



Universidad del
Rosario

Escuela de Ingeniería,
Ciencia y Tecnología

MAESTRÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES

**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**

AUTOR: BERNARDO ACEVEDO

DIRECTOR: DAVID CELEITA, PHD

Julio 18/24



CONTENIDO

- 01 Objetivo general y objetivos específicos
- 02 Problema
- 03 Metodología
- 04 Estado del arte
- 05 Parámetros y criterios
- 06 Modelo preconceptual
- 07 Caso global y caso en Colombia
- 08 Conclusiones



1. Objetivos

Objetivo general

Generar un **modelo preconceptual** que permita dimensionar los principales componentes de parques eólicos offshore y su aplicación a un caso práctico en Colombia, basado en estado de arte de los últimos 15 años.

Objetivos específicos:

1. Revisar fundamentos y configuraciones de transmisión CC/CA.
2. Comparar las diferentes configuraciones de transmisión CC/CA.
3. Establecer un modelo preconceptual que permita dimensionar:
 - Área del parque eólico
 - Tipo y distribución de aerogeneradores.
 - Tipo y cantidad de cables de interconexión y exportación.
 - Voltaje
 - Posibles configuraciones para las redes de transmisión.
4. Aplicar el modelo preconceptual a un caso real a nivel global y en un caso práctico en Colombia.



Fuente: [8]

2. Problema

¿Cuáles son los criterios pertinentes para generar un modelo preconceptual, que coadyuve al proceso de estructuración y predimensionamiento de cualquier proyecto eólico offshore con capacidad inferior a 1600 MW, y que puedan ser utilizados para la evaluación de un caso práctico en Colombia?

Fuente: [8]

3. Metodología

01

Estado del arte

- Revisión de literatura científica y técnica.
- Análisis cualitativo del estado del arte.
- Tendencias a nivel global.



02

Selección parámetros

- Principales componentes de los parques eólicos costa afuera.
- Parámetros y variables de ingeniería



03

Rangos y criterios

- Interacción.
- Configuraciones de transmisión CC/AC
- Cables de interconexión y exportación.
- Voltajes.



04

Aplicación en Python

- Dimensionamiento simplificado de parques eólicos costa afuera.
- Distribución de aerogeneradores.



05

Caso global

- Evaluación del modelo con base en parámetros reales del proyecto Atlantic Shores.



06

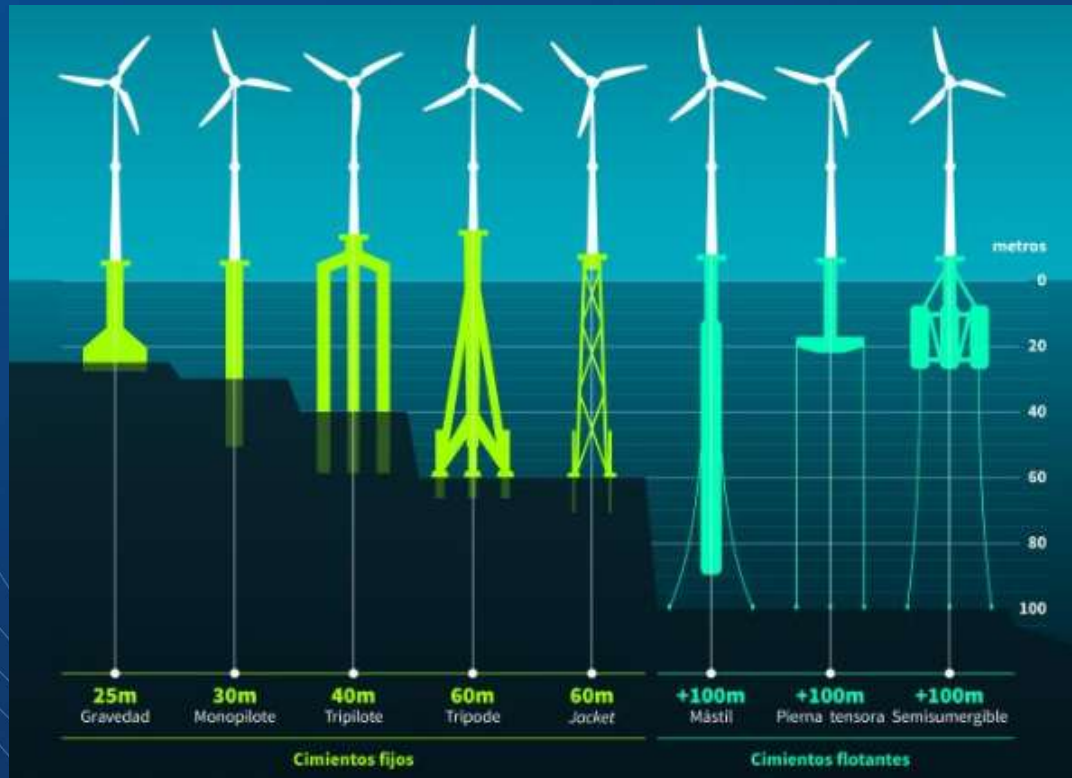
Caso práctico en Colombia

- Aplicación del modelo a un caso práctico en Colombia (Vientos Alisios).



4. Estado del arte

Tipos de cimentación



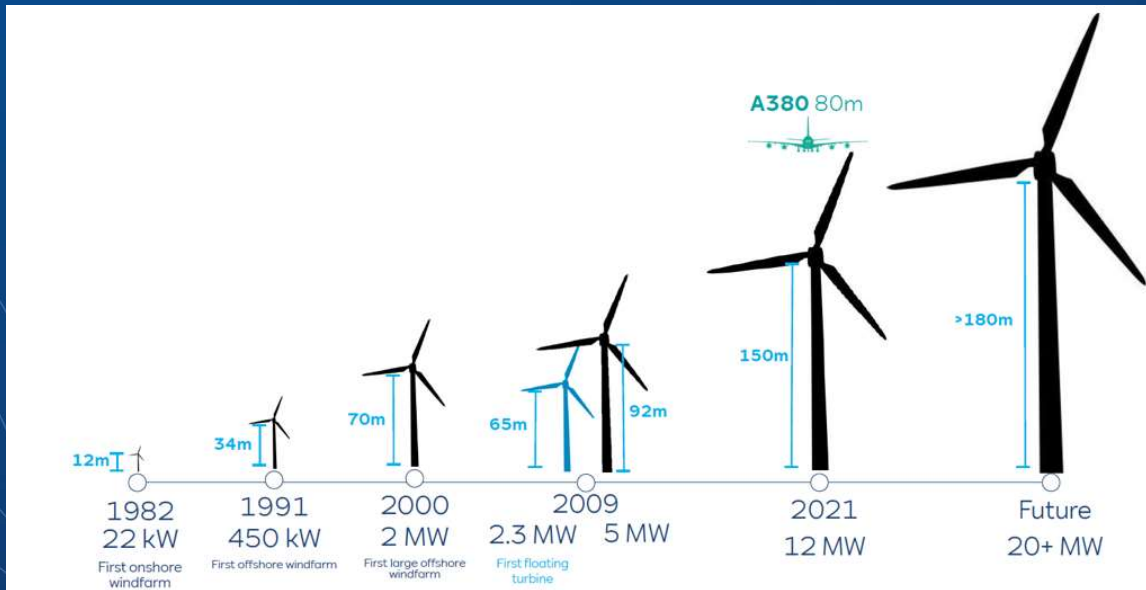
Cimientos parques eólicos offshore y límites de profundidad. [21]



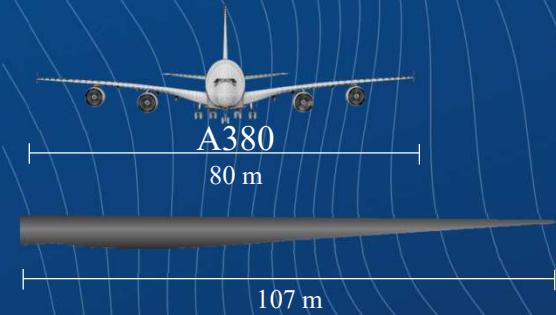
Fuente: [8]



Tendencia aerogeneradores

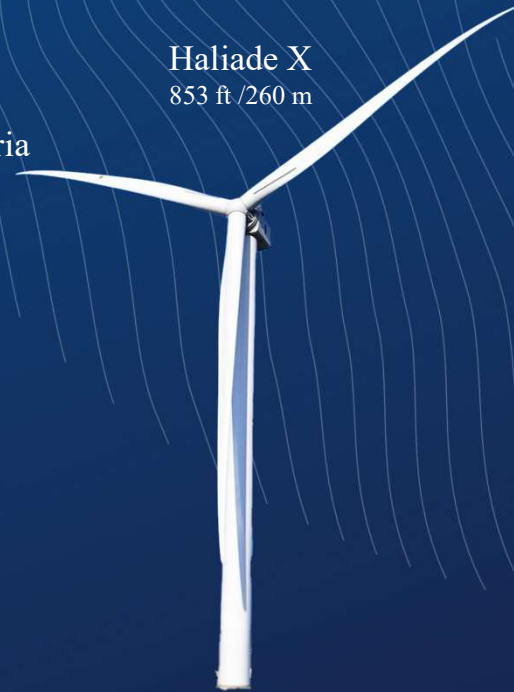


Evolución global de los aerogeneradores. [14]



Haliade X
 853 ft / 260 m

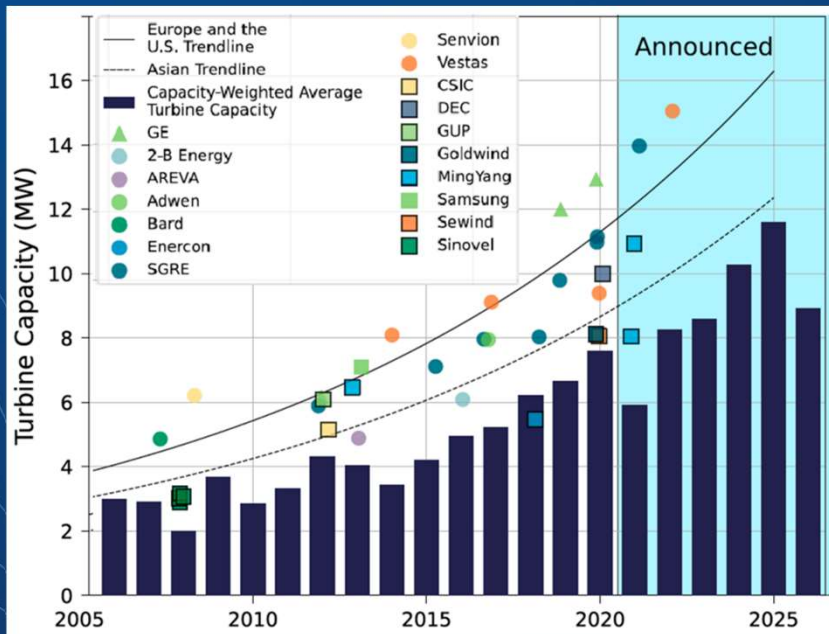
Torre Colpatria
 643 ft / 196 m



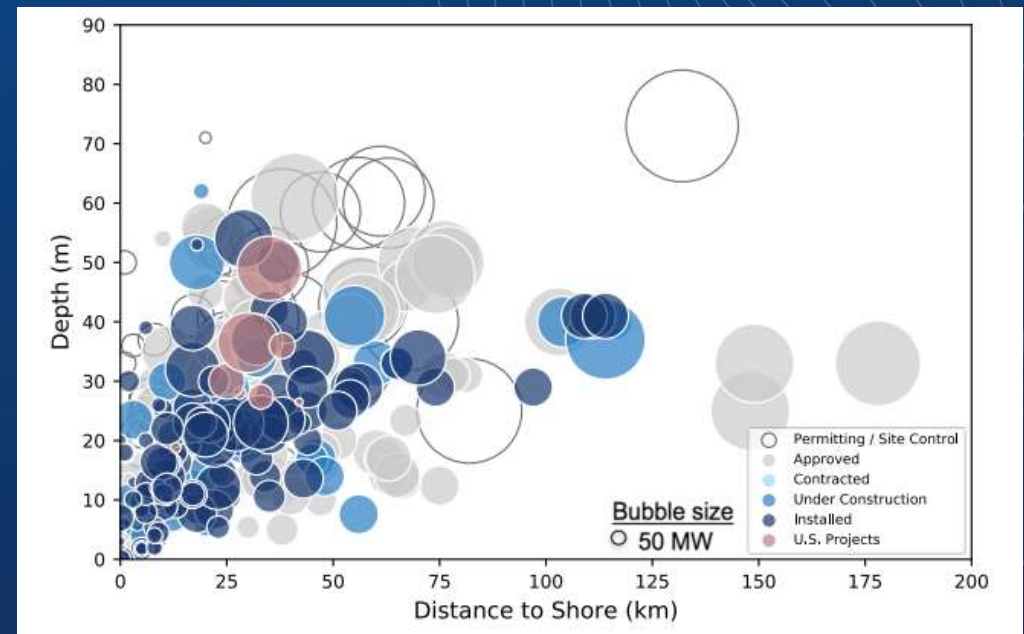


Tendencia aerogeneradores y capacidades

Parques eólicos offshore



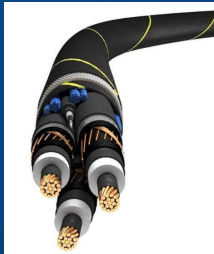
Capacidades instaladas y planificadas de turbinas marinas hasta 2025. [12]



Tendencias parámetros tecnología eólica marina de fondo fijo. [26]

Cables interconexión y exportación

XLPE

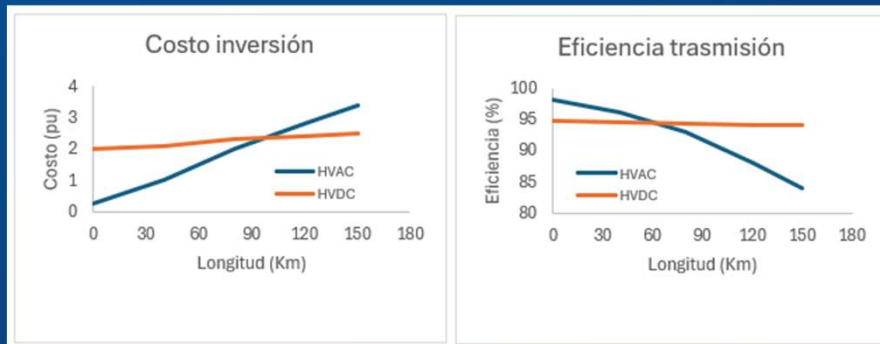


Parámetro	HVAC Interconexión	HVAC Exportación	HVDC
Rango diámetro externo	4.25"-6" (110 mm-160 mm)	10"-13" (250 mm-320 mm)	Aproximadamente 6" (150mm) El cable de retorno es más pequeño
Peso en el aire	13 lb/ft-34 lb/ft (20 kg/m-51 kg/m)	Hasta 85 lb/ft (125 kg/m)	Aprox. 40 lb/ft (60 kg/m)
Radio mínimo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

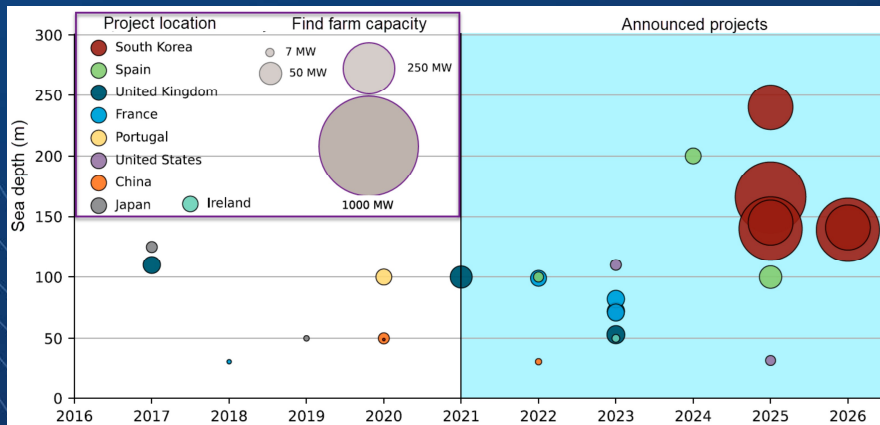
Fuente: [32]



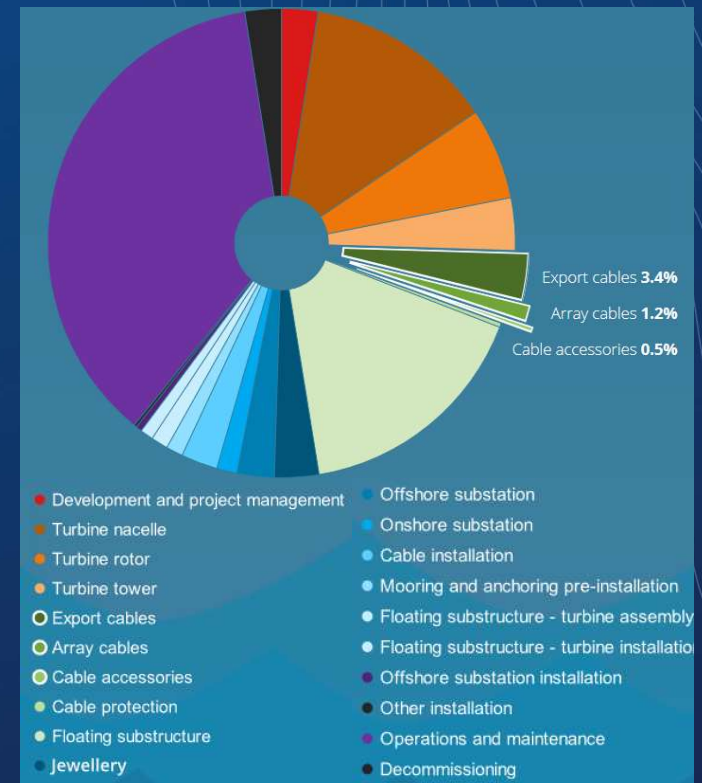
Paramétrico costos y despliegue aerogeneradores



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

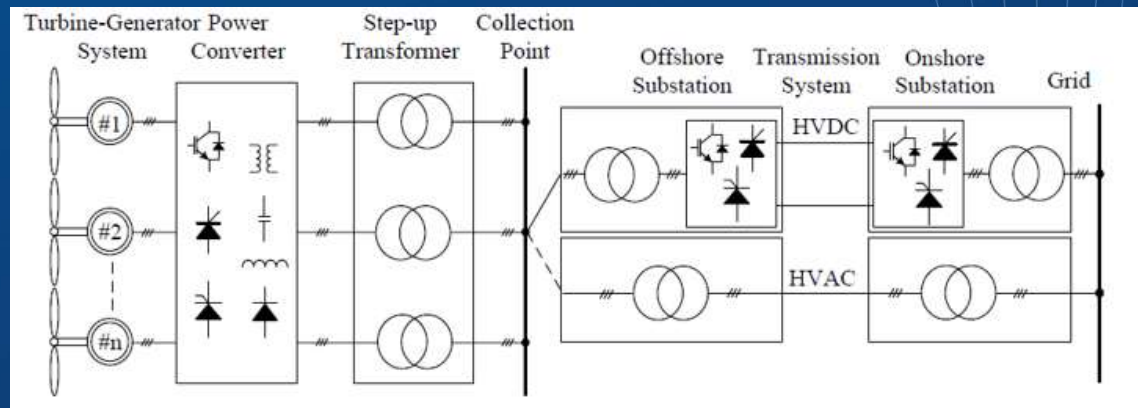


Despliegue aerogeneradores eólicos a nivel global a 2026. [12]

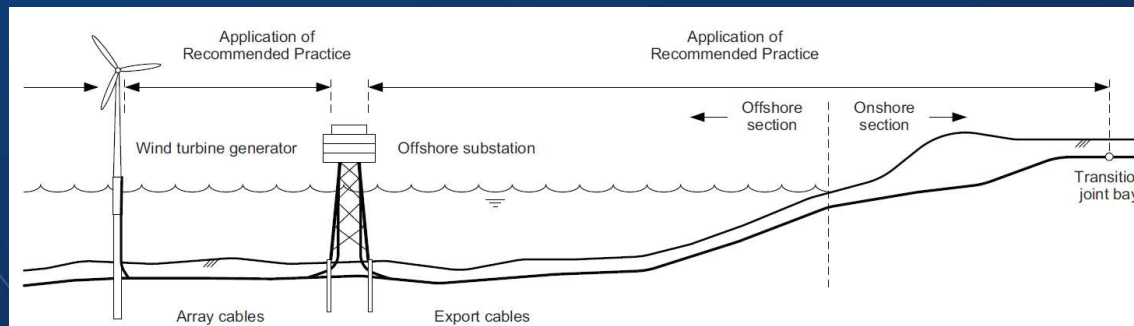


Distribución de costos para la vida útil de un parque de 450 MW con una inversión total de 2600 millones de libras esterlinas. Adaptación [24]

Configuraciones típicas

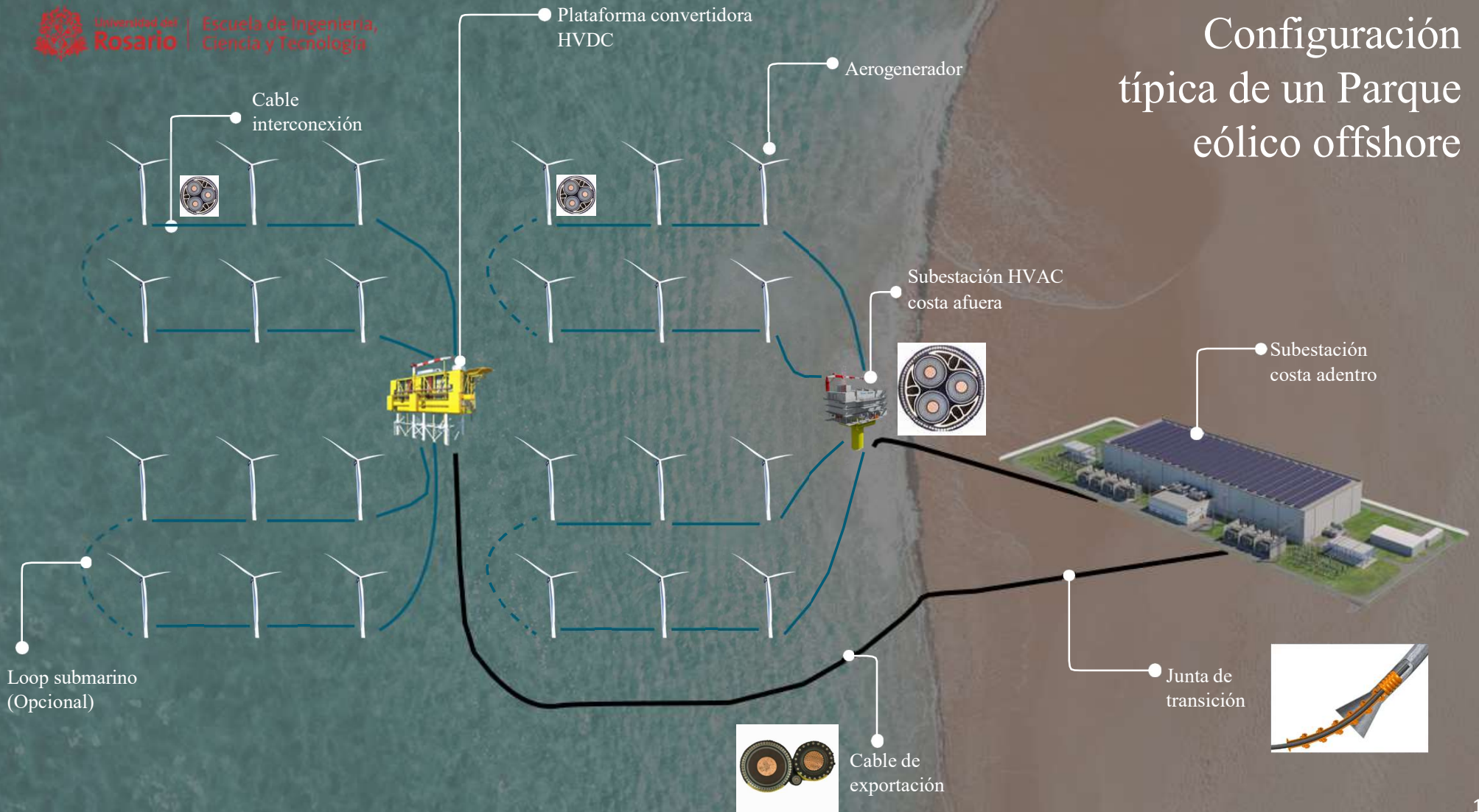


Fuente: [10]



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

Configuración típica de un Parque eólico offshore



Tendencias

382 GW a 2030

2002 GW a 2050

Capacidad total instalada energía
eólica marina a 2022 **35** GW

HVAC

Potencias hasta **400** MW y
distancias < **100** Km



VESTAS y SIEMENS

255 GW a 2024

Aerogeneradores

Potencia > **12** MW

D > **200** m

XLPE

Hasta **400** KV

Resistente a la humedad, la
corrosión y la abrasión.

Baja pérdida dieléctrica

COLOMBIA

Primera ronda para asignación de
permisos de ocupación temporal
sobre áreas marítimas



11 Proyectos en fase 1

5 GW

3 GW en 2040

6-9 GW en 2050

Integración criterios



Criterios y rangos:

Parámetros	Rango o tipo	Especificación o criterio	
Profundidad lámina de agua	< 15m	VESTAS V80-2.0 MW, 2 MW Ø80 m VESTAS V90-3.0 MW, 3 MW Ø90 m	
	Entre 15 y 30 m	VESTAS V117-4.2 MW, 4,2 MW Ø117 m	
	> 30 m		VESTAS V164-8.0 MW, 8 MW Ø164 m SIEMENS GAMESA SG8.0-167DD, 8MW Ø167 m VESTAS V164-10.0 MW, 10 MW y Ø164 m SIEMENS GAMESA SG11.0-200DD, 11MW Ø200 m SIEMENS GAMESA SG14.0-222DD, 14MW Ø222 m SIEMENS GAMESA SG14.0-236DD, 14MW Ø236 m VESTAS V236-15.0 MW, 15 MW Ø236 m
		0-200 Km	HVAC /Potencia hasta 400 MW
		0-300 Km	HVDC-VSC /Potencia hasta 900 MW
			HVDC-LCC /Potencia entre 600 MW y 1000 MW
		Tipo de cimentación	Profundidades <25 m
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)		

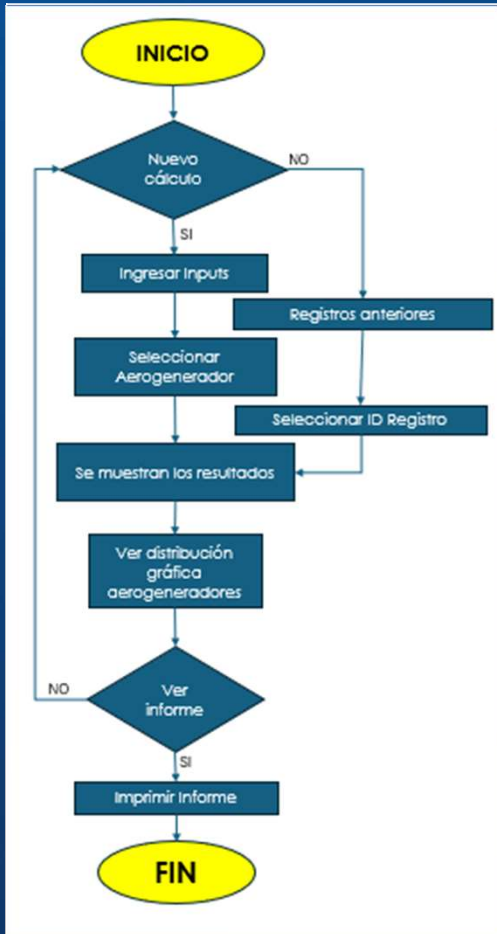


Crterios y rangos:

Parámetros	Rango o tipo	Especificación o criterio
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
	34 MVA < Potencia < 94 MVA	Cable 66 KV AC
Cables de exportación	200 MVA < Potencia < 428 MVA	Cable 300 KV AC
	225 MVA < Potencia < 645 MVA	Cable 200 KV DC
	421 MVA < Potencia < 1636 MVA	Cable 420 KV DC
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



Diagrama herramienta computacional



Página de bienvenida e ingreso de los datos necesarios para generar los cálculos del modelo preconceptual

Ingresar inputs:

Nombre del proyecto
 Potencia del parque (MW)
 Distancia más cercana a la costa (Km)
 Profundidad lámina de agua (m)

Seleccionar aerogenerador en función de la profundidad de la lámina de agua
 VESTAS o SIEMENS GAMESA
 MW y diámetro rotor (m)

El botón calcular validará los inputs e iniciará el **proceso de cálculo**, con base en parámetros, rangos y criterios definidos. Los resultados incluyen:
 Área del parque eólico (Km²)
 Cantidad de aerogeneradores
 Tipo de aerogenerador
 Tipo de cimentación
 Tipo sistema de transmisión (HVAC/HVDC)
 Tipo de cable de interconexión, sección y nivel de tensión (KV)
 Tipo de cable de exportación, sección y nivel de tensión (KV)
 Diagrama tipo según sistema de transmisión

Botón de **distribución gráfica** aerogeneradores muestra de manera la distribución espacial más conveniente de los aerogeneradores en función del diámetro del rotor

Los registros pueden ser visualizados e impresos y/o almacenados con un ID único que permite rescatar los datos almacenados posteriormente.



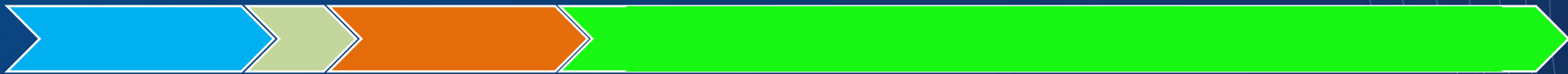
Aplicación en Python

Validación caso real

1510MW



Año 1-5 6-7 8-12 13-33

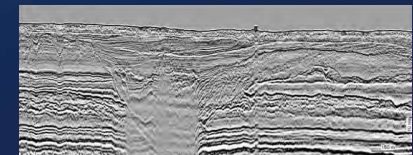
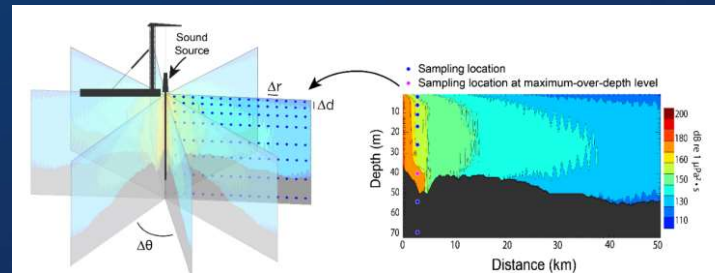
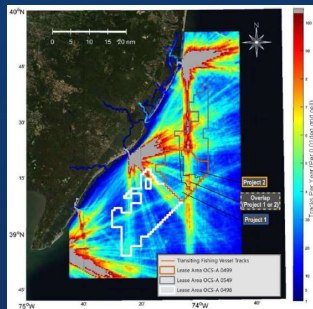
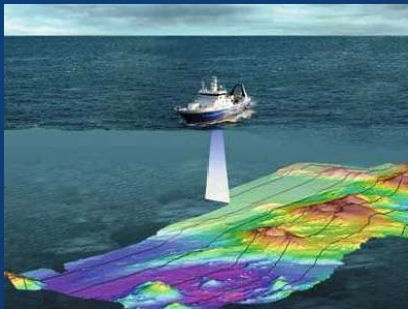


Planeación

Compras y suministros

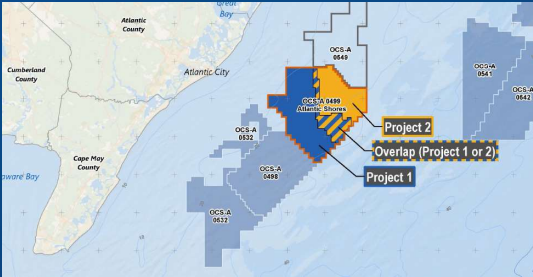
Ejecución

Operación y mantenimiento



Caso global

EDF-RE Offshore Development, LLC y Shell New Energies US LLC



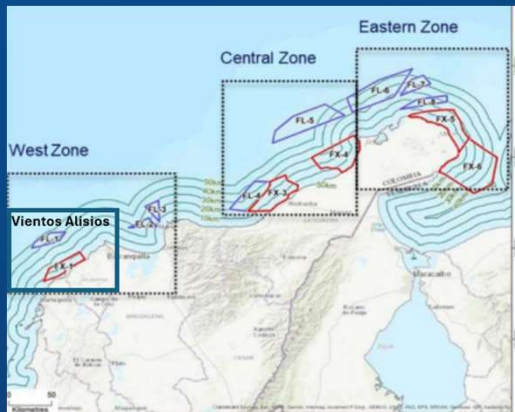
Fuente: [8]

1510_{MW}
700.000_{VIVIENDAS}



Variable	Atlantic Shores (Datos reales del Proyecto 1)	Atlantic Shores Software preconceptual Python
ENTRADAS (INPUTS)		
Distancia más cercana a la costa (Km)	14 km	
Profundidad lámina de agua (m)	19-37 m	30 m
Potencia aerogenerador (MW)	13 MW	14 MW
Diámetro aerogenerador (m)	280.0 m	236.0 m
SALIDAS		
Área parque eólico (Km ²)	220	192
Cantidad de aerogeneradores	105-136	108
Tipo de aerogenerador	General Electric Halide-X turbines 13 MW Ø280 m	Siemens Gamesa SG14.0-236DD 14MW Ø236 m
Tipo de cimentación	Monopilotes	Tripilote
Tipo de cable de interconexión generadores	66–150 kV HVAC	66 kV 3x800 mm ² 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 ² Opción 2: HVDC – 1 cable 420 kV HVDC 2200 mm ²
Tipo sistema de transmisión	HVAC HVDC	HVAC HVDC

Caso práctico en Colombia



Fuente: [31]

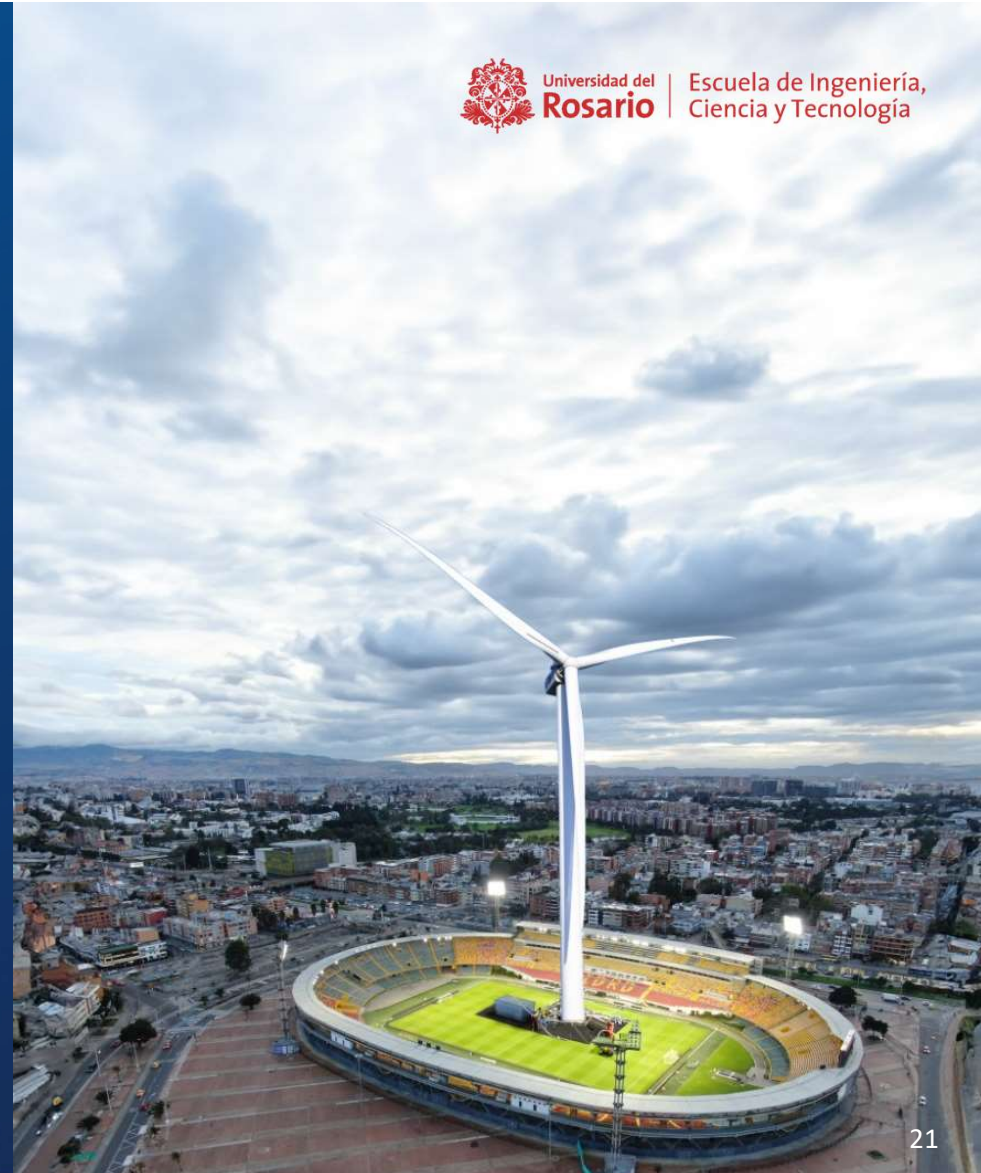
200_{MW}

Fase 1

Variable	Software preconceptual
ENTRADAS (INPUTS)	
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
SALIDAS	
Área parque eólico (Km ²)	18
Cantidad de aerogeneradores	25
Tipo de aerogenerador	VESTAS V164-8.0 MW, 8 MW Ø164 m
Tipo de cimentación	Trípode 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 ²
Tipo sistema de transmisión	HVAC

Conclusiones:

1. La revisión del estado de arte de los últimos 15 años, la integración de criterios y la combinación de Flask, Docker y Python, permitieron construir una aplicación versátil y de libre acceso para profesionales involucrados en la planificación y preconceptualización de parques eólicos offshore.
2. La potencia reactiva actúa como un factor limitante para distancias superiores a 70 Km.
3. La transmisión en corriente continua (HVDC) emerge como la mejor alternativa para distancias mayores a 70 Km.
4. El modelo preconceptual contribuye al predimensionamiento de ingeniería de los parques eólicos offshore en trámite de planeación en Colombia y en cualquier otro lugar a nivel global.
5. En fases posteriores de diseño (conceptual, básico y detalle), se deben ampliar criterios para seleccionar la mejor alternativa.



Referencias:

- [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
- [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.
- [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>
- [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-filles/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».
- [32] «Offshore Wind Submarine Cabling Overview».

