y artificiales, aves, mamíferos marinos).</li> <li>▪ Áreas protegidas de interés ambiental y/o importancia cultural</li> <li>▪ Infraestructura existente.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Estudios biológicos (censo fauna y flora).</li> <li>▪ Estudios geotécnicos, geoeléctricos y sísmicos.</li> <li>▪ Plan de respuesta a derrames.</li> <li>▪ Modelos sonoros submarinos</li> <li>▪ Inventario rutas de pesca y población.</li> <li>▪ Inventario de rutas marítimas y aéreas.</li> </ul>

Impactos	Estudios y medidas de mitigación
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Rutas marítimas y aéreas.</li> <li>▪ Pesca recreativa y comercial.</li> <li>▪ Turismo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Plan de Manejo HSE.</li> <li>▪ Planes de conservación y rehabilitación.</li> <li>▪ Plan de Gestión de Riesgos.</li> <li>▪ Instalación enlaces bipolares en cables CC.</li> </ul>

Para cualquier sistema de transmisión de parques eólicos offshore, se deben evaluar y seleccionar las mejores alternativas, considerando los siguientes aspectos:

- **Espacio limitado:** los equipos deben ser lo más compactos posible para reducir el tamaño y el peso global.
- **Condiciones medioambientales extremadamente severas y variables:** la constante exposición a la alta salinidad en el aire, al viento y al agua requiere equipos que puedan ser colocados en interiores o en espacios cerrados herméticamente.
- **Acceso limitado al mantenimiento:** la accesibilidad para el mantenimiento es reducido, por lo que los equipos deben tener una alta fiabilidad y requerir poco o casi ningún mantenimiento.

## **Capítulo 4**

### **METODOLOGÍA**

En ingeniería un modelo preconceptual es una representación inicial o simplificada de un sistema, proceso o proyecto que se utiliza en etapas tempranas de diseño o planificación, y que se crea antes de que se hayan definido completamente los detalles técnicos o especificaciones del sistema o proyecto, y su propósito principal es proporcionar una visión general que sirva como punto de partida para el desarrollo posterior.

En consecuencia, la metodología propuesta para este trabajo de grado consiste en analizar sistemas híbridos de transmisión de energía utilizados en la industria eólica offshore en los últimos 15 años, para generar un modelo preconceptual que facilite la selección de los principales componentes de un sistema de transmisión de energía para un parque eólico offshore a red eléctrica terrestre y su aplicación a un caso práctico en Colombia. La metodología propuesta incluye los siguientes pasos:

- i. Revisión bibliográfica de literatura científica y técnica, a través de un análisis cualitativo del estado del arte relacionada con sistemas de transmisión híbrida CC/AC de parques eólicos costa afuera y las principales tendencias a nivel global.
- ii. Identificación y selección de los principales parámetros y variables de ingeniería que deben ser considerados en el modelo preconceptual para el dimensionamiento de los principales componentes de los parques eólicos costa afuera, incluidas las redes de transmisión híbridas CC/AC.
- iii. Con base en los parámetros y variables de ingeniería seleccionados, definición de rangos y criterios, que sirvan de referencia para la estructuración del modelo en Python, incluyendo su interacción, tendencias globales y posibles configuraciones de transmisión CC/AC,
- iv. Utilización de parámetros y variables del modelo preconceptual para el desarrollo de aplicación en Python que permita obtener un dimensionamiento simplificado de un parque eólico costa afuera, que incluya: área del parque, tipo y distribución de aerogeneradores, tipo y cantidad de cables de interconexión y exportación, voltaje y posibles configuraciones de redes de transmisión, para que el usuario en fases posteriores de diseño profundice y seleccione las mejores alternativas, durante la elaboración de las ingenierías conceptual y básica.

- v. Evaluación del modelo con base en parámetros reales de un parque eólico a nivel global, utilizando datos disponibles y relevantes, de manera que permita comparar los resultados obtenidos mediante la aplicación en Python con los datos reales del proyecto seleccionado.
- vi. Aplicación del modelo a un caso práctico en Colombia, utilizando datos disponibles y relevantes, para obtener un dimensionamiento simplificado preconceptual de un parque eólico costa afuera.

El modelo preconceptual desarrollado en Python es un software de libre uso aportado a la Universidad el Rosario, cuyo principal objetivo es facilitar la investigación, el aprendizaje y la enseñanza en el ámbito académico para el dimensionamiento simplificado de un parque eólico offshore. Este software se fundamenta en el estado del arte a la fecha y es susceptible de cambios y mejoras, asociados a la gestión de requisitos cambiantes, tales como: cambios y desarrollo de tecnología, cambios de políticas energéticas; y a mejoras implícitas del software relacionadas con: retroalimentación de usuarios expertos, actualización de premisas, adición de nuevos parámetros, optimizaciones relacionadas con la distribución de aerogeneradores y mejoras en la interfaz de usuario.

A continuación, se amplía el detalle del paso a paso de la metodología, fundamentado en los aspectos relevantes que contribuyeron con la generación del modelo preconceptual para el análisis de alternativas para la transmisión de energía de parques eólicos offshore a redes terrestres:

#### **4.1 Tendencias en los sistemas de transmisión a nivel global y tecnologías disponibles**

En la revisión bibliográfica de literatura científica y técnica, y en el análisis cualitativo del estado del arte de los últimos 15 años, relacionada con sistemas de transmisión híbrida CC/AC de parques eólicos offshore, se lograron identificar las principales tendencias de los sistemas de transmisión global, que están permanentemente influenciadas por cambios en las políticas energéticas, avances tecnológicos y la necesidad de mejorar eficiencia y reducción de costos de los componentes que integran los parques eólicos, según detalle a continuación:

- Aunque el tipo de cimentación más común para turbinas eólicas marinas es el monopilote, se prevé el uso de plataformas flotantes que permiten ampliar significativamente las áreas para energía eólica offshore en áreas profundas.
- Se prevé que la capacidad total instalada de energía eólica marina, que actualmente es de 35 GW, sea de aproximadamente 382 GW para 2030 y aproximadamente 2002 GW para 2050. Existe una tendencia de aumento del tamaño y capacidad de los aerogeneradores, que prevé capacidades mayores a 12 MW y diámetros mayores a 200 metros.
- Los principales fabricantes de aerogeneradores incluyen a VESTAS y SIEMENS GAMESA, con la instalación de 145 GW y 110 GW a septiembre de 2022, respectivamente.
- Existen los sistemas HVDC y HVAC. La elección de un sistema u otro depende de varios factores, siendo determinantes la potencia a transportar y la distancia. La corriente alterna presenta el problema de que se encuentra limitada por la distancia, ya que los efectos capacitivos del cable podrían suponer unas pérdidas muy importantes, que generan calentamientos en el conductor y pérdida de la eficiencia del sistema. Normalmente se utiliza HVAC para distancias menores a 100 Km con potencias de hasta 400 MW.
- Los conductores de cables submarinos normalmente son de cobre trenzado, ya que tienen mejor conductancia y resistencia a la corrosión que el aluminio. El cable con aislamiento tipo sólido o XLPE es el más utilizado para cableado submarino y tiene un rango de hasta 400kV.
- Las subestaciones offshore se utilizan para recoger y transformar la energía AC generada por varios aerogeneradores antes de transmitirla a tierra a través de cables de exportación HVAC. En el caso de energía CC se utilizan plataformas convertidoras antes de transmitirla a tierra a través de cables de exportación HVDC.
- Las subestaciones Offshore aumentan los voltajes desde 33 kV o 66 kV hasta al menos 115 kV, y comúnmente, a rangos entre 245-290 kilovoltios.
- Los cables de transmisión HVDC pueden transportar mayores niveles de potencia en comparación con los cables de corriente alterna de tamaño similar, lo que significa que requieren menos infraestructura para transmitir la misma cantidad de energía.

- De los 3.688 MW de aerogeneradores flotantes marinos que se instalarán de aquí a 2026, la mayoría se ubicarán en Corea del Sur (2.300 MW), Arabia Saudí (500 MW), España (365 MW) y Francia (132 MW). Cuando se excede la distancia de 250 km, la solución HVDC-VSC es, al menos en teoría, más factible técnicamente hablando.
- En Estados Unidos, el foco inicial de la industria está a lo largo del Atlántico, la mayor concentración de proyectos está entre Nueva Jersey y Massachusetts.
- Colombia tiene un creciente interés por la energía eólica offshore, que sigue una hoja de ruta que estima 1 GW de capacidad para el 2030, 3 GW para el 2040 y 9 GW para el 2050.

#### 4.2 Identificación de principales parámetros y variables de ingeniería preconceptual

Basado en las tendencias en los sistemas de transmisión a nivel global y en el estado del arte de los últimos 15 años, se identificaron los principales parámetros de ingeniería a tener en cuenta en el modelo preconceptual para el diseño de los parques eólicos offshore, los cuales se aprecian en la figura a continuación:



Figura 21. Principales parámetros de ingeniería para parques eólicos Offshore.  
Adaptación[25]

#### 4.3 Definición de rangos y especificaciones de los parámetros o variables que influyen en el diseño preconceptual

A continuación, se presenta la definición de rangos y especificaciones de los principales parámetros de ingeniería que se tuvieron en cuenta en el modelo preconceptual para el diseño

de los parques eólicos offshore, basados en las tendencias en los sistemas de transmisión eólica offshore a nivel global y en el estado del arte de los últimos 15 años:

Tabla 6: Caracterización parámetros más relevantes para el diseño preconceptual del parque eólico offshore.

Parámetros	Rango o tipo	Especificación o criterio
Profundidad lámina de agua	< 15m	VESTAS V80-2.0 MW, 2 MW $\Phi$ 80 m VESTAS V90-3.0 MW, 3 MW $\Phi$ 90 m
	Entre 15 y 30 m	VESTAS V117-4.2 MW, 4,2 MW $\Phi$ 117 m
	> 30 m	VESTAS V164-8.0 MW, 8 MW $\Phi$ 164 m SIEMENS GAMESA SG8.0-167DD, 8MW $\Phi$ 167 m VESTAS V164-10.0 MW, 10 MW y $\Phi$ 164 m SIEMENS GAMESA SG11.0-200DD, 11MW $\Phi$ 200 m SIEMENS GAMESA SG14.0-222DD, 14MW $\Phi$ 222 m SIEMENS GAMESA SG14.0-236DD, 14MW $\Phi$ 236 m VESTAS V236-15.0 MW, 15 MW $\Phi$ 236 m
Distancia a la costa (Km)	0-200 Km	HVAC Potencia hasta 400 MW
	0-300 Km	HVDC-VSC Potencia hasta 900 MW
	0-300 Km	HVDC-LCC Potencia entre 600 MW y 1000 MW
Tipo de cimentación	Profundidades <25 m	Gravedad
	Profundidades entre 25 y 30 m	Monopilote
	Profundidades entre 30 y 40 m	Tripilote
	Profundidades entre 40 y 80 m	Tripode o Jacket
	Profundidades > 80 m	Flotante (mástil, pierna tensora (TLP), semisumergible)
Nivel de tensión	< 66 kV	Cable interconexión aerogeneradores HVAC
	< 420 kV	Cable Exportación HVAC/HVDC
	< 600 kV	Cable Exportación HVDC
Cable de interconexión generadores	10 MVA < Potencia < 40 MVA	Cable 26/35 KV AC Ver detalle sección transversal cables en anexo 7.6
	34 MVA < Potencia < 94 MVA	Cable 66 KV AC Ver detalle sección transversal cables en anexo 7.7
Cables de exportación	200 MVA < Potencia < 428 MVA	Cable 300 KV AC Ver detalle sección transversal cables en anexo 7.8
	225 MVA < Potencia < 645 MVA	Cable 200 KV DC Ver detalle sección transversal cables en anexo 7.9
	421 MVA < Potencia < 1636 MVA	Cable 420 KV DC Ver detalle sección transversal cables en anexo 7.10

Parámetros	Rango o tipo	Especificación o criterio
Opciones Cables de exportación HVAC	<200 MW	Distancia ente 180-370 Km Nivel de tensión entre 132 Kv y 170 Kv
	Entre 200 y 400 MW	Distancia ente 140-281 Km Nivel de tensión entre 220 Kv y 245 Kv
	Entre 400 y 920 MW	Distancia ente 100-202 Km Nivel de tensión 400 Kv

#### 4.4 Desarrollo de modelo preconceptual

Con base en la identificación y caracterización de los principales parámetros de ingeniería, se desarrolló un modelo en Python, que permite simular diferentes escenarios de diseño preconceptual para parques eólicos offshore, en función de la distancia a la costa, profundidad de la lámina de agua, potencia del parque eólico y el tipo de generadores seleccionados.

Las salidas del modelo plantean la cantidad y disposición preliminar de los aerogeneradores, el área del parque, el tipo de cimentación más adecuado, los posibles niveles de tensión, el tipo de cable y alternativas de sistemas de transmisión, que podrían ser utilizados en una etapa posterior para definir posibles rutas de interconexión de generadores, la cantidad de subestaciones, las posibles rutas de los cables exportación y refinar la configuración del parque eólico offshore, para maximizar la producción de energía y minimizar los costos de instalación y operación.

Las salidas del software se denominan preconceptuales, dado que los diseños conceptuales, básicos y detallados deben considerar variables relacionadas con la velocidad y dirección del viento, condiciones meteorológicas y oceanográficas, condiciones particulares del lecho marino, tipo de suelo y estratigrafía, presencia de flora y fauna marina, las rutas de los barcos y aeronaves, las actividades de pesca y turismo, infraestructura existente, vestigios arqueológicos y áreas protegidas, normatividad y regulación, entre otras restricciones o limitaciones.

A continuación, se presenta un diagrama de flujo del modelo preconceptual para diseño de parques eólicos offshore:

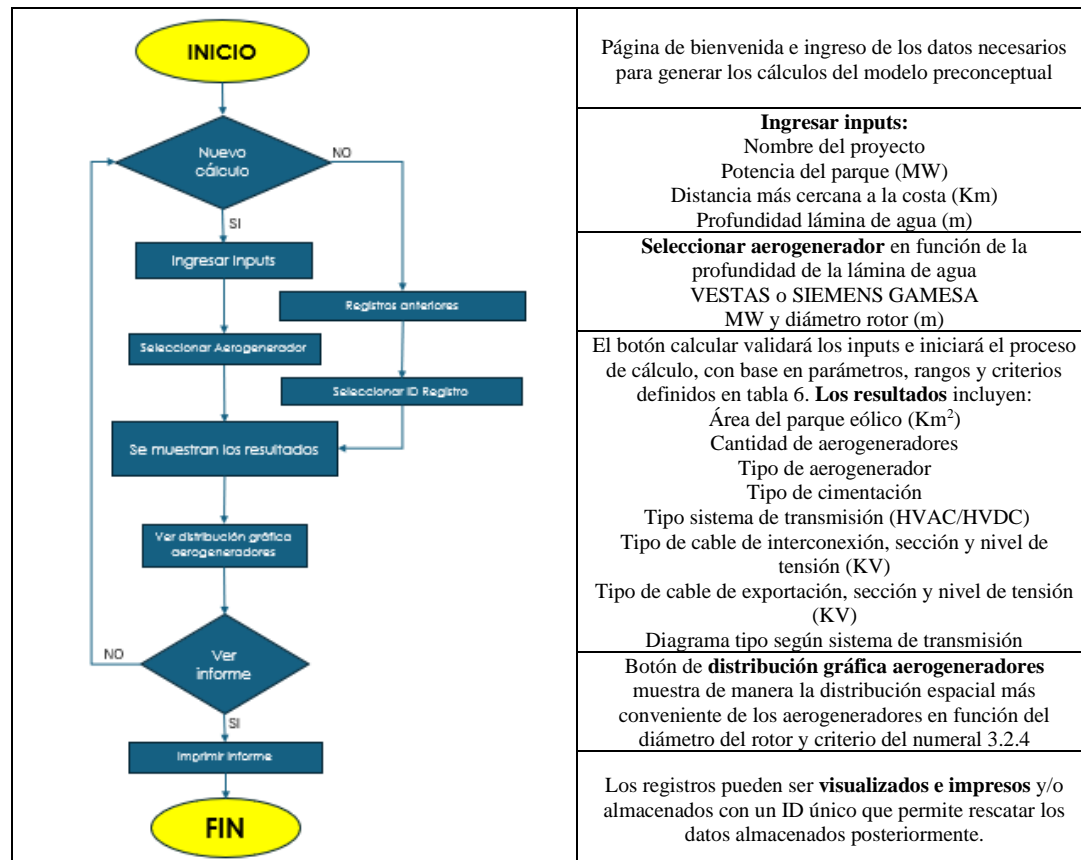


Figura 22. Diagrama de flujo del modelo preconceptual para diseño de parques eólicos offshore.

El desarrollo del modelo preconceptual se realizó aprovechando la versatilidad y bondades de Python como lenguaje de programación principal, combinado con tecnología de Flask y Docker, para construir una interfaz de usuario intuitiva y receptiva, que permita encapsular la aplicación y todas sus dependencias en contenedores ligeros y portátiles, garantizando su consistencia y facilitando una futura expansión, actualización y/o mantenimiento.

#### 4.5 Evaluación del modelo con base en parámetros de un parque eólico real

Con el fin de validar el modelo preconceptual, se realizaron pruebas de corrida del software con diferentes parámetros de entrada, incluyendo la modelación del proyecto “**Atlantic Shores Offshore Wind, LLC**”, en adelante Atlantic Shores, empresa conjunta 50/50 entre EDF-RE Offshore Development, LLC (una subsidiaria de propiedad total de EDF Renewables, Inc. y Shell New Energies US LLC (Shell), cuyo propósito es desarrollar instalaciones de generación de energía eólica marina dentro del Área de Arrendamiento OCS-

A 0499 para proporcionar energía limpia y renovable al noreste de EE.UU. a mediados o finales de la década 2020.

En línea con lo anterior, este proyecto eólico offshore ayudará tanto a Estados Unidos como a Nueva Jersey a lograr sus objetivos de energía renovable, diversificar el suministro de electricidad del estado, aumentar la confiabilidad de la electricidad y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). El proyecto también proporcionará numerosos beneficios ambientales, de salud, comunitarios y económicos, como la creación de nuevas oportunidades de empleo.

A continuación, se presenta ubicación geográfica del proyecto y los datos técnicos relacionados con el Plan de Construcción de Atlantic Shores:

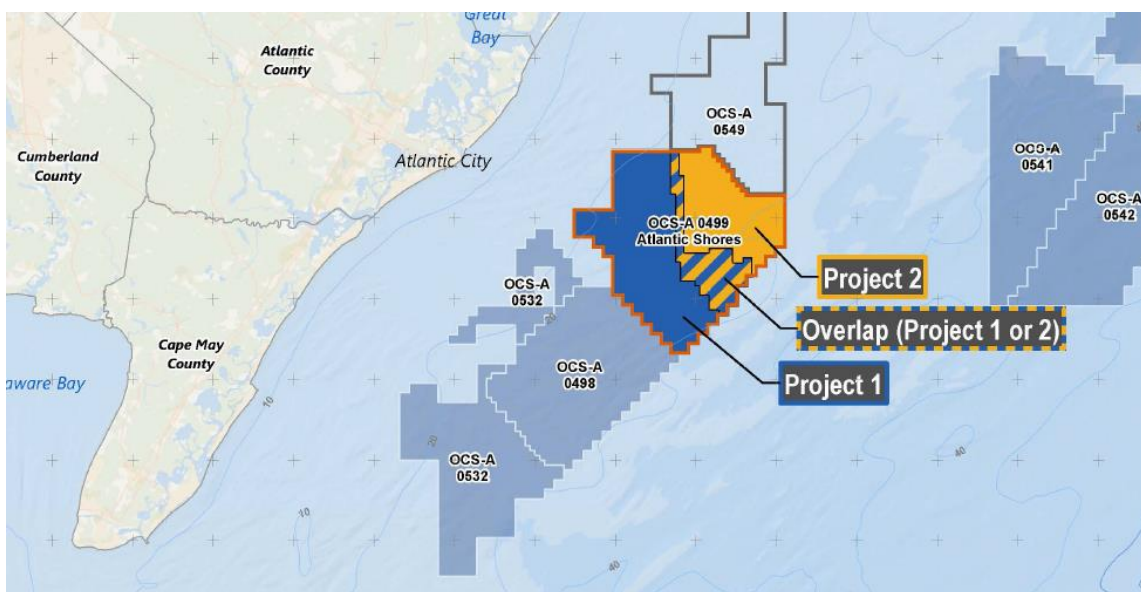


Figura 23. Ubicación geográfica parque eólico Atlantic Shores en EE.UU. Adaptación[8]

Tabla 7: Cuadro comparativo del Plan y Construcción de Atlantic Shores versus salidas del software preconceptual. Elaboración Propia [8]

Variable	Atlantic Shores (Datos reales del Proyecto 1)
Potencia (MW)	1510 MW
Distancia más cercana a la costa (Km)	14 Km
Profundidad lámina de agua (m)	19-37 m
Potencia aerogenerador (MW)	13 MW
Diámetro aerogenerador (m)	280.0 m
Área parque eólico (Km <sup>2</sup> )	220
Cantidad de aerogeneradores	105-136

Variable	Atlantic Shores (Datos reales del Proyecto 1)
Tipo de aerogenerador	General Electric Halide-X turbinas
Tipo de cimentación	Monopilotes
Tipo de cable de interconexión generadores	66–150 kV HVAC
Tipo de cable de exportación	Opción 1: HVAC - 4 cables 230–275 kV HVAC Opción 2: HVDC – 1 cable 320–525 kV HVDC
Tipo sistema de transmisión	HVAC HVDC

Los resultados de la evaluación del modelo preconceptual, con base en los datos reales del proyecto Atlantic Shores, será analizado en el numeral 5.1 del presente trabajo de grado.

#### 4.6 Aplicación del modelo a un caso práctico en Colombia

Con base en los proyectos inscritos para generación eólica en Colombia, se realizó la selección del parque eólico Vientos Alisios SAS, planificado frente a las costas del municipio de Santa Catalina Bolívar, con capacidad de 200 MW, en fase 1 y cuya entrada está planeada para diciembre de 2025, de manera que a través del modelo preconceptual permita obtener un dimensionamiento simplificado del parque eólico.

A continuación, se presenta la ubicación geográfica y los datos técnicos conocidos del proyecto, para la aplicación del modelo preconceptual a un caso práctico en Colombia:

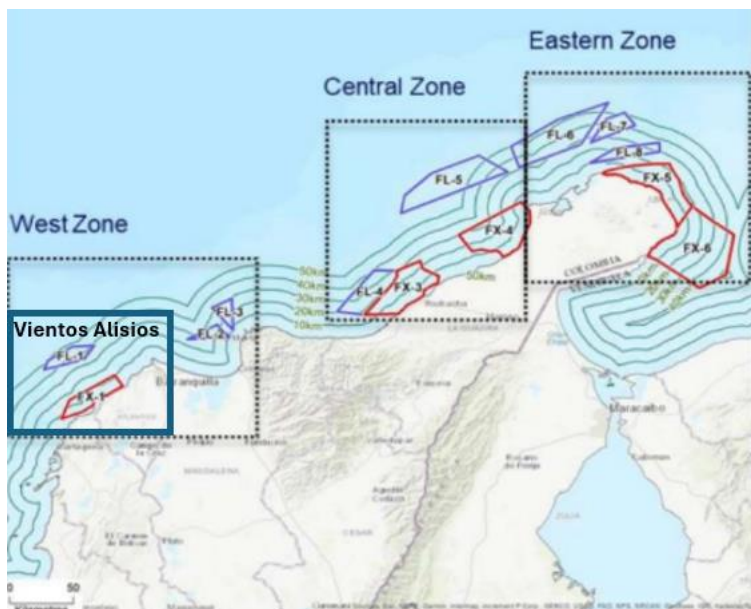


Figura 24. Ubicación geográfica parques eólicos en el Caribe Colombiano. [31]

Tabla 8: Datos conocidos del proyecto Vientos Alisios SAS. Elaboración propia

<b>Variable</b>	<b>Datos conocidos</b>
<b>ENTRADAS</b>	
<b>Potencia (MW)</b>	200
<b>Distancia más cercana a la costa (Km)</b>	10
<b>Profundidad lámina de agua (m)</b>	40

Los resultados de la aplicación del modelo preconceptual con base en los datos conocidos del proyecto Vientos Alisios SAS, serán dados a conocer en el numeral 5.2 del presente trabajo de grado.

## Capítulo 5

### RESULTADOS

Con base en el análisis cualitativo del estado del arte de los sistemas de transmisión híbrida CC/AC de parques eólicos costa afuera de los últimos 15 años, las principales tendencias a nivel global, los parámetros definidos en el modelo preconceptual para el diseño de parques eólicos offshore, la aplicación desarrollada en Python y los datos conocidos de los parques eólicos Atlantic Shores Offshore Wind LLC y Vientos Alisios en Colombia, se realizaron corridas del modelo preconceptual para evaluar la precisión, funcionalidad y posible usabilidad en etapas tempranas de proyectos eólicos offshore con capacidad menor a 1600 MW.

A continuación, se presenta el resumen de los resultados obtenidos en el modelo preconceptual, y en los anexos 7.12 y 7.13 se incluye la impresión con las salidas del modelo desarrollado en Python y el código en formato .txt, respectivamente.

#### 5.1 Evaluación del modelo con base en parámetros de un parque eólico real

**Proyecto:** Atlantic Shores

**Ubicación:** Noreste de EE.UU., frente a las costas de New Jersey

A continuación, se presenta cuadro comparativo entre los datos reales del proyecto Atlantic Shores y las salidas del modelo preconceptual, con base en los inputs definidos en el modelo y los datos conocidos o supuestos para la corrida del software:

Tabla 9: Cuadro comparativo entre los datos reales del proyecto Atlantic Shores versus salidas del modelo preconceptual

Variable	Atlantic Shores (Datos reales del Proyecto 1)	Atlantic Shores Software preconceptual en Python
<b>ENTRADAS (INPUTS)</b>		
<b>Potencia (MW)</b>	1510 MW	
<b>Distancia más cercana a la costa (Km)</b>	14 km	
<b>Profundidad lámina de agua (m)</b>	19-37 m	30 m
<b>Potencia aerogenerador (MW)</b>	13 MW	14 MW
<b>Diámetro aerogenerador (m)</b>	280.0 m	236.0 m

Variable	Atlantic Shores (Datos reales del Proyecto 1)	Atlantic Shores Software preconceptual en Python
<b>SALIDAS</b>		
Área parque eólico (Km <sup>2</sup> )	220	192
Cantidad de aerogeneradores	105-136	108
Tipo de aerogenerador	General Electric Halide-X turbinas 13 MW $\Phi$ 280 m	Siemens Gamesa SG14.0-236DD 14MW $\Phi$ 236 m
Tipo de cimentación	Monopilotes	Tripilote
Tipo de cable de interconexión generadores	66–150 kV HVAC	66 KV 3x800 mm <sup>2</sup> HVAC por cada 6 generadores
Tipo de cable de exportación	Opción 1: HVAC - 4 cables 230–275 kV HVAC  Opción 2: HVDC – 1 cable 320–525 kV HVDC	Opción 1: HVAC - 4 cables 300 kV HVAC 3x800 mm <sup>2</sup>  Opción 2: HVDC – 1 cable 420 kV HVDC 2200 mm <sup>2</sup>
Tipo sistema de transmisión	HVAC HVDC	HVAC HVDC

#### **Análisis de resultados:**

- El área y cantidad de aerogeneradores es consistente, teniendo en cuenta que la potencia del aerogenerador seleccionado para la corrida en Python es mayor, por lo que parque eólico ocuparía menor área.
- Aunque el tipo de cimentación difiere, las dos alternativas se pueden utilizar para profundidades de lámina de agua entre 25 y 35 m. Adicionalmente, este parámetro depende de las características particulares del lecho marino y de las propiedades del subsuelo. Por ser un modelo preconceptual, no incluye variables relacionadas con el tipo de subsuelo.
- Los tipos y cantidad de cables de interconexión de aerogeneradores y de exportación son muy similares, lo que confirma la fiabilidad del software.
- Existe coherencia en la configuración de los sistemas de transmisión planteados, con base en las tendencias globales de los últimos 15 años.
- El modelo en Python confirma la posibilidad de sistemas de transmisión híbridos HVAC y HVDC, lo que confirma la fiabilidad del software.
- La distribución espacial de los aerogeneradores es adecuada, en función del área disponible (Ver Anexo 7.12).

- Los componentes obtenidos en el modelo preconceptual son adecuados para una etapa temprana y deben ser refinadas en función de variables específicas del sitio, relacionadas con velocidad y dirección del viento, condiciones meteorológicas y oceanográficas, condiciones particulares del lecho marino, tipo de suelo y estratigrafía, presencia de flora y fauna marina, las rutas de los barcos y aeronaves, las actividades de pesca y turismo, infraestructura existente, vestigios arqueológicos y áreas protegidas, normatividad y regulación, entre otras posibles restricciones o limitaciones.

Por lo anterior, se confirma la funcionabilidad, fiabilidad y usabilidad del software para el diseño preconceptual de parques eólicos offshore, basado en la coherencia de los resultados obtenidos.

## 5.2 Aplicación del modelo a un caso práctico en Colombia

**Proyecto:** Vientos Alisios S.A.S.

**Localización:** Noroeste de Colombia, frente a las costas del municipio de Santa Catalina Bolívar.

A continuación, se presentan los datos de entrada y salida del modelo preconceptual, con base en los datos conocidos o supuestos para la corrida del software:

Tabla 10: Datos de entrada y salida del modelo preconceptual para el proyecto Vientos Alisios SAS

Variable	Software preconceptual
<b>ENTRADAS (INPUTS)</b>	
Potencia (MW)	200
Distancia más cercana a la costa (Km)	10
Profundidad lámina de agua (m)	40
Potencia aerogenerador (MW)- dato asumido	8
Diámetro aerogenerador (m)- dato asumido	164
<b>SALIDAS</b>	
Área parque eólico (Km <sup>2</sup> )	18
Cantidad de aerogeneradores	25
Tipo de aerogenerador	VESTAS V164-8.0 MW, 8 MW Φ164 m

Variable	Software preconceptual
Tipo de cimentación	Tripode o Jacket
Tipo de cable de interconexión generadores	26/35 KV 3x500 por cada 5 aerogeneradores 66 KV 3x300 por cada 7 aerogeneradores 66 KV 3x500 por cada 10 aerogeneradores
Tipo de cable de exportación	HVAC 300 KV 3x300 mm <sup>2</sup>
Tipo sistema de transmisión	HVAC

### Análisis de resultados:

- El área y cantidad de aerogeneradores es consistente con la Potencia del parque eólico offshore.
- El tipo de cimentación es adecuado para la profundidad de la lámina de agua, sin embargo, este parámetro se debe validar con las características particulares del lecho marino y las propiedades del subsuelo. Por ser un modelo preconceptual, no incluye variables relacionadas con el tipo de subsuelo.
- Los tipos y cantidad de cables de interconexión de aerogeneradores y de exportación son consistentes con las especificaciones y criterios definidos en el modelo preconceptual para el diseño de los parques eólicos offshore, basados en las tendencias en los sistemas de transmisión eólica offshore a nivel global y en el estado del arte de los últimos 15 años.
- Existe coherencia en la configuración del sistema de transmisión planteado, en función de la distancia a la costa (Ver Anexo 7.12).
- El modelo en Python confirma la posibilidad del sistema de transmisión HVAC por encontrarse a una distancia menor a 100 Km, lo que confirma la fiabilidad del software.
- La distribución espacial de los aerogeneradores es adecuada, en función del área disponible (Ver Anexo 7.12).

Los resultados obtenidos permiten obtener un modelo preconceptual para dimensionar el área del parque eólico, tipo y distribución de aerogeneradores, tipo y cantidad de cables de interconexión y exportación, voltaje y posibles configuraciones para las redes de transmisión, que podría ser usada de referencia para el desarrollo de la ingeniería básica y detallada, en fases subsecuentes.

No obstante, para la construcción es necesario conocer el sitio específico de implantación del parque eólico offshore y variables específicas relacionadas con velocidad y dirección del viento, condiciones meteorológicas y oceanográficas, condiciones particulares del lecho marino, tipo de suelo y estratigrafía, presencia de flora y fauna marina, las rutas de los barcos y aeronaves, las actividades de pesca y turismo, infraestructura existente, vestigios arqueológicos y áreas protegidas, normatividad y regulación, entre otras restricciones o limitaciones.

## **Capítulo 6**

### **CONCLUSIONES**

A partir del análisis cuantitativo del estado del arte de los últimos 15 años se concluye que:

1. Con la introducción de unidades eólicas flotantes, los avances tecnológicos recientes, la mejora de los aerogeneradores, se proyecta un aumento sustancial en el desarrollo de la capacidad de energía eólica marina a nivel mundial, alcanzando los 382 GW en 2030 y alrededor de 2002 GW en 2050.
2. Para distancias superiores a 70 Km, la potencia reactiva generada debido a la alta capacidad del cable de corriente alterna actúa como un factor limitante, lo que impide la transmisión eficiente de la potencia activa. La transmisión en corriente continua no presenta esa limitante, por lo que la transmisión de alta tensión en corriente continua (HVDC) emerge como la mejor alternativa para distancias mayores a 70 Km.
3. La metodología implementada en el modelo preconceptual para el análisis de alternativas para la transmisión de energía eólica offshore, proporciona un enfoque estructurado y riguroso para el dimensionamiento simplificado de parques eólicos offshore, incluyendo las posibles configuraciones de sistemas de transmisión HVDC/HVAC, que pueden ser utilizadas por académicos y expertos multidisciplinarios en etapas tempranas de maduración de proyectos.
4. La aplicabilidad y utilidad del modelo preconceptual desarrollado en el presente trabajo de grado contribuye al predimensionamiento de ingeniería de los parques eólicos offshore en trámite de planeación en Colombia y cualquier otro lugar a nivel global, permitiendo obtener el área del parque, tipo y posible distribución de aerogeneradores, tipo y cantidad de cables de interconexión y exportación, voltaje y posibles configuraciones de redes de transmisión, para que los usuarios en fases posteriores de diseño profundicen, complementen y seleccionen las mejores alternativas, durante la elaboración de las ingenierías conceptual y básica.
5. La aplicación desarrollada en Python para diseños preconceptuales de redes de transmisión eólica offshore en el presente trabajo de grado, permite a los usuarios ingresar datos específicos de cada proyecto y obtener un dimensionamiento simplificado de cualquier parque eólico offshore, lo cual debe ser revisado en fases subsecuentes con información técnica detallada, dependiendo del lugar de proyección o implantación del

parque eólico offshore, que incluya: variables relacionadas con la velocidad y dirección del viento, condiciones meteorológicas y oceanográficas, condiciones particulares del lecho marino, tipo de suelo y estratigrafía, presencia de flora y fauna marina, las rutas de los barcos y aeronaves, las actividades de pesca y turismo, infraestructura existente, vestigios arqueológicos y áreas protegidas, normatividad y regulación, entre otras restricciones o limitaciones.

6. La revisión del estado de arte de los últimos 15 años, la selección de criterios técnicos basados en las tendencias de diseño de parques eólicos offshore y la combinación de tecnologías como Flask, Docker y Python, permitieron construir una aplicación robusta, eficiente, versátil y de libre acceso para los profesionales involucrados en la planificación y preconceptualización de parques eólicos offshore, contribuyendo así al avance de la energía renovable y la sostenibilidad ambiental.

## REFERENCIAS

- [1] M. E. Montilla de Jesús, «Control de parques eólicos “offshore” conectados a red mediante enlace de continua HVdc-LCC», <http://purl.org/dc/dcmitype/Text>, Universidad Carlos III de Madrid, 2010. Accedido: 21 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=87640>
- [2] O. E. Á. Calderón, «Renovables en el Contexto Latinoamericano», n.º 1, 2019.
- [3] E. S. T. Gutierrez, «TRANSMISION DE POTENCIA EN CORRIENTE DIRECTA – HVDC ANALISIS Y SIMULACION», 2004.
- [4] Z. J. Díaz Puerto y J. P. Rodríguez Miranda, «Generalidades de la energía eólica marina», [https://rdigitales.uptc.edu.co/memorias/index.php/eniiu/ped\\_practicas/paper/view/2569](https://rdigitales.uptc.edu.co/memorias/index.php/eniiu/ped_practicas/paper/view/2569), jun. 2018, Accedido: 22 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uptc.edu.co/handle/001/6341>
- [5] M. Zubiaga y S. Aurtenetxea, *Energy Transmission and Grid Integration of AC Offshore Wind Farms*. BoD – Books on Demand, 2012. [En línea]. Disponible en: <https://www.intechopen.com/books/3181>
- [6] «8.2: Vientos y el Efecto Coriolis», LibreTexts Español. Accedido: 15 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: [https://espanol.libretexts.org/Geociencias/Oceanograf%C3%ADa/Libro%3A\\_Introducci%C3%B3n\\_a\\_la\\_Oceanograf%C3%ADa\\_\(Webb\)/08%3A\\_Oc%C3%A9anos\\_y\\_clima/8.02%3A\\_Vientos\\_y\\_el\\_Efecto\\_Coriolis](https://espanol.libretexts.org/Geociencias/Oceanograf%C3%ADa/Libro%3A_Introducci%C3%B3n_a_la_Oceanograf%C3%ADa_(Webb)/08%3A_Oc%C3%A9anos_y_clima/8.02%3A_Vientos_y_el_Efecto_Coriolis)
- [7] L. C. Jiménez Vergara, «Diseño conceptual y básico de una interconexión HVDC para un Parque Eólico Offshore», *instname:Universidad de los Andes*, 2014, Accedido: 16 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/16099>
- [8] «OCW01\_COP\_Volume I\_20230518.pdf». Accedido: 18 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://www.boem.gov/sites/default/files/documents/renewable-energy/state-activities/OCW01\\_COP\\_Volume%20I\\_20230518.pdf](https://www.boem.gov/sites/default/files/documents/renewable-energy/state-activities/OCW01_COP_Volume%20I_20230518.pdf)
- [9] «DNV GL releases subsea power cable guideline following 18-month Joint Industry Project». Accedido: 13 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.dnv.com/news/dnv-gl-releases-subsea-power-cable-guideline-following-18-month-joint-industry-project-7340/>
- [10] Q. Wei, B. Wu, D. Xu, y N. R. Zargari, «Overview of offshore wind farm configurations», *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 93, n.º 1, p. 012009, nov. 2017, doi: 10.1088/1755-1315/93/1/012009.
- [11] P. S. Cáceres, «Centrales eólicas», Blog de Tecnología - IES José Arencibia Gil - Telde. Accedido: 15 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www3.gobiernodecanarias.org/medusa/ecoblog/fsancac/2017/11/24/centrales-eolicas/>
- [12] M. Bošnjaković, M. Katinić, R. Santa, y D. Marić, «Wind Turbine Technology Trends», *Applied Sciences*, vol. 12, n.º 17, Art. n.º 17, ene. 2022, doi: 10.3390/app12178653.
- [13] M. Bilgili y H. Alphan, «Global growth in offshore wind turbine technology», *Clean Techn Environ Policy*, vol. 24, n.º 7, pp. 2215-2227, sep. 2022, doi: 10.1007/s10098-022-02314-0.

- [14] RWE, «The company history of RWE». Accedido: 13 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.rwe.com/en/the-group/history/?endDateYear=2040&startDateYear=1881>
- [15] «List of the 50 largest wind turbine manufacturers [2024] -», Renewables.Digital. Accedido: 25 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://renewables.digital/product/wind-turbine-manufacturers/>
- [16] «Vestas - Manufacturers and turbines - Online access - The Wind Power». Accedido: 25 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://www.thewindpower.net/manufacturer\\_en\\_14\\_vestas.php](https://www.thewindpower.net/manufacturer_en_14_vestas.php)
- [17] «Offshore Wind Turbines and Wind Farms | Siemens Gamesa». Accedido: 25 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.siemensgamesa.com/products-and-services/offshore>
- [18] T. Guerrero y J. Constante, «Distribución factible de aerogeneradores en un parque eólico.», *ENERLAC. Revista de energía de Latinoamérica y el Caribe*, vol. 1, n.º 2, Art. n.º 2, dic. 2017.
- [19] G. Martínez y J. Eduardo, «Layout optimisation of offshore wind farms with realistic constraints and options», 2014, Accedido: 25 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3Ad66d8415-6cbe-494d-83f5-f207ab5f9ed3>
- [20] F. Manzano-Agugliaro, M. Sánchez-Calero, A. Alcayde, C. San-Antonio-Gómez, A.-J. Perea-Moreno, y E. Salmeron-Manzano, «Wind Turbines Offshore Foundations and Connections to Grid», *Inventions*, vol. 5, n.º 1, Art. n.º 1, mar. 2020, doi: 10.3390/inventions5010008.
- [21] «Wind power business, technology & policy | Windpower Monthly». Accedido: 13 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.windpowermonthly.com/>
- [22] «Maine OSW DNV Offshore Wind Transmission Technical Review Final Report.pdf». Accedido: 21 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.maine.gov/energy/sites/maine.gov.energy/files/inline-files/Maine%20OSW%20DNV%20Offshore%20Wind%20Transmission%20Technical%20Review%20Final%20Report.pdf>
- [23] M. J. M. Ayora, «Caracterización eléctrica de cables eléctricos submarinos a diferentes frecuencias».
- [24] «04-cables-accessories.pdf». Accedido: 29 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.sdi.co.uk/media/1sga2j4x/04-cables-accessories.pdf>
- [25] E. P. P. Soares-Ramos, L. de Oliveira-Assis, R. Sarrias-Mena, y L. M. Fernández-Ramírez, «Current status and future trends of offshore wind power in Europe», *Energy*, vol. 202, p. 117787, jul. 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.117787.
- [26] W. Musial, P. Beiter, P. Spitsen, J. Nunemaker, y V. Gevorgian, «2018 Offshore Wind Technologies Market Report».
- [27] I. Martínez De Alegria, J. L. Martín, I. Kortabarria, J. Andreu, y P. Ibanez Ereno, «Transmission alternatives for offshore electrical power: Renewable & sustainable energy review», *Renewable & sustainable energy review*, vol. 13, n.º 5, pp. 1027-1038, ene. 2009.
- [28] «Los siete proyectos colombianos de energía eólica marina». Accedido: 16 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://oilchannel.tv/noticias/los-siete-proyectos-colombianos-de-energia-eolica-marina>

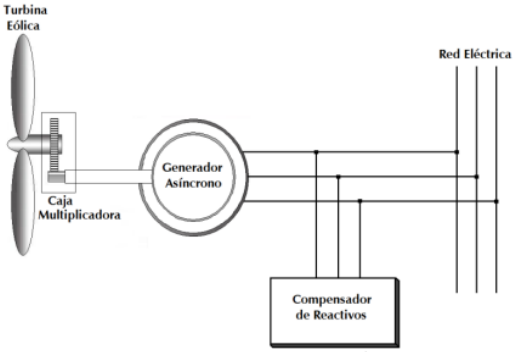
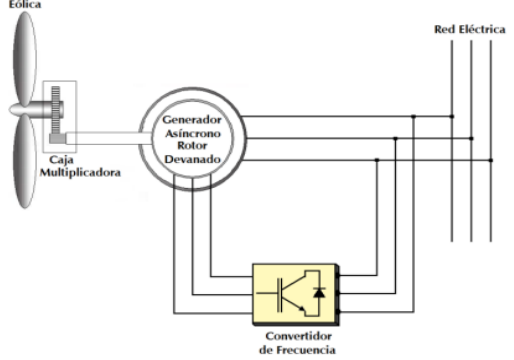
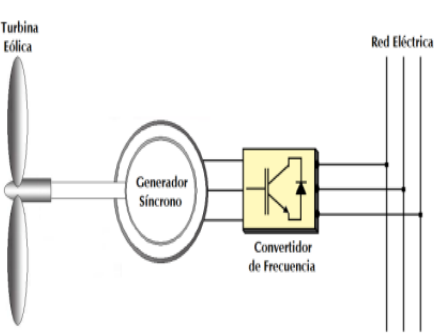
- [29] «Adenda\_No.1\_-\_Modifica\_Cronograma\_px dum5q.pdf». Accedido: 5 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en:  
[https://www.anh.gov.co/documents/23533/Adenda\\_No.1\\_-\\_Modifica\\_Cronograma\\_px dum5q.pdf](https://www.anh.gov.co/documents/23533/Adenda_No.1_-_Modifica_Cronograma_px dum5q.pdf)
- [30] J. G. Rueda-Bayona, A. Guzmán, J. J. C. Eras, R. Silva-Casarín, E. Bastidas-Arteaga, y J. Horrillo-Caraballo, «Renewables energies in Colombia and the opportunity for the offshore wind technology», *Journal of Cleaner Production*, vol. 220, pp. 529-543, may 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.02.174.
- [31] A. Leon, «Informes de la Hoja de ruta de la energía eólica costa afuera en Colombia PROEXCA», PROEXCA. Accedido: 3 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en:  
<https://proexca.es/informes-de-la-hoja-de-ruta-de-la-energia-eolica-costa-afuera-en-colombia-proexca/>
- [32] «Offshore Wind Submarine Cabling Overview».
- [33] T. Worzyk, *Submarine Power Cables: Design, Installation, Repair, Environmental Aspects*. Berlin Heidelberg, 2009.
- [34] M. Hu, S. Xie, J. Zhang, y Z. Ma, «Desing selection of DC & AC submarine power cable for offshore wind mill», en *2014 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*, sep. 2014, pp. 1675-1679. doi: 10.1109/CICED.2014.6991991.
- [35] «xlpe-submarine-cable-systems-2gm5007.pdf». Accedido: 2 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://new.abb.com/docs/default-source/ewea-doc/xlpe-submarine-cable-systems-2gm5007.pdf>
- [36] D. Dhua, S. Huang, y Q. Wu, «Optimal Power Flow Modelling and Analysis of Hybrid AC-DC Grids with Offshore Wind Power Plant», *Energy Procedia*, vol. 141, pp. 572-579, dic. 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.11.076.
- [37] M. E. Montilla de Jesús, «Control de parques eólicos “offshore” conectados a red mediante enlace de continua HVdc-LCC», <http://purl.org/dc/dcmitype/Text>, Universidad Carlos III de Madrid, 2010. Accedido: 21 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=87640>
- [38] O. E. Á. Calderón, «Renovables en el Contexto Latinoamericano», n.º 1, 2019.
- [39] E. S. T. Gutierrez, «TRANSMISION DE POTENCIA EN CORRIENTE DIRECTA – HVDC ANALISIS Y SIMULACION», 2004.
- [40] Z. J. Díaz Puerto y J. P. Rodríguez Miranda, «Generalidades de la energía eólica marina»,  
[https://rdigitales.uptc.edu.co/memorias/index.php/eniiu/ped\\_practicas/paper/view/2569](https://rdigitales.uptc.edu.co/memorias/index.php/eniiu/ped_practicas/paper/view/2569)  
 , jun. 2018, Accedido: 22 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en:  
<https://repositorio.uptc.edu.co/handle/001/6341>
- [41] M. Zubiaga y S. Aurtenetxea, *Energy Transmission and Grid Integration of AC Offshore Wind Farms*. BoD – Books on Demand, 2012. [En línea]. Disponible en:  
<https://www.intechopen.com/books/3181>
- [42] «8.2: Vientos y el Efecto Coriolis», LibreTexts Español. Accedido: 15 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en:  
[https://espanol.libretexts.org/Geociencias/Oceanograf%C3%ADa/Libro%3A\\_Introducci%C3%B3n\\_a\\_la\\_Oceanograf%C3%ADa\\_\(Webb\)/08%3A\\_Oc%C3%A9anos\\_y\\_clima/8.02%3A\\_Vientos\\_y\\_el\\_Efecto\\_Coriolis](https://espanol.libretexts.org/Geociencias/Oceanograf%C3%ADa/Libro%3A_Introducci%C3%B3n_a_la_Oceanograf%C3%ADa_(Webb)/08%3A_Oc%C3%A9anos_y_clima/8.02%3A_Vientos_y_el_Efecto_Coriolis)
- [43] L. C. Jiménez Vergara, «Diseño conceptual y básico de una interconexión HVDC para un Parque Eólico Offshore», *instname:Universidad de los Andes*, 2014, Accedido:

- 16 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en:  
<https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/16099>
- [44] «OCW01\_COP\_Volume I\_20230518.pdf». Accedido: 18 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://www.boem.gov/sites/default/files/documents/renewable-energy/state-activities/OCW01\\_COP\\_Volume%20I\\_20230518.pdf](https://www.boem.gov/sites/default/files/documents/renewable-energy/state-activities/OCW01_COP_Volume%20I_20230518.pdf)
- [45] «DNV GL releases subsea power cable guideline following 18-month Joint Industry Project». Accedido: 13 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.dnv.com/news/dnv-gl-releases-subsea-power-cable-guideline-following-18-month-joint-industry-project-7340/>
- [46] Q. Wei, B. Wu, D. Xu, y N. R. Zargari, «Overview of offshore wind farm configurations», *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 93, n.º 1, p. 012009, nov. 2017, doi: 10.1088/1755-1315/93/1/012009.
- [47] P. S. Cáceres, «Centrales eólicas», Blog de Tecnología - IES José Arencibia Gil - Telde. Accedido: 15 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www3.gobiernodecanarias.org/medusa/ecoblog/fsancac/2017/11/24/centrales-eolicas/>
- [48] M. Bošnjaković, M. Katinić, R. Santa, y D. Marić, «Wind Turbine Technology Trends», *Applied Sciences*, vol. 12, n.º 17, Art. n.º 17, ene. 2022, doi: 10.3390/app12178653.
- [49] M. Bilgili y H. Alphan, «Global growth in offshore wind turbine technology», *Clean Techn Environ Policy*, vol. 24, n.º 7, pp. 2215-2227, sep. 2022, doi: 10.1007/s10098-022-02314-0.
- [50] RWE, «The company history of RWE». Accedido: 13 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.rwe.com/en/the-group/history/?endDateYear=2040&startDateYear=1881>
- [51] «List of the 50 largest wind turbine manufacturers [2024] -», Renewables.Digital. Accedido: 25 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://renewables.digital/product/wind-turbine-manufacturers/>
- [52] «Vestas - Manufacturers and turbines - Online access - The Wind Power». Accedido: 25 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://www.thewindpower.net/manufacturer\\_en\\_14\\_vestas.php](https://www.thewindpower.net/manufacturer_en_14_vestas.php)
- [53] «Offshore Wind Turbines and Wind Farms | Siemens Gamesa». Accedido: 25 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.siemensgamesa.com/products-and-services/offshore>
- [54] T. Guerrero y J. Constante, «Distribución factible de aerogeneradores en un parque eólico.», *ENERLAC. Revista de energía de Latinoamérica y el Caribe*, vol. 1, n.º 2, Art. n.º 2, dic. 2017.
- [55] G. Martínez y J. Eduardo, «Layout optimisation of offshore wind farms with realistic constraints and options», 2014, Accedido: 25 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3Ad66d8415-6cbe-494d-83f5-f207ab5f9ed3>
- [56] F. Manzano-Agugliaro, M. Sánchez-Calero, A. Alcayde, C. San-Antonio-Gómez, A.-J. Perea-Moreno, y E. Salmeron-Manzano, «Wind Turbines Offshore Foundations and Connections to Grid», *Inventions*, vol. 5, n.º 1, Art. n.º 1, mar. 2020, doi: 10.3390/inventions5010008.
- [57] «Wind power business, technology & policy | Windpower Monthly». Accedido: 13 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.windpowermonthly.com/>

- [58] «Maine OSW DNV Offshore Wind Transmission Technical Review Final Report.pdf». Accedido: 21 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.maine.gov/energy/sites/maine.gov.energy/files/inline-files/Maine%20OSW%20DNV%20Offshore%20Wind%20Transmission%20Technical%20Review%20Final%20Report.pdf>
- [59] M. J. M. Ayora, «Caracterización eléctrica de cables eléctricos submarinos a diferentes frecuencias».
- [60] «04-cables-accessories.pdf». Accedido: 29 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.sdi.co.uk/media/1sga2j4x/04-cables-accessories.pdf>
- [61] E. P. P. Soares-Ramos, L. de Oliveira-Assis, R. Sarrias-Mena, y L. M. Fernández-Ramírez, «Current status and future trends of offshore wind power in Europe», *Energy*, vol. 202, p. 117787, jul. 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.117787.
- [62] W. Musial, P. Beiter, P. Spitsen, J. Nunemaker, y V. Gevorgian, «2018 Offshore Wind Technologies Market Report».
- [63] I. Martínez De Alegria, J. L. Martín, I. Kortabarria, J. Andreu, y P. Ibanez Ereno, «Transmission alternatives for offshore electrical power: Renewable & sustainable energy review», *Renewable & sustainable energy review*, vol. 13, n.º 5, pp. 1027-1038, ene. 2009.
- [64] «Los siete proyectos colombianos de energía eólica marina». Accedido: 16 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://oilchannel.tv/noticias/los-siete-proyectos-colombianos-de-energia-eolica-marina>
- [65] «Adenda\_No.1\_-\_Modifica\_Cronograma\_px dum5q.pdf». Accedido: 5 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://www.anh.gov.co/documents/23533/Adenda\\_No.1\\_-\\_Modifica\\_Cronograma\\_px dum5q.pdf](https://www.anh.gov.co/documents/23533/Adenda_No.1_-_Modifica_Cronograma_px dum5q.pdf)
- [66] J. G. Rueda-Bayona, A. Guzmán, J. J. C. Eras, R. Silva-Casarín, E. Bastidas-Arteaga, y J. Horrillo-Caraballo, «Renewables energies in Colombia and the opportunity for the offshore wind technology», *Journal of Cleaner Production*, vol. 220, pp. 529-543, may 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.02.174.
- [67] A. Leon, «Informes de la Hoja de ruta de la energía eólica costa afuera en Colombia PROEXCA», PROEXCA. Accedido: 3 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://proexca.es/informes-de-la-hoja-de-ruta-de-la-energia-eolica-costa-afuera-en-colombia-proexca/>
- [68] «Offshore Wind Submarine Cabling Overview».
- [69] T. Worzyk, *Submarine Power Cables: Design, Installation, Repair, Environmental Aspects*. Berlin Heidelberg, 2009.
- [70] M. Hu, S. Xie, J. Zhang, y Z. Ma, «Desing selection of DC & AC submarine power cable for offshore wind mill», en *2014 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*, sep. 2014, pp. 1675-1679. doi: 10.1109/CICED.2014.6991991.
- [71] «xlpe-submarine-cable-systems-2gm5007.pdf». Accedido: 2 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://new.abb.com/docs/default-source/ewea-doc/xlpe-submarine-cable-systems-2gm5007.pdf>
- [72] D. Dhua, S. Huang, y Q. Wu, «Optimal Power Flow Modelling and Analysis of Hybrid AC-DC Grids with Offshore Wind Power Plant», *Energy Procedia*, vol. 141, pp. 572-579, dic. 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.11.076.

## APENDICE

### 7.1 Tipos de aerogeneradores

Turbina eólica a velocidad constante basada en un generador asíncrono.	Turbina eólica a velocidad variable basada en un generador asíncrono doblemente alimentado (GADA).	Turbina eólica a velocidad variable basada en un generador síncrono
		
<p>Esta configuración es el llamado «concepto danés», y consiste en un generador asíncrono tipo jaula de ardilla conectado directamente a la red. El rotor de la turbina eólica se conecta al generador a través de una caja multiplicadora y gira a una velocidad casi constante con una variación entre 0.1-2% de la nominal. Tiene el inconveniente de consumir potencia reactiva para su magnetización, tanto en vacío como a plena carga.</p>	<p>En esta configuración el estator de la máquina eléctrica está directamente conectado a la red. Sin embargo, los devanados del rotor están alimentados a través de convertidores de electrónica de potencia «back-to-back» que pueden variar la frecuencia eléctrica aplicada al rotor. De esta forma se consigue que la frecuencia mecánica y eléctrica del rotor estén desacoplados, haciendo posible la operación con velocidad variable del aerogenerador, lo que deriva en que la frecuencia del estator y del rotor pueden ser sincronizadas independientemente de la velocidad mecánica en la turbina. De igual modo, con un apropiado sistema de control implementado en los convertidores es posible controlar independientemente la potencia activa y reactiva que entrega el generador.</p>	<p>En esta configuración el generador síncrono puede ser de rotor devanado o de imanes permanentes. Con este último generador la turbina no necesita caja multiplicadora aunque el generador gire a bajas velocidades, ya que el estator está acoplado a la red eléctrica a través de un convertidor de electrónica de potencia que varía la frecuencia del generador para acoplarla a la frecuencia de la red.</p>

Fuente: Adaptación [1]

## 7.2 Resumen de tipos de cimentaciones, profundidades y frecuencia de uso.

Tipo de fundación	Tipo de estructura	Profundidad lámina		Uso actual
		de agua (m)	Tipo de suelo	
<b>Monopilote</b>	Fija	<15	Arenoso-arcilloso	El más usado
<b>Gravedad</b>	Fija	≤30	Requiere preparación del terreno	Significativo
<b>Jacket</b>	Fija	>30 (25-50)	Diferentes tipos de suelos (no rocoso)	Significativo
<b>Tripode</b>	Fija	30	Diferentes tipos de suelos (no rocoso)	No común
<b>Estructura de boya</b>	Flotante	>60	-	No común
<b>Semisumergible</b>	Flotante	>60	-	No común
<b>Plataforma piernas tensoras (TLP)</b>	Flotante	>60	-	No común


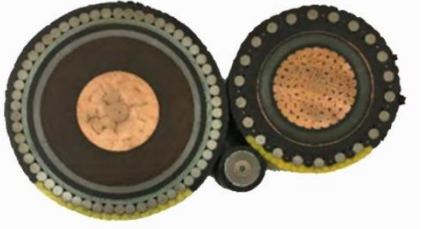
Fuente: Adaptación [20]

### 7.3 Comparación de la tecnología actual usada en las diferentes soluciones de transmisión en los parques eólicos offshore:

Crterios	HVAC	HVDC-LCC	HVDC-VSC
<b>Máxima potencia por cable</b>	400MW a 245kV. 200 MW a 150kV.	Hasta 1200MW.	Hasta 350MW instalado. 400 MW anunciado 1200 MW propuesto
<b>Longitud máxima (sin mitigación)</b>	100km	Teóricamente ilimitado Distancias actuales hasta 600 Km	
<b>Nivel de tensión</b>	132kV instalado. 245kV y 400kV bajo desarrollo.	Hasta $\pm 500$ kV	Hasta $\pm 150$ kV. ( $\pm 300$ kV propuesto)
<b>Apoyo a la red</b>	No, se requiere SVC para generar la potencia reactiva	No, se requieren bancos de condensadores o STATCOM	Sí, la potencia reactiva es generada o absorbida por los dispositivos del VSC
<b>Modelo del cable</b>	Resistencia, inductancia y capacitancia.	Resistencia	
<b>Costo del cable</b>	Alto	Medio	
<b>Requerimiento de servicios complementario</b>	No es necesario.	Sí para bajas velocidades del viento	Sí para bajas velocidades del viento
<b>Espacio en la subestación offshore</b>	Tamaños pequeños	Tamaños grandes	Tamaños medios
<b>Costo subestación/Plataforma de Conversión</b>	Medio	Alto	
<b>Costo subestación/Plataforma de Conversión</b>	1.500-3.000 Tons	12.000 Tons (Borwin Beta Germany)	
<b>Costo de la instalación</b>	Pequeños para la estación (sólo el transformador) y alto costo en el cable	Alto costo para la estación (transformador, filtros, banco de condensadores, válvulas de tiristores).	La estación es entre un 30% y 40% más cara que la solución LCC (los IGBT son más caros que los tiristores)

Fuente: Adaptación [1] [32]

#### 7.4 Tipo de cable y comparación del tamaño

<b>Parámetro</b>			
	HVAC Interconexión (izquierda) y HVAC Exportación (derecha)		
	<b>HVAC Interconexión</b>	<b>HVAC Exportación</b>	<b>HVDC</b>
<b>Rango diámetro externo</b>	4.25"-6" (110 mm-160 mm)	10"-13" (250 mm-320 mm)	Aproximadamente 6" (150mm) El cable de retorno es más pequeño
<b>Peso en el aire</b>	13 lb/ft-34 lb/ft (20 kg/m-51 kg/m)	Hasta 85 lb/ft (125 kg/m)	Aprox. 40 lb/ft (60 kg/m)
<b>Radio mínimo de doblado</b>	~ 6 ft (2.0 m)	~ 15 ft (5.0 m)	Variable
<b>Sección transversal del conductor</b>	3 x 120 mm <sup>2</sup> - 800 mm <sup>2</sup> .	3 x 800 mm <sup>2</sup> - 1400 mm <sup>2</sup>	Hasta 1800 mm <sup>2</sup>
<b>Rango de voltaje</b>	< 66 kV	< 420 kV (más común entre 220-290 kV)	Aproximadamente hasta +/- 600 kV

Fuente: Adaptación [32]

### 7.5 Tipos de cables submarinos genéricos

					
<b>Tipo de cable</b>	1	2	3	4	5
<b>Rango de voltaje <math>U_0</math></b>	33 KV AC	150 KV AC	420 KV AC	320 KV DC	450 KV DC
<b>Tipo de aislamiento</b>	XLPE, EPR	XLPE	Oil/paper o XLPE	Extruido	Mass Impregnated (MI)
<b>Aplicación</b>	Suministros islas pequeñas y conexión de aerogeneradores	Suministros islas grandes y cables de exportación parques eólicos costa afuera	Cruce de ríos/tramos rectos con alta capacidad de transmisión	Conexiones de grandes distancias para plataformas o parques eólicos costa afuera	Conexiones de grandes distancias para redes eléctricas autónomas. Uso común en LCCs.
<b>Máxima distancia</b>	20-30 Km	70-150 Km	< 50 Km	> 500 Km	> 500 Km
<b>Rango típico</b>	30 MW	180 MW	700 MW/3 cables	1000 MW/par de cables	600 MW/cable

Fuente: Adaptación [33]

### 7.6 Capacidad de transmisión cable de cobre submarino 26/35 KV AC

<b>Especificación cable Submarino mm<sup>2</sup></b>	<b>Ampacidad referenciada Tubo J metálico</b>	<b>Capacidad de Potencia MVA</b>	<b>Corriente de cortocircuito KA/s</b>
<b>26/35KV 3x50</b>	194	10	6.8
<b>26/35KV 3x70</b>	220	12	10.0
<b>26/35KV 3x95</b>	285	16	13.5
<b>26/35KV 3x120</b>	325	18	17.2
<b>26/35KV 3x150</b>	364	22	21.5
<b>26/35KV 3x185</b>	410	24	26.5
<b>26/35KV 3x240</b>	475	28	34.3
<b>26/35KV 3x300</b>	530	32	42.9
<b>26/35KV 3x400</b>	600	36	57.2
<b>26/35KV 3x500</b>	690	40	69.5

*Fuente:* Adaptación [34]

### 7.7 Capacidad de transmisión cable de cobre submarino 66 KV AC

Especificación cable		Capacidad de
Submarino	Ampacidad	Potencia
mm <sup>2</sup>		MVA
<b>66KV 3x95</b>	300	34
<b>66KV 3x120</b>	340	38
<b>66KV 3x150</b>	375	42
<b>66KV 3x185</b>	420	48
<b>66KV 3x240</b>	480	54
<b>66KV 3x300</b>	530	60
<b>66KV 3x400</b>	590	67
<b>66KV 3x500</b>	655	74
<b>66KV 3x630</b>	715	81
<b>66KV 3x800</b>	775	88
<b>66KV 3x1000</b>	825	94

*Fuente:* Adaptación [35]

### 7.8 Capacidad de transmisión cable de cobre submarino 300 KV AC

<b>Especificación cable</b>	<b>Ampacidad</b>	<b>Capacidad de</b>
<b>Submarino</b>		<b>Potencia</b>
<b>mm<sup>2</sup></b>		<b>MVA</b>
<b>300KV 3x300</b>	530	275
<b>300KV 3x400</b>	590	306
<b>300KV 3x500</b>	655	340
<b>300KV 3x630</b>	715	371
<b>300KV 3x800</b>	775	402
<b>300KV 3x1000</b>	825	428

*Fuente:* Adaptación [35]

### 7.9 Capacidad de transmisión cable de cobre submarino 200 KV DC

<b>Especificación cable Submarino mm<sup>2</sup></b>	<b>Capacidad de Potencia MVA</b>
<b>240</b>	225
<b>300</b>	250
<b>400</b>	295
<b>500</b>	330
<b>630</b>	390
<b>800</b>	440
<b>1000</b>	510
<b>1200</b>	555
<b>1400</b>	600
<b>1600</b>	645

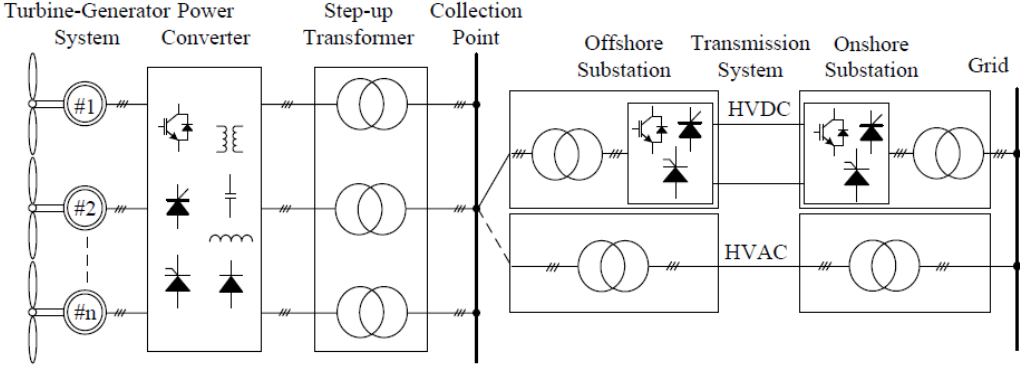
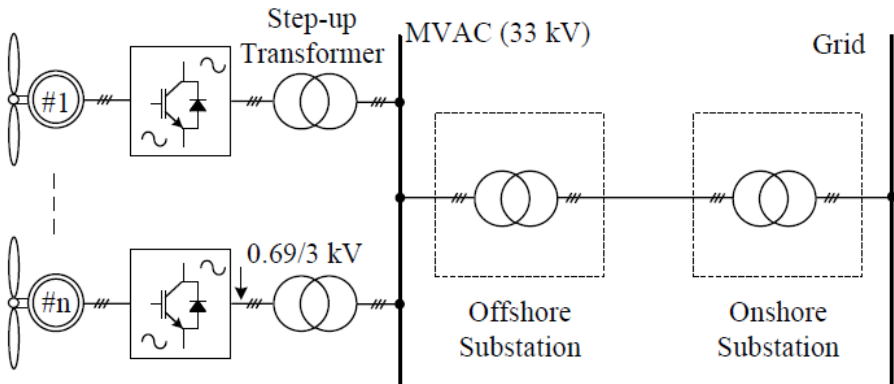
*Fuente:* Adaptación [34]

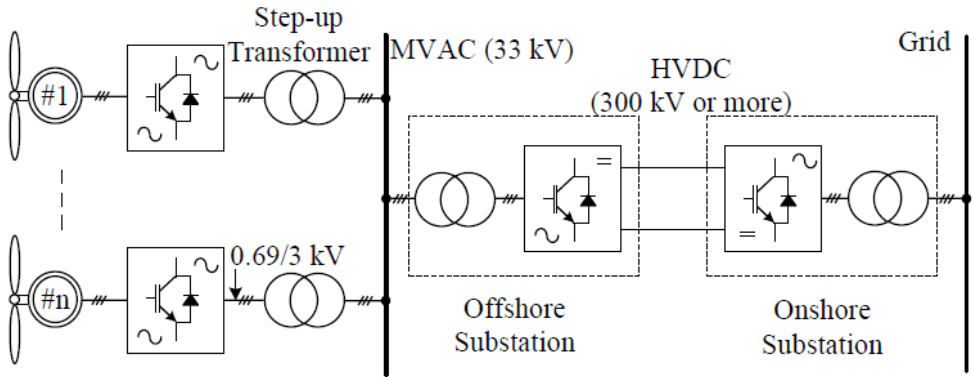
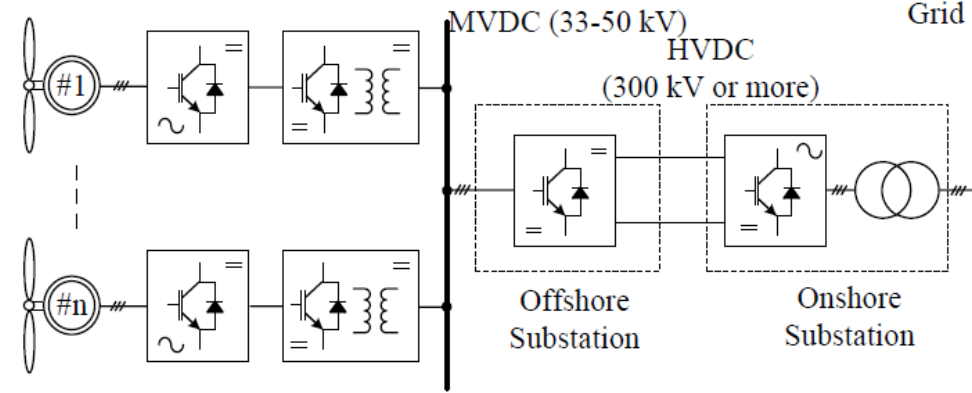
### 7.10 Capacidad de transmisión cable de cobre submarino 420 KV DC

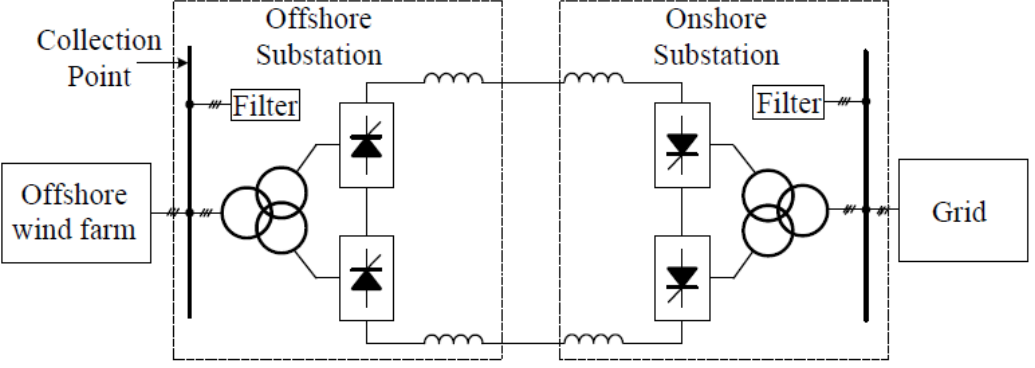
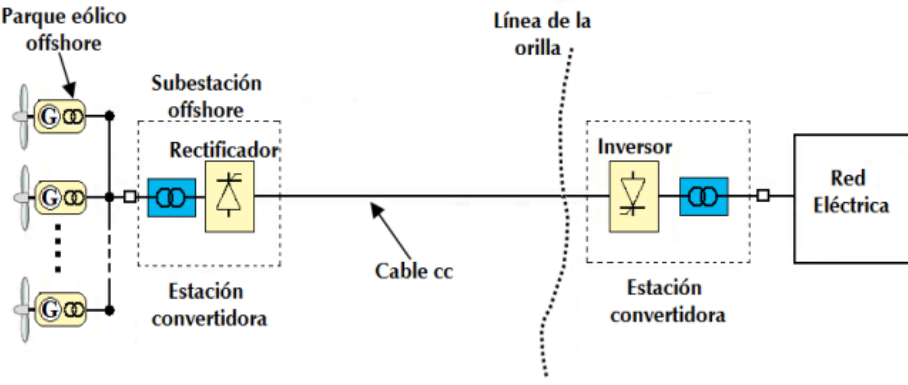
Especificación cable		Capacidad de
Submarino	Ampacidad	Potencia
mm <sup>2</sup>		MVA
185	580	421
240	670	487
300	750	545
400	845	614
500	950	691
630	1065	774
800	1180	858
1000	1290	938
1200	1450	1054
1400	1600	1164
1600	1700	1236
2000	1950	1418
2200	2080	1513
2500	2250	1636

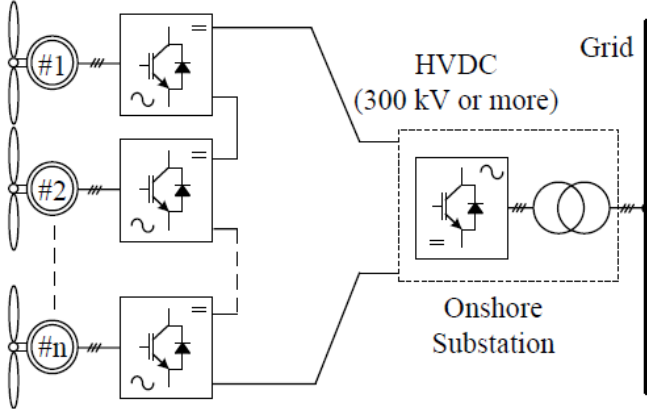
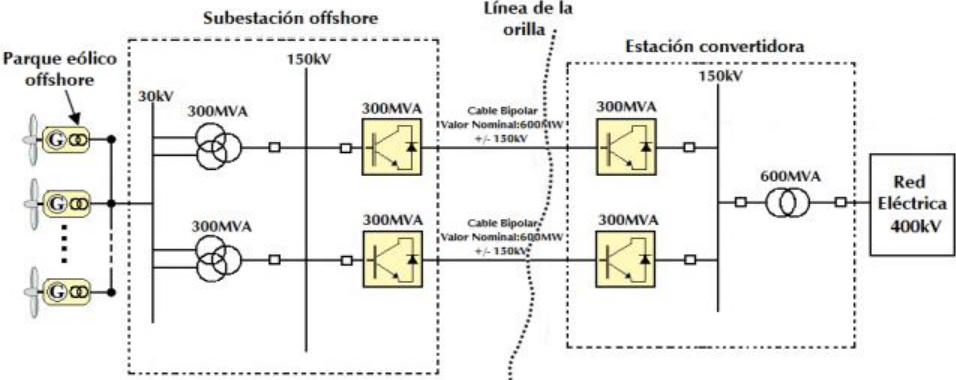
*Fuente:* Adaptación [35]

## 7.11 Posibles configuraciones redes de transmisión

Esquema de conexión	Descripción
 <p>Diagrama de conexión para configuración HVDC/HVAC. Muestra un sistema de turbinas generadoras (#1, #2, ..., #n) conectadas a un convertidor de potencia. El convertidor está conectado a un transformador de elevación de voltaje. El sistema de recolección de 33 kV es entonces transformado a un nivel HVAC por otro transformador. El nivel HVAC luego se transforma a un Nivel HVDC mediante un convertidor de potencia CA/CC centralizado (los convertidores modulares multinivel (MMC) están dominando el mercado). La energía eólica total capturada se entrega luego al punto de conexión común.</p>	<p>La salida del sistema turbina-generador-convertidor, que normalmente es de 690 V, se aumenta hasta 33 kV mediante un transformador. El sistema de recolección de 33 kV es entonces transformado a un nivel HVAC por otro transformador. El nivel HVAC luego se transforma a un Nivel HVDC mediante un convertidor de potencia CA/CC centralizado (los convertidores modulares multinivel (MMC) están dominando el mercado). La energía eólica total capturada se entrega luego al punto de conexión común.</p>
 <p>Diagrama de conexión para configuración HVAC simple. Muestra un sistema de turbinas generadoras (#1, ..., #n) conectadas a un convertidor de potencia. El convertidor está conectado a un transformador de elevación de voltaje. El sistema de recolección de 33 kV es entonces transformado a un nivel HVAC por otro transformador. El nivel HVAC luego se transforma a un Nivel HVDC mediante un convertidor de potencia CA/CC centralizado (los convertidores modulares multinivel (MMC) están dominando el mercado). La energía eólica total capturada se entrega luego al punto de conexión común.</p>	<p>El voltaje de salida típico de las turbinas eólicas es 690 o 3000 (o 4000) V, que se convierte en alrededor de 33 kV por el transformador. Las salidas de los transformadores están conectadas en paralelo para formar un sistema medio sistema de voltaje, y luego aumenta a un nivel HVAC mediante transformadores ubicados en subestación en altamar. Entre los convertidores marinos y terrestres se encuentra el sistema de transmisión HVAC.</p> <p>Esta configuración es el método de conexión más simple y económico cuando la distancia entre los puntos de conexión en alta mar y en tierra es inferior a 50 km.</p>

Esquema de conexión	Descripción
 <p>The diagram illustrates a conventional AC/DC connection. On the left, multiple wind turbines (labeled #1 to #n) are connected to a Step-up Transformer (0.69/3 kV) to create an MVAC (33 kV) bus. This bus is connected to an Offshore Substation containing an AC/DC converter. The HVDC (300 kV or more) line then connects to an Onshore Substation containing a DC/AC converter and a transformer, which is connected to the Grid.</p>	<p>Se utiliza un transformador elevador para convertir el sistema MVAC en un nivel HVAC y luego un convertidor AC/DC para convertir HVAC a HVDC. Todos los transformadores, los convertidores AC/DC y otros componentes relacionados se encuentran alojados en la subestación en altamar. Un convertidor centralizado DC/AC y un transformador reductor se utilizan en el lado de la red y están ubicados en la estación terrestre.</p> <p>Es la configuración más popular para parques eólicos que están ubicados lejos de la costa y tienen gran capacidad de potencia.</p>
 <p>The diagram illustrates an MVDC connection. On the left, multiple wind turbines (labeled #1 to #n) are connected to a DC/DC converter, which is then connected to an MVDC (33-50 kV) bus. This bus is connected to an Offshore Substation containing a DC/DC converter. The HVDC (300 kV or more) line then connects to an Onshore Substation containing a DC/DC converter and a transformer, which is connected to the Grid.</p>	<p>El sistema de recolección MVDC está formado por la conexión de las salidas de los convertidores en paralelo DC/DC. Luego, el sistema MVDC se actualiza a un nivel HVDC con la ayuda de un convertidor DC/DC alojado en subestación en altamar.</p> <p>Los convertidores DC/DC normalmente constan de tres etapas de conversión, que son DC/AC, transformador de frecuencia media/alta y AC/DC. En comparación con la conexión de AC en paralelo y sistema de transmisión HVDC, el tamaño y peso de esta configuración es menor principalmente gracias al transformador de media/alta frecuencia basado en el Convertidor DC/DC.</p> <p>Esta configuración no ha sido implementada todavía.</p>

Esquema de conexión	Descripción
	<p>La configuración con conexión CC en serie y transmisión HVDC puede eliminar la subestación en altamar, reduciendo considerablemente el costo de todo el sistema del parque eólico marino.</p> <p>Se han desarrollado configuraciones conectadas en serie basadas en CSC y VSC para granjas eólicas offshore en la literatura.</p>
	<p>En un sistema HVDC basado en un convertidor conmutado por red (LCC) se pueden conectar dos sistemas eléctricos de C.A. a través de un enlace en continua. La corriente eléctrica se toma desde un punto en uno de los dos sistemas de C.A. para convertirse en corriente continua (C.C.) por medio de una estación convertidora. Esta forma de energía se transmite al punto de recepción mediante un cable subterráneo de C.C. La energía se vuelve a convertir en C.A. en la estación receptora para inyectarse al sistema restante.</p> <p>El sistema HVDC-LCC ha sido instalado en muchos lugares del mundo, principalmente para la transmisión de grandes capacidades de potencia sobre largas distancias geográficas y para la interconexión de sistemas de potencia con frecuencia de operación diferentes. Sin embargo, hasta ahora no existe ninguna experiencia respecto a los parques eólicos offshore que utilice esta tecnología.</p>

Esquema de conexión	Descripción
	<p>La salida de DC de los turbogeneradores se conecta directamente a los convertidores AC/DC en serie para alcanzar un nivel HVDC sin el uso de transformadores elevadores. En comparación con la configuración basada en LCC, la configuración basada en VSC presenta un tamaño más compacto, control independiente de potencia real y reactiva y una rápida respuesta dinámica.</p>
 <p style="text-align: center;"><i>Fuente: [1]</i></p>	<p>El sistema HVDC basado en un convertidor de fuente de tensión (VSC) es la última propuesta en la transmisión de C.C. Este nuevo sistema utiliza la más avanzada tecnología en convertidores. Con los avances más recientes en la electrónica de potencia se han desarrollado interruptores muy avanzados y de fácil control, como son el transistor bipolar de puerta aislada (IGBT) y el tiristor de apagado por puerta (GTO), que permiten un control mediante la modulación del ancho del pulso (PWM). Esta solución mejora la estabilidad y el control de la potencia reactiva en cada extremo de la red, y puede también operar a muy bajos niveles de potencia de cortocircuito.</p>

Esquema de conexión	Descripción
<p>El diagrama muestra la configuración de conexión entre un parque eólico offshore y una subestación onshore. En el lado offshore, se encuentran transformadores de aislamiento etiquetados como #1, #2, ..., #n, cada uno conectado a un convertidor PWM CSR. Estos convertidores están conectados a una línea de transmisión que pasa por un transformador y se conecta a la subestación onshore. En la subestación onshore, se encuentran transformadores multi-enrollados conectados a los convertidores PWM CSI, los cuales a su vez están conectados a la red (Grid). El diagrama también muestra detalles de los convertidores PWM CSR y PWM CSI, incluyendo sus circuitos de potencia y filtros.</p>	<p>Los CSC con pulso ancho de modulación (PWM) son convertidores bien probados en aplicaciones de media tensión (MV). Presenta ventajas como topología simple, forma de onda compatible con la red y protección confiable contra cortocircuitos. Se consideran muy prometedores para convertidores de energía eólica.</p> <p>En alta mar se utilizan varias unidades de turbina-generador de MV.</p> <p>El voltaje de salida DC de cada CSC se conecta directamente en serie para alcanzar un nivel HVDC, que luego es transferido a tierra firme mediante cables de transmisión. El mismo número de CSC es conectado directamente en serie para construir un convertidor DC/AC conectado a la red a través de transformadores.</p>
<p>Este diagrama representa una solución de flujo de potencia óptimo (OPF) en una red híbrida AC/DC. Se muestran nueve buses (Bus 1 a Bus 9) interconectados por líneas de transmisión AC y DC. El Bus 6 está conectado a un generador eólico. Los parámetros de las líneas de transmisión AC y DC se detallan a continuación:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Linea Bus 1-2: <math>2.00, 1.00</math></li> <li>Linea Bus 2-3: <math>1.00, 0.50</math></li> <li>Linea Bus 2-8: <math>1.02:1, 0.15j</math></li> <li>Linea Bus 2-7: <math>0.04</math></li> <li>Linea Bus 7-9: <math>0.05</math></li> <li>Linea Bus 8-9: <math>0.01+0.05j</math></li> <li>Linea Bus 3-4: <math>1.02:1, 0.15j</math></li> <li>Linea Bus 3-5: <math>0.02+0.03j</math></li> <li>Linea Bus 4-5: <math>1.02, 3.00</math></li> <li>Linea Bus 5-9: <math>5.00, 2.00</math></li> <li>Linea Bus 6-7: <math>1.02:1, 0.15j</math></li> <li>Linea Bus 1-6: <math>1&lt;0</math></li> </ul> <p>Parámetros de la red:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Base = 100 MVA</li> <li><math>Z_c = 0.0001 + 0.1643j</math></li> <li>Shunt Admittance of AC lines = <math>0.1j</math></li> </ul>	<p>Solución Optimal Power Flow (OPF) en una red hibrida AC/DC, incluyendo HVDC (basado en LCC) y WPP offshore (basado en VSC)</p>

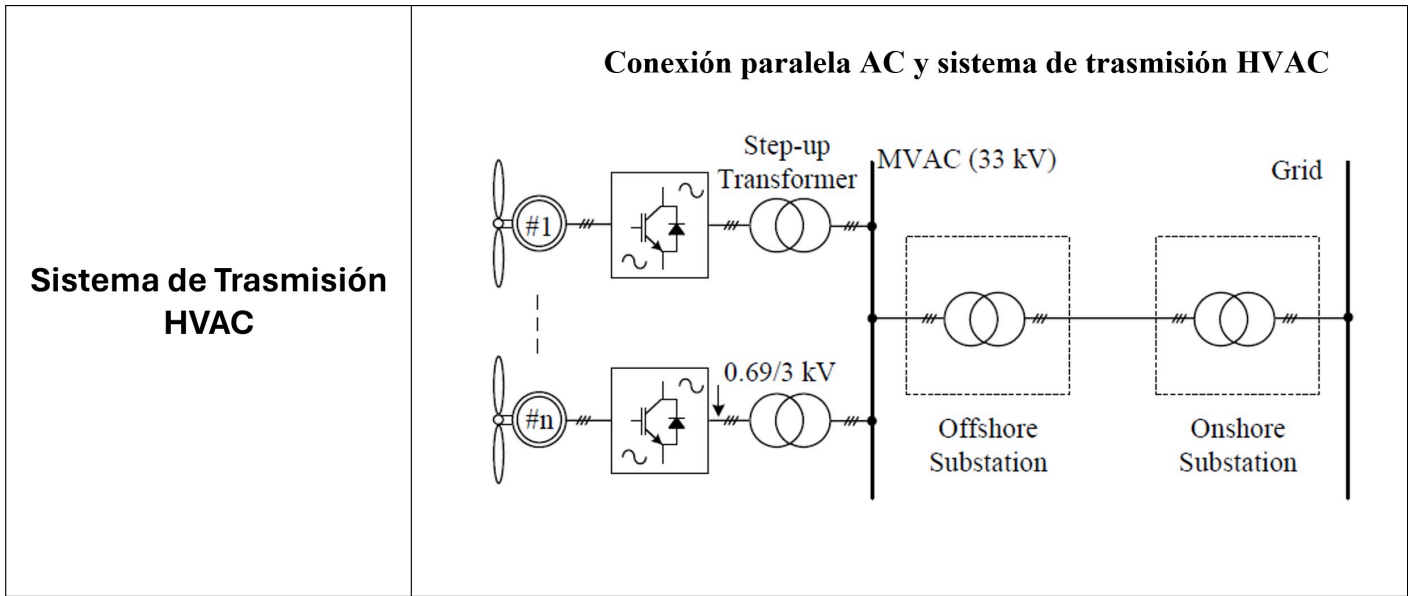
## **7.12 Resultado Evaluación modelo preconceptual y resultado de un caso práctico en Colombia**

**Proyecto: Atlantic Shores Offshore Wind****ID: 8563**

<b>Atributo</b>	<b>Valor</b>
Potencia del parque (MW)	1510.0
Distancia más cercana a la costa (Km)	14.0
Profundidad lámina de agua (m)	30.0
Potencia del aerogenerador (MW)	14.0
Diámetro del Aerogenerador	236.0 m
Marca Aerogenerador	SIEMENS GAMESA SG 14.0-236 DD

**Resultados**

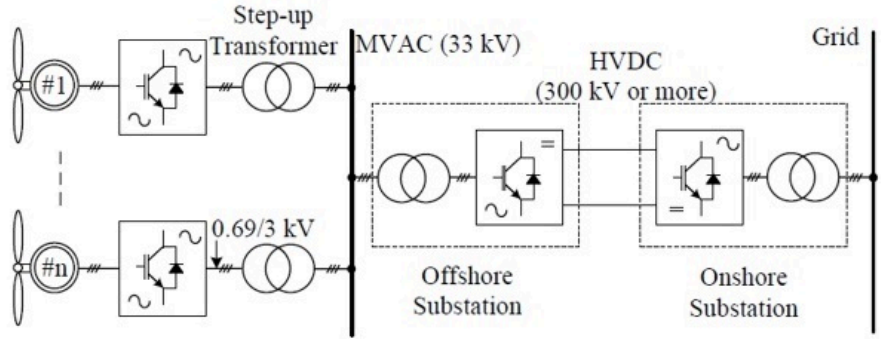
<b>Atributo</b>	<b>Valor</b>
Fecha y Hora (UTC)	30/05/2024 21:03
Sistema de Transmisión	HVAC o HVDC
Distancia a la Costa	14.0 km
Tipo de Cimentación	Tripilote
Profundidad del Agua	30.0 m
Cantidad de Generadores	108
Área del Parque	191.59 km <sup>2</sup>
Cable de interconexión	66KV 3x800por cada 6 aerogeneradores
Cable de Exportación HVAC	4 cables de 300KV 3x800 mm <sup>2</sup>
Cable de Exportación HVDC	1 cable DC 420 KV de 2200 mm <sup>2</sup>



Parque Eólico Offshore

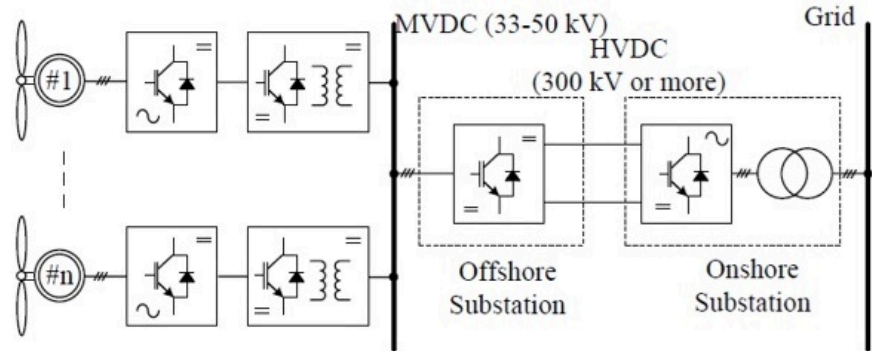
**Sistema de Trasmisión HVDC**

**Conexión paralela AC y sistema de trasmisión HVDC**



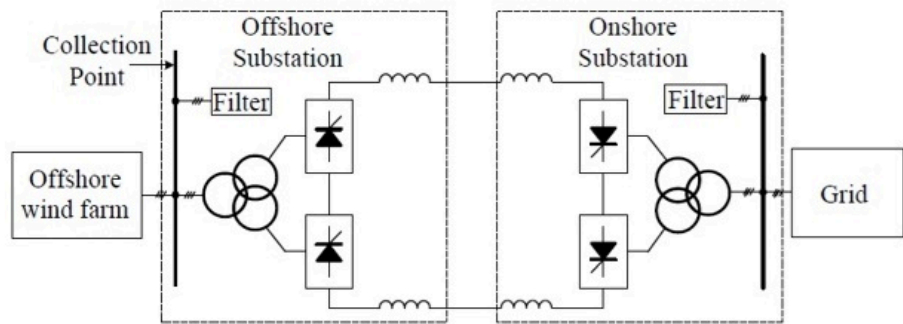
**Sistema de Trasmisión HVDC**

**Conexión paralela DC y sistema de trasmisión HVDC**



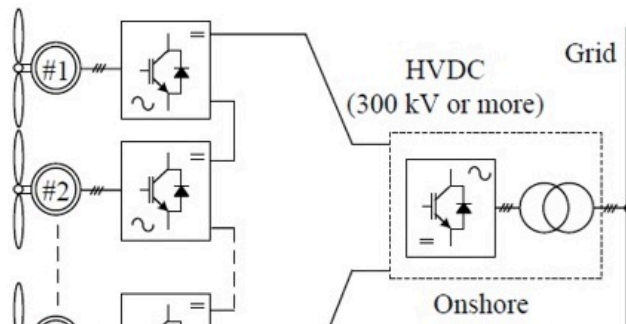
**Sistema de Trasmisión HVDC-LCC**

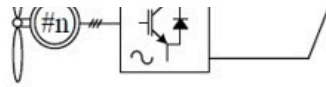
**Conexión DC basada en LCC y sistema de trasmisión HVDC**



**Sistema de Trasmisión HVDC-VSC**

**Transmisión HVDC basada en conexión VSC**

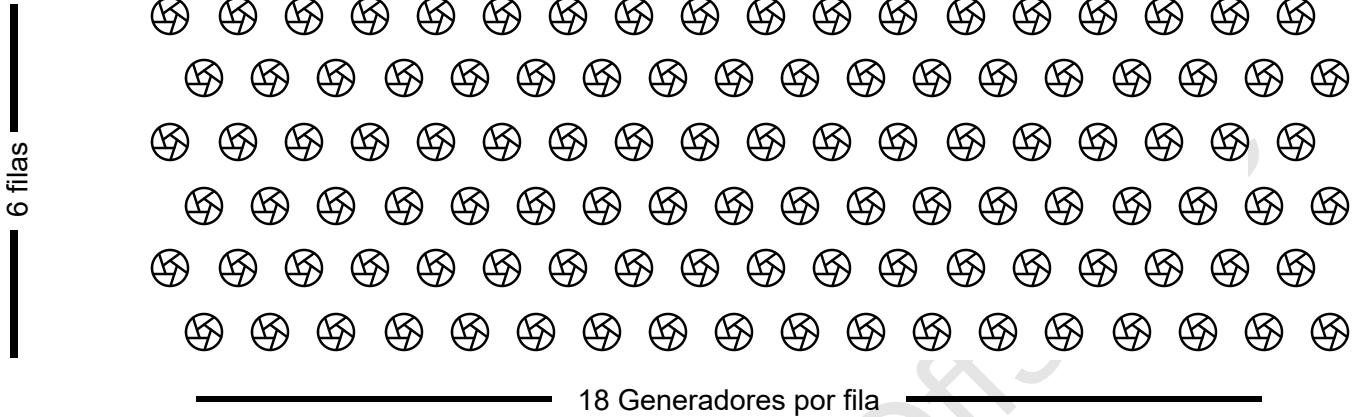




Substation

Parque Eólico Offshore

# Distribución Gráfica de Aerogeneradores



Parque Eólico Offshore



Universidad del  
**Rosario**

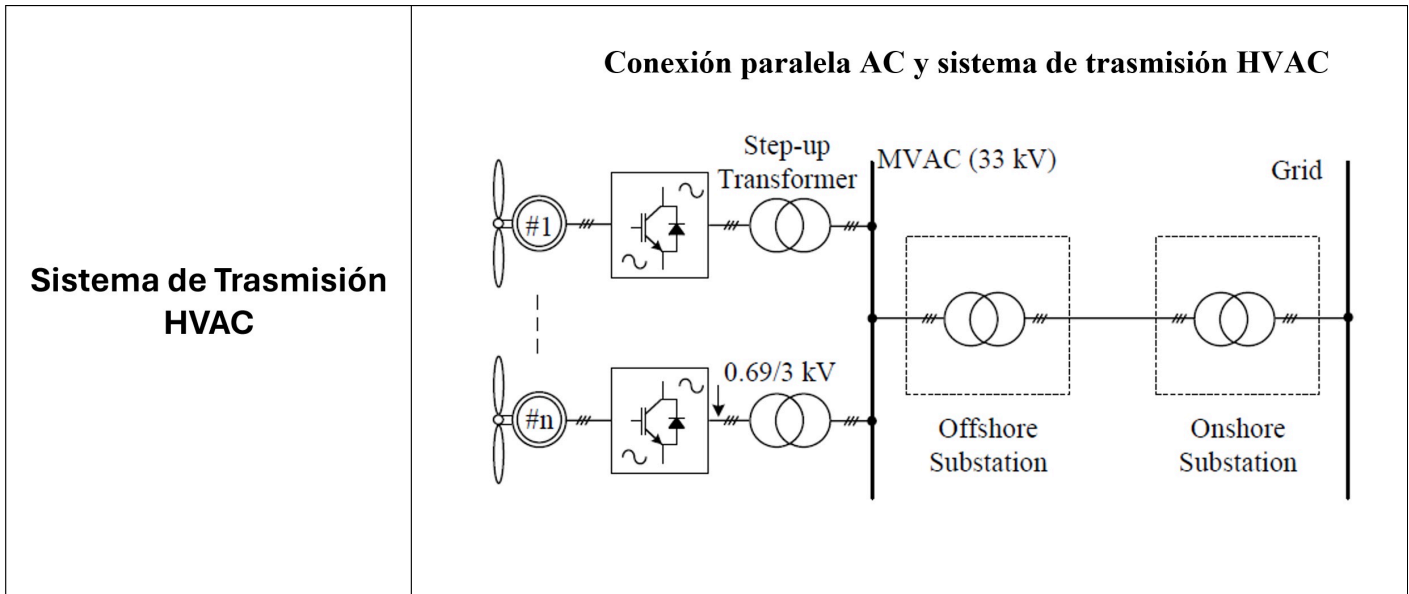
*Autor: Bernardo Diego Acevedo Rojas  
Maestría Energías Renovables  
Escuela de Ingeniería, Ciencia y Tecnología  
Universidad del Rosario  
Bogotá - Colombia  
Derechos de autor 2024 Bernardo Acevedo*

**Proyecto: Vientos Alisios S.A.S.****ID: 7405**

<b>Atributo</b>	<b>Valor</b>
Potencia del parque (MW)	200.0
Distancia más cercana a la costa (Km)	10.0
Profundidad lámina de agua (m)	40.0
Potencia del aerogenerador (MW)	8.0
Diámetro del Aerogenerador	164.0 m
Marca Aerogenerador	VESTAS V164-8.0 MW

**Resultados**

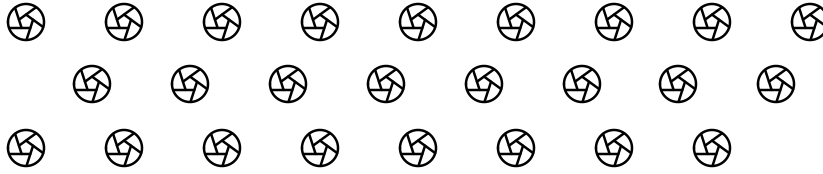
<b>Atributo</b>	<b>Valor</b>
Fecha y Hora (UTC)	30/05/2024 21:11
Sistema de Transmisión	HVAC
Distancia a la Costa	10.0 km
Tipo de Cimentación	Tripode o Jacket
Profundidad del Agua	40.0 m
Cantidad de Generadores	25
Área del Parque	17.64 km <sup>2</sup>
Cable de interconexión	26/35KV 3x500por cada 5 aerogeneradores
Cable de interconexión	66KV 3x300por cada 7 aerogeneradores
Cable de interconexión	66KV 3x500por cada 10 aerogeneradores
Cable de Exportación HVAC	300KV 3x300 mm <sup>2</sup>



Parque Eólico Offshore

# Distribución Gráfica de Aerogeneradores

■ 3 filas



9 Generadores por fila



Universidad del  
**Rosario**

*Autor: Bernardo Diego Acevedo Rojas*  
*Maestría Energías Renovables*  
*Escuela de Ingeniería, Ciencia y Tecnología*  
*Universidad del Rosario*  
*Bogotá - Colombia*  
*Derechos de autor 2024 Bernardo Acevedo*

### **7.13 Código Python**

Formulario:

```
<!DOCTYPE html>
<html lang="es">
<head>
  <link rel="stylesheet" href="../../static/css/normalize.css">
  <link rel="stylesheet" href="../../static/css/styles.css">
  <link rel="preconnect" href="https://fonts.googleapis.com">
  <link rel="preconnect" href="https://fonts.gstatic.com" crossorigin>
  <link
href="https://fonts.googleapis.com/css2?family=Montserrat:wght@300;400;700;900&disp
lay=swap" rel="stylesheet">
  <meta charset="UTF-8">
  <meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1.0">
  <title>Generador de Parque Eólico</title>

</head>
<body>
<div class="contSectPrin">

<div class="contentLogging">
  <h1 class="logging">Parque eólico Offshore</h1>
</div>

<div class="contentImgFond">
  
</div>

<div class="contentImgFond-secundario">
  
</div>

  <section id="introduccion">
    <button id="btnIniciar">Iniciar nuevo cálculo</button>
  </section>

<section id="seccionPrincipal">
  <form class="formPrueba" id="datosForm" action="/guardar_resultado/"
method="POST" onsubmit="return validateForm()">
    <label class="labeFormPrueba" for="nombreProyecto">Nombre del
Proyecto</label>
    <input class="inputFormPrueba" type="text" id="nombreProyecto"
name="nombreProyecto" required><br>
    <span id="nombreProyectoError" class="error-message"></span>

    <label class="labeFormPrueba" for="potenciaParque">Potencia del parque
(MW)</label>
    <input class="inputFormPrueba" type="number" id="potenciaParque"
name="potenciaParque" min="0" required><br>
    <span id="potenciaParqueError" class="error-message"></span>
</form>
</section>
</body>
</html>
```

```

        <label class="labeFormPrueba" for="distanciaCosta">Distancia más cercana a
la costa (Km)</label>
        <input class="inputFormPrueba" type="number" id="distanciaCosta"
name="distanciaCosta" min="0" required><br>
        <span id="distanciaCostaError" class="error-message"></span>

        <label class="labeFormPrueba" for="profundidadAgua">Profundidad lámina de
agua (m)</label>
        <input class="inputFormPrueba" type="number" id="profundidadAgua"
name="profundidadAgua" min="0" required onchange="showOptions()">
        <span id="profundidadAguaError" class="error-message"></span><br>

        <input class="inputFormPrueba" type="hidden" id="diametroGenerador"
name="diametroGenerador">
        <input class="inputFormPrueba" type="hidden" id="potenciaGenerador"
name="potenciaGenerador" readonly required><br>
        <div id="options" class="options">
            <label class="labeFormPrueba" for="aerogenerador">Seleccione tipo de
aerogenerador</label><br>
            <select class="selecFormPrueba" id="aerogenerador" name="aerogenerador"
onchange="updatePower()" required>
                <option value="" disabled selected>Seleccione...</option>
                <!-- Las opciones de aerogenerador se llenarán dinámicamente aquí
-->
            </select><br>
            <span id="aerogeneradorError" class="error-message"></span>
        </div>
        <button class="btnFormPrueba" type="submit">CALCULAR</button>
    </form>
</section>
</div>

<script>

const btnIniciar = document.getElementById('btnIniciar');
const introduccion = document.getElementById('introduccion');
const seccionPrincipal = document.getElementById('seccionPrincipal');

// Agregar evento de clic al botón
btnIniciar.addEventListener('click', () => {
    introduccion.style.display = 'none';
    seccionPrincipal.style.display = 'block';
});

function showOptions() {
    var profundidad = document.getElementById("profundidadAgua").value;
    var optionsDiv = document.getElementById("options");
    var aerogeneradorSelect = document.getElementById("aerogenerador");
    if (profundidad < 15) {

```

```

optionsDiv.style.display = "block";
aerogeneradorSelect.innerHTML = `
    <option value="V80">VESTAS V80-2.0 MW, 2 MW y diámetro 80 m</option>
    <option value="V90">VESTAS V90-3.0 MW, 3 MW y diámetro 90 m</option>
`;
} else if (profundidad >= 15 && profundidad <= 29) {
optionsDiv.style.display = "block";
aerogeneradorSelect.innerHTML = `
    <option value="V117">VESTAS V117-4.2 MW, 4,2 MW y diámetro 117
m</option>
`;
} else if (profundidad > 29) {
optionsDiv.style.display = "block";
aerogeneradorSelect.innerHTML = `
    <option value="V164">VESTAS V164-8.0 MW, 8 MW y diámetro 164 m</option>
    <option value="SG167">SIEMENS GAMESA SG 8.0-167 DD, 8 MW y diámetro 167
m</option>
    <option value="V164_10">VESTAS V164-10.0 MW, 10 MW y diámetro 164
m</option>
    <option value="SG200">SIEMENS GAMESA SG 11.0-200 DD, 11 MW y diámetro
200 m</option>
    <option value="SG222">SIEMENS GAMESA SG 14.0-222 DD, 14 MW y diámetro
222 m</option>
    <option value="SG236">SIEMENS GAMESA SG 14.0-236 DD, 14 MW y diámetro
236 m</option>
    <option value="V236">VESTAS V236-15.0 MW, 15 MW y diámetro 236
m</option>
`;
} else {
optionsDiv.style.display = "none";
}

// Llama a la función updatePower() después de actualizar el contenido del
selector
updatePower();
}

function updatePower() {
var aerogeneradorSelect = document.getElementById("aerogenerador");
var selectedOption =
aerogeneradorSelect.options[aerogeneradorSelect.selectedIndex];
if (selectedOption) {
var selectedPower = selectedOption.text.match(/(\d+(?:\.\d+)?) MW/)[1];
var selectedDiameter = selectedOption.text.match(/(\d+) m/)[1];
document.getElementById("potenciaGenerador").value = selectedPower;
document.getElementById("potenciaGenerador").readOnly = true; // Establece
el campo como de solo lectura
document.getElementById("diametroGenerador").value = selectedDiameter;
}
}

```

```

function validateForm() {
    var isValid = true;

    var nombreProyecto = document.getElementById("nombreProyecto").value;
    var potenciaParque = document.getElementById("potenciaParque").value;
    var distanciaCosta = document.getElementById("distanciaCosta").value;
    var profundidadAgua = document.getElementById("profundidadAgua").value;
    var aerogenerador = document.getElementById("aerogenerador").value;

    if (nombreProyecto === "") {
        document.getElementById("nombreProyectoError").innerText = "Este campo es obligatorio";
        isValid = false;
    } else {
        document.getElementById("nombreProyectoError").innerText = "";
    }

    if (potenciaParque === "") {
        document.getElementById("potenciaParqueError").innerText = "Este campo es obligatorio";
        isValid = false;
    } else {
        document.getElementById("potenciaParqueError").innerText = "";
    }

    if (distanciaCosta === "") {
        document.getElementById("distanciaCostaError").innerText = "Este campo es obligatorio";
        isValid = false;
    } else {
        document.getElementById("distanciaCostaError").innerText = "";
    }

    if (profundidadAgua === "") {
        document.getElementById("profundidadAguaError").innerText = "Este campo es obligatorio";
        isValid = false;
    } else {
        document.getElementById("profundidadAguaError").innerText = "";
    }

    if (aerogenerador === "") {
        document.getElementById("aerogeneradorError").innerText = "Seleccione un aerogenerador";
        isValid = false;
    } else {
        document.getElementById("aerogeneradorError").innerText = "";
    }
}

```

```
    return isValid;
}

</script>
</body>
</html>
```

## Backend

```
import math
from flask import Flask, render_template, request, jsonify, redirect, url_for
import json
import random
from datetime import datetime
from reportlab.lib.pagesizes import letter
from reportlab.pdfgen import canvas

app = Flask(__name__)

# Funciones originales de cálculo de parques eólicos y almacenamiento de datos

def generar_pdf(registro):
    # Crear un nuevo PDF
    c = canvas.Canvas("informe_registro.pdf", pagesize=letter)

    # Definir los datos del registro que se presentarán en el PDF
    datos = [
        f"ID: {registro['id']}",
        f"Fecha y Hora (UTC): {registro['fecha_hora']}",
        f"Nombre del Proyecto: {registro['nombreProyecto']}",
        f"Sistema de Transmisión: {registro['tipoTransmision']}",
        f"Distancia a la Costa: {registro['distanciaCosta']} km",
        f"Tipo de Cimentación: {registro['tipoCimentacion']}",
        f"Profundidad del Agua: {registro['profundidadAgua']} m",
        f"Cantidad de Generadores: {registro['cantidadGeneradores']}",
        f"Área del Parque: {registro['areaParque']} km2",
        f"Cable de Exportacion AC: {registro['cableExportacion']}",
        f"Cable de Exportacion DC: {registro['cableExportacionDC']}",
    ]

    # Establecer la posición inicial para escribir en el PDF
    y = 750

    # Escribir los datos en el PDF
    for dato in datos:
        c.drawString(100, y, dato)
        y -= 20

    # Guardar el PDF generado
```

```

c.save()

def obtener_generadores_fila(numero_objetos):
    lado_x = math.ceil(math.sqrt(numero_objetos / 3))
    lado_y = math.ceil(numero_objetos / lado_x)
    return lado_x, lado_y

def marca_aerogenerador(potencia_generador, diametro_generador):
    if potencia_generador == 2.0 and diametro_generador == 80.0:
        return "VESTAS V80-2.0 MW"
    elif potencia_generador == 2.0 and diametro_generador == 90.0:
        return "VESTAS V90-3.0 MW"
    elif potencia_generador == 4.2 and diametro_generador == 117.0:
        return "VESTAS V117-4.2 MW"
    elif potencia_generador == 8.0 and diametro_generador == 164.0:
        return "VESTAS V164-8.0 MW"
    elif potencia_generador == 8.0 and diametro_generador == 167.0:
        return "SIEMENS GAMESA SG 8.0-167 DD"
    elif potencia_generador == 10.0 and diametro_generador == 164.0:
        return "VESTAS V164-10.0 MW"
    elif potencia_generador == 11.0 and diametro_generador == 200.0:
        return "SIEMENS GAMESA SG 11.0-200 DD"
    elif potencia_generador == 14.0 and diametro_generador == 222.0:
        return "SIEMENS GAMESA SG 14.0-222 DD"
    elif potencia_generador == 14.0 and diametro_generador == 236.0:
        return "SIEMENS GAMESA SG 14.0-236 DD"
    elif potencia_generador == 15.0 and diametro_generador == 236.0:
        return "VESTAS V236-15.0 MW"
    else:
        return "No definido"

def calcular_cantidad_generadores(potencia_parque, potencia_generador):
    return math.ceil(potencia_parque / potencia_generador)

def calcular_area_parque(cantidad_generadores, diametro_generador):
    distancia_fila = 4 * diametro_generador
    distancia_entre_filas = 8 * diametro_generador
    lado_x, lado_y = obtener_generadores_fila(cantidad_generadores) # Obtener las
    dimensiones del rectángulo
    area_parque = ((lado_y * diametro_generador) + ((lado_y - 1) * distancia_fila))
    * ((lado_x - 1) * distancia_entre_filas)
    return round(area_parque / (1000 * 1000), 2) # Dar el resultado en kilometros
    cuadrados y redondear a 2 el numero maximo de decimales

def determinar_tipo_cimentacion(profundidad_agua):
    if profundidad_agua < 25:
        return 'Gravedad'
    elif 25 <= profundidad_agua < 30:

```

```

        return 'Monopilote'
    elif 30 <= profundidad_agua < 40:
        return 'Tripilote'
    elif 40 <= profundidad_agua <= 80:
        return 'Tripode o Jacket'
    else:
        return 'Mástil, pierna tensora o semisumergible'

```

```

def determinar_tipo_transmision(distancia_costa, potencia_parque):
    if distancia_costa <= 99:
        if potencia_parque <= 400:
            return 'HVAC'
        elif 400 < potencia_parque <= 900:
            return 'HVDC-VSC o HVAC'
        elif 600 <= potencia_parque <= 1000:
            return 'HVDC-LCC o HVAC'
    else:
        if potencia_parque <= 900:
            return 'HVDC'
        elif 600 <= potencia_parque <= 2000:
            return 'HVDC'
    return 'HVAC o HVDC'

```

```

def obtener_ultimo_id(existing_data):
    if existing_data:
        used_ids = [int(id) for id in existing_data.keys()]
        available_ids = [id for id in range(10000) if id not in used_ids]
        if available_ids:
            return random.choice(available_ids)
        else:
            return max(used_ids) + 1
    else:
        return random.randint(0, 9999)

```

# Nuevas funciones para organizar objetos

```

def organizar_objetos(numero_objetos):
    imagen_presente = 'X' # Representa la presencia de la imagen
    lado_x_1 = math.ceil(math.sqrt(numero_objetos / 3))
    lado_y_1 = math.ceil(numero_objetos / lado_x_1)
    objetos_opcion_1 = lado_x_1 * lado_y_1
    rectangulo_1 = [[' ' for _ in range(lado_x_1)] for _ in range(lado_y_1)]
    for i in range(numero_objetos):
        row = i // lado_x_1
        col = i % lado_x_1
        rectangulo_1[row][col] = imagen_presente

    return {

```

```

    "opcion_1": {
        "lado_x": lado_x_1,
        "lado_y": lado_y_1,
        "numero_ajustado": min(numero_objetos, objetos_opcion_1),
        "rectangulo": rectangulo_1
    }
}

```

```

def calcular_datos(data):
    potencia_parque = data['potenciaParque']

    potencia_generador = data['potenciaGenerador']
    cantidad_generadores = math.ceil(potencia_parque / potencia_generador)

    return {
        "cantidadGeneradores": cantidad_generadores,
    }

```

```

#Calcular cables de interconexion y cable de exportacion
def calcular_cables_interconexion(potencia_aerogenerador, numero_generadores):
    if potencia_aerogenerador == 2:
        if numero_generadores == 5:
            return "26/35KV 3x70"
    elif potencia_aerogenerador == 3:
        if numero_generadores == 5:
            return "26/35KV 3x95"
        elif numero_generadores == 10:
            return "66KV 3x95"
    elif potencia_aerogenerador == 4.2:
        if numero_generadores == 5:
            return "26/35KV 3x150"
        elif numero_generadores == 10:
            return "66KV 3x150"
    elif potencia_aerogenerador == 8:
        if numero_generadores == 5:
            return "26/35KV 3x500"
        elif numero_generadores == 7:
            return "66KV 3x300"
        elif numero_generadores == 10:
            return "66KV 3x500"
    elif potencia_aerogenerador == 10:
        if numero_generadores == 4:
            return "26/35KV 3x500"
        elif numero_generadores == 7:
            return "66KV 3x500"
    elif potencia_aerogenerador == 11:
        if numero_generadores == 7:
            return "66KV 3x630"
    elif potencia_aerogenerador == 14:
        if numero_generadores == 6:

```

```

        return "66KV 3x800"
    elif potencia_aerogenerador == 15:
        if numero_generadores == 6:
            return "66KV 3x1000"

    return "No definido"

```

```

def calcular_cable_exportacionAC(potencia_parque, tipo_transmision,
distancia_costa):
    if distancia_costa <= 99 and tipo_transmision in ['HVAC', 'HVAC o HVDC']:
        if 200 <= potencia_parque <= 275:
            return "300KV 3x300 mm2"
        elif 275 < potencia_parque <= 300:
            return "300KV 3x400 mm2"
        elif 300 < potencia_parque <= 340:
            return "300KV 3x500 mm2"
        elif 340 < potencia_parque <= 370:
            return "300KV 3x630 mm2"
        elif 370 < potencia_parque <= 400:
            return "300KV 3x800 mm2"
        elif 400 < potencia_parque <= 430:
            return "300KV 3x1000 mm2"
        elif 430 < potencia_parque <= 600:
            return "2 cables de 300KV 3x400 mm2"
        elif 600 < potencia_parque <= 800:
            return "2 cables de 300KV 3x800 mm2"
        elif 800 < potencia_parque <= 1000:
            return "3 cables de 300KV 3x500 mm2"
        elif 1000 < potencia_parque <= 1200:
            return "3 cables de 300KV 3x800 mm2"
        elif 1200 < potencia_parque <= 1400:
            return "4 cables de 300KV 3x630 mm2"
        elif 1400 < potencia_parque <= 1600:
            return "4 cables de 300KV 3x800 mm2"
        else:
            return "No definido"
    else:
        return "Es necesario que use cable DC"

```

```

def calcular_cable_exportacionDC(potencia_parque):
    if 150 <= potencia_parque <= 225:
        return "1 cable DC 200 KV de 240 mm2"
    elif 225 < potencia_parque <= 250:
        return "1 cable DC 200 KV de 300 mm2"
    elif 250 < potencia_parque <= 295:
        return "1 cable DC 200 KV de 400 mm2"
    elif 295 < potencia_parque <= 330:
        return "1 cable DC 200 KV de 500 mm2"

```

```

elif 330 < potencia_parque <= 390:
    return "1 cable DC 200 KV de 630 mm2"
elif 390 < potencia_parque <= 440:
    return "1 cable DC 200 KV de 800 mm2"
elif 440 < potencia_parque <= 510:
    return "1 cable DC 200 KV de 1000 mm2"
elif 510 < potencia_parque <= 555:
    return "1 cable DC 200 KV de 1200 mm2"
elif 555 < potencia_parque <= 600:
    return "1 cable DC 200 KV de 1400 mm2"
elif 600 < potencia_parque <= 645:
    return "1 cable DC 200 KV de 1600 mm2"
elif 645 < potencia_parque <= 770:
    return "1 cable DC 420 KV de 630 mm2"
elif 770 < potencia_parque <= 850:
    return "1 cable DC 420 KV de 800 mm2"
elif 850 < potencia_parque <= 940:
    return "1 cable DC 420 KV de 1000 mm2"
elif 940 < potencia_parque <= 1054:
    return "1 cable DC 420 KV de 1200 mm2"
elif 1054 < potencia_parque <= 1164:
    return "1 cable DC 420 KV de 1400 mm2"
elif 1164 < potencia_parque <= 1236:
    return "1 cable DC 420 KV de 1600 mm2"
elif 1236 < potencia_parque <= 1418:
    return "1 cable DC 420 KV de 2000 mm2"
elif 1418 < potencia_parque <= 1513:
    return "1 cable DC 420 KV de 2200 mm2"
elif 1513 < potencia_parque <= 1636:
    return "1 cable DC 420 KV de 2500 mm2"
else:
    return "No definido"

```

```

@app.route('/guardar_resultado/', methods=['POST'])
def guardar_resultado():
    try:
        # Obtener los datos del formulario
        nombre_proyecto = request.form['nombreProyecto']
        potencia_parque = float(request.form['potenciaParque'])
        distancia_costa = float(request.form['distanciaCosta'])
        profundidad_agua = float(request.form['profundidadAgua'])
        potencia_generador = float(request.form['potenciaGenerador'])

        diametro_generador = float(request.form['diametroGenerador'])
        cantidad_generadores = calcular_cantidad_generadores(potencia_parque,
potencia_generador)
        area_parque = calcular_area_parque(cantidad_generadores,
diametro_generador)
        tipo_cimentacion = determinar_tipo_cimentacion(profundidad_agua)

```

```

    tipo_transmision = determinar_tipo_transmision(distancia_costa,
potencia_parque)
    cable_exportacionAC = calcular_cable_exportacionAC(potencia_parque,
tipo_transmision, distancia_costa)
    cable_exportacionDC = calcular_cable_exportacionDC(potencia_parque)
    marca_aero = marca_aerogenerador(potencia_generador, diametro_generador)

# Calcular cables de interconexión
cable_interconexion4 = calcular_cables_interconexion(potencia_generador, 4)
cable_interconexion5 = calcular_cables_interconexion(potencia_generador, 5)
cable_interconexion6 = calcular_cables_interconexion(potencia_generador, 6)
cable_interconexion7 = calcular_cables_interconexion(potencia_generador, 7)
cable_interconexion10 = calcular_cables_interconexion(potencia_generador,
10)

```

```

# Generar el nuevo ID para el proyecto
with open('data.json', 'r+') as json_file:
    existing_data = json.load(json_file)
    nuevo_id = obtener_ultimo_id(existing_data)
    data = {
        "id": nuevo_id,
        "fecha_hora": datetime.now().strftime("%Y-%m-%d %H:%M:%S"),
        "nombreProyecto": nombre_proyecto,
        "potenciaParque": potencia_parque,
        "distanciaCosta": distancia_costa,
        "profundidadAgua": profundidad_agua,
        "potenciaGenerador": potencia_generador,
        "marcaAerogenerador": marca_aero,
        "diametroGenerador": diametro_generador,
        "cantidadGeneradores": cantidad_generadores,
        "areaParque": area_parque,
        "tipoCimentacion": tipo_cimentacion,
        "tipoTransmision": tipo_transmision,
        "cableInterconexion4": cable_interconexion4,
        "cableInterconexion5": cable_interconexion5,
        "cableInterconexion6": cable_interconexion6,
        "cableInterconexion7": cable_interconexion7,
        "cableInterconexion10": cable_interconexion10,
        "cableExportacion": cable_exportacionAC,
        "cableExportacionDC": cable_exportacionDC,
    }

    existing_data[str(nuevo_id)] = data
    json_file.seek(0)
    json.dump(existing_data, json_file, indent=4)

    return redirect(url_for('mostrar_registro', id=data["id"]))
except Exception as e:
    return jsonify({'error': str(e)}), 500

```

```

@app.route('/single_item/')
def mostrar_lista_registros():
    try:
        with open('data.json', 'r') as json_file:
            registros = json.load(json_file)
            return render_template('single_item.html', registros=registros)
    except Exception as e:
        return jsonify({'error': str(e)}), 500

@app.route('/mostrar_registro/<int:id>/', methods=['GET'])
def mostrar_registro(id):
    try:
        with open('data.json', 'r') as json_file:
            data = json.load(json_file)
            registro = data.get(str(id))
            if registro:
                data_calculados = calcular_datos(registro)
                registro.update(data_calculados)
                diametro_aerogenerador = request.args.get('diametroAerogenerador')
                # Obtener el diámetro del aerogenerador desde la solicitud
                registro['diametroAerogenerador'] = diametro_aerogenerador #
                # Agregar el diámetro del aerogenerador al registro
                return render_template('mostrar_registro.html', registro=registro)
            else:
                return jsonify({'error': 'No se encontró ningún registro con el ID
especificado'}), 404
    except (FileNotFoundError, ValueError) as e:
        return jsonify({'error': str(e)}), 500
    except Exception as e:
        return jsonify({'error': str(e)}), 500

# Ruta para mostrar pagina de calculo principañ
@app.route('/')
def index():
    return render_template('prueba1.html')

# Nueva ruta para renderizar 'input_generadores.html'
@app.route('/input_generadores/')
def input_generadores():
    return render_template('input_generadores.html')

@app.route('/resultado', methods=['POST'])
def resultado():
    numero_objetos = int(request.form['numero_objetos'])
    resultados = organizar_objetos(numero_objetos)
    return render_template('resultado.html', resultados=resultados)

```

```

@app.route('/prueba1/')
def pagina_prueba():
    return render_template('prueba1.html')

@app.route('/single_item.html')
def mostrar_registros_antiguos():
    return redirect(url_for('mostrar_lista_registros'))

if __name__ == '__main__':
    app.run(debug=True, host='0.0.0.0', port=8000)

```

Resultados:

```

<!DOCTYPE html>
<html lang="es">
<head>
    <link rel="stylesheet" href="{{ url_for('static', filename='css/normalize.css')
}}">
    <link rel="stylesheet" href="{{ url_for('static', filename='css/styles.css')
}}">
    <link rel="preconnect" href="https://fonts.googleapis.com">
    <link rel="preconnect" href="https://fonts.gstatic.com" crossorigin>
    <link
href="https://fonts.googleapis.com/css2?family=Montserrat:wght@300;400;700;900&disp
lay=swap" rel="stylesheet">
    <meta charset="UTF-8">
    <meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1.0">
    <title>Datos del Registro</title>

</head>
<div class="containerDatosRegis">

<body class="bodMostrarRegis">

    <!-- Sección de Datos de Entrada -->
<div class="contentDatosRegi">

    <h2>Datos de Entrada</h2>
    <ul class="listaDatosRegis">
        <li class="conteneInfRegis">Potencia del parque (MW) </li> <div
class="conteneInfRegis">{{ registro.potenciaParque }}</div>
        <li class="conteneInfRegis">Distancia más cercana a la costa(Km)</li> <div
class="conteneInfRegis"> {{ registro.distanciaCosta }} </div>
        <li class="conteneInfRegis">Profundidad lámina de agua (m) </li> <div
class="conteneInfRegis"> {{ registro.profundidadAgua }} </div>
        <li class="conteneInfRegis">Potencia del aerogenerador (MW) </li> <div
class="conteneInfRegis"> {{ registro.potenciaGenerador }} </div>
        <li class="conteneInfRegis">Diámetro del Aerogenerador </li> <div
class="conteneInfRegis"> {{ registro.diámetroGenerador }}<a>m</a> </div>
        <li class="conteneInfRegis">Marca Aerogenerador </li> <div

```

```

class="conteneInfRegis"> {{ registro.marcaAerogenerador }} </div>
</ul>

<!-- Sección de Otros Datos -->
<h2>Resultados</h2>
<div class="listaDatosRegis">
  <li class="conteneInfRegis">ID </li> <div class="conteneInfRegis"> {{
registro.id }} </div>
  <li class="conteneInfRegis">Fecha y Hora (UTC) </li> <div
class="conteneInfRegis"> {{ registro.fecha_hora }} </div>
  <li class="conteneInfRegis">Nombre del Proyecto </li> <div
class="conteneInfRegis"> {{ registro.nombreProyecto }} </div>
</div>
<ul class="listaDatosRegis">
  <li class="conteneInfRegis">Sistema de Transmisión </li> <div
class="conteneInfRegis"> {{ registro.tipoTransmision }} </div>
  <li class="conteneInfRegis">Distancia a la Costa </li> <div
class="conteneInfRegis"> {{ registro.distanciaCosta }}<a>km</a> </div>
  <li class="conteneInfRegis">Tipo de Cimentación </li> <div
class="conteneInfRegis"> {{ registro.tipoCimentacion }} </div>
  <li class="conteneInfRegis">Profundidad del Agua </li> <div
class="conteneInfRegis"> {{ registro.profundidadAgua }}<a> m</a> </div>
  <li class="conteneInfRegis">Cantidad de Generadores </li>
  <div class="conteneInfRegis"> <form action="/resultado" method="post"
target="_blank">
  <button class="btnDistribucion" type="submit" onclick="submitForm()"
id="numero_objetos" name="numero_objetos" title="Distribución sugerida">{{
registro.cantidadGeneradores }}</button></form> </div>
  <li class="conteneInfRegis">Área del Parque </li> <div
class="conteneInfRegis"> {{ registro.areaParque }} <a> km²</a></div>

  {% if registro.cableInterconexion4 != 'No definido' %}
  <li class="conteneInfRegis">Cable de interconexión</li><div
class="conteneInfRegis">{{ registro.cableInterconexion4 }} <p style="margin: 0;
padding-left: 5px;"> por cada 4 aerogeneradores</p></div>{% endif %}

  {% if registro.cableInterconexion5 != 'No definido' %}
  <li class="conteneInfRegis">Cable de interconexión</li><div
class="conteneInfRegis">{{ registro.cableInterconexion5 }} <p style="margin: 0;
padding-left: 5px;"> por cada 5 aerogeneradores</p></div>{% endif %}

  {% if registro.cableInterconexion6 != 'No definido' %}
  <li class="conteneInfRegis">Cable de interconexión</li><div
class="conteneInfRegis">{{ registro.cableInterconexion6 }} <p style="margin: 0;
padding-left: 5px;"> por cada 6 aerogeneradores</p></div>{% endif %}

  {% if registro.cableInterconexion7 != 'No definido' %}
  <li class="conteneInfRegis">Cable de interconexión</li><div
class="conteneInfRegis">{{ registro.cableInterconexion7 }} <p style="margin: 0;
padding-left: 5px;"> por cada 7 aerogeneradores</p></div>{% endif %}

```

```

        {% if registro.cableInterconexion10 != 'No definido' %}
        <li class="conteneInfRegis">Cable de interconexión</li><div
class="conteneInfRegis">{{ registro.cableInterconexion10 }} <p style="margin: 0;
padding-left: 5px;"> por cada 10 aerogeneradores</p></div>{% endif %}

        {% if registro.cableExportacion != 'Es necesario que use cable DC' %}
        <li class="conteneInfRegis">Cable de Exportacion AC</li> <div
class="conteneInfRegis"> {{ registro.cableExportacion }}</div>{% endif %}
        <li class="conteneInfRegis">Cable de Exportacion DC</li> <div
class="conteneInfRegis"> {{ registro.cableExportacionDC }}</div>
    </ul>

    <!-- Sección de Imagen de Transmisión -->
    <h2>Esquema de Transmisión</h2>
    <div id="imagenTransmision">
        {% if registro.tipoTransmision == 'HVAC' %}
            
        {% elif registro.tipoTransmision == 'HVDC' %}
            
        {% elif registro.tipoTransmision == 'HVAC o HVDC' %}
            
        {% endif %}
    </div>
    <div id="imagenTransmision">
        {% if registro.tipoTransmision == 'HVAC o HVDC' %}
            
        {% endif %}
    </div>

    <div class="buttonsPruebaYRegis">
        <a class="buttonNavcalc" href="/prueba1/">Nuevo Cálculo</a><br>
        <a class="buttonNavcalc" href="/single_item.html" target="_blank">Registros
anteriores</a><br>

    </div>
</div>

<div class="contentTitle">
    
    
</div>

</div>

```

```

<script>
  function submitForm() {
    // Obtener el valor de cantidadGeneradores
    var cantidadGeneradores = "{{ registro.cantidadGeneradores }}";

    // Asignar el valor a la entrada
    document.getElementById('numero_objetos').value = cantidadGeneradores;

    // Enviar el formulario
    document.getElementById('myForm').submit();
  }
</script>
<form action="/descargar_pdf" method="POST">
  <button type="submit">Descargar PDF</button>
</form>
</body>
</html>

```

Vista grafica de generadores:

```

<!DOCTYPE html>
<html lang="es">
<head>
  <link rel="stylesheet" href="{{ url_for('static', filename='css/normalize.css')
  }}">
  <link rel="stylesheet" href="{{ url_for('static', filename='css/styles.css')
  }}">
  <link rel="preconnect" href="https://fonts.googleapis.com">
  <link rel="preconnect" href="https://fonts.gstatic.com" crossorigin>
  <link
href="https://fonts.googleapis.com/css2?family=Montserrat:wght@300;400;700;900&disp
lay=swap" rel="stylesheet">
  <meta charset="UTF-8">
  <meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1.0">
  <title>Resultado</title>
</head>
<body>
  <h1 class="titleResult">Distribución Gráfica de Generadores</h1>
  <!-- <p>Lado 1: {{ resultados.opcion_1.lado_x }} objetos</p>
  <p>Lado 2: {{ resultados.opcion_1.lado_y }} objetos</p> -->
  <div class="contenedor">
    <div class="lineLadodouno">
      <hr class="hrResultLadoUno">
      <p class="pInfResiluLadoDosLadoUno">{{ resultados.opcion_1.lado_x }}
filas</p>
      <hr class="hrResultLadoUno">
    </div>
    {% set rows = resultados.opcion_1.rectangulo %}

```

```

        {% for row in rows %}
            <div class="row">
                {% set cells = row %}
                {% set clases = ["par" if loop.index0 % 2 == 0 else "impar"] *
cells | length %}
                {% for i in range(cells|length) %}
                    {% set cell = cells[i] %}
                    {% set clase = clases[i] %}
                    <div class="cell1 {{ clase }}">
                        {% if cell == 'X' %}
                            
                        {% endif %}
                    </div>
                {% endfor %}
            </div>
        {% endfor %}
    </div>
    <div class="lineLadodos">
        <hr class="hrResult">
        <p class="pInfResiluLadoDos">{{ resultados.opcion_1.lado_y }} Generadores
por fila</p>
        <hr class="hrResult">
    </div>

    <div class="eliceResult">  </div>
    <div class="eliceResult-secundario">  </div>
    <div class="eliceResult-terceario">  </div>
</body>
</html>

```