



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE
INGENIERÍA ELÉCTRICA

“Factibilidad Técnica, Operativa y Diseño de Parques Eólicos Marinos en México”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica

PRESENTA:

Ingeniera en Energía y Sustentabilidad
Herlinda Tututi Guillén

DIRECTOR DE TESIS:
Dr. J. Aurelio Medina Ríos

DIRECTOR DE TESIS:
Dr. J. Julio César Godínez Delgado



Morelia, Michoacán, febrero 2026



FACTIBILIDAD TÉCNICA, OPERATIVA Y DISEÑO DE PARQUES EÓLICOS MARINOS EN MÉXICO

Los Miembros del Jurado de Examen de Grado aprueban la Tesis de Maestría en
Ciencias en Ingeniería Eléctrica de Herlinda Tututi Guillén. / /

Dr. Juan Carlos Silva Chávez
Presidente del Jurado

Dr. J. Aurelio Medina Rios
Director de Tesis

Dr. Julios César Godínez Delgado
Co-director

Dr. Alejandro Zamora Méndez
Vocal

Dr. Ismael Molina Moreno.
Revisor Externo (ITM)

Dr. J. Aurelio Medina Rios
*Jefe de la División de Estudios de Posgrado
de la Facultad de Ingeniería Eléctrica. UMSNH
(Por reconocimiento de firmas)*

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
Febrero 2026

Dedicado a:

Mi familia:

Eduardo Salvador, Norma Alicia, Eduardo, Karla, Eréndira y Norma

Mi prometido, Alejandro Bucio

Y a Dios

Agradecimientos

Al Dr. J. Aurelio Medina Ríos, por su paciencia, dedicación, y por brindarme su apoyo en la elaboración de mi tesis. Agradezco que haya compartido su experiencia y sabiduría conmigo, y ser un mentor ejemplar.

Al Dr. Julio César Godínez Delgado por su amistad y apoyo académico. Le agradezco los consejos y comentarios para la elaboración de mi tesis

Agradezco a los profesores e investigadores de la DEP-FIE de la UMSNH, Dr. Juan Carlos Silva Chávez, Dr. Alejandro Zamora Méndez, así como al Dr. Ismael Molina Moreno quien fungió como revisor externo del Instituto Tecnológico de Morelia. Agradezco sus varios comentarios, observaciones y por el tiempo dedicado durante la revisión y aprobación de esta tesis

Agradezco el apoyo financiero aportado por CONAHCYT.

A todo el personal de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y a la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Eléctrica

A mis compañeros del posgrado, con quienes nos apoyamos para seguir adelante.

Asímismo, agradezco a mis padres y hermanos por el apoyo moral, y el cariño de me han brindado.

A mis queridos gatitos, Suki, Wilson, Kero, Sunny y Monina, por acompañarme y brindar amor.

También agradezco a mis mejores amigas Magnolia y Daniela, por el simple hecho de formar parte de mi vida, y apoyarme en lo académico y en lo personal.

Agradezco a Dios, por estar siempre a mi lado, apoyarme y darme fuerzas y fe para creer en mi misma y seguir luchando.

Por último, quiero agradecer a mi motor de vida y mi razón de ser, mi futuro esposo, Alejandro, quién me apoya en muchos aspectos como en lo académico, en lo personal, y quién me ha brindado mucho amor y cariño. Te amo.

Resumen

En esta tesis se analiza la factibilidad, el diseño, la configuración y el análisis del funcionamiento en estado estacionario y transitorio de parques eólicos marinos para el suministro eficiente de energía eléctrica. Se describen varias localidades con capacidad de aprovechamiento eólico marino en México. Entre estos, la ubicación propuesta se encuentra en la región, en el Golfo de Tehuantepec, en Oaxaca, México, la cual presenta un gran potencial y características ideales para su instalación y operación. Esta región ofrece ventajas significativas con respecto a otras, de acuerdo a los datos y estudios proporcionados por diversas instituciones, así como de estudios de complementariedad realizados. Cabe destacar que esta investigación representa una iniciativa para la instalación de sistemas de generación de energía renovable en México, específicamente energía eólica marina, aprovechando las fuertes y constantes corrientes de viento de la zona. La región se caracteriza por su clima favorable, su proximidad al océano y su ubicación estratégica para la instalación de parques eólicos marinos. Adicionalmente, se analiza las ventajas medioambientales y operativas, así como los retos técnicos asociados con su implementación y diseño mediante la simulación de diferentes casos prácticos utilizando el software PSCAD/EMTDC® para verificar su aplicación y eficiencia.

Palabras clave. Energía renovable, estado estacionario, estado transitorio, factibilidad, parque eólico marino, transición energética.

Abstract

This thesis presents the feasibility, design, configuration, and analysis of the steady state and transient operation of offshore wind farms for the efficient supply of electrical energy. Several locations with offshore wind energy potential in Mexico are described. Among these, the proposed location is in the Gulf of Tehuantepec, in Oaxaca, Mexico, which has great potential and ideal characteristics for installation and operation. This region offers significant advantages over others, according to data and studies provided by various institutions, as well as complementary studies. It should be noted that this research represents an initiative for the installation of renewable energy generation systems in Mexico, specifically wind energy, taking advantage of the strong and constant wind currents in the area. The region is characterized by its favorable climate, proximity to the ocean, and strategic location for the installation of offshore wind farms. In addition, the environmental and operational advantages, as well as the technical challenges associated with its implementation and design, are analyzed by simulating different practical cases using PSCAD/EMTDC® software to verify its application and efficiency.

Keywords. Renewable energy, steady state, transient state, feasibility, offshore wind farm, energy transition.

Contenido

Dedicatoria	III
Agradecimientos	V
Resumen	VII
Abstract	IX
Contenido	XI
Lista de Figuras	XV
Lista de Tablas	XIX
Lista de Acrónimos y Símbolos	XXII
Lista de Publicaciones	XXV
Lista de publicaciones	XXV
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Descripción del Problema	4
1.2.1. La Energía Eléctrica en México	5
1.2.1.1. Definición de Energía Eólica	6
1.2.1.2. Desarrollo Histórico y Antecedentes	7
1.2.1.3. La Energía Eólica en México	9
1.2.1.4. Aplicación de la Energía Eólica Off-shore	10
1.2.1.5. Beneficios y Desventajas de la Energía Eólica	10
1.2.1.6. Aspectos Legales	11
1.3. Justificación	11
1.4. Objetivos de la Tesis	13
1.4.1. Objetivo General	13
1.4.2. Objetivos Específicos	14
1.5. Hipótesis	14
1.6. Metodología	14
1.7. Contribuciones	17
1.8. Descripción de los Capítulos	17
2. Factibilidad y Técnicas de Pronóstico para el Diseño de Parques Eólicos Marinos en México	19
2.1. Introducción	19
2.2. Factibilidad	20

2.2.1.	Factibilidad Técnica	20
2.2.2.	Factibilidad Operacional	20
2.3.	Determinación de Potencial Energético	24
2.3.1.	Estudios de Complementariedad Energética.	25
2.3.1.1.	Evaluación de la Complementariedad Energética.	27
2.4.	Conclusiones	31
3.	Determinación de Ubicación y Configuración de Parques Eólicos Marinos en México	33
3.1.	Introducción	33
3.2.	Determinación de Ubicaciones Potenciales.	35
3.2.1.	Estudios de Complementariedad Energética.	37
3.2.2.	Áreas Protegidas en México.	40
3.2.3.	Red Nacional de Transmisión.	41
3.3.	Identificación de Parámetros para Definir la Configuración de Parques Eólicos Marinos.	44
3.3.1.	Golfo de Tehuantepec, Oaxaca.	45
3.3.1.1.	Estudios de Batimetría.	50
3.3.1.2.	Recurso Eólico.	52
3.3.1.2.1.	Rosa de los vientos.	53
3.3.1.3.	Ciclones.	54
3.4.	Determinación de Componentes y Configuración de Parques Eólicos Marinos.	55
3.4.1.	Tecnologías para Cimentaciones.	55
3.4.2.	Líneas de Amarre.	59
3.4.3.	Anclaje.	60
3.4.4.	Determinación de la Turbina.	60
3.4.5.	Determinación de configuración.	66
3.5.	Conclusiones.	71
4.	Operación en Estado Estacionario y Estado Transitorio de Parques Eólicos Marinos	75
4.1.	Introducción	75
4.2.	Casos de Estudio.	76
4.2.1.	Caso de Estudio 1: Operación en Estado Estacionario	77
4.2.1.1.	Datos de Simulación:	78
4.2.2.	Caso de Estudio 2: Operación en Estado Transitorio	81
4.2.3.	Caso de Estudio 3: Falla Monofásica a Tierra en la Línea de Distribución.	82
4.2.4.	Caso de Estudio 4: Falla Trifásica en la Línea de Distribución.	85
4.2.5.	Caso de Estudio 5: Operación Conectada a un Bus Infinito.	88
4.2.6.	Caso de Estudio 6: Falla Trifásica Cercana al Bus Infinito.	91
4.3.	Conclusiones	94
5.	Conclusiones Generales y Sugerencias de Trabajo Futuro	97
5.1.	Aportaciones	99
5.2.	Sugerencias para Trabajos de Investigación Futuros.	100
A.	Carta Batimétrica del Golfo de Tehuantepec	101

B. Parámetros del sistema	103
C. Parámetros del sistema para la simulación en PSCAD/EMTDC®.	107
C.1. Datos de la turbina de viento.	107
D. Diagramas Esquemáticos en PSCAD/EMTDC® de los casos de estudio.	109
D.1. Datos de la turbina de viento.	109
Referencias	111

Lista de Figuras

1.1. Pronóstico de consumo del SEN 2019-2033 [SENER, 2019].	6
1.2. Evolución de la capacidad instalada de energía eólica en México [AMDEE, s.f.]	9
1.3. Parques eólicos on-shore instalados en México en el 2023 [AMDEE, 2024] . . .	9
3.1. Velocidad media del viento en México [GWA, s.f.]. Imagen tomada el 27 de septiembre de 2024	34
3.2. Mapas del potencial eólico en México (promedios anuales): (a) Velocidad del viento entre 80 y 120 m, (b) Densidad de potencia (cantidad de energía por unidad de volumen) entre 80 y 120 m [INEGI, s.f.]. Con edición propia.	34
3.3. Zonas con mayor potencial de energía eólica en México [Gallardo <i>et al.</i> , 2020]	37
3.4. Zonas con mayor potencial de energía eólica en México [Gallardo <i>et al.</i> , 2020]	38
3.5. Mapas del potencial de energía eólica en México [Gallardo <i>et al.</i> , 2020]	38
3.6. Mapa de complementariedad energética en México [Gallardo <i>et al.</i> , 2020]. . .	40
3.7. Mapa de Áreas Naturales Protegidas de México. La zonas verde indica las reservas de la biosfera y la café parques nacionales. Con edición propia. [Go- bierno de México, 2024].	41
3.8. Mapa del SEN [CONAHCYT, s.f.], imagen obtenida el 29 de septiembre de 2024.	42
3.9. Mapa del SEN en la zona del Golfo de Tehuantepec. La línea amarilla son las redes de tensiones de 230 kV, y la rosa entre 24 a 161 kV. [CONAHCYT, s.f.], imagen obtenida el 29 de septiembre de 2024.	43
3.10. Mapa de velocidades medias del viento, mostrando el SEN y áreas naturales protegidas en México [CONAHCYT, s.f., GWA, s.f., Gobierno de México, 2024].	44
3.11. Plataforma Continental del Golfo de Tehuantepec [Google Maps, 2024]. Ima- gen obtenida el 6 de diciembre de 2024.	45
3.12. Extensión de la velocidad del viento más alta en el Golfo de Tehuantepec [GWA, s.f.].	46
3.13. Ubicación de un parque eólico marino en México, de acuerdo a las coordena- das: punto 1: 16°08', 95°05'; punto 2: 16°08', 95°02'; punto 3: 16°06', 95°02'; y punto 4: 16°06', 95°05'. [Galván, 2022].	47

3.14. Ubicación de un parque eólico marino en México, de acuerdo a las coordenadas: punto 1: 16°08', 95°05'; punto 2: 16°08', 95°02'; punto 3: 16°06', 95°02'; y punto 4: 16°06', 95°05', dada por Global Wind Atlas [GWA, s.f.]. Con edición propia.	47
3.15. Localización geográfica de la zona de pesca 90 en el Golfo de Tehuantepec y sus respectivos sub-sectores [Cervantes-Hernández <i>et al.</i> , 2008].	48
3.16. Distribución y captura de peces en el 2023 en el Golfo de Tehuantepec por el crucero JCFINP2303: a) Barrilete, Cocinero, Jurel orqueta, entre otros, b) Chabelita, Ojotón y Papelillo, c) Calamar gigante y dedal, y Jaiba nadadora, d) Sardina crinuda [Vallarta-Zárate <i>et al.</i> , 2024]. Con edición propia.	49
3.17. Carta Batimétrica del Golfo de Tehuantepec y área identificada para el parque eólico [Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 1983]. Con edición propia.	51
3.18. Batimetría del Golfo de Tehuantepec por National Oceanic and Atmospheric Administration [National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), s.f.]. Imagen tomada el 19 de mayo de 2024.	52
3.19. Batimetría del Golfo de Tehuantepec por Global Wind Atlas [GWA, s.f.]. Imagen: 19/mayo/2024.	52
3.20. Rosa de los Vientos en la región 16°08'N y 95°05'O del Golfo de Tehuantepec [Meteoblue, 2025].	53
3.21. Plataformas flotantes para turbinas eólicas en alta mar.	56
3.22. Estructura de la plataforma semisumergible con diseño de WindFloat de Principle Power.	58
3.23. Comportamiento del sistema de lastre de la plataforma semisumergible WindFloat de Principle Power ante posible oleaje o viento.	58
3.24. Líneas de amarre de tipo catenario.	59
3.25. Área de 6 km ² en la ubicación seleccionada para el Golfo de Tehuantepec. [GWA, s.f.]. Imagen obtenida el 07 de marzo de 2025 con edición propia.	61
3.26. Distancias paralelas o perpendiculares de acuerdo a la dirección dominante del viento.	62
3.27. Esquema de la turbina eólica tipo 4. [Vittal y Ayyanar, 2012]. Traducida al español.	64
3.28. Distancia del área en donde se dispondrá el parque eólico marino, a las costas de Salina Cruz. [GWA, s.f.]. Imagen obtenida el 02 de abril de 2025.	65
3.29. Configuración de onda floja del cable de interconexión dinámico.	66
3.30. Sistema de interconexión del parque eólico marino en fishbone.	67
3.31. Configuración en barlovento con dirección al norte para las turbinas del Golfo de Tehuantepec.	67
3.32. Distancias en disposiciones lineales. [Prado, 2018].	68
3.33. Distancias en posiciones circulares. [Prado, 2018].	68
3.34. Área de estudio (captura de Google Earth, edición propia). [Google, s.f.].	69
3.35. Propuesta de disposición lineal de distancia entre columnas con dirección al norte.	70

3.36. Diagrama unifilar del parque eólico marino propuesto en el Golfo de Tehuantepec.	70
4.1. Diagrama esquemático del sistema de parque eólico marítimo.	77
4.2. Formas de onda de corrientes en estado estacionario medidas en terminales de la carga: a) Corriente en la carga, b) Ampliación de corriente en la carga. .	78
4.3. Formas de onda de corrientes en estado estacionario en el parque eólico marino: a) Corriente instantánea b) Ampliación de corriente instantánea.	79
4.4. Formas de onda de voltaje en estado estacionario: a) Voltajes de fase en la carga, c) Ampliación de las formas de onda de voltaje de fase en la carga. . .	80
4.5. Formas de onda de voltaje en estado estacionario: a) Voltaje en los puntos del parque eólico, c) Ampliación de las formas de onda de voltaje de fase. . .	80
4.6. Transitorios iniciales: a) Corrientes de rama, b) Voltajes de fase.	81
4.7. Transitorios iniciales: a) Corrientes en la carga, b) Voltajes de fase en la carga.	81
4.8. Diagramas esquemáticos del sistema de parque eólico marino con una falla monofásica: a) Configuración de turbinas de tipo 4, b) diagrama unifilar aplicando un fallo monofásico.	82
4.9. Formas de onda de voltaje durante Falla monofásica: a) Voltaje en los puntos del parque eólico, b) Ampliación de las formas de onda de voltaje de fase . . .	82
4.10. Formas de onda de corriente durante falla monofásica: a) Corriente en los puntos del parque eólico, b) Ampliación de corriente	83
4.11. Formas de onda de voltaje de línea con carga durante falla monofásica: a) Voltaje de línea con carga, b) Ampliación de voltaje de línea con carga. . . .	83
4.12. Formas de onda de corriente de la línea con carga durante falla monofásica: a) Corriente de línea con carga, b) Ampliación de corriente de línea con carga.	84
4.13. Formas de onda de voltaje de carga con carga durante falla monofásica: a) Voltaje de carga con carga, b) Ampliación de voltaje de carga con carga. . . .	84
4.14. Formas de onda de corriente de carga con carga durante falla monofásica: a) Corriente de carga con carga, b) Ampliación	85
4.15. Diagramas esquemáticos del diseño de un parque eólico marino con una falla trifásica: a) Configuración de turbinas de tipo 4, b) diagrama unifilar aplicando un fallo trifásico.	85
4.16. Formas de onda de voltaje en el parque eólico durante falla trifásica: a) Voltaje de fase con carga, b) Acercamiento de las formas de onda del voltaje en el con carga.	86
4.17. Formas de onda de corriente en el parque eólico marino con carga durante falla trifásica: a) Corriente en el parque con carga, b) Ampliación de corriente con carga.	86
4.18. Formas de onda de voltaje de la línea de distribución con carga durante falla trifásica: a) Voltaje de fase con carga, b) Ampliación del voltaje con carga. . .	87
4.19. Formas de onda de corriente de la línea de distribución con carga durante falla trifásica: a) Corriente con carga, b) Ampliación de corriente con carga. .	87
4.20. Formas de onda de voltaje en la carga durante falla trifásica: a) Voltajes de fase con carga, b) Ampliación de los voltajes con carga.	88

4.21. Formas de onda de corriente con carga durante falla trifásica: a) Corriente con carga, b) Ampliación de corriente con carga.	88
4.22. Formas de onda de voltaje a la salida del parque marítimo conectado a la red en estado estacionario: a) Voltaje en el parque conectado a la red, b) Acercamiento de voltaje en el parque eólico marino conectado a la red.	89
4.23. Formas de onda de corriente en estado estacionario en el parque eólico marino conectado a la red: a) Corriente en el parque conectado a la red, b) Ampliación de corriente en el parque eólico marino conectado a la red.	89
4.24. Formas de onda de voltaje en la línea de distribución cuando el parque se conecta a la red: a) Voltaje en la línea de distribución, b) Ampliación de voltaje en la línea de distribución.	90
4.25. Formas de onda de corriente en la línea de distribución cuando el parque se conecta a la red: a) Corriente de en la línea de distribución cuando el parque se conecta a la red, b) Ampliación de corriente de la línea de distribución cuando el parque se conecta a la red.	90
4.26. Diagramas esquemáticos del diseño de un parque eólico marino conectado a la red, con una falla trifásica: a) Configuración de turbinas de tipo 4, b) diagrama unifilar aplicando un fallo trifásico.	91
4.27. Formas de onda de voltaje del parque marítimo conectada a la red durante falla trifásica: a) Voltaje en el parque, b) Acercamiento de voltaje en el parque eólico marino.	92
4.28. Formas de onda de corriente en el parque eólico marino conectado a la red durante falla trifásica: a) Corriente en el parque, b) Ampliación de corriente en el parque eólico marino.	92
4.29. Formas de onda de voltaje de línea de distribución, cuando el parque se conecta a la red, durante falla trifásica: a) Voltaje de la línea, b) Ampliación de voltaje de la línea.	93
4.30. Formas de onda de corriente de línea de distribución, cuando el parque se conecta a la red, durante falla trifásica: a) Corriente de la línea, b) Ampliación de corriente.	93
4.31. Formas de onda de voltaje en la red durante falla trifásica: a) Voltaje de línea, b) Ampliación de voltaje de línea.	94
4.32. Formas de onda de corriente en la red durante falla trifásica: a) Corriente de línea, b) Ampliación de corriente de línea.	94
A.1. Carta Batimétrica del Golfo de Tehuantepec. [Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 1983].	102
D.1. Diagrama del parque eólico marino de cinco turbinas conectadas a la red a través de un transformador en tierra en el simulador PSCAD/EMTDC®. . .	110
D.2. Diagrama del parque eólico marino de cinco turbinas conectadas a la una carga a través de un transformador en tierra en el simulador PSCAD/EMTDC®. .	110
D.3. Diagrama del sistema electromecánico de la turbina tipo 4 en el simulador PSCAD/EMTDC®.	110

Lista de Tablas

1.1. Evolución de dimensiones y capacidad de las turbinas eólicas entre 1985 y 2004 [Mukund, 1999].	8
1.2. Rangos de capacidad y diámetro del Rotor de aerogeneradores según la escala [AMDEE, s.f.].	8
3.1. Áreas con mayor potencial eólico y velocidades medias del viento.	36
3.2. Ciclones que afectaron en Salina Cruz entre el año 2021 y 2024.	55
3.3. Ventajas y desventajas de las plataformas flotantes para aerogeneradores en alta mar.	57
B.1. Hoja de datos del modelo Vestas V164/8000. [Bauer, s.f., The Wind Power, s.f., Vestas, 2011].	104
B.2. Distancias de las diferentes disposiciones de las turbinas para el parque eólico marino del Golfo de Tehuantepec. Nota: En las circulares podría tomarse un ángulo de 3000 m y ángulo de 9.6° como referencia.	105
C.1. Parámetros utilizados para la simulación del parque eólico marino de cinco turbinas de 8 MW.	108

Lista de Acrónimos y Símbolos

Término	Sigla
Aerogenerador	AG
Alternating current	AC
Asia-Pacífico	APAC
Asociación Mexicana de Energía Eólica	AMDEE
Autorregressive Integrated Moving Average	ARIMA
Autorregressive Moving Average	ARMA
Canonical correlation analysis	CCA
Centro Nacional de Control de Energía	CENACE
Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas	CONANP
Comisión Nacional del Agua	CONAGUA
Comisión y Uso de de Biodiversidad	CONABIO
Conductor	C
Conexión en delta	Δ
Conexión en estrella	Y
Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecno- logías	CONAHCYT
Corriente Alterna	CA
Corriente en la fase a	I_a
Corriente en la fase b	I_b
Corriente en la fase c	I_c
Cross correlation	CC
Cumulative distribution function	CDF
Dióxido de carbono	CO ₂
Direct current	DC
Enhanced Relational Access	ERA
Este / east	E
Este-noreste / east-northeast	ENE
Este-sureste / east-southeast	ESE
Floating Offshore Wind Platform	FOWP
Floating Production, Storage and Offloading	FSPPO
Gases de Efecto Invernadero	GEI
Giga Byte	GB
Giga Hertz	GHz
Giga watts	GW
Global Wind Atlas	GWA
Global Wind Energy Council	GWEC
Henrio	H

Término	Sigla
Hertz	Hz
High Voltage Alternating Current	HVAC
High Voltage Direct Current	HVDC
IDEA	IDEA
Instituto de Ingenieros en Electricidad y Electrónica	IEEE
Instituto Mexicano de Investigación en Pesca y Acuacultura Sustentables	IMIPAS
Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático	INECC
Instituto Nacional de Estadística y Geografía	INEGI
Jorge Carranza Fraser, Instituto Nacional de la Pesca, crucero realizado en marzo del 2023	JCFINP2303
Kilo-amperes	kA
Kilómetro	km
Kilómetro al cuadrado	km ²
Kilovolt	kV
Kilo Watt	kW
Les Éoliennes Flottantes du Golfe de Lion	EFGL
Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Medio Ambiente	LGEEPA
Línea de distribución	LD
Línea de Transmisión	LT
Manifestación de Impacto Ambiental	MIA
Mega volts amper	MVA
Mega Watt	MW
Mega watt hora	MWh
Metro	m
Metro al cuadrado	m ²
Metro sobre segundo	m/s
Micro faradios	μF
National Oceanic and Atmospheric Administration	NOAA
National Renewable Energy Laboratory	NREL
Negative Pearson Correlation Coefficient	NPCC
Noreste / Northeast	NE
Noroeste	NO
Norte / North	N
Norte-noreste / north-northeast	NNE
Norte-noroeste	NNO
Northwest	NW
North-northwest	NNW

Término	Sigla
Oeste / West	O
Oeste-noroeste	ONO
Oeste-suroeste	OSO
Original Equipment Manufacturer	OEM
Óxido de azufre	SO ₂
Óxido de nitrógeno	NO ₂
Pearson Correlation Coefficient	PCC
Point of Common Coupling	PCC
Por unidad	pu
Poste aislador	PA
Postes metálicos y postes de media tensión	PM
Power System Computer Aided Design - ElectroMagnetic Transients including DC	PSCAD/EMTDC
Proceso de Análisis Jerárquico	PAJ
Programa de Desarrollo del Sector Eléctrico Nacional	PRODESEN
Promedio Móvil Ponderado	PMP
Promedio Móvil Simple	PMS
Random Access Memory	RAM
Real Academia Española	RAE
Red Nacional de Transmisión	RNT
Revoluciones por minuto	rpm
RN / Redes Neuronales	RN
Secretaría de Energía	SENER
Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales	SEMARNAT
Segundo	s
Sistema Eléctrico Nacional	SEN
South-southwest	SSW
Southwest	SW
Spearman's rank correlation coefficient	SRCC
Sur / south	S
Sureste / southeast	SE
Sur-sureste / south-southeast	SSE
Suroeste	SO
Sur-suroeste	SSO
Tasa de crecimiento anual compuesto	TCAC
Tensioned Legs Platform	TLP
Voltaje en la fase a	V _a
Voltaje en la fase b	V _b
Voltaje en la fase c	V _c
Watt sobre metro al cuadrado	W/m ²
West	W
West-northwest	WNW
West-southwest	WSW

Lista de Publicaciones

- Herlinda Tututi-Guillén, Aurelio Medina-Ríos, Julio Cesar Godinez-Delgado, “Feasibility Analysis and Design of Off-shore Wind Energy Systems in the Gulf of Tehuantepec,” *2025 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, Ixtapa, México, 2025, pp. 1-6.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes

En los últimos años, debido a la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y ampliar las fuentes de energía, se ha incrementado el interés por el desarrollo de energías renovables y la generación distribuida. En tal sentido, la realización de diversos estudios de factibilidad desempeña un papel crucial para evaluar la viabilidad técnica, económica y ambiental de proyectos de generación de energía eléctrica basados en fuentes renovables de energía. En otras palabras, realizar un estudio de factibilidad consiste en evaluar y analizar un proyecto, con la intención de estudiar la viabilidad y la posibilidad de tener éxito en su implementación y operación. En [Peña, 2006] se analizó la factibilidad y el diseño de sistemas de generación distribuida basados en microgeneración hidráulica en México, el cual determinó la factibilidad puntual de la instalación de una micro-unidad de generación mediante el uso de series de tiempo de caudal. Además, se analizaron aspectos asociados en el diseño de la obra civil, la selección de componentes necesarios y la operación en estado estacionario y transitorio de una micro-red de generación distribuida; al final se concluye que la Generación Distribuida es una alternativa viable para la generación de energía eléctrica con base a fuentes renovables en México. Otra aplicación se describe en [Saldivar, 2009] cuyo análisis consiste en el estudio de Factibilidad Técnica, Diseño y Operación de Generación Distribuida basadas en fuentes Mareomotrices; en su trabajo, al igual que Peña, utilizó como herramienta las técnicas de análisis de series de tiempo para el

estudio de factibilidad del recurso mareomotriz, estableció las características técnicas principales de las centrales mareomotrices y propuso una configuración para la parte eléctrica para posteriormente analizar el comportamiento dinámico y en estado estable. Sin embargo, a pesar de ser significativas la Generación Distribuida basada en fuentes mareomotrices y microgeneración hidráulica, existe otra alternativa importante, como el uso de la fuente de energía eólica, debido a su potencial documentado en México ya que es una tecnología consolidada y competitiva, en comparación con fuentes convencionales de generación.

Países como China, Estados Unidos, Alemania, Reino Unido, España y la India han desarrollado parques eólicos viables en el aspecto técnico y económico, convirtiéndolos en líderes en generación de energía eólica. En Latinoamérica, los países con mayor capacidad instalada son Brasil, México y Chile. A pesar de estos avances, quedan algunas zonas o regiones en el mundo para explorar e instalar parques eólicos terrestres o marinos (on-shore y off-shore, respectivamente).

Se han realizado previamente estudios de factibilidad con el fin de diseñar este tipo de proyectos. Un caso de estudio de factibilidad para este tipo de tecnología fue el realizado por [Roberts y Prado, 2011] en el que desarrolló una metodología para evaluar las condiciones adecuadas para la instalación de un parque eólico en el Partido de General Pueyrredón, Argentina. En dicha aplicación se analizan aspectos técnicos, ambientales y económicos, el cual determina la región como un excelente potencial eólico, ya que a 60 metros de altura se puede obtener una potencia específica mayor a 200 W/m^2 con un tiempo de repago de 18 años. Además, se afirma que Argentina debe reformular las políticas e incluir estrategias para fuentes de energía renovable. En el estudio realizado por [Luque, 2019] se evalúa la factibilidad de un parque eólico marino destinado a incrementar la capacidad de generación del parque Jepírachi en Colombia. La metodología empleada consiste en un análisis exhaustivo de la viabilidad técnica, eficiencia y evaluación económica del sistema de generación eólica marina, considerando parámetros de rendimiento, impacto ambiental, costos de implementación y operación de sistemas eólicos en alta mar. También, en el estudio se realiza una comparación con el sistema energético terrestre; se concluye que los sistemas eólicos mar adentro son más costosos, pero más sostenibles ambientalmente y aunque su inversión inicial es alta, se puede recuperar en función del tiempo, considerando una capacidad del 35 %

por el potencial del viento en las zonas de alta mar. En México, es significativo el potencial eólico debido a su ubicación, geografía y clima favorable. De hecho, según la Asociación Mexicana de Energía Eólica (AMDEE), la producción de energía eléctrica anual estimada mediante parque eólicos es de aproximadamente 20, 319, 765 MWh y se espera que a finales del 2024 se cuente en el país con una potencia instalada de más de 8 mil MW distribuidos en varios estados [AMDEE, s.f.]. Este potencial se puede confirmar en el trabajo realizado por [Gallardo *et al.*, 2020], es descrito a través de mapas de la República Mexicana y mediante el Coeficiente de Correlación de Pearson, los lugares en donde hay mayor complementariedad eólico-solar. Para efectos de esta investigación, el estudio también presenta los mapas mensuales del potencial eólico en México, presentando las costas de Oaxaca con un gran potencial eólico casi todo el año, por ejemplo, en Tamaulipas hay mucho potencial en septiembre y octubre, en Baja California únicamente no se tiene disponible este recurso en enero, febrero, noviembre y diciembre. Asimismo, se puede comprobar el potencial eólico en México a partir del estudio descrito en [Ruvalcaba García, 2021], con el tema de Estudio de factibilidad de sitios apropiados para el aprovechamiento del recurso eólico en la región norte de México. En su estudio seleccionó una zona de aprovechamiento al norte de México; determinó y analizó una lista de criterios cualitativos y cuantitativos, aplicó la técnica del Proceso de Análisis Jerárquico (PAJ) en las variables propuestas, elaboró mapas de sitios óptimos para las variables más importantes y ubicó los sitios óptimos. En sus resultados concluye a la región frontera norte de México predeterminada como ideal para el desarrollo de proyectos eólicos, en particular, el estado de Coahuila. Sin embargo, como en la actualidad se han desarrollado nuevas tecnologías para el uso de la energía eólica marina, es importante realizar investigaciones del potencial eólico marino que existe en México.

Se ha dedicado muy poca atención en México al estudio y análisis de esta potencial área de desarrollo. Tal es el caso de estudio desarrollado en [Arredondo *et al.*, 2022] el cual consiste en la estimación de recurso eólico marino en la Península de Baja California utilizando la base de datos ERA5. Por ello, la evaluación del potencial eólico del sitio utilizaron la información de la velocidad y la dirección del viento a 100 m de altura en el periodo entre 2000 y 2019 obtenido del reanálisis ERA5. En dicha evaluación promediaron la potencia del viento, en donde observaron que a 100 m de altura las velocidades son mayores a 7 m/s.

Posteriormente se consideraron aerogeneradores, tales como NREL Reference 8 MW, NREL Reference 10 MW e IDEA 15 MW [Arredondo *et al.*, 2022]. Finalmente, en el estudio, se contempla la Península de Baja California como una región con alto recurso eólico.

No obstante, aún es necesario estudios de factibilidad, impactos sociales y ambientales para determinar la viabilidad de proyectos marinos en la región. El más reciente estudio para en México es el realizado por [Galván, 2022], en relación al tema de factibilidad de ubicación y planeación de parques eólicos en México. En este trabajo, se presentan los elementos necesarios que conlleva un parque eólico marino, se realizaron estudios de factibilidad técnica como la batimetría para la identificación de la región con más potencial eólico en el país, para el diseño, instalación y configuración del parque eólico marino correspondiente a las regiones identificadas. Sin embargo, para este último trabajo aún es necesario considerar aspectos importantes como zonas protegidas (considerado que esto puede cambiar en periodos específicos de años). Además, se considera que aún es necesario realizar un estudio de planeación en donde se representen los parques eólicos marinos propuestos en forma unificada en espacio de estado para determinar su comportamiento dinámico y bajo condiciones de falla. Por lo tanto, para la investigación que se reporta en esta tesis, toma como referencia los antecedentes previamente mencionados, en la investigación desarrollada y reportada en ésta tesis, se describe el proceso para el análisis de la factibilidad y diseño de parques eólicos marinos en México, para el análisis de la solución en estado estacionario y transitorio bajo condiciones de falla.

1.2. Descripción del Problema

La energía eléctrica desempeña un aspecto fundamental en la realización de diversas actividades en las sociedades contemporáneas, como en ámbitos industriales, económicos, educativos, médicos, recreativos, comerciales, habitacionales, entre otros. No obstante, se debe reconocer que la generación de energía eléctrica convencional ha dependido principalmente de fuentes alimentadas mediante combustibles fósiles. Este enfoque, aunque ha sido eficaz en el suministro de energía, plantea desafíos significativos relacionados con el calentamiento global. La emisión de gases de efecto invernadero y el consecuente deterioro de la capa de ozono han suscitado crecientes preocupaciones, instando a una reflexión profunda sobre la viabilidad y sostenibilidad a largo plazo de esta forma de generación de energía eléctrica.

Ahora, desde una perspectiva futura, la continuidad en la dependencia de los combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica se revela como insostenible, tanto en el ámbito de sus impactos medioambientales directos como en la realidad de que estas fuentes de energía se están agotando, tal es el caso del petróleo, gas y carbón, encaminados hacia su máximo consumo en las próximas décadas, pronosticando limitaciones en la disponibilidad y aumentos persistentes en los precios según [Kuo, 2019].

1.2.1. La Energía Eléctrica en México

En México, predomina el uso de combustibles fósiles. De hecho, según estadísticas respaldadas por el Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), cuyas tecnologías convencionales empleadas para la generación eléctrica en México contribuyen aproximadamente al 18 % de las emisiones totales de Gases de Efecto Invernadero (GEI) a nivel nacional [SENER, 2018]. Este índice representa la segunda actividad con mayor impacto ambiental en el país, superada sólo por el sector del transporte. De manera más específica, estas emisiones anuales equivalen a un volumen alarmante de 125 mil millones de toneladas de dióxido de carbono (CO_2). Estos datos enfatizan la necesidad inminente de reconsiderar y reformar las estrategias energéticas para abordar tanto la sostenibilidad medioambiental como la reducción de emisiones de gases contaminantes. La creciente demanda de energía eléctrica en México destaca la necesidad de que el país establezca un sistema de suministro eléctrico sólido, integrando fuentes innovadoras para garantizar la satisfacción de dicha demanda. Para contextualizar este crecimiento imperativo, la Secretaría de Energía (SENER) ha divulgado el Programa de Desarrollo del Sector Eléctrico Nacional 2019-2033 (PRODESEN). En el marco de esta perspectiva, la Figura 1.1 presenta la proyección del consumo bruto del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) para el periodo 2019-2033. Se muestra el consumo bruto en Gigawatt (GW) del SEN en el periodo 2014 a 2033. La gráfica fue obtenida por la SENER por medio de datos del Centro Nacional de Control de Energía (CENACE) [SENER, 2019].

En este sentido, la transición hacia fuentes no convencionales de generación de energía eléctrica emerge como una alternativa imperativa frente a los desafíos asociados con la dependencia de combustibles fósiles y la creciente demanda de energía eléctrica. Entre estas alternativas se destacan, por su nivel actual y consolidación técnica, la hidráulica, fotovol-

taica y eólica, las cuales aportan soluciones innovadoras y sostenibles. Esta última (eólica), aprovecha la potencia generada por el viento a través de turbinas, la cual, se caracteriza por su capacidad para generar electricidad sin emisiones contaminantes ni agotamiento de recursos. Sin embargo, la energía eólica en tierra ha sido cuestionada por su potencial impacto visual y acústico. Además, requiere de grandes extensiones de terreno, provocando conflicto con otros usos del suelo como la agricultura, y el desarrollo urbano. Por estas razones, el desarrollo de proyectos se ha enfocado cada vez más en la energía eólica marina, ya que presenta un menor impacto visual, acústico y los vientos son más constantes y fuertes. Asimismo, en México se dispone de un gran potencial de energía eólica, de hecho, cuenta con 13 estados que tienen parques eólicos en tierra con producción de energía anual de aproximadamente 20, 319, 765 MWh [AMDEE, s.f.]. Desafortunadamente, aún no se dispone de un solo parque marino operando en el país, por lo que su diseño y planeación representa un campo teórico-práctico de gran relevancia.

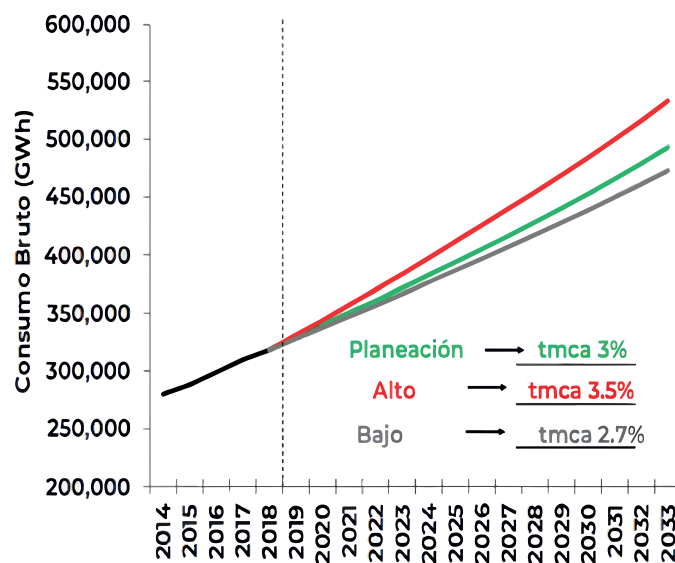


Figura 1.1: Pronóstico de consumo del SEN 2019-2033 [SENER, 2019].

1.2.1.1. Definición de Energía Eólica

Una definición muy concisa de la energía eólica es la energía que se obtiene mediante el aprovechamiento de la velocidad del viento. Esta fuente, al incidir con las palas de una turbina y hacerlas mover de forma rotatoria, convierten la energía eólica en energía eléctrica a través de un proceso de conversión electromecánica que se realiza en el conjunto de turbina

de viento, generador eléctrico y sus diversos accesorios. Existen dos tipos de energía eólica: la energía eólica on-shore y la energía eólica off-shore. La primera se refiere a la energía eólica generada en la tierra, mientras que la segunda es la energía eólica generada en la superficie del mar. La energía eólica off-shore, según la definición de Iberdrola, es una fuente limpia y renovable que se obtiene en alta mar, donde la velocidad del viento es constante debido a la inexistencia de obstáculos naturales que se tienen en tierra.

1.2.1.2. Desarrollo Histórico y Antecedentes

La incidencia de la radiación solar en la Tierra genera variaciones de temperatura que resultan en la formación de presiones atmosféricas, mientras que el movimiento del aire, un gas que fluye desde áreas de alta presión hacia aquellas de baja presión, origina el fenómeno del viento. Esta relación entre la radiación solar y el viento ha sido aprovechada a lo largo de la historia, evolucionando desde las velas de los barcos sumerios hasta las modernas turbinas eólicas [Derry y Williams, 1995]. Por ejemplo, los egipcios utilizaban velas en sus embarcaciones para navegar el Nilo, mientras que los sumerios construyeron las primeras velas para propulsar sus barcos. Ahora, esta transición hacia la generación de energía mecánica mediante molinos de viento se atribuye a Persia, destacando su uso para bombear agua y moler granos [Flores y Montes, 2007]. No obstante, durante el siglo XVII se empleaban los molinos como sistemas de bombeo, mientras que en Europa eran fundamentales para la molienda de granos. Esto con el tiempo fue cambiando ya que Holanda introdujo innovaciones como el molino de viento de poste hueco [Flores y Montes, 2007]. Sin embargo, con la industrialización, la energía eólica fue reemplazada por motores que funcionaban con combustibles fósiles.

Por ende, la transición hacia la generación de electricidad a partir de la energía eólica ocurrió en la década de 1920, pero su consolidación como fuente de energía renovable fue en la década de los 80 [Stiebler, 2008]. Las turbinas eólicas, el moderno sistema de aprovechamiento eólico, continúan evolucionando, posicionándose como uno de los recursos energéticos sostenibles más significativos. A lo largo del último decenio del siglo XX, la capacidad global de generación eólica experimentó un crecimiento notable, duplicándose aproximadamente cada tres años. Este impulso expansivo se reflejó no solo en el aumento de la capacidad instalada de turbinas eólicas, sino también en una tendencia decreciente

en el costo de la electricidad generada a partir de la energía eólica, [Stiebler, 2008]. En la investigación [Mukund, 1999], se revela que, durante este periodo, las turbinas a escala mediana inicialmente eran de una capacidad de 300 kW. La Tabla 1.1 muestra un cambio significativo, con máquinas de mayor capacidad, oscilando entre 500 y 1,000 kW, fueron instaladas posteriormente. Este cambio en la capacidad de generación destaca el avance tecnológico y la adaptación ante un aumento en la demanda de generación de energía eólica.

Tabla 1.1: Evolución de dimensiones y capacidad de las turbinas eólicas entre 1985 y 2004 [Mukund, 1999].

Año	Capacidad (kW)	Diámetro del rotor (m)
1985	50	15
1989	300	30
1992	500	37
1994	600	46
1998	1500	70
2003	3000-3600	90-104
2004	4500-5000	112-128

La Asociación Mexicana de Energía Eólica (AMDEE) clasifica los aerogeneradores con respecto a su escala, según se ilustra en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2: Rangos de capacidad y diámetro del Rotor de aerogeneradores según la escala [AMDEE, s.f.].

Escala	Rangos de Capacidad	Diámetro del Rotor (m)
Micro	50 W - 2 KW	<3
Pequeña	2 KW - 40 KW	3 - 12
Mediana	40 KW - 999 KW	12 - 45
Grande	>1 MW	>46

Cabe destacar en la última década del siglo XX, se implementaron proyectos de turbinas eólicas que superaban 1 MW, específicamente alrededor de 3 MW, con rotores de un diámetro de 90 metros. No obstante, recientemente estas turbinas eólicas con capacidad superior a 1 MW se encuentran ampliamente disponibles en el mercado. Por ende, es evidente

que la tendencia en el desarrollo y fabricación de nuevas turbinas apunta hacia el incremento continuo de la capacidad de potencia.

1.2.1.3. La Energía Eólica en México

En 2010 la capacidad instalada de energía eólica en México fue de alrededor de 519 MW, y en 2018 esta capacidad aumentó a 4, 959 MW, según se muestra en la Figura 1.2.

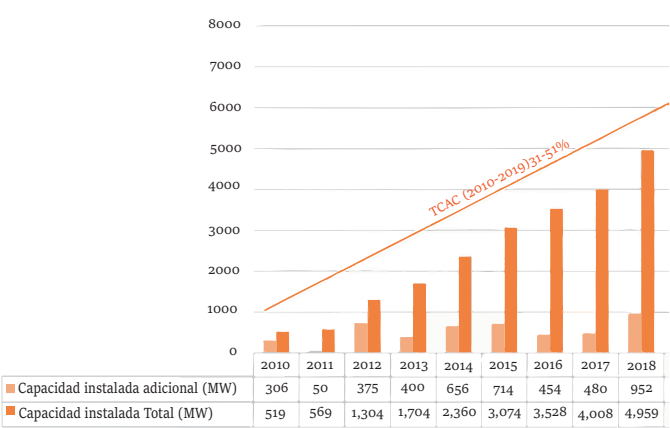


Figura 1.2: Evolución de la capacidad instalada de energía eólica en México [AMDEE, s.f.]

Actualmente, México cuenta con parques eólicos onshore instalados en 13 estados. De hecho, según la AMDEE, la capacidad instalada en México incrementó 96 MW llegando a 7, 413 MW en el 2024 distribuidos en varios estados [AMDEE, 2024]. Sin embargo, México aún no cuenta con ningún parque eólico off-shore. La Figura 1.3 muestra los parques eólicos existentes en México durante el año 2023 según la AMDEE.

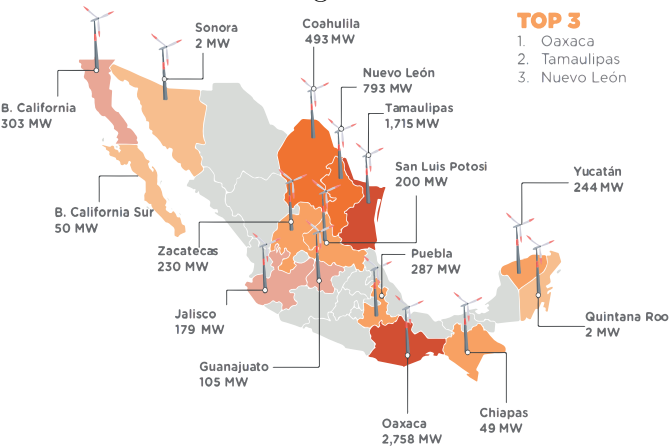


Figura 1.3: Parques eólicos on-shore instalados en México en el 2023 [AMDEE, 2024]

1.2.1.4. Aplicación de la Energía Eólica Off-shore

La implementación de la energía eólica, en particular la off-shore, depende según las necesidades específicas del usuario final, considerando variables como la capacidad de generación, la ubicación geográfica, los requisitos de integración en sistemas energéticos, entre otras. Por ejemplo, la compañía energética global (REPSOL) destaca algunas de las aplicaciones técnicas más relevantes descritas a continuación [REPSOL, 2023]:

- **Producción de energía eléctrica:** Es la principal utilidad de la energía eólica, la cual radica en su capacidad para convertir la energía cinética del viento en energía eléctrica. Este proceso se lleva a cabo mediante el uso de aerogeneradores, que transforman la energía mecánica generada por el movimiento del viento en energía eléctrica, constituyendo una fuente de energía renovable y sustentable.
- **Bombeo de agua:** Se trata de una tecnología de extracción de agua del subsuelo que emplea aero-bombas, cuyos dispositivos mecánicos tipo molino son diseñados para bombeo, con una capacidad de hasta 600 litros por hora.
- **Hidrógeno renovable:** Se obtiene hidrógeno mediante electrólisis alimentada por corriente continua proveniente de energía eólica. Este proceso permite la producción de hidrógeno con bajo impacto ambiental, que puede ser utilizado como elemento energético para el uso de combustibles renovables.

Otra aplicación importante es la desalinización en plantas de agua, las cuales requieren un alto consumo de energía eléctrica, que puede obtenerse mediante energía eólica off-shore. Aunque existen pocos estudios al respecto, se están logrando avances significativos en las tecnologías de desalación y energía eólica [Hernández, 2015].

1.2.1.5. Beneficios y Desventajas de la Energía Eólica

Dado que todo proyecto genera algunas alteraciones en el entorno, es fundamental analizar los efectos medioambientales (ventajas y desventajas), cuya dirección están asociados a un proyecto de generación eólica. A continuación, se presenta una lista de ventajas y desventajas con el fin de evaluar la viabilidad del proyecto [Galván, 2022].

Ventajas:

- No aumenta el efecto invernadero ya que no emite CO₂ (dióxido de carbono).

- No contribuye a la generación de lluvia ácida ni degradación de la capa de ozono porque no emite gases de SO₂ (dióxido de azufre) y NO₂ (dióxido de nitrógeno).
- No se generan cenizas, humos o partículas sólidas de suspensión.
- No ocasiona enfermedades respiratorias.
- Disminuye la dependencia de combustibles fósiles [González, 2012].

Desventajas:

- Producción de componentes requeridos para el parque eólico.
- Costos: monetarios y/o inversiones [Henestroza, 2009].
- Alteración de flora y fauna.
- Contaminación acústica.
- Alta inversión.

1.2.1.6. Aspectos Legales

Según lo indicado en la revista Forbes [Cervantes, 2023], la energía eólica en México presenta desafíos significativos en el ámbito político, ambiental y social. De hecho, la carencia de una legislación especificada o de leyes, ha resultado la falta de obligaciones para que las empresas realicen estudios detallados sobre la viabilidad e implementación de la energía eólica offshore. Desafortunadamente los estudios y el tiempo requieren alta inversión, más aún si se adquieren equipos de otros países debido a la falta de fabricantes en México. En consonancia, la revista destaca la necesidad de establecer condiciones legislativas propicias para incentivar el desarrollo y fabricación de la energía eólica marina en México. También, se resalta la importancia de crear normas técnicas de ajuste al Sistema Eléctrico Nacional (SEN), instalando equipos de medición climáticos de viento en las zonas marinas y ambientales [Cervantes, 2023]. En consecuencia, tomando como referencia los parques eólicos on-shore, el parque eólico marino serviría para realizar ajustes y nuevas regulaciones.

1.3. Justificación

Actualmente, en México la demanda de energía eléctrica va en aumento y el principal generador de energía son las centrales eléctricas, las cuales utilizan derivados del petróleo, agua o energía nuclear. Sin embargo, aunque han sido eficaces para la generación y suministro de energía eléctrica, aún se presentan desafíos notables en relación al cambio climático,

regulaciones, aspectos ambientales y/o sociales. Este consumo de combustibles fósiles provoca ya impactos medioambientales severos, sin tener en cuenta que los derivados del petróleo son cada vez más limitados. Es decir, la producción mundial de petróleo, gas y carbón está llegando a su nivel máximo, provocando limitaciones futuras en su disponibilidad, así como su costo cada vez más alto [Kuo, 2019].

Frente a estos desafíos, las energías renovables como la energía solar y eólica se posicionan como opciones estratégicas y sostenibles para diversificar la producción energética y así reducir las emisiones contaminantes. Estas fuentes aprovechan recursos naturales inagotables y son distribuidos geográficamente, como la radiación solar y los vientos. La energía solar fotovoltaica y la energía eólica son las tecnologías de gran impacto en la generación eléctrica a nivel mundial, debido a su rápida evolución tecnológica, costos decrecientes y gran potencial de implementación en diferentes regiones del país.

En particular, la energía eólica en México ha tenido un gran impacto en proyectos e instalaciones terrestres (on-shore), ya que existen regiones con un alto potencial de vientos a lo largo del país, como Oaxaca, Tamaulipas, Nuevo León, entre otras [AMDEE, 2024]. Esta potencialidad se respalda en datos estadísticos proporcionados por instituciones y organizaciones gubernamentales, como el INEGI, la CFE y la Secretaría de Energía.

Aunque estos parques eólicos terrestres son altamente eficientes y se utilizan ampliamente, enfrentan ciertos inconvenientes, como las alteraciones de la flora y fauna local, la contaminación acústica, su generación es disminuida debido a la reducción del viento por obstáculos naturales como montañas, y el impacto social en las comunidades cercanas. Sin embargo, una alternativa para mitigar algunos de estos problemas y aprovechar de manera más eficiente los recursos eólicos es la energía eólica off-shore, que consiste en la instalación de aerogeneradores en el mar, donde las condiciones de viento son más constantes y fuertes, permitiendo un mejor aprovechamiento del recurso eólico. En este contexto, las regiones con mayor potencial para este tipo de aplicaciones en México son el Golfo de Tehuantepec, el Golfo de California, el Océano Pacífico colindante con la Península de Baja California, la Península de Yucatán, así como las costas de Campeche y Tamaulipas [Tapia, 2023]. No obstante, aunque todas estas regiones presentan un alto potencial, algunas enfrentan restricciones relacionadas con zonas protegidas, cercanía al sistema eléctrico nacional, litigios

legales, entre otras circunstancias. De estas áreas, la región del Golfo de Tehuantepec destaca por su alta eficiencia en recursos eólicos y presenta menores restricciones, convirtiéndose en una de las zonas con mayor posibilidad para el desarrollo de proyectos off-shore en México.

Para el diseño y desarrollo de proyectos de energía eólica marina (off-shore), es fundamental realizar un estudio de factibilidad que considere aspectos técnicos, económicos, operativos y ambientales. Dichos análisis permiten determinar la viabilidad del proyecto desde diferentes perspectivas. Sin embargo, en el presente trabajo de tesis, el enfoque se centra en la evaluación de la factibilidad técnica y operativa, dado que estos estudios requieren de un nivel de profundidad y detalle que corresponden a fases avanzadas de investigación y planificación. La factibilidad técnica contempla aspectos como la caracterización del recurso eólico en el sitio, la selección y evaluación de tecnologías de aerogeneradores, infraestructura de soporte, integración con la red eléctrica y consideraciones de ingeniería civil y marítima. Por su parte, la factibilidad operativa evalúa aspectos relacionados con la logística de instalación, mantenimiento, operación continua y gestión de riesgos, asegurando que el proyecto pueda ser ejecutado y mantenido de manera eficiente y segura en el entorno marino. Además, se consideran estudios de complementariedad energética, los cuales están basados en la recopilación de los estudios realizados por [Peña, 2006]. Por lo tanto en este trabajo de tesis, a partir de los estudios de factibilidad y análisis de complementariedad energética, se realiza la evaluación del aspecto operativo mediante la utilización del software de simulación PSCAD/EMTDC. Esta plataforma permite la modelación detallada de sistemas eléctricos de potencia en el dominio del tiempo, facilitando la simulación de respuestas dinámicas y transitorias del parque eólico marino y su interacción con la red eléctrica. La implementación de simulaciones en diferentes escenarios operativos permite analizar variables como la estabilidad del sistema, la respuesta a perturbaciones, la gestión de la variabilidad en la generación eólica, y la interacción con otros generadores o cargas conectadas en la red.

1.4. Objetivos de la Tesis

1.4.1. Objetivo General

Analizar la factibilidad, el diseño, la configuración, así como la operación en estado estacionario y transitorio de parques eólicos marinos para el suministro eficiente de ener-

gía eléctrica, en regiones identificadas en México con gran potencial y con características adecuadas para realizar dicha instalación y operación práctica.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Identificar las regiones potenciales en México con capacidad eólica para la instalación y puesta en operación de parques eólicos marinos.
- Proponer el diseño, instalación y configuración de un parque eólico marino correspondiente a la región o regiones identificados en México.
- Desarrollar una herramienta digital que permita analizar el comportamiento en estado estacionario y transitorio de parques eólico marinos propuestos.

1.5. Hipótesis

México cuenta con un gran potencial eólico en diversas regiones del país, tanto en tierra como en alto mar. Por ello, la adopción de parques eólicos marinos en las costas mexicanas o en mar abierto es factible desde el punto de vista técnico y operacional. En este contexto, la investigación relacionada con el diseño desarrollado permitirá evaluar la robustez técnica y la capacidad de mantener la estabilidad bajo condiciones de operación adversas, como fallas e interrupciones, entre otras.

1.6. Metodología

1. Se consideró la factibilidad técnica y operacional debido a que la viabilidad técnica permite determinar la configuración del parque y la viabilidad operacional garantiza que dicha configuración pueda ejecutarse y mantenerse de forma segura y eficiente. En cuanto a los estudios ambientales y económicos, requieren análisis de mayor profundidad y, por su naturaleza y exigencias metodológicas, deberían abordarse mediante investigaciones independientes.
2. Se analizó la factibilidad técnica mediante los pasos a seguir de la estrategia descrita en el Capítulo 2.
3. Se realizó una revisión exhaustiva de la información, con base a datos del gobierno de México en instituciones geográficas, ambientales, energéticas, plataformas digitales

especializadas en investigación científica y aplicaciones técnicas, así como portales de divulgación científica y repositorios académicos pertinentes al tema.

4. Se recopiló información de la literatura de la complementariedad energética de la energía eólica cuando se complementa con la energía solar, para evitar utilizar sistemas de almacenamiento para trabajos futuros. Además, estos estudios consideran la ubicación geográfica específica.
5. Se revisó bibliografía y fuentes oficiales como la INEGI, para identificar zonas con un buen recurso eólico. Además, se recopiló la información de mapas de recurso eólico (fuentes satelitales y bases como Global Wind Atlas), mapas de complementariedad energética con la energía solar, redes eléctricas, zonas protegidas y usos pesqueros, para analizar las zonas más viables para instalar parques eólicos marinos en México.
6. Se localizó las zonas con mayor potencial el Golfo de Tehuantepec, el Golfo de California, el Océano Pacífico colindante con la Península de Baja California, la Península de Yucatán, así como las costas de Campeche y Tamaulipas [Tapia, 2023]. Sin embargo, se descartó la mayoría debido a sus restricciones relacionadas con zonas protegidas, cercanía al sistema eléctrico nacional y complementariedad energética con el sol. Quedando el Golfo de Tehuantepec por su alta eficiencia en recursos eólicos y tener menores restricciones.
7. Se revisó bibliografía como la de [Galván, 2022], en donde las coordenadas de la autora se usan como zona de partida por su cercanía a costa y menor uso pesquero, pero el área se podrá ajustar en etapas siguientes, debido a en la parte técnica: las plataformas flotantes como las semisumergibles requieren holguras específicas de amarres y maniobra que limitan el número práctico de unidades; a la parte económica: la inversión por unidad en tecnologías es elevada en etapas tempranas, lo que favorece proyectos de menor escala; y la parte ambiental: minimizar el espacio reduce impactos en hábitats marinos y facilita el cumplimiento de requisitos ambientales y de monitoreo.
8. Se recopiló la información de la velocidad del viento de las coordenadas de la autora [Galván, 2022], así como las velocidad y oleaje ocasionado por los ciclones.
9. Se analizó las profundidades mediante la recopilación de la información de la batimetría

en la zona, para determinar el tipo de cimentación. Esto último es necesario para el soporte del peso de las turbinas. Además, la importancia de verificar el tipo de cimentación, radica en la profundidad del mar en la localidad, no se puede colocar, por ejemplo un Tipo Jacket a una profundidad mayor de 50 metros, debido a la altura, o no se puede colocar una plataforma flotante en menor de 50 metros porque estas están diseñadas especialmente para grandes profundidades.

10. Se evaluó las opciones de anclaje y líneas de amarre, considerando preferentemente a las semisumergibles (WindFloat), debido a su estabilidad en el mar.
11. Se consideró las turbinas Vestas 164 porque son las que se manejan en los tipos de plataformas semisumergibles, y porque soportan la velocidad del viento generado por los ciclones.
12. Se consideró un área de 6 km² debido a que las plataformas semisumergibles requieren holguras específicas de amarres y maniobra que limitan el número práctico de unidades; a la parte económica: la inversión por unidad en tecnologías es elevada en etapas tempranas, lo que favorece proyectos de menor escala; y la parte ambiental: minimizar el espacio reduce impactos en hábitats marinos y facilita el cumplimiento de requisitos ambientales y de monitoreo. Además que se toma como ejemplos parques eólicos puestos en marcha, como el Kincardine y el WindFloat Atlantic.
13. Se calculó el número de turbinas mediante el diámetro de las turbinas Vestas 164, el área de la ubicación, y el área que ocupa cada turbina.
14. Se dimensionó el espaciamiento (por ejemplo 820 m entre cada turbina) y la disposición (como la lineal).
15. Se seleccionó tensiones inter-array (p. ej. 66 kV, de acuerdo a Hoja de datos de la turbina), así como los arreglos inter-array. Y se seleccionó el tipo de cable de exportación. En este caso, el HVAC es para distancias cortas al litoral, menores de 15 km y el HVDC para distancias mayores a 15 km. Así como se identificó la conexión con los cables de transmisión, en este caso de Salina Cruz. Y se estimó la longitud del cable de exportación.

16. Se analizó la Factibilidad operacional, mediante el modelado en PSCAD/EMTDC® para validar el comportamiento en estado estacionario y transitorio. Se analizó el tiempo que tarda en estabilizarse ante fallas y después del arranque.

1.7. Contribuciones

- En México aún no se han realizado proyectos de parques eólicos marinos y, además, se cuentan con pocos informes o estudios de factibilidad para poder realizar este tipo de trabajos. Por lo que en esta tesis se proporcionará información detallada sobre el análisis del potencial que se dispone para implementar plantas eólicas en las costas mexicanas. Es decir, se realiza un estudio de la viabilidad técnica mediante técnicas de pronóstico o complementariedad energética (dependiendo de la alternativa seleccionada) para evaluar el potencial energético.
- Se consideran estudios necesarios de batimetría y se analizan los componentes para brindar el conocimiento de la ubicación con el mejor potencial eólico en el mar de México y así mismo, facilitar una configuración confiable del parque.
- Se propone un modelo de parque eólico marino, desarrollado en PSCAD/EMTDC®, mediante la implementación de casos de estudios de análisis que permiten evaluar su comportamiento en condiciones en estado estacionario y transitorio, con el objetivo de profundizar en el entendimiento de los fenómenos dinámicos y estáticos que afectan la operación y estabilidad del sistema en dichas condiciones.

1.8. Descripción de los Capítulos

El Capítulo 1 ilustra un panorama general de la creciente demanda de energía en México y en el mundo, así como la solución a este problema podría ser las energías alternas (en específico la energía eólica), lo que también podría disminuir el uso de fuentes convencionales contaminantes. También, se hace énfasis de los compromisos en México para disminuir las emisiones de CO₂. Se da una breve introducción del historial de parques eólicos y la capacidad de generación de potencia a través de los años. Se redacta de manera general la generación eólica en México y la generación eólica terrestre y marino en el mundo, es decir, algunos de los países con mayor distribución de potencial eólica. Se hace referencia de algunas aplicaciones, beneficios y desventajas de utilizar la energía eólica. Por último, se

exponen los objetivos principales de la tesis, su justificación, su metodología y se describen los capítulos de que está constituida la tesis.

El Capítulo 2 describe la factibilidad y las técnicas de pronóstico para el diseño de parques eólicos marinos en México. Se analizan algunas técnicas o métodos posibles para evaluar el potencial energético con base a series de tiempo para determinar la factibilidad de la instalación de una unidad de generación eólico marino. También, se describen los estudios de complementariedad energética como alternativa para determinar el potencial energético.

El Capítulo 3 estudia y analiza el potencial, y se establece la ubicación y la configuración del parque eólico marino en México. Es decir, se postulan las ubicaciones con un potencial aprovechable a través de estudios de complementariedad energética y mediante estudios de batimetría, determinando los componentes y la configuración de los parques.

El Capítulo 4 presenta y analiza a través del simulador PSCAD/EMTDC® la operación en estado estacionario y transitorio de un parque eólico marino. Realizando 6 casos de estudio: operación en estado estacionario, operación en estado transitorio, falla monofásica a tierra en la línea de distribución, falla trifásica a tierra en la línea de distribución, operación conectada a un bus infinito y falla trifásica cercana al bus infinito.

El Capítulo 5 argumenta las conclusiones generales obtenidas de la presente investigación y se sugieren actividades para el desarrollo de trabajos futuros relacionados con el campo del conocimiento presentado en esta tesis.

Capítulo 2

Factibilidad y Técnicas de Pronóstico para el Diseño de Parques Eólicos Marinos en México

2.1. Introducción

En los estudios y análisis de factibilidad de parques eólicos marinos, es fundamental considerar aspectos clave como la factibilidad técnica, operacional, ambiental y económica. Estos aspectos se describen con mayor detalle posteriormente. No obstante, en la presente tesis se abordan estudios de factibilidad técnica y operacional. Esto último debido a que la factibilidad técnica permite definir la configuración del parque, y la factibilidad operacional garantiza que esa configuración sea ejecutable y mantenible de manera segura y eficiente. Por el contrario, los estudios ambientales y económicos (aunque también son necesarios), constituyen trabajos de gran extensión y profundidad que, por su naturaleza y requisitos metodológicos, justificarían investigaciones independientes. Por lo que se realiza inicialmente la indagación de mapas energéticos registrados mediante mediciones satelitales y una indagación de estudios de complementariedad energética para determinar el potencial energético, y así mismo obtener la planeación, diseño y operación de parques eólicos marinos en México.

En términos técnicos, el potencial energético de un sitio se caracteriza mediante la evaluación de la factibilidad técnica, empleando herramientas analíticas detalladas en

este capítulo. Esto debido a la importancia de la identificación de los sitios potenciales que proporcionan condiciones óptimas para la instalación del parque eólico.

2.2. Factibilidad

La determinación de la factibilidad para realizar un proyecto, incluyendo su diseño e implementación, consiste en analizar la viabilidad técnica, económica, operativa y ambiental del mismo [Kendall y Kendall, 2005]. Un proyecto se considera factible cuando estos aspectos se valoran positivamente, conforme a las cuatro dimensiones principales de análisis de factibilidad previamente identificadas descritas a continuación: técnica, operacional, económica y ambiental. Por lo tanto, un proyecto es eficiente en función de la viabilidad demostrada en estos cinco aspectos, ya que el estudio de la factibilidad proporciona información importante para facilitar su instalación y su puesta en operación. A continuación se describen la factibilidad técnica y operacional, ya que son los aspectos más importantes en esta tesis.

2.2.1. Factibilidad Técnica

Este aspecto consiste en determinar si los recursos técnicos actuales son óptimos o necesarios para cumplir con los requisitos específicos en consideración [Kendall y Kendall, 2005]. En adición, esta viabilidad comprende recursos complementarios necesarios como instrumentos, conocimientos, habilidades y/o experiencia, para realizar las actividades o procesos específicos del proyecto. Además, se deben evaluar los elementos tangibles para determinar si son adecuados o si se deben agregar aún más elementos [Peña, 2006]. Por ello, en esta tesis es fundamental la factibilidad técnica, ya que permite analizar variables como la velocidad y dirección del viento, la batimetría de la zona marina, entre otras.

2.2.2. Factibilidad Operacional

Este estudio se determina en la disponibilidad de los recursos adecuados y competentes para su ejecución, lo que implica la eficiente operación del sistema y que pueda ser éste utilizado. Dicho de otro modo, la factibilidad operacional estudia múltiples activida-

des y procesos de un proyecto que están en función o dependen de herramientas técnicas adecuadas [Kendall y Kendall, 2005]. Por ejemplo, en este trabajo los materiales serían los componentes de un parque eólico y sus diversas configuraciones en PSCAD/EMTDC[®], para posteriormente analizar su viabilidad y operación en estado estacionario y transitorio.

A continuación se establecen puntos importantes para evaluar y aumentar la factibilidad de establecer y diseñar parques eólicos en altamar en México. Dicha estrategia considera la factibilidad técnica y operacional, y, adicionalmente, para trabajos futuros se menciona brevemente la ambiental y la económica. El enfoque consta de las siguientes etapas:

Aspecto Técnico:

- **Localización de sitios con potencial eólico.** Con técnicas de análisis y predicción de series de tiempo o mapas satelitales y estudios de complementariedad energética.
- **Comparación con otros mapas.** Comparar los lugares ubicados que disponen de gran potencial eólico, con mapas que indiquen la existencia de una red o subestación eléctrica cercana a la costa y mapas que muestran las zonas que están protegidas.
- **Velocidad del viento por medio de plataformas.** Se considera la velocidad del viento, que te proporciona plataformas en línea, a una altura desde la superficie marítima hasta la góndola de la turbina, y se utilizan los datos obtenidos en un software.
- **Dirección del viento.** Se investiga la dirección de la velocidad del viento a través de la “Rosa de los vientos”, para analizar la manera de colocar las turbinas.
- **Ciclones.** Conociendo las rachas y las velocidades máximas que se dan en el viento a causa de ciclones, se selecciona el modelo de turbina que soporte dichos vientos.
- **Batimetría.** Mediante la batimetría podemos analizar la profundidad que existe en las regiones a estudiar. Una vez detectado el nivel, se escogen las opciones más viables para utilizar el tipo de cimentación para la turbina.
- **Modelos de turbinas.** Conociendo las velocidades más comunes y los provocados por ciclones, se analiza los catálogos de los aerogeneradores. Estos últimos proporcionan información sobre las velocidades del viento en las que trabaja y llega a soportar.
- **Tipo de cimentación.** Dependiendo del nivel del mar, se considera si son superficiales o plataformas flotantes.

- **Configuración de las líneas de amarre y el tipo de anclaje.** En caso de utilizar plataformas flotantes, se analiza las líneas de amarre y el tipo de anclaje más óptimo.
- **Lecho marino.** En caso de requerir plataformas flotantes, se analiza el lecho o subsuelo marino para escoger el tipo de anclaje más factible.
- **Distancia del parque eólico a la costa y tipo de cable de exportación.** Para distancias menores a 50 kilómetros se establecen enlaces de Corriente Alterna de Alto Voltaje (HVAC, por sus siglas en inglés). Por el contrario, mayores a 50 kilómetros se utiliza la Corriente Continua en Alto Voltaje (HVDC, por sus siglas en inglés) [Trashorras, 2015].
- **Barlovento o Sotavento.** En estas, el rotor se orienta en cara contra el viento y a favor del viento, respectivamente.
- **Área y número de turbinas.** Se identifica el diámetro del área de barrido para determinar el área disponible por cada máquina. Y, junto con el área del entorno del parque eólico establecido, se calcula el número máximo de turbinas que se necesitarán.
- **Disposición entre turbinas.** Es la distribución de las turbinas en el parque eólico.
- **Sistema de interconexión interna.** Será necesario seleccionar la topología que se adapte al tipo de disposición entre turbinas seleccionado. Elegir el más factible depende de la distancia entre aerogeneradores, el número de turbinas y la profundidad del mar.
- **Conexión a una subestación en tierra o en altamar.** Por un lado, se necesita subestaciones marinas para las plantas de gran potencia y muy alejadas de la costa, y, por otro lado, se utilizan en tierra para parques que estén cercanos al litoral.

Aspecto operacional: Establecido el o los diseños de los parques eólicos, se realiza un análisis operacional mediante herramientas especializadas de simulación como PSCAD/EMTDC[®], para analizar su comportamiento en estado estacionario y transitorio. Se examina la estabilidad transitoria de la o las plantas de generación eólica ante posibles fallas en la red. En otras palabras, se determina la capacidad del diseño de los parques para recuperar su estabilidad, identificando el periodo de tiempo en el que se reestablecen los valores instantáneos de los voltajes y corrientes. Con base a los resultados, se evalúa la viabilidad operacional de las configuraciones propuestas de las instalaciones eólicas, para validar si el diseño cumple con los requisitos de estabilidad y confiabilidad.

Aspecto ambiental: Existe una importante diferencia entre lo que serían las “energías renovables” y “las energías limpias”. Las primeras se refieren a energías provenientes de fuentes naturales inagotables, o por lo menos no se extinguirán en un futuro previsible. Y las segundas se refieren a aquellas en el que durante la producción de energía genera una considerablemente menor cantidad de contaminación en comparación con otras, como las derivadas de combustibles fósiles. La generación de energía eólica considera dos aspectos, es decir, es considerada renovable y limpia. Sin embargo, como sucede en cualquier otra actividad o acción humana, ejerce un impacto en el entorno, cuya magnitud depende de la fragilidad ecológica del área afectada. Por lo que, como se ha desarrollado en algunos países, se realiza un informe de impacto ambiental para permitir que el proyecto se lleve a cabo.

En México, el 28 de diciembre de 2006, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales estableció en el Diario Oficial el “Proyecto de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-151-SEMARNAT-2006”, que establece las especificaciones técnicas para la protección del medio ambiente durante la construcción, operación y abandono de instalaciones eoloe-léctricas en zonas agrícolas, ganaderas y eriales; en donde se menciona que el responsable debe de presentar un Informe Preventivo en sustitución de una Manifestación de Impacto Ambiental en los términos del marco jurídico vigente. Recordando que una Manifestación de Impacto Ambiental (MIA) es un informe que en México se solicita por parte de la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Medio Ambiente (LGEEPA) a todos los proyectos que pueden generar consecuencias ambientales. Dicho documento describe y caracteriza los componentes del sistema ambiental del área y cómo puede ser afectada cuando se construye y opera el proyecto del parque eólico. Es decir, recopila información sobre incorporar un proyecto al ambiente y, además, plantea medidas para mitigar el impacto y estrategias para la protección del hábitat [Zárate y Fraga, 2016]. Un Informe Preventivo es un documento en donde se presentan los datos generales de una obra o actividad, indicando si se ajustan a las condiciones especificadas por el artículo 31 de la Ley; de no ser así, el proyecto tendrá que ser evaluado por una Manifestación de Impacto Ambiental, que por lo general, son realizados por biólogos o especialistas.

Aunque la norma sea establecida para zonas agrícolas, ganaderas y eriales, y como no existen alguna para regiones marítimas en el caso de parques eólicos, podría de igual

manera realizar un Informe Preventivo y/o una MIA. De hecho, realizar uno estaría vinculado con la SEMARNAT para que el proyecto pueda ser aprobado. Otro aspecto importante para diseñar e instalar un parque eólico en altamar de manera más factible, sería ubicando por medio de mapas, las zonas que estén protegidas. Y, además, que no estén cerca de ubicaciones de pesca para no generar un impacto social. Lo cual, se aborda en el Capítulo 3 de la presente tesis, donde se determinará la zona más viable para la instalación del parque eólico marino.

Aspecto económico: Con base a especificaciones técnicas de los aerogeneradores, resultados adquiridos del recurso eólico y datos de costos de instalación, se establece el estudio económico mediante el método de la Tasa Interna de Retorno. Es decir, para evaluar económicamente un proyecto de parques eólicos, se calcula los costos del kilowatt instalado y kilowatt-hora nivelado a través de los siguientes datos, [Peña, 2006, de Gobernación, s.f.]:

- Año del comienzo de la construcción; año de la finalización de la construcción. Información proporcionada por Iberdrola la duración es alrededor de 7 y 11 años.
- Año del comienzo de la operación.
- Vida útil del proyecto, que es aproximadamente 25 años.
- Flujo de inversión útil para un año, varía en cada proyecto.
- Generación media anual, varía en cada proyecto.
- Potencia total instalada, varía en cada proyecto.
- Costo de operación y mantenimiento, varía en cada proyecto.
- Otros costos de desarrollo y planeación.
- Tasa anual de descuento.
- Producción de electricidad y pérdidas de energía.

Por lo tanto, en esta tesis se evalúa la factibilidad técnica y operacional. En general, se realizará el diseño y estudio de la operación en estado estacionario y transitorio del parque eólico marino implementado en el simulador PSCAD/EMTDC®.

2.3. Determinación de Potencial Energético

Para obtener energía eléctrica en una planta eólica, es necesario que los aerogeneradores puedan convertir la energía cinética generada por corrientes de viento de gran magnitud en energía mecánica y, posteriormente, en la energía deseada. Sin embargo, debido a que el comportamiento de la velocidad del viento es variable a lo largo del año, es

necesario utilizar estudios para determinar el potencial energético en varias ubicaciones, y así poder identificar las zonas más factibles y con suficiente viento para establecer parques eólicos marinos. La forma de realizar dichos estudios para evaluar el potencial energético de una región específica, con miras a la planificación, diseño e instalación de un parque eólico marino, es mediante una alternativa que se ha aplicado en los últimos años, la cual consiste en estudios de complementariedad energética que utilizan mapas energéticos registrados mediante mediciones satelitales. De hecho, con esta opción se pueden complementar aspectos del terreno, zonas protegidas y otros.

En este trabajo, para determinar la ubicación y el potencial energético aprovechable para la planeación, diseño e instalación de un sistema de parques eólicos marinos en México, se recurre a cartografía y estudios publicados (mapas satelitales y trabajos sobre complementariedad energética). Los estudios de complementariedad energética se incorporan con el fin de evaluar la viabilidad de reducir o evitar la necesidad de sistemas de almacenamiento y, simultáneamente, de analizar configuraciones híbridas. En relación, en este trabajo se incluye la revisión y recopilación de la información sobre sistemas híbridos eólico-solar con miras a trabajos futuros, dado que ambos recursos son abundantes en México. A continuación, se describe dicha complementariedad energética y se exponen ecuaciones, así como los conceptos conceptuales para su interpretación, sin aplicar nuevos procesos de medición.

2.3.1. Estudios de Complementariedad Energética.

El uso de recursos renovables para la generación de la energía eléctrica ha estado creciendo con el paso del tiempo, esto es debido a las ventajas que se tiene en comparación al uso de los derivados del petróleo [Roldán *et al.*, 2014]. Un ejemplo claro de estos recursos es el sol y el viento. Sin embargo, el comportamiento de estos elementos es estocástico y, por lo tanto, no son gestionables, por lo que no pueden abastecer de manera correcta la demanda de los consumidores [Joskow, 2011]. Además, una vez que los recursos fotovoltaicos y eólicos se conectan a las redes eléctricas, es importante tomar en cuenta sus diversos patrones de generación y reducir cualquier impacto negativo que puedan ocasionar. Según [Gallardo *et al.*, 2020] algunas soluciones encontradas en la literatura especializada para abordar el problema de variabilidad de los recursos renovables son: sobredimensionar los sistemas de generación, utilizar sistemas de almacenamiento de energía, ubicar múltiples

sistemas distribuidos en una amplia región, prever la demanda y la generación, tener cargas viables y flexibles en términos de consumo, y utilizar dos o más fuentes de energía que se complementen entre sí.

Ahora, si se quiere instalar un parque de generación de energía eléctrica mediante recursos renovables y se quiere evitar el alto costo al utilizar sistemas de almacenamiento de energía, se debe de tener conocimiento de la cantidad del recurso disponible, la región donde es más factible instalar, y examinar que la generación de un tipo de energía renovable complemente la generación de otro tipo. Es por ello que actualmente son más importantes los estudios de complementariedad energética. Por lo que, para el presente trabajo, es la alternativa ideal como caso de estudio y así poder verificar el potencial para la instalación de un parque eólico marino en cierta zona de México y con ello reemplazar la opción de utilizar las técnicas de pronóstico basadas en series de tiempo. La complementariedad se puede observar en el tiempo, espacio y conjuntamente en ambos dominios. Estos tipos se pueden definir de la siguiente manera [Gallardo *et al.*, 2020, Jurasz *et al.*, 2020]:

- *Complementariedad espacial.* Puede ser observada entre uno o más tipos de fuentes de energía. Dichas fuentes se complementan entre sí en una región amplia. Es decir, las fuentes de generación pueden estar distribuidas en la región, y cuando el recurso es escaso en una zona, podría ser abundante en otra, de tal manera que se complementan entre sí. El efecto suavizador de los generadores eólicos distribuidos espacialmente, puede ser un claro ejemplo de complementariedad espacial. En este caso, al aumentar la distancia entre los sitios, las tendencias de producción de energía muestran un coeficiente de correlación decreciente.
- *Complementariedad temporal.* De igual manera, este tipo puede observarse entre dos o más fuentes de energía en la misma región. No obstante, en este caso, se refiere a que la disponibilidad de los periodos de las fuentes de energía renovable es complementaria en el dominio temporal. En otras palabras, es aquella que se observa en la misma región y periodo específico, tal como, durante un año o una estación. Por ejemplo, en Europa se dispone de un comportamiento anual de energía eólica, que es abundante en otoño e invierno; y de energía solar, que se manifiesta más en primavera y verano.
- *Complementariedad espacio-temporal.* En la complementariedad en el tiempo y el es-

pacio también se toma en cuenta una o varias fuentes de energía, en donde la complementariedad es analizada de manera simultánea en los dominios del tiempo y el espacio. Un claro ejemplo es el caso del sistema eléctrico brasileño y sus recursos hidroeléctricos, que dan lugar a la interconexión de los subsistemas del sur-sureste y norte-noreste.

En el contexto de esta investigación, se presentará en secciones adelante los estudios de complementariedad energética temporal de los recursos eólicos y solares en México para identificar áreas en la que es factible instalar sistemas de generación híbridos eólico-solar, y que complementen su generación a lo largo de un año. También se presentará factores importantes para el análisis de la viabilidad de la instalación, como las áreas protegidas y la proximidad a los sistemas de transmisión. De esta manera, se podrá determinar las ubicaciones potenciales en México para instalar parques eólicos marinos.

2.3.1.1. Evaluación de la Complementariedad Energética.

La evaluación de la complementariedad energética entre varios recursos se ha llevado a cabo a través de índices o análisis estadísticos. En otras palabras, se utilizan *coeficientes de correlación*, que miden la dependencia lineal entre dos variables distribuidas aleatoriamente usando análisis estadístico [Gallardo *et al.*, 2020]. Por ejemplo, ¿a qué se refiere *coeficiente de correlación*?, para definir su significado, se describen a continuación algunos términos estadísticos como la covarianza, y se presentarán las ecuaciones correspondientes.

La covarianza es un indicador que mide el nivel de variación conjunta de dos variables aleatorias, asimismo, determina si existe dependencia entre ambas variables. Por otro lado, la correlación es una métrica que cuantifica cómo están relacionadas linealmente las variables, y es la medida más utilizada de la dependencia entre dos variables distribuidas aleatoriamente [Carmona, 2014, Moreno, 2018]. Matemáticamente, la covarianza es definida de la siguiente manera [Lalinde *et al.*, 2018],

$$Cov(x, y) = E[(x - \mu_x)(y - \mu_y)]. \quad (2.1)$$

donde

E : Operador de la esperanza matemática o valor medio.

μ_x, μ_y : Medias poblacionales de x y y respectivamente

si se reemplaza y por x se obtiene la forma

$$Cov(x, x) = \sigma_{xx} = \sigma_x^2 = Var(x) = E[(x - \mu_x)(x - \mu_x)] = E(x - \mu_x)^2 \quad (2.2)$$

en caso contrario, si se reemplaza x por y obtenemos la siguiente expresión

$$Cov(y, y) = \sigma_{yy} = \sigma_y^2 = Var(y) = E[(y - \mu_y)(y - \mu_y)] = E(y - \mu_y)^2 \quad (2.3)$$

Al obtener la covarianza de una variable con esa misma variable se obtiene lo que se denomina como *varianza*. Si X y Y son continuas o discretas, la ecuación (2.1) se puede escribir como:

$$Cov(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu_x)(y - \mu_y) f_{xy} dx dy \quad (2.4)$$

$$Cov(x, y) = \sum_x \sum_y (x - \mu_x)(y - \mu_y) f_{xy} \quad (2.5)$$

donde,

f_{xy} : Es la función de probabilidad conjunta.

Es importante notar que si los valores x y y ambos son mayores o menores que las medias poblacionales en el producto $(x - \mu_x)(y - \mu_y)$, la covarianza tendrá signo positivo. Al contrario, si x es mayor que su media poblacional y y es menor que su media o viceversa, la covarianza tendrá signo negativo. Eventualmente, las variables individuales x y y tienen una varianza alta. Esto quiere decir que experimentan cambios significativos en sus valores. Además, si las variables se relacionan entre sí, puede ser que la covarianza entre ellas también sea alta. No obstante, la covarianza suele ser difícil de interpretar directamente, debido a que se influye por las unidades en las que se mide cada variable. Y en ocasiones, suele suceder que x e y tengan diferentes unidades [Hernández, 2006]. Para comprender de manera más adecuada la relación entre las variables sin ser influenciado por las unidades de medida, se emplea el coeficiente de correlación. La correlación entre dos variables aleatorias x e y se determina de la siguiente manera [Hernández, 2006, Lalinde *et al.*, 2018]:

$$\rho_{xy} = \frac{Cov(x, y)}{\sqrt{E(x - \mu_x)^2 * E(y - \mu_y)^2}} = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} \quad (2.6)$$

donde

σ_x : es la desviación estándar de x

σ_y : es la desviación estándar de y

En (2.6) las unidades del numerador se cancelan con las del denominador, ocasionando el adimensionamiento de σ_{xy} [Lalinde *et al.*, 2018]. Se mencionó anteriormente, que los coeficientes de correlación se han utilizado para evaluar la complementariedad energética, ya que miden la dependencia lineal entre dos variables distribuidas aleatoriamente. A continuación, se presentan algunos de los coeficientes más utilizados.

Coeficientes para el Cálculo de la Complementariedad Energética. Existen distintos modelos de coeficientes para el Cálculo de la Complementariedad energética. El más simple es el Coeficiente de Correlación de Pearson (PCC, por sus siglas en inglés), y su derivado el Coeficiente de Correlación de Pearson Negativo (NPCC, por sus siglas en inglés). Asimismo, en la literatura se han encontrado otros modelos descritos de la siguiente manera [Jurasz *et al.*, 2020, Gallardo *et al.*, 2020]:

- El Coeficiente de Correlación de Kendall es llamado también como Tau de Kendall y se denota por el símbolo τ . Este evalúa la relación o dependencia de rango entre dos conjuntos de variables aleatorias y como medida no paramétrica [Carmona, 2014].
- Coeficiente de Correlación de Rango de Spearman (SRCC, por sus siglas en inglés). Es una medida de dependencia de rango [Myers y Well, 2003]. En otras palabras, para calcular el Coeficiente de Correlación de Pearson, las variables deben ser transformadas a través de sus funciones de distribución acumulativas marginales univariantes (CDF, por sus siglas en inglés) [Ruppert y Matteson, 2015].
- Análisis de Correlación Canónica (CCA). Es una técnica estadística multivariante desarrollada en 1930, en el cual es utilizada para identificar posibles vínculos entre conjuntos de múltiples variables dependientes y múltiples variables independientes [Santos-Alamillos *et al.*, 2015]. Es decir, el CCA trata de estimar de manera simultánea el valor de múltiples variables dependientes a partir de un conjunto de variables independientes que se disponen. Esto lo realiza mediante funciones ponderadas de tal manera que se maximice la correlación entre dos conjuntos [Santos-Alamillos *et al.*, 2012].

- Correlación Cruzada (CC, por sus siglas en inglés). Es una medida de similitud, ya que compara dos series de componentes de una serie temporal multivariante estacionaria, donde existe una similitud retrasada [Li *et al.*, 2009, Ruppert y Matteson, 2015]. Los valores de la correlación cruzada se obtienen a partir de la correlación de Pearson entre la serie temporal y su copia desplazada en el tiempo, y varían entre -1 a 1.

Una descripción más detallada de los coeficientes se describe en [Jurasz *et al.*, 2020]. En este sentido, la evaluación de la complementariedad energética ha cobrado mayor importancia con la pauta de incrementar el uso de energías renovables en las redes eléctricas nacionales, de tal manera que prevalezca la confiabilidad y se optimice los recursos financieros disponibles [Jurasz *et al.*, 2020]. En la siguiente sección, se presenta la descripción del PCC, el cual, ha sido utilizado por muchos investigadores por su simplicidad y confiabilidad.

Coefficiente de Correlación de Pearson. En 1895 Pearson dio a conocer matemáticamente el siguiente coeficiente:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 * \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2.7)$$

donde

n : tamaño de la muestra

x_i : mediciones de la variable x

y_i : las mediciones de la variable y

$\bar{x}$: el promedio de la variable x

$\bar{y}$: el promedio de la variable y

El PCC, también llamado Coeficiente de Correlación Simple, es una covarianza estandarizada por la desviación estándar de las dos variables comparadas [Salazar, 2000]. Y tiene como propósito medir la relación entre dos variables, entregando valores en un rango entre -1 y +1. De modo que si el valor es cero indicará que no hay relación entre las variables; por otro lado, si el valor es 1 significa que para cada aumento en la variable x , hay un aumento en la variable y ; por último, para un valor igual a -1 quiere decir que para cada aumento en la variable x , hay una disminución en la variable y , y viceversa [Dagnino, 2014, Gallardo *et al.*, 2020, Salazar, 2000]. Dentro del contexto de la complementariedad energética, un valor

positivo indica que entre dos recursos en una región hay una complementariedad total; un valor negativo significa que mientras un recurso aumenta, el otro disminuye en una misma región, resultando una baja complementariedad energética; y un valor igual a cero quiere decir que no hay asociación entre los recursos [Gallardo *et al.*, 2020].

Un aspecto importante a considerar para aplicar (2.7) y analizar la complementariedad energética entre dos recursos, es el hecho de conocer los valores disponibles de estos en la zona a examinar. Para ello, se utilizan las mediciones de las estaciones meteorológicas establecidas en toda la localidad o a través de mapas de alta resolución utilizando técnicas de procesamiento de imágenes como en la literatura encontrada de un estudio de complementariedad energética en México [Gallardo *et al.*, 2020] y en Colombia [Peña, 2006]. De hecho, México dispone de información sobre el potencial energético en distintas regiones; un ejemplo es en las cercanías de la costa del estado de Oaxaca, en donde las velocidades del viento en mar adentro de 24, 664 km^2 de distancia, son mayores a 8.5 m/s con un promedio de 12.12 m/s a 150 m de altura [GWA, s.f.].

En la Sección 3.2.1 se presentan los argumentos analizados por [Gallardo *et al.*, 2020], en donde se utiliza el NPCC para evaluar la complementariedad entre los recursos solares y eólicos para la generación de electricidad en México. En la investigación se seleccionó dicho coeficiente debido a que permite, a partir de las mediciones de los recursos solares y eólicos, realizar análisis estadísticos y determinar regiones en las que ambos recursos se complementan entre sí. Cabe recordar que, en este trabajo, se lleva a cabo el análisis para la instalación de parques eólicos marinos; no obstante, se incorpora información sobre la energía eólico-solar que pueda reducir o evitar la necesidad de sistemas de almacenamiento.

2.4. Conclusiones

La alternativa para determinar el potencial energético eólico es mediante estudios de complementariedad energética, debido a que el viento es estocástico, y se evitaría emplear sistemas de almacenamiento. En estos estudios, se utilizan el coeficiente de correlación. De hecho, en la literatura se han encontrado diferentes coeficientes que han utilizado algunos autores; el más simple y confiable es el PCC.

De hecho, la solución más recomendable para determinar el potencial energético

eólico marino es mediante estudios de complementariedad energética, debido a que al utilizar dos variables: solar y eólico, beneficiaría y evitaría colocar sistemas de almacenamiento de energía en posible trabajos futuros, ya que son costosos. Además, la recopilación de información para estos estudios servirían no solo a determinar las regiones con mayor complementariedad de dos fuentes de energía, si no que, a través de algunos mapas, se podrá visualizar otros aspectos como las regiones protegidas, los lugares en donde están localizadas las líneas de transmisión en México o incluso las zonas en donde hay cimentaciones petroleras, entre otros aspectos.

Por otra parte, se describió una estrategia general para analizar la factibilidad de la instalación de parques eólicos marinos en México, requiriendo los cuatro aspectos para valorar su viabilidad. En este contexto técnico, se tomará como base los estudios de complementariedad energética para la determinación del potencial energético, que se verá en el Capítulo 3.

Capítulo 3

Determinación de Ubicación y Configuración de Parques Eólicos Marinos en México

3.1. Introducción

Según la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), México cuenta con una extensión territorial de 1,964,375 km², situado en el lugar 14 entre los países más extensos del planeta, según la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Además, el territorio insular ocupa 5,127 km² y con 231,813 km² de mar territorial. Mientras que, los estados costeros disponen de 7,828 km de acceso al Océano Pacífico y Golfo de California; y las entidades del Golfo de México y Mar Caribe comparten 3,294 km de región costera [INEGI, 2000, SEMARNAT, 2018]. Por ejemplo, México se encuentra ubicado en las coordenadas 23.6345°N, 102.5528°O [Geodatos, s.f.], cuya localización permite al viento desplazarse a una velocidad adecuada para la generación de energía eléctrica a través de parques eólicos. De hecho, como se abordó en el Capítulo 1 de la presente tesis, según la AMDEE, en México existen 13 estados que tienen parques eólicos en tierra (onshore) con producción de energía anual de aproximadamente 20,319 y 765 MWh. Convirtiéndolo en un país con un gran potencial eólico. Incluso, en alta mar, se dispone con varias zonas marítimas en donde el viento es muy recurrente, como se muestra en la Figura

3.1, en donde las zonas rojas y moradas muestran la velocidad media del viento aproximadamente entre 6.70 a 12 m/s, las amarillas son alrededor de 5.30 m/s y las zonas azules corresponde a menos de 3 m/s. La ilustración fue extraída de Global Wind Atlas (GWA), una aplicación consultada para la planificación e identificación de los vientos más fuertes para la generación de energía eléctrica a partir de recursos renovables como fuentes eólicas.

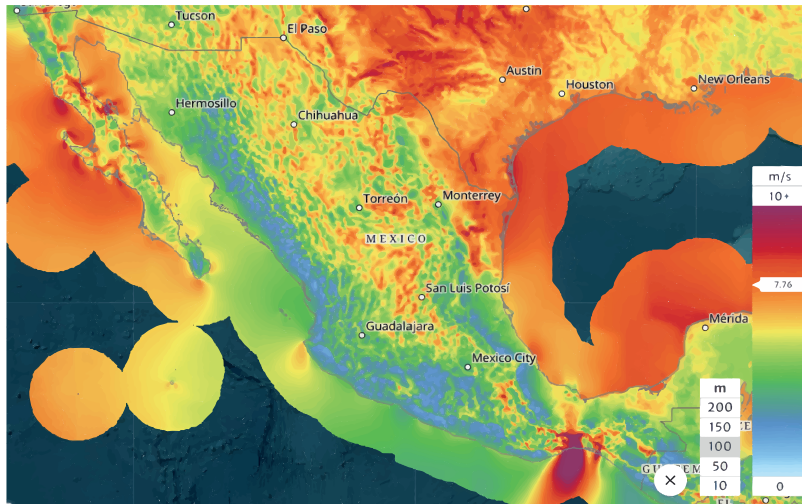


Figura 3.1: Velocidad media del viento en México [GWA, s.f.]. Imagen tomada el 27 de septiembre de 2024

En coherencia con el uso de los mapas satelitales de GWA, se dispone también de los mapas interactivos elaborados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). La Figura 3.2 presenta el mapa de velocidad del viento anual en México, según los datos estadísticos y mapas modificados descritos en [INEGI, s.f.].

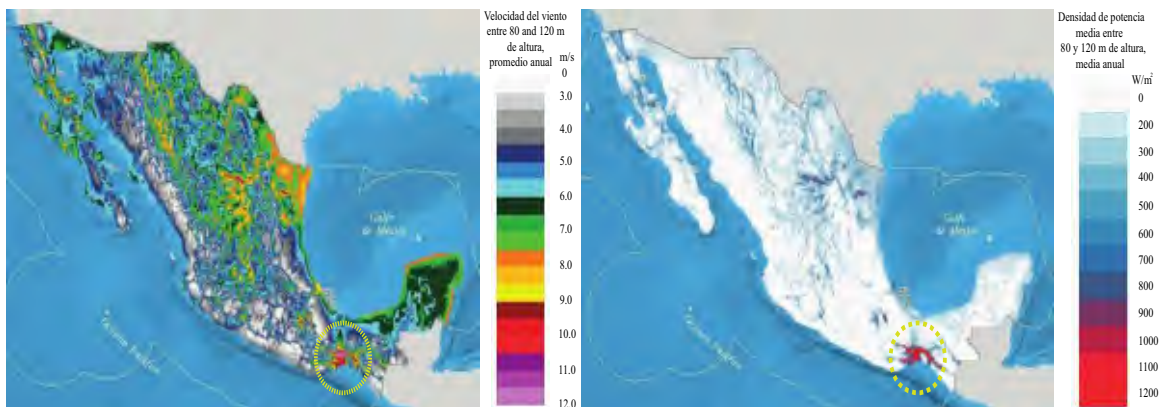


Figura 3.2: Mapas del potencial eólico en México (promedios anuales): (a) Velocidad del viento entre 80 y 120 m, (b) Densidad de potencia (cantidad de energía por unidad de volumen) entre 80 y 120 m [INEGI, s.f.]. Con edición propia.

Las regiones con mayor potencial para la explotación de los recursos eólicos se indican con contornos amarillos discontinuos. Por ejemplo, la Figura 3.2a muestra el mapa que indica la región con el índice de velocidad del viento más alto a altitudes entre 80 y 120 m, mientras que la Figura 3.2b ilustra el mapa de densidad de potencia a altitudes alrededor de 80 y 120 m [INEGI, s.f.]. Sin embargo, para que un proyecto de parques eólicos se realice de forma viable, es indispensable evaluar diversos aspectos, para determinar las ubicaciones con un gran potencial y establecer las configuraciones adecuadas para su instalación. Por ende, en este Capítulo se lleva a cabo la factibilidad técnica, determinando las localidades con potencial eólico a través de estudios de complementariedad energética, mapas satelitales, entre otros; estableciendo el tipo de turbinas con investigaciones batimétricas; y definido los componentes y configuraciones del o los parques eólicos más adecuados.

3.2. Determinación de Ubicaciones Potenciales.

De acuerdo a la “Iniciativa que reforma diversas disposiciones de las leyes de transición energética, y la industria eléctrica” en México, las zonas favorables con respecto a la superficie marítima para establecer parques eólicos marinos son: aguas territoriales mexicanas del golfo de California, el océano Pacífico colindante con la península de Baja California, el Golfo de Tehuantepec y Sonda de Campeche [Tapia, 2023]. Estas ubicaciones se pueden observar en las Figuras 3.1 y 3.2, las cuales exponen las regiones con una alta velocidad del viento. No obstante, no son las únicas, puesto que en Tamaulipas y Yucatán también hay potencial eólico. Estas velocidades fluctúan dependiendo de la región en la que se encuentre. La Tabla 3.1, se muestran las áreas con mejor potencial eólico y sus velocidades medias del viento aproximados, desde una altura entre 10 y 200 metros sobre nivel del mar registrados en GWA. Se observa en la Tabla 3.1, las zonas que predominan de acuerdo a la velocidad del viento, tales como la isla de Ángel de la Guarda y la Gringa de Baja California y el Golfo de Tehuantepec. Le procede el Mar Muerto, algunos lugares del Golfo de California, Océano Pacífico colindante con la península de Baja California y las costas de Tamaulipas.

No obstante, en México se presentan ubicaciones con una gran velocidad de viento, se debe elegir el lugar más factible para la instalación de parques eólicos marinos mediante la complementariedad energética temporal. La complementariedad energética se utiliza para el estudio de dos variables, cómo se comportan en conjunto, así como la compensación de la

variabilidad una de otra. La complementariedad energética considera la ubicación geográfica específica, tomando en cuenta la variabilidad de una fuente y otra.

Tabla 3.1: Áreas con mayor potencial eólico y velocidades medias del viento.

Localidad	Localidad más definida	10 m	50 m	100 m	150 m	200 m
		Velocidad del Viento (m/s)				
Golfo de California	Entre la Isla Ángel de la Guarda y Gringa	9.08	10.79	11.67	11.84	11.95
	Baja California Sur, cerca de la frontera de Baja California Norte	6.57	7.91	8.67	8.84	8.81
	Debajo de Punta Final	6.77	8.08	8.71	8.75	8.85
	Por Puertecitos	6.65	7.87	8.5	8.82	8.88
	Entre San Carlos y Puerto Canoas	6.8	8.09	8.85	8.87	8.6
	Al Sur de Isla Cedros	6.39	7.72	8.55	8.71	8.83
Océano Pacífico colindante con la	Al norte de Isla Cedros	6.44	7.69	8.43	8.64	8.8
	Cerca Punta abre ojos, Baja California Sur	5.86	7.18	8	8.57	8.89
	Cerca de la costa Punta Delgadillo	5.97	7.31	8.27	8.89	9.07
Golfo de Tehuantepec	Golfo de Tehuantepec	9.88	11.48	12.26	12.45	12.75
	Mar Muerto, entre Punta Flor y Paredón, Chis.	8.84	10.32	10.93	11.38	11.71
Península de Yucatán	Yucatán	6.18	7.45	8.22	8.9	9.51
Costas de Campeche	Costas de Campeche	5.81	6.89	7.52	7.71	7.85
Tamaulipas	Costa de Tamaulipas	6.15	7.32	8.02	8.36	8.61

Por ello, en esta tesis se toma en cuenta la recopilación de la información encontrada en la literatura de los estudios de complementariedad energética, para la combinación de energía eólica y solar. De tal manera, esta investigación sea una referencia utilizada para trabajos futuros en el caso de instalar sistemas híbridos. Además, esta información utiliza para comparar las regiones con mapas y localizar las regiones protegidas, las líneas de trans-

misión en México e incluso las zonas con cimentaciones petroleras. Existen otras alternativas de complementariedad como la energía eólica, y la microgeneración hidráulica. Sin embargo, dado que ese recurso es abundante en zonas costeras, no es necesario realizar estudios de complementariedad. Además, en este recurso se trabaja en en cimentaciones fijas y no flotantes. Asimismo, es más común utilizarlas a distancias cercanas al litoral, por el flujo de agua. Por el contrario, la irradiación solar presenta variaciones espaciales y temporales que afectan directamente la gestión conjunta de generación. Lo que lo hace interesante es su complementariedad con la energía eólica.

3.2.1. Estudios de Complementariedad Energética.

Con el fin de ilustrar la variabilidad del recurso eólico, se presenta el análisis del potencial eólico en México del año 2018, basado en los datos recopilados por [Gallardo *et al.*, 2020], según se muestra en la Figura 3.3. Estos mapas presentan una de las zonas con mayor potencial eólico (región de la ventosa), pero durante el mes de marzo gran parte de la región disminuyó de 800 W/m^2 a $401\text{-}500 \text{ W/m}^2$ y posteriormente aumentó en abril.

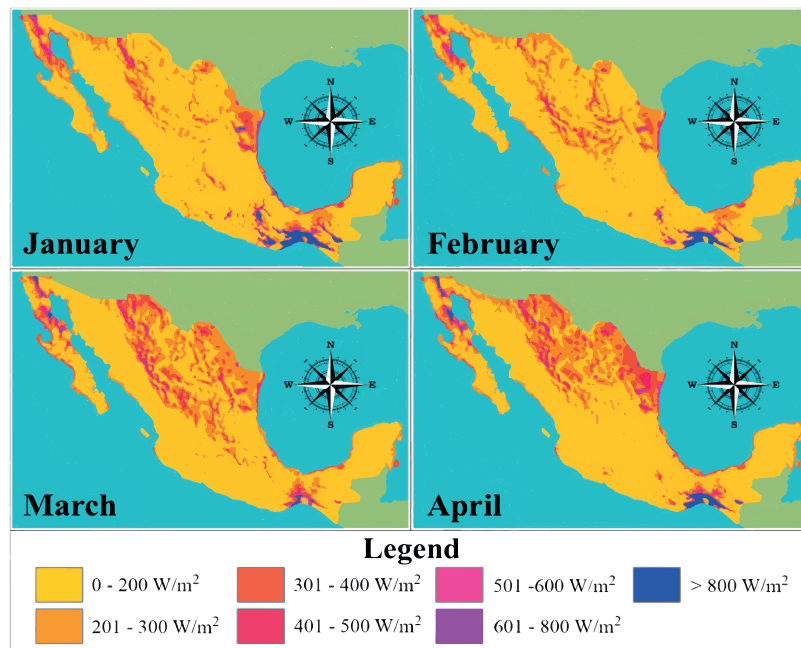


Figura 3.3: Zonas con mayor potencial de energía eólica en México [Gallardo *et al.*, 2020]

Ahora, para los meses entre junio y agosto el potencial eólico en la Ventosa disminuyó entre $401\text{-}500 \text{ W/m}^2$. Sin embargo, entre los meses de mayo a junio la regiones de Baja California Norte incrementó a más de 800 W/m^2 (Véase la Figura 3.4).

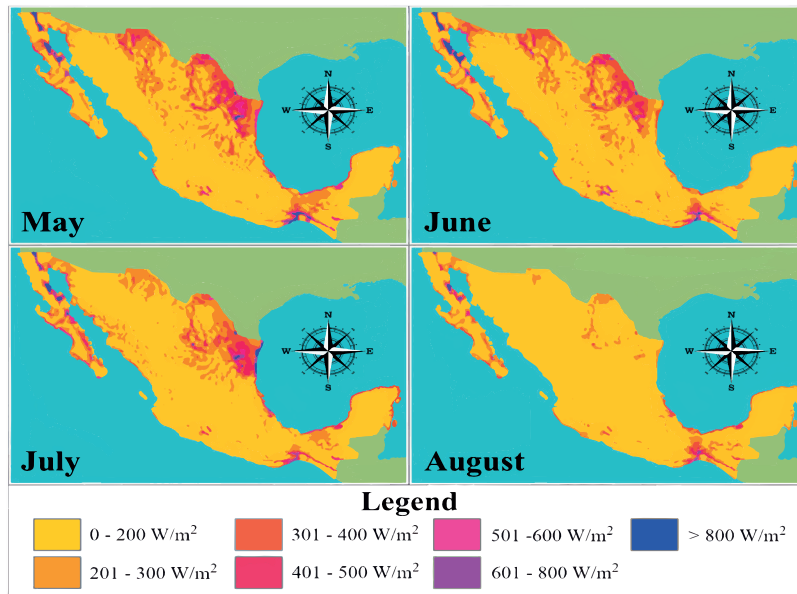


Figura 3.4: Zonas con mayor potencial de energía eólica en México [Gallardo *et al.*, 2020]

Finalmente, en la Figura 3.5 la zona de la Ventosa aumentó el potencial eólico mayor a 800 W/m^2 , pero se puede apreciar que en la región de Baja California disminuyó considerablemente. Además, se puede observar también un aumento significativo en Tamaulipas, Campeche y Yucatán, en los meses de septiembre y octubre.

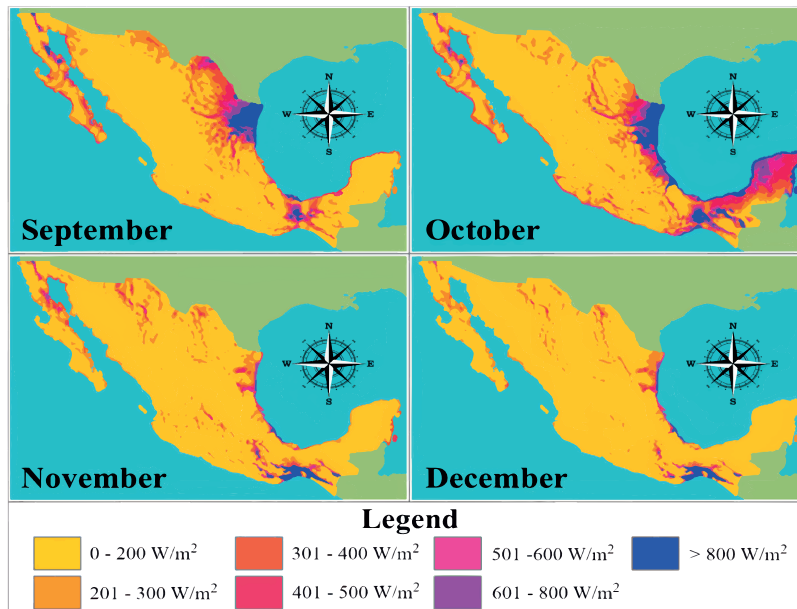


Figura 3.5: Mapas del potencial de energía eólica en México [Gallardo *et al.*, 2020]

Previamente se ha descrito como una variable importante la velocidad del viento que, usualmente es intermitente a lo largo del año. Por esta razón, se deben optar por alternativas factibles con el propósito de sustituir y/o de complementar la falta de potencial eólico en zonas estratégicas, tal es el caso de la energía solar. Dichas zonas se pueden analizar mediante estudios de complementariedad energética descritas en la Sección 2.3.1 de esta tesis. Ahora bien, estudios como la complementariedad energética, permite en lo general la integración de energías renovables eólicas y/o solares, o en su caso la integración de ambas (híbridas). En general, estos estudios permiten evaluar el grado de viabilidad que tiene la incorporación de dos o más fuentes para complementarse. Es importante mencionar que la complementariedad energética se evalúa a través del uso de índices o análisis estadísticos utilizando coeficientes de correlación, que miden la dependencia lineal entre dos variables distribuidas aleatoriamente a través de análisis estadísticos. El más común y práctico es el Coeficiente de Correlación de Pearson.

Estudios como el presentado en [Gallardo *et al.*, 2020] en relación al tema de Analysis of the Solar and Wind energetic complementarity in Mexico, en el cual se incluyó el NCCP para determinar las regiones en México más factibles para la instalación de sistemas de generación híbridos (eólico y solar). Cabe destacar que utilizaron el NCCP en lugar del CCP, debido a la escala de colores azul a rojo, según se muestra en la Figura 3.6. El color azul intenso está representado por -1 y el color rojo intenso por +1. El valor positivo implica que existe complementariedad total entre un sistema híbrido (eólico y solar) en tal región, un valor negativo considera los recursos como de baja complementariedad energética, mientras que un valor cercano a cero no está asociado a ninguno de los anteriores.

Con base a la Figura 3.6, una gran parte de México presenta una notable complementariedad energética mediante sistemas híbridos de generación (eólica-solar). Sin embargo, una parte está localizada en zonas no cercanas al mar, por ejemplo, existe complementariedad en partes de Nuevo León, Coahuila y Chihuahua, las cuales, son áreas lejanas a la costa. En cambio, es posible observar que en algunas regiones cercanas a la costa de Baja California y Oaxaca también hay complementariedad. No obstante, se puede observar que en algunas áreas de Baja California en tierra o mar no es posible la instalación de parques eólicos, debido a que algunas regiones de México son áreas protegidas por el medio ambiente.

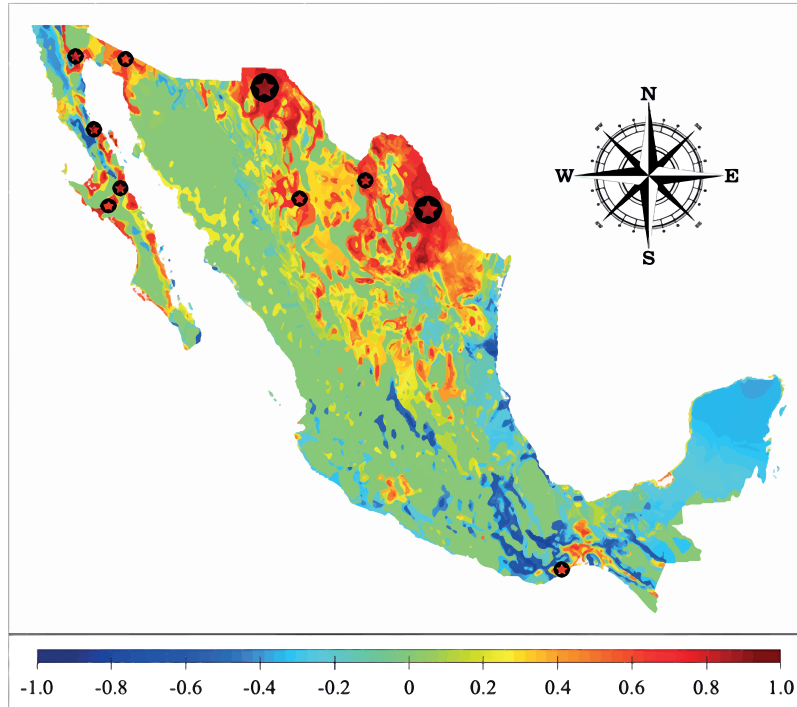


Figura 3.6: Mapa de complementariedad energética en México [Gallardo *et al.*, 2020].

3.2.2. Áreas Protegidas en México.

Un aspecto importante para México es la protección de sus áreas naturales para poder conservar el ecosistema y enfrentar los cambios climáticos. Alterar tal ecosistema generaría un alto impacto ambiental y social. De hecho, antes de realizar un proyecto, se debe establecer y presentar una Manifestación de Impacto Ambiental (MIA) ante la SEMARNAT. Es por ello que las Áreas Naturales Protegidas son definidas como zonas de territorio nacional y aquellas sobre las que la nación ejerce soberanía y jurisdicción, establecido en el Art. 44 de la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al ambiente (LGEEPA) [Gobierno de México, 2024]. En el país se encuentran 226 de estas áreas administradas por la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP), cuyo objetivo es preservar ambientes naturales representativos del país, mientras que los ecosistemas permiten mantener equilibrio y continuidad a procesos evolutivos y ecológicos, salvar la diversidad genética de las especies, asegurar el equilibrio y la continuidad, preservar de manera particular especies endémicas, entre otros [Gobierno de México, 2024]. Estas áreas las podemos observar en el mapa de

México de la Figura 3.7 donde gran parte de las zonas que presentan complementariedad son áreas protegidas, tales como el alto Golfo de California (abarcando una parte predominante de la zona marítima), Punta Final y norte del Golfo de California Sur. En estas dos últimas, la mayor parte de áreas protegidas están en tierra y cerca del mar en la costa, lo cual, también sería perjudicial por las líneas de transmisión submarinas y subterráneas que se tendrían que instalar. Por el contrario, en la zona de Oaxaca en donde también existe complementariedad energética (durante casi todo el año), no hay alguna zona que esté protegida, en tierra ni costa, únicamente en la fosa mesoamericana. Por lo tanto, en la presente tesis las opciones más adecuadas para establecer proyectos de parques eólicos marinos son aquellos lugares en donde no existan áreas protegidas, ya que implican un alto impacto social y ambiental. En la Figura 3.7 se indica con una flecha roja la ubicación del Golfo de Tehuantepec, como la más viable para instalar el parque eólico marino, debido a no ser una zona protegida.



Figura 3.7: Mapa de Áreas Naturales Protegidas de México. La zonas verde indica las reservas de la biosfera y la café parques nacionales. Con edición propia. [Gobierno de México, 2024].

3.2.3. Red Nacional de Transmisión.

Para el proyecto resulta ser más factible que el parque eólico marino esté cerca de las redes de transmisión y se adapte al Sistema Eléctrico Nacional (SEN), ya que de esta manera se disminuyen los costos de construcción e instalación de nuevas líneas que conecten al sistema. Por ello que es importante localizar que la SEN está constituido por redes eléctricas con distintos niveles de suministro de energía eléctrica (redes de transmisión,

distribución y particulares) [Secretaría de Energía (SENER), 2019].

- **Red Nacional de Transmisión:** La Secretaría de Energía (SENER) en el Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN) define a la Red Nacional de Transmisión (RNT) como sistema integrado por el conjunto de las redes eléctricas que se utilizan para transportar energía eléctrica a las Redes Generales de Distribución y al público en general, así como las interconexiones a los sistemas eléctricos extranjeros que determine la Secretaría de Energía. Algunos niveles de voltaje en la líneas de transmisión abarcan entre 69 kV y 400 kV.
- **Redes Generales de Distribución:** En estas redes se distribuye la energía eléctrica al público general. Está conformado por redes eléctricas, cuyos niveles son mayores a 1 kV y menores o iguales a 35 kV, y las redes que tienen niveles igual o menor a 1 kV.
- **Redes Particulares:** Redes que no están asociadas a la Red Nacional de Transmisión o Redes Generales de Distribución.

Otro aspecto relevante es localizar las centrales eléctricas cercanas a las costas. Esto puede realizarse en el mapa interactivo elaborado por el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT), según se muestra en la Figura 3.8.

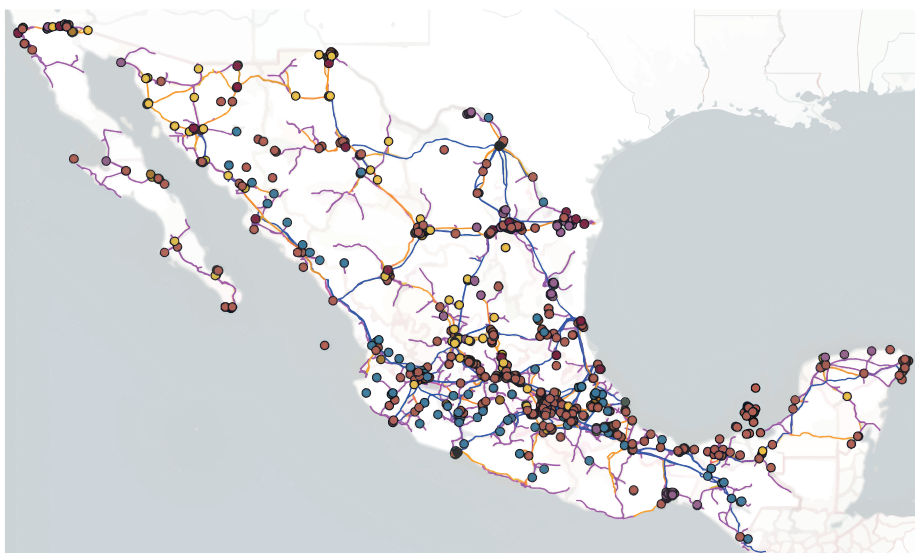


Figura 3.8: Mapa del SEN [CONAHCYT, s.f.], imagen obtenida el 29 de septiembre de 2024.

En esta representación cartográfica se dispone de las Centrales Eléctricas que están en operación en México, y la Red Nacional de Transmisión de 69 a 400 kV. La Figura 3.8

muestra una menor cantidad de líneas de transmisión en Baja California. Algunas de ellas localizadas en donde existe complementariedad energética, es decir, en alto Golfo de California, Punta Final y al norte del Golfo de California Sur. Sin embargo, como se mencionaba en la sección anterior, estas zonas son áreas protegidas; y aunque la protección no abarca gran parte del mar, aún tendrían que considerarse la preservación por las líneas de transmisión (o subestaciones si se llegaran a necesitar) que se tendrían que construir. Por lo que dichas áreas podrían tomarse aún no aptas para un proyecto de parques eólicos marinos. En el Golfo de Tehuantepec, la velocidad del viento ronda entre 9.88 y 12.75 m/s como se muestra en la Tabla 3.1 (dependiendo de la altura al nivel del mar y la ubicación exacta). Por otra parte, se dispone de varios parques eólicos por Juchitán de Zaragoza, Oaxaca, otros dos por Chiapas y una unidad térmica y de combustión que está más cercana a la costa, por Salina Cruz, Oaxaca. Véase la Figura 3.9. La línea amarilla son las redes de tensiones de 230 kV, y la rosa entre 24 a 161 kV. La que se ubica en Salina Cruz es de 115 kV.

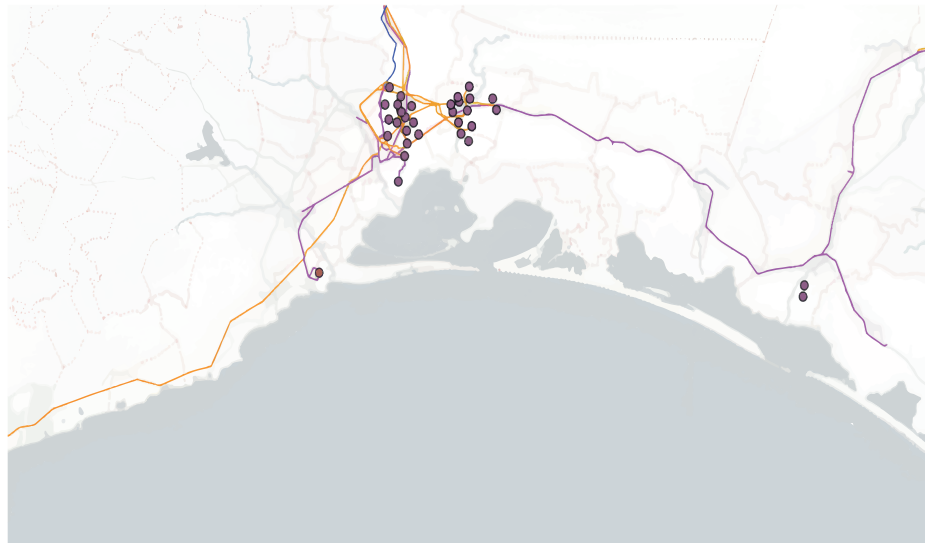


Figura 3.9: Mapa del SEN en la zona del Golfo de Tehuantepec. La línea amarilla son las redes de tensiones de 230 kV, y la rosa entre 24 a 161 kV. [CONAHCYT, s.f.], imagen obtenida el 29 de septiembre de 2024.

En resumen, del mapa de las velocidades medias del viento realizado por GWA de la Figura 3.1., donde las áreas puntualizadas anualmente que disponen de complementariedad energética con la energía solar del mapa son presentes en la Figura 3.6 en la Sección 3.2.1., del mapa de las 226 áreas naturales protegidas de México de la Sección 3.2.2., y el mapa del Sistema Eléctrico Nacional realizado por el CONAHCYT mostrado en la Figura 3.8 de la

sección 3.2.3, se ha obtenido como resultado el esquema de México dado en la Figura 3.10.

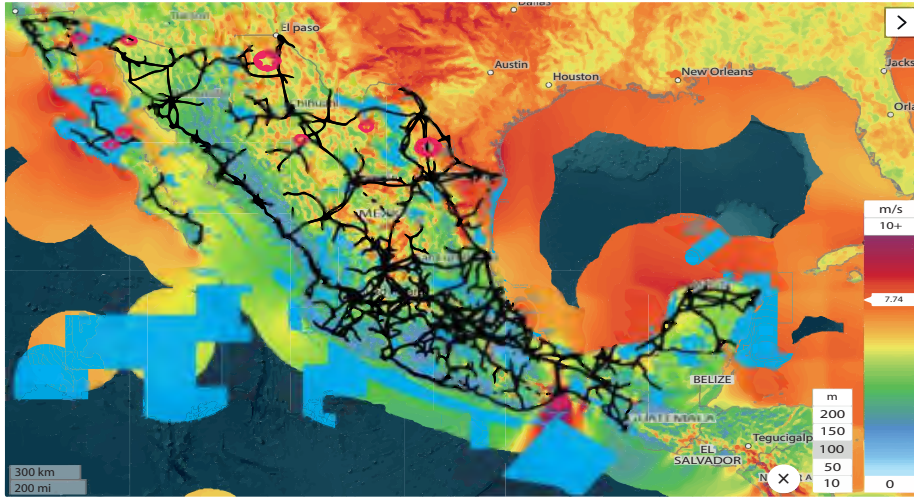


Figura 3.10: Mapa de velocidades medias del viento, mostrando el SEN y áreas naturales protegidas en México [CONAHCYT, s.f., GWA, s.f., Gobierno de México, 2024].

De acuerdo a la Figura 3.10., en el Golfo de Tehuantepec las velocidades medias del viento de 10, 50, 100, 150, y 200 metros, tiene una adecuada complementariedad energética con la energía solar la mayor parte del año, no hay muchas zonas cercanas que estén protegidas y existen líneas de transmisión e incluso está presente una subestación cercanas a la costa. Además, es una zona mencionada en la “Iniciativa que reforma diversas disposiciones de las leyes de transición energética, y la industria eléctrica”. En consecuencia, el sitio más factible para instalar un parque eólico marino en México es en el Golfo de Tehuantepec. Es por ello, que en esta área se llevará a cabo el estudio del proyecto para la presente tesis.

3.3. Identificación de Parámetros para Definir la Configuración de Parques Eólicos Marinos.

De acuerdo a la sección anterior, México dispone de un gran recurso eólico. De hecho, se encontraron varias ubicaciones marinas con altas velocidades del viento (mayores a 5 m/s), como en el Golfo de California, Océano Pacífico Colindante con la península de Baja California, Golfo de Tehuantepec, Yucatán, Costas de Campeche y Tamaulipas. No todas las localidades antes mencionadas las hacen factibles, a excepción del Golfo de Tehuantepec. Por ello, en dicha región se lleva a cabo la configuración y diseño de un parque eólico marino. Para tal efecto, se analizará el sitio con la finalidad de identificar los parámetros necesarios,

como la velocidad del viento, la rosa de los vientos, la batimetría y otros.

3.3.1. Golfo de Tehuantepec, Oaxaca.

La plataforma continental del Golfo de Tehuantepec es una zona angosta del amplio Océano Pacífico, situado entre los estados de Oaxaca y Chiapas. Dispone de varias ciudades ribereñas, algunas de ellas son: Puerto Ángel, Salina Cruz, Unión Hidalgo, Juchitán de Zaragoza, San Mateo del Mar y Puerto Arista. De manera complementaria, tiene una extensión alrededor de 125,000 km² ubicada en relación entre las coordenadas 126°08'24" a 14°12'36" de latitud y 96°35'24" a 92°16'48" de longitud. Esta localización presenta un clima cálido subhúmedo, lluvias otoñales y vientos estacionales altos como se muestra en la Tabla 3.1 [Carranza *et al.*, 1998, Galván, 2022, Ortega *et al.*, 2000]. Lo que lo convierte en una localidad ideal para establecer parques eólicos. La Figura 3.11 muestra la plataforma continental del Golfo de Tehuantepec, en donde se muestra una parte parcialmente plana y otra parte de estructura compleja, cerca del Pacífico Mexicano Profundo, debido a que se ubican las placas de Cocos y del Caribe.

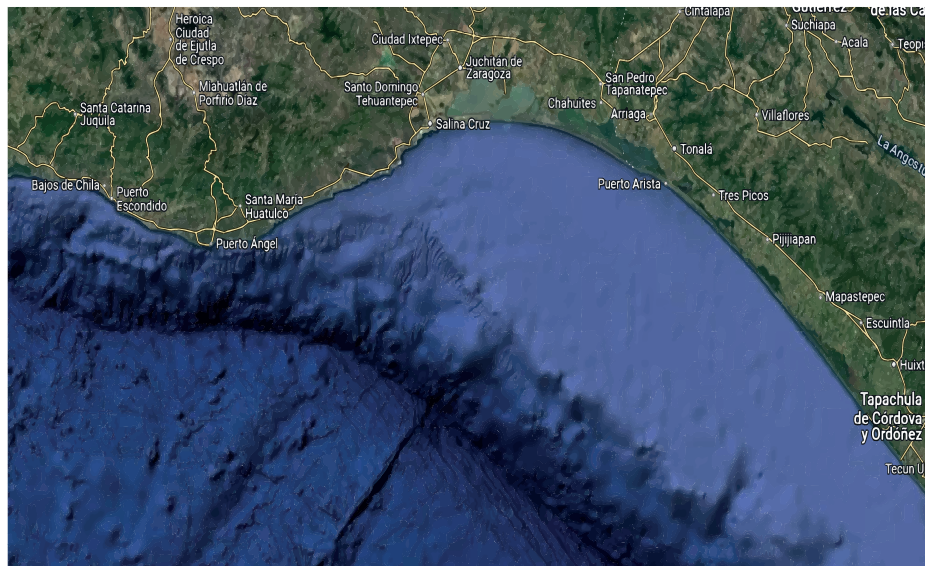


Figura 3.11: Plataforma Continental del Golfo de Tehuantepec [Google Maps, 2024]. Imagen obtenida el 6 de diciembre de 2024.

En otras palabras, una falla transformante divide a la superficie subacuática en dos perfiles fisiográficos principales: la parte Noroeste estrecha por la plataforma continental y la subsiguiente parte en donde se ensancha hacia el Sureste [Carranza *et al.*, 1998]. De

los fenómenos atmosféricos existentes en el Golfo de Tehuantepec, el más distinguible son los vientos provenientes entre el Norte y el Nor-noreste, cuyos valores de velocidad que ya se han mencionado en secciones anteriores se encuentran alrededor de 9.88 y 12.75 m/s (dependiendo de la altura al nivel del mar), tal como se muestra en la Tabla 3.1. La extensión de región marina con la mejor velocidad media del viento es de aproximadamente de 23,846 km² ilustrado en la Figura 3.12.

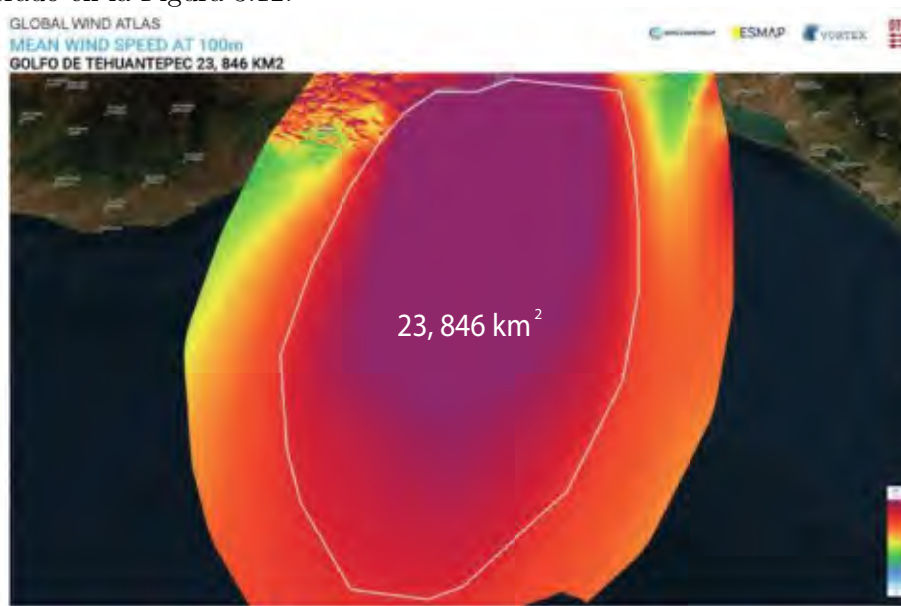


Figura 3.12: Extensión de la velocidad del viento más alta en el Golfo de Tehuantepec [GWA, s.f.].

Esta imagen proporciona la densidad media de potencia del territorio marino a 10 % del área ventosa a 100 m al nivel del mar, lo cual es de $2,435 \text{ W/m}^2$, y la densidad media de potencia a 100 % del área ventosa es de $1,685.83 \text{ W/m}^2$, con una velocidad promedio de 11.88 m/s . Por lo tanto, el territorio ubicado en la Figura 3.12 es un área considerablemente grande para instalar parques eólicos marinos. No obstante, para ser más factible implementar un proyecto eólico en esta zona, se considera un espacio que no se ubique lejos de la costa debido a los altos costos de implementar cables subterráneos y no abarque áreas de en donde se lleva a cabo la pesca, ya que esta es una de las actividades principales en el Golfo de Tehuantepec. La autora [Galván, 2022] consideró un área de 17.4824 km^2 , ubicado a 15 km al Este del puerto de Salina Cruz, Oaxaca y a 5 km de la costa Norte, cuyas coordenadas son las siguientes: Punto 1: $16^\circ 08'$, $95^\circ 05'$, Punto 2: $16^\circ 08'$, $95^\circ 02'$, Punto 3: $16^\circ 06'$, $95^\circ 02'$ y 4: $16^\circ 06'$, $95^\circ 05'$.

Estas coordenadas describen la zona mostrada en la Figura 3.13 que también se puede observar desde una perspectiva del GWA ilustrada en la Figura 3.14.



Figura 3.13: Ubicación de un parque eólico marino en México, de acuerdo a las coordenadas: punto 1: $16^{\circ}08'$, $95^{\circ}05'$; punto 2: $16^{\circ}08'$, $95^{\circ}02'$; punto 3: $16^{\circ}06'$, $95^{\circ}02'$; y punto 4: $16^{\circ}06'$, $95^{\circ}05'$. [Galván, 2022].



Figura 3.14: Ubicación de un parque eólico marino en México, de acuerdo a las coordenadas: punto 1: $16^{\circ}08'$, $95^{\circ}05'$; punto 2: $16^{\circ}08'$, $95^{\circ}02'$; punto 3: $16^{\circ}06'$, $95^{\circ}02'$; y punto 4: $16^{\circ}06'$, $95^{\circ}05'$, dada por Global Wind Atlas [GWA, s.f.]. Con edición propia.

Las distancias mostradas entre la ubicación y el litoral es de aproximadamente 15 km al este del puerto de Salina Cruz y 5 km a la costa norte. Una posición que es considerablemente cercano a las zonas costeras, lo que resulta más factible por los altos costos de los cables subterráneos. Por otro lado, el Golfo de Tehuantepec dispone de la zona 90 de pesca, que está dividida en las subzonas S-91, S-92, S-93, S-94 y S-95, y cuya localización se muestran en la Figura 3.15. Por lo que es importante analizar los lugares en donde realizan mayor actividad de pesca y observar la dispersión y cantidad del recurso marino.

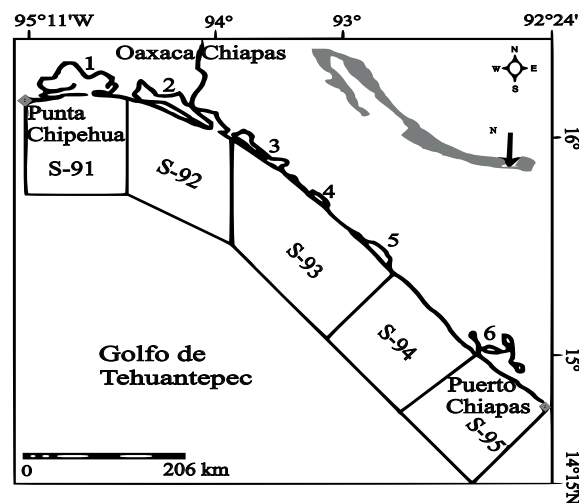


Figura 3.15: Localización geográfica de la zona de pesca 90 en el Golfo de Tehuantepec y sus respectivos sub-sectores [Cervantes-Hernández *et al.*, 2008].

Las coordenadas descritas con anterioridad, muestran al parque eólico en la subdivisión S-91 de pesca. Este territorio dispone de datos en la distribución y abundancia de recursos marinos realizados en el crucero JCFINP2303 en el año 2023 por el Instituto Mexicano de Investigación en Pesca y Acuicultura Sustentables (IMIPAS), orientado a la investigación aplicada para promover el desarrollo y sustentabilidad del sector pesquero y acuícola en México [INEGI, 2000]. La riqueza de especies fue reportada en la “Evaluación de recursos pesqueros en Pacífico Sur Mexicano B/I Dr. Jorge Carranza Fraser, informe técnico núm. 24” por el autor Vallarta, J.R.F. y colaboradores. Las principales especies de interés comercial registrados fueron Barrilete, cocinero, Jurel orqueta, Macarela alicorta, Chabelita, entre otros. La afluencia de estos organismos se muestra en la Figura 3.16, indicando, la posición estimada para las coordenadas (punto verde) mostradas en las Figuras 3.13 y 3.14.

Las Figuras 3.16, la región analizada es una zona en donde no predominan los recursos marinos comerciales para la pesca. Por lo tanto, al no coincidir con las áreas que son usados para capturar organismos acuáticos, la factibilidad de instalar un parque en dicha área aumenta, ya que generaría un menor impacto social.

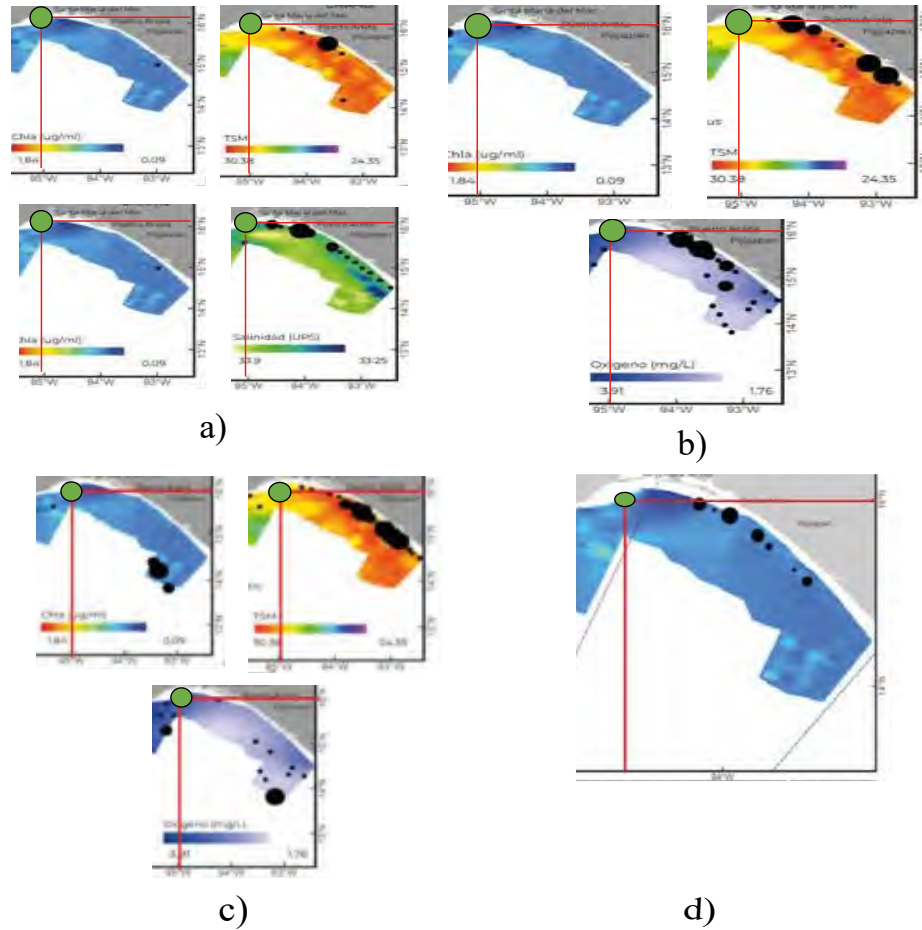


Figura 3.16: Distribución y captura de peces en el 2023 en el Golfo de Tehuantepec por el crucero JC-FINP2303: a) Barrilete, Cocinero, Jurel orqueta, entre otros, b) Chabelita, Ojotón y Papelillo, c) Calamar gigante y dedal, y Jaiba nadadora, d) Sardina crinuda [Vallarta-Zárate *et al.*, 2024]. Con edición propia.

Para la presente tesis, las coordenadas que se tomarán para establecer un parque eólico marino son las que presentó la autora [Galván, 2022], las cuales se muestran en las Figuras 3.13 y 3.14, debido a que es una ubicación no muy lejana de la costa (para no aumentar el uso de cables subterráneos), y no es un lugar con abundancia de especies comerciales (con el propósito de practicar la captura de peces). En otras palabras, se adopta como referencia las coordenadas preportadas por [Galván, 2022] por varias razones prácticas y metodológicas:

primero, la ubicación propuesta por [Galván, 2022] se encuentra relativamente próxima a la costa, lo que reduce de forma significativa los costos y las pérdidas asociadas al tendido del cable de exportación; segundo, se tiene gran potencial eólico, debido a las altas velocidades; tercero, porque evita zonas con abundancia de pesca comercial; cuarto, utilizar una zona ya demilitada en la literatura facilita la comparación, la reproducibilidad y el anclaje de los supuestos del estudio frente a trabajos previos; y quinto, las estimaciones del recurso empleado como en GWA y la batimetría disponible hacen de esta área un punto de partida sólido para un estudio conceptual. No obstante, el área puede cambiar (por lo tanto, las coordenadas tendrían un cambio menor), a consecuencia de que dependerá de la potencia disponible, el área que ocupa cada turbina, la cantidad de turbinas y la disposición lineal, es decir, la distribución de ellas. Además de que las turbinas son de mayor portencia en el mar de que en tierra, son necesarias menores cantidades para egenerar la portencia deseada. Es importante mencionar, que, aunque podría disminuir la cantidad de impacto social, para trabajos futuros es necesario realizar un Informe Preventivo y una MIA como lo estableció la SEMANART en el Diario Oficial el “Proyecto de Norma Oficial Mexicana PROY NOM-151-SEMARNAT-200”.

3.3.1.1. Estudios de Batimetría.

La batimetría es un estudio de las profundidades del mar a través de mapas de isobaras. Realizar estas investigaciones son de gran importancia si se quiere implementar un proyecto de parques eólicos en altamar, puesto que, al analizar las profundidades, se puede tener conocimiento de la distancia en metros desde la superficie hasta el fondo del mar. Lo cual, es necesario para saber el tipo de cimentación que se utilizará en el parque, ya sean las fijas como las estructura tipo Jacket o monopolites, o las flotantes como las semi-sumergibles. Con base a lo señalado anteriormente, las Cartas Batimétricas disponen de isobaras. Estas últimas son curvas del nivel que describen las profundidades del mar. Dichos mapas se pueden encontrar en la plataforma digital de INEGI, en donde se consultan las cartas de los Golfos que se encuentran a los alrededores de México. Un caso de estos se presenta en la Figura 3.17, en la que se muestra la del Golfo de Tehuantepec.

Se ilustra la localización de las coordenadas seleccionadas (indicado por el punto verde en el mapa). Esta posición está cercana la primera isóbata, en el que se registra como

profundidad menor a los 200 metros. Sin embargo, no se indica con mayor certeza la profundidad de la zona. Por esta razón es necesario considerar otras alternativas de consulta referentes a la batimetría. Un ejemplo es la página “National Centers for Environmental Information: National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)” en su apartado “Bathymetric Data Viewer”, en donde se presenta un mapa mundial interactivo que te describe la posición y la elevación en metros.



Figura 3.17: Carta Batimétrica del Golfo de Tehuantepec y área identificada para el parque eólico [Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 1983]. Con edición propia.

La Figura 3.18 se tiene una visualización del portal en el área del Golfo de Tehuantepec. La región amarilla con líneas punteadas rojas es la posición de las coordenadas antes descritas. Al interactuar con la herramienta digital, la profundidad que indica es entre -100 y -141 metros. Esto se puede verificar en la misma herramienta de GWA, en el que se indica que la profundidad del área es entre -127 y -143 metros, como se observa en la Figura 3.18. De acuerdo a los registros tomados de las Figuras 3.18 y 3.19, se puede establecer que las profundidades para las coordenadas: punto 1: 16°08', 95°05', punto 2: 16°08', 95°02', punto 3: 16°06', 95°02', y punto 4: 16°06', 95°05', es entre -120 y -143 metros. Con esta información, ya se puede deducir el tipo de cimentación o plataformas para las turbinas eólicas que se utilizarán. Lo cual, se describe en la siguiente sección.

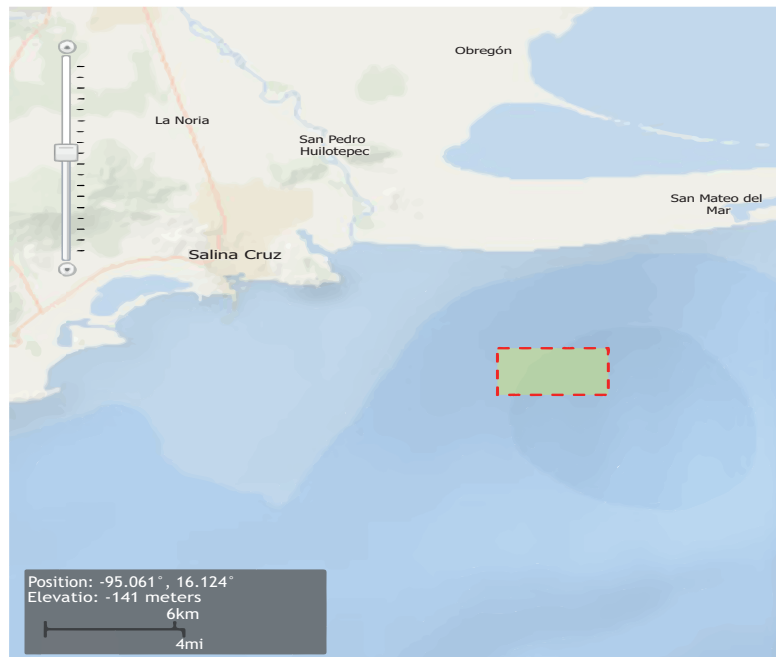


Figura 3.18: Batimetría del Golfo de Tehuantepec por National Oceanic and Atmospheric Administration [National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), s.f.]. Imagen tomada el 19 de mayo de 2024.

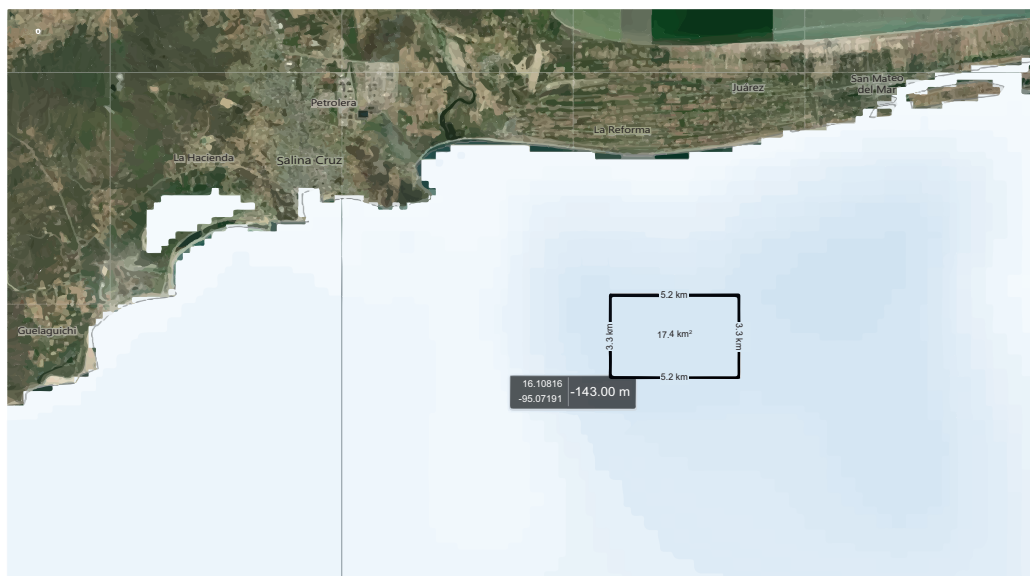


Figura 3.19: Batimetría del Golfo de Tehuantepec por Global Wind Atlas [GWA, s.f.]. Imagen: 19/mayo/2024.

3.3.1.2. Recurso Eólico.

En el Golfo de Tehuantepec, el viento tiene una velocidad de entre 9.88 y 12.75 m/s, como lo indica la Tabla 3.1. Por otra parte, de acuerdo a GWA el recurso eólico del área de la Figura 3.13 para alturas de 10, 50, 100, 150 y 200 metros al nivel del mar, las velocidades

son de 9.13, 10.72, 11.48, 11.93 y 12.45 m/s , respectivamente. Adicionalmente, en el Golfo de Tehuantepec, también existe turbulencia de viento de entre 18 y 22 m/s , afectando el rendimiento de la máquina. Es por ello la importancia de seleccionar adecuadamente el modelo del aerogenerador. En consecuencia, se debe considerar la dirección predominante del viento. Esto último se lleva a cabo mediante el uso del denominado Rosa de los Vientos.

3.3.1.2.1. Rosa de los vientos. La rosa de los vientos es una figura, diagrama o símbolo circular que marca varias direcciones proyectadas en el plano del horizonte. Indica principalmente, el norte, sur, este y oeste. En el ámbito de la energía eólica, las rosas de los vientos son utilizadas para proporcionar información acerca de la dirección más frecuente del viento. De esta manera, se puede tomar la decisión de cómo ubicar y configurar adecuadamente los aerogeneradores. Hoy en día existen plataformas que proporcionan información referente al clima como el viento, temperatura, etc. Tal es el caso de “meteoblue”, el cual, es un sitio web que produce datos meteorológicos orientado a un público amplio. En el apartado de Clima (modelado) del portal digital se puede buscar varias ubicaciones a considerar y reporta su temperatura, precipitación y el viento en forma de histogramas. Así mismo, genera una rosa de los vientos con las velocidades más frecuentes y las direcciones. La Figura 3.20 muestra la Rosa de los Vientos en las coordenadas 16°08'N y 95°05'O.

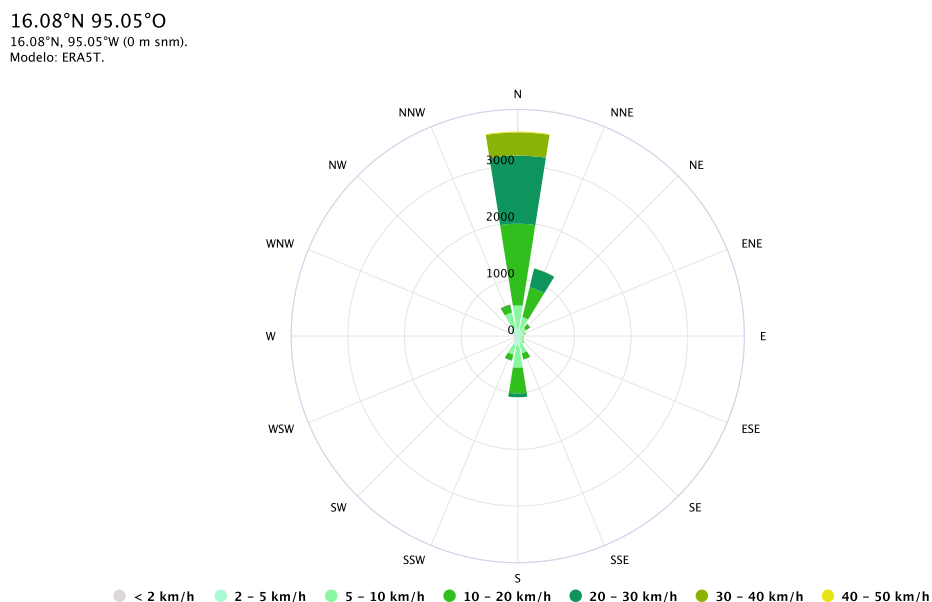


Figura 3.20: Rosa de los Vientos en la región 16°08'N y 95°05'O del Golfo de Tehuantepec [Meteoblue, 2025].

Las cuales, corresponden casi exactamente al área seleccionada para el parque eólico. De esta manera se conoce la dirección e intermitencia del viento cercano en el Norte con rachas al Norte-noreste. De hecho, los vientos del Golfo de Tehuantepec son bien conocidos por provenir del Norte y suelen ser denominados “Tehuano”.

3.3.1.3. Ciclones.

Los huracanes y tormentas tropicales son fenómenos que deben tomarse en cuenta para el diseño y construcción de parques eólicos. Esto es debido a que transmiten datos de las velocidades del viento alcanzadas por estos fenómenos atmosféricos. Con base en la información proporcionada, se determinará el modelo de las turbinas capaces de soportar dichos vientos. Además, analizando los ciclones, se puede obtener la máxima altura de las olas. Lo cual, es también importante para determinar la altura de los aerogeneradores. En esta sección se analizará el registro de los ciclones que han estado cerca de las costas del Golfo de Tehuantepec, Oaxaca. De hecho, debido a que el área determinada está cercana a las costas de Salina Cruz, y como los registros tomados por CONAGUA sólo consideran municipios, se tomará como referencia las velocidades del viento de la entidad territorial señalada previamente.

A continuación, en la Tabla 3.2 se presenta un resumen de los ciclones que han afectado en las cercanías de Salina Cruz desde el 2021 al 2024. Por el cual, se tomará como referencia las velocidades y el oleaje reportado al momento de seleccionar en los catálogos, el modelo de las turbinas. De acuerdo en la Información Histórica reportada por CONAGUA, en 2021 uno de los ciclones registrados fue la tormenta tropical Terry, generando vientos máximos de entre 12.5 y 15.28 m/s con rachas entre 18.06 y 20.23 m/s. Posteriormente, en el 2022, el Huracán Agatha de categoría 2, provocó en Salina Cruz vientos máximos de entre 12.5 m/s y 30.6 m/s con rachas de entre 18 y 39 m/s, así como olas de entre 6 y 8 m. En el 2023 la tormenta tropical Pilar alcanzó las costas de Salina Cruz. Lo que generó velocidades máximas de entre 12.5 y 30.6 m/s con rachas de entre 18 a 39 m/s, y oleaje de entre 3 y 5 m en las zonas. Por último, en el 2024 se registró la depresión tropical Once-E que afectó a Salina Cruz con velocidades máximas de 15.27 m/s y rachas de 20.83m/s. Además, se registró oleaje de 1 a 3 metros de altura [CENAPRED, 2022, SEMARNAT *et al.*, 2021, SEMARNAT *et al.*, 2023, SEMARNAT *et al.*, 2024, SEMARNAT *et al.*, 2022, SMN *et al.*, 2023].

Tabla 3.2: Ciclones que afectaron en Salina Cruz entre el año 2021 y 2024.

CICLONES QUE AFECTARON LAS COSTAS DE SALINA CRUZ					
Nombre	Fecha	Lugar	Velocidad máxima	Rachas de velocidad	Oleaje
Depresión Tropical Once-E	1/octubre/2024	Salina Cruz, Oax.	15.27 m/s	20.83 m/s	1 a 3 metros
Tormenta Tropical Pilar	28/octubre/2023	Salina Cruz, Oax.	20 a 26.4 m/s	26.4 a 30.6 m/s	3 a 5 metros
Huracán Agatha	27/mayo/2022	Salina Cruz, Oax.	12.5 a 30.6 m/s	18 a 39 m/s	6 a 8 metros
Tormenta Tropical Terry	7/noviembre/2021	Salina Cruz, Oax.	12.5 a 15.28 m/s	18.06 a 20.83 m/s	-

3.4. Determinación de Componentes y Configuración de Parques Eólicos Marinos.

3.4.1. Tecnologías para Cimentaciones.

La manera de montar un aerogenerador en tierra es mediante una estructura de sustento diseñado para soportar el peso de la turbina. Por otro lado, en el campo de la energía eólica marina existen distintos tipos de tecnologías como plataformas: las cimentaciones superficiales y las cimentaciones profundas y ultra profundas. La instalación de cada una dependerá de la profundidad local del mar. Los principales tipos de cimentaciones superficiales de acuerdo a la profundidad son monopolite, estructura de gravedad, y estructura tipo Jacket [Iberdrola, s.f.b]. En las cimentaciones superficiales, las profundidades a las que alcanza cada una son menores a los 50 metros. Sin embargo, dadas las coordenadas seleccionadas en el Golfo de Tehuantepec para la presente tesis, y de acuerdo a la batimetría estudiada en la Sección 3.3.1, la profundidad es de -120 y -143 metros. Por consiguiente, las plataformas

fijas antes analizadas no serán ideales para este trabajo. Es por ello que, a continuación, se presentan las plataformas flotantes, que son para fondos marinos más extensos.

Una Plataforma Eólica Marina Flotante (FOWP, por sus siglas en inglés) es una estructura que se impulsa con el agua hacia la superficie [Prado, 2018], según se muestra en la Figura 3.21. Estos sistemas de soporte alcanzan regiones superficiales de más de 50 metros. Las principales son: barge (barcaza), spar, semi-sumergible (semi-sumergible), plataforma de piernas tensadas (TLP por sus siglas en inglés, Tensioned Legs Platform) y estructura tipo FPSO [Iberdrola, s.f.a].

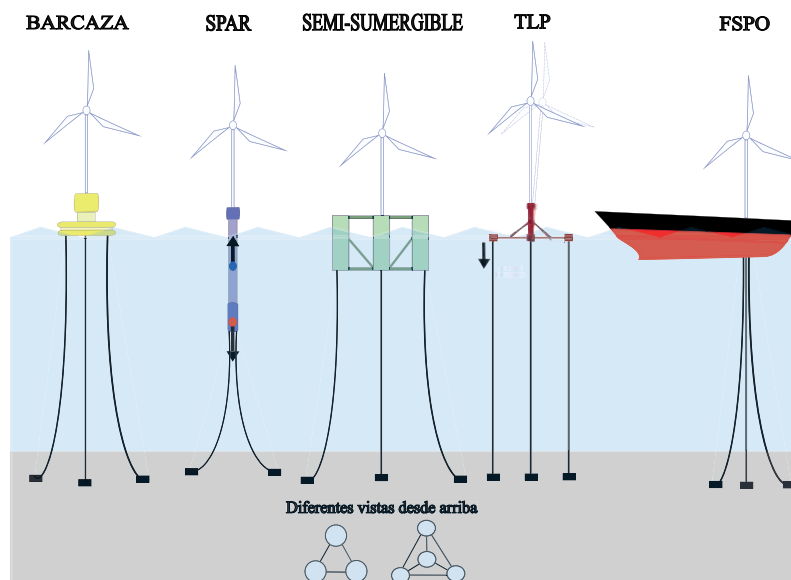


Figura 3.21: Plataformas flotantes para turbinas eólicas en alta mar.

A continuación, en la Tabla 3.3 se muestra una comparación de las ventajas y desventajas de cada una de las plataformas flotantes para turbinas eólicas mencionadas con anterioridad. Para la presente tesis, debido a que son fáciles de instalar, presentan una adecuada estabilidad en cuanto a las escoras, es apropiada para aguas profundas (recordando que en la ubicación establecida para el Golfo de Tehuantepec se tiene profundidades del mar de entre -120 y -143 metros), es el más trabajado y el que más se ha llevado a la investigación por científicos o expertos, la plataforma flotante que se utilizará será la semi-sumergible. Además, la tecnología avanza y las compañías van mejorando estos tipos de estructuras, tal es el caso de Principle Power y empresas colaboradoras. Dicha compañía ha

Tabla 3.3: Ventajas y desventajas de las plataformas flotantes para aerogeneradores en alta mar.

Plataformas Flotantes para Turbinas Eólicas		
Tipos	Ventajas	Desventajas
Barcaza	El diseño es simple. Fácil de construir. Fácil de instalar. Menos costosa que las otras estructuras. Adecuado para aguas profundas al contrario de las cimentaciones fijas. Menor impacto ambiental al contrario de las cimentaciones fijas.	Menos estables. Podría ser solo para aguas tranquilas.
Spar	Tiene alta estabilidad debido a que su centro de gravedad está por debajo de su centro de empuje. Debido a su estabilidad puede soportar olas y corrientes. Adecuado para aguas profundas al contrario de las cimentaciones fijas. Tiene menor impacto al ambiente al contrario de las cimentaciones fijas.	La instalación es más difícil y menos económica que los otros tipos. La instalación es en el mar. Si las turbinas son cada vez más grandes, los cilindros deben ser más grandes, los cilindros deben ser más largos. Difícil de fabricar y transportar.
Semi-sumergible	Tiene una alta estabilidad debido a la forma y/o estructura. Fácil de instalar debido a que se monta desde el puerto. Adecuado para aguas profundas al contrario de las cimentaciones fijas. Tiene menor impacto ambiental al contrario de las cimentaciones fijas. Se tiene antecedentes, ya que hay algunos parques eólicos marinos en el mundo con este tipo de plataformas y varios en proyectos de investigación.	Mayor costo que las otras plataformas a excepción del tipo SPAR. Menos estable que la plataforma tipo SPAR, sin embargo, existen modelos más recientes que han mejorado en este aspecto, como el "WindFloat"
TLP	Tiene buena estabilidad debido a las líneas amarre tensadas (tendones pretensados). Adecuado para aguas profundas al contrario de las cimentaciones fijas. Tiene menor impacto ambiental al contrario de las cimentaciones fijas. Trata de reducir las dimensiones para bajar el costo de fabricación. Utiliza flotadores temporales y reutilizables.	Es novedoso por lo que no se tiene muchos antecedentes o que no se han realizado muchos parques eólicos con este tipo de plataformas. De lo anterior, de acuerdo a Iberdola, tiene mayor riesgo técnico. Cuando la turbina se instala sobre la plataforma, este no flota como tal.
FSPO	Ya han sido desarrolladas en la industria de alta mar para embarcaciones petroleras. Se podrían adaptar para incluir almacenamiento de energía. Resistentes entre olas y viento.	Podría resultar costoso y más si se requiere modificaciones estructurales para adaptarse a un aerogenerador. Podría generar desafíos regulatorios e impactos ambientales. No hay muchos antecedentes para aerogeneradores.

estado trabajando en el desarrollo técnico del denominado WindFloat. Este último es una base semi-sumergible para turbinas eólicas marinas, en el que utiliza 3 cilindros flotantes unidos por vigas y distribuidos de tal manera que forman un triángulo, y en uno de ellos se ubica el aerogenerador como se muestra en la Figura 3.22.



Figura 3.22: Estructura de la plataforma semisumergible con diseño de WindFloat de Principle Power.

El WindFloat incorpora un sistema de lastre (peso adicional para generar estabilidad y equilibrio en las embarcaciones) en las columnas. Dicha carga de ajuste que utiliza la estructura es agua, y esto ayuda a que la plataforma mantenga una posición equilibrada como se ilustra en la Figura 3.23. Si el oleaje o viento se direcciona de izquierda a derecha como en la Figura 3.23(a), el lastre aumenta en los cilindros en los que no está la turbina; si se dirige de frente hacia atrás, en uno de los cilindros en el que no se encuentra la turbina aumenta el lastre y en el otro queda por la mitad, y en cuanto al cilindro en donde está la turbina, se mantiene con poca agua, como se muestra en la Figura 3.23(b); y en el caso de que el oleaje o viento vaya de derecha a izquierda, aumenta el lastre en el tubo donde está la turbina y en los otros dos disminuye, como se observa en la Figura 3.23(c).

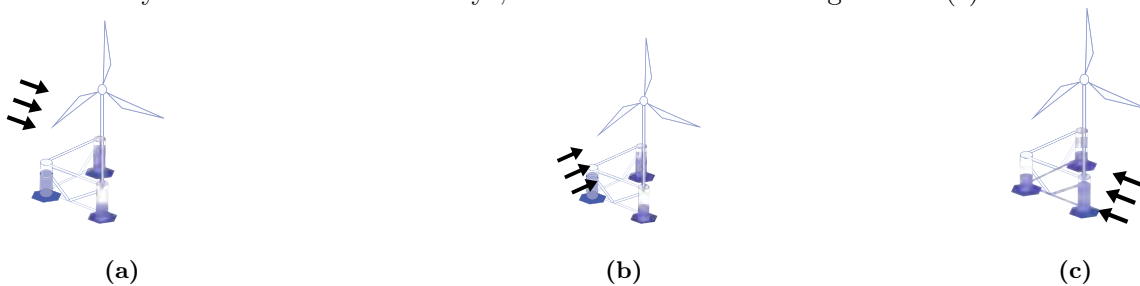


Figura 3.23: Comportamiento del sistema de lastre de la plataforma semisumergible WindFloat de Principle Power ante posible oleaje o viento.

Debido a que la plataforma semisumergible con la estructura de WindFloat de Principle Power es estable en cuanto a escoras y el viento, y como ya existen parques eólicos marinos funcionando de manera correcta en algunas zonas del mundo; para la presente

tesis se ha elegido este tipo de tecnología para el soporte de las turbinas en el Golfo de Tehuantepec. Es importante también mencionar que esta ingeniería logra soportar turbinas grandes de alta potencia, como los modelos Vestas de 164 metros de diámetro en el área de barrido, donde los parques existentes que utilizan WindFloat son de estos modelos vestas.

3.4.2. Líneas de Amarre.

Las líneas de amarre se utilizan para sujetar las plataformas flotantes al fondo marino, esto con el propósito de mantener a la turbina en un sitio indicado y proporcionar más estabilidad en cuanto a las olas y el viento. De acuerdo al tipo y características de la estructura de la base para el aerogenerador marino, se disponen de tres tipos: líneas tensadas, líneas tensadas verticales, y catenarío [Musial *et al.*, 2004].

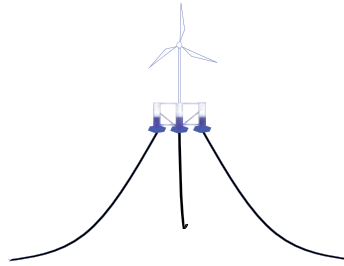


Figura 3.24: Líneas de amarre de tipo catenarío.

El tipo de líneas que se utiliza para las plataformas semisumergibles son las catenarias, que por lo general están sujetas cada una a los cilindros de la estructura. Por ello, para la presente tesis se utiliza tres de estas líneas de amarre separadas 120° (una para cada columna tubular) para las turbinas en el Golfo de Tehuantepec. Se dispone una parte de cadenas, y la otra de cuerda sintética. Además, se incorporan accesorios necesarios como elementos de flotabilidad, conectores de amarre, dispositivos de reducción de carga, entre otras cosas. En cuanto la longitud de la línea de amarre, ésta comúnmente es de seis a ocho veces la profundidad del agua [BVG Associates, 2023]. Como la mayor profundidad encontrada en el área descrita en este trabajo es de -143 m, y tomando siete veces esa extensión vertical, se ocupará aproximadamente 1,001 m de longitud para las líneas de amarre.

3.4.3. Anclaje.

Las anclas son los dispositivos necesarios que se incrustan en el fondo marino y no permiten que las líneas de amarre o las plataformas flotantes se muevan. Existen diferentes tipos de anclas: las de arrastre, de succión, pilotes hinchados y peso muerto o anclas de gravedad. Sin embargo, para seleccionar una se debe tomar en cuenta aspectos como la composición del suelo marino [Iberdrola, s.f.a, Offshore Wind Scotland, s.f.].

De acuerdo a investigadores, los sedimentos del Golfo de Tehuantepec son en su mayoría de arena. Sin embargo, también suele componerse de cohesivos como arcilla y limos [Morales de la Garza y Carranza-Edwards, 1995, Ruiz *et al.*, 2009]. Por lo que, dado que son adecuadas para este tipo de suelo (ya que permiten una buena incrustación del ancla proporcionándole sujeción firme), es el que se usa en WindFloat, y por lo general se usan en líneas de amarre en catenaria, el tipo de ancla más factible es el de arrastre.

3.4.4. Determinación de la Turbina.

Para la elección de la turbina, se eligen los aerogeneradores de gran potencia, pero que se ajusten a las condiciones del viento de la zona (incluyendo las provocadas por los ciclones), para no causar daños a la máquina. Esto se realiza identificando la velocidad del viento máxima, mínima y nominal con la que trabaje el aerogenerador.

De acuerdo a GWA, el recurso eólico promedio de la zona seleccionada para alturas de 10, 50, 100, 150 y 200 m son de 9.13, 10.72, 11.48, 11.93 y 12.45 m/s, respectivamente. Las velocidades máximas del viento provocados por los ciclones que han estado cerca de la zona en los últimos cuatro años, han sido de entre 12.5 y 30.6 m/s, con rachas de entre 18 a 39 m/s como se muestra en la Tabla 3.2. Vestas es una empresa fabricante de turbinas; en los últimos años esta compañía se ha dedicado a desarrollar los modelos V164 con potencia nominal de entre 6 a 9 MW o más. Algunos de estos diseños son capaces de trabajar con las velocidades antes mencionadas. Por esta razón, para los aerogeneradores del diseño en el Golfo de Tehuantepec, se analiza los del catálogo del modelo Vestas V164. De manera complementaria, es importante mencionar que las plataformas semi-sumergibles WindFloat logran soportar estas turbinas de gran tamaño de capacidades mayores a los 8 MW, debido a su diseño, estructura y material.

Área y Número de Unidades de Turbinas. La tecnología de las plataformas semi-sumergibles como el WindFloat son una novedad y demandan recursos financieros. Por ello, generalmente los parques eólicos marinos que utilizan este tipo de tecnología disponen de uno a cinco turbinas eólicas, ocupando menos espacio que otras grandes instalaciones. Por otro lado, los aerogeneradores requieren cierta distancia entre ellas para que no se interfieran entre sí por el efecto estela. Es por ello que, el área que se va a utilizar para el parque eólico marino propuesto será de aproximadamente 6 km² mostrado en la Figura 3.25. La elección de un espacio operativo reducido es debido a en la parte técnica: las plataformas semisumergibles requieren holguras específicas de amarres y maniobra que limitan el número práctico de unidades; a la parte económica: la inversión por unidad en tecnologías es elevada en etapas tempranas, lo que favorece proyectos de menor escala; y la parte ambiental: minimizar el espacio reduce impactos en hábitats marinos y facilita el cumplimiento de requisitos ambientales y de monitoreo.

El número de turbinas se establece de acuerdo al área que ocupa cada máquina del modelo Vestas V164.

Por lo tanto, ahora las nuevas coordenadas son: Punto 1: 16° 7' 38.75" N, 95° 4' 35.04" O, Punto 2: 16° 7' 39.47" N, 95° 2' 49.85" O, Punto 3: 16° 6' 39.20" N, 95° 2' 49.99" O y Punto 4: 16° 6' 39.53" N, 95° 4' 35.83" O.



Figura 3.25: Área de 6 km² en la ubicación seleccionada para el Golfo de Tehuantepec. [GWA, s.f.]. Imagen obtenida el 07 de marzo de 2025 con edición propia.

De acuerdo a [Prado, 2018], la longitud X es la distancia entre las turbinas acomodadas en columnas, y debe de ser de 3 a 5 veces el diámetro del rotor o área barrido de la máquina. Y la longitud Y, es la distancia entre las filas, y es de 5 a 9 veces el diámetro de la turbina, véase la Figura 3.26.

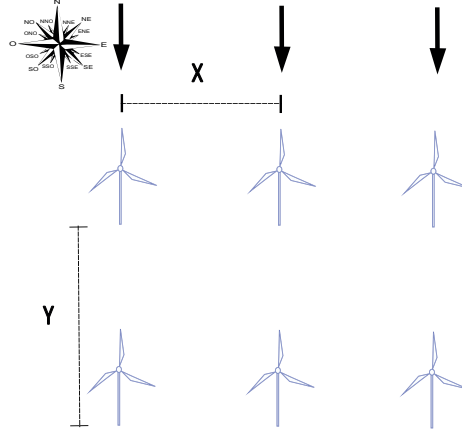


Figura 3.26: Distancias paralelas o perpendiculares de acuerdo a la dirección dominante del viento.

Para este trabajo se considera que las distancias en X e Y serán 5 y 8 veces el diámetro del área de barrido, respectivamente. Esta última se puede encontrar en los catálogos de los modelos Vestas V164 como una longitud de 164 metros. En consecuencia, tendríamos que en X debe ser una distancia de 820 metros y en Y 1,312 metros. Por lo tanto, el área por cada turbina se podría calcular como:

$$A_{ocupada} = \text{distancia } X \times \text{distancia } Y \quad (3.1)$$

$$A_{ocupada} = 820 \text{ m} \times 1312 \text{ m} = 1,075,840 \text{ m}^2 \quad (3.2)$$

Convirtiendo el área total disponible en unidades de metros al cuadrado, tenemos que:

$$A_{total} = 6 \text{ km}^2 = 6,000,000 \text{ m}^2 \quad (3.3)$$

Una vez teniendo el área que ocupa cada turbina y el área disponible, se procede a calcular el número máximo de turbinas que pueden abarcar en el espacio seleccionado. Esto se realiza al dividir una con respecto a la otra de la siguiente manera:

$$N = \frac{A_{total}}{A_{ocupada}} = \frac{6,000,000 \text{ m}^2}{1,075,840 \text{ m}^2} \approx 5.5 \quad (3.4)$$

Dado que no se puede tener una fracción de una máquina, el máximo de aerogeneradores que se pueden instalar en la región de la Figura 3.25 es de cinco. Adoptando como referencia casos prácticos de parques eólicos que implementan plataformas semisumergibles como el Kincardine y el WindFloat Atlantic, la potencia que se desea es aproximadamente de 40 MW. Por lo tanto, se puede disponer de diferentes turbinas con distintas potencias nominales que den cerca de la esperada. Las distintas configuraciones acopladas a los aerogeneradores identificados en el catálogo de los modelos V164, son los siguientes: 5 turbinas de 8 MW para generar los 40 MW, 3 de 9.5 MW y 1 de 8.8 MW para generar 37.3 MW, 4 de 8.8 y 1 de 3.5 MW para generar 38.7 MW, y 4 turbinas de 8.8 y 1 de 4.5 para generar 39.7 MW. Cada una de las opciones anteriores son aptas para generar casi 40 MW. Sin embargo, dado que la alternativa de cinco turbinas de 8 MW podría generar exactamente la potencia deseada, es la opción más viable.

Desde el punto de vista técnico, además de generar la potencia deseada, es necesario identificar que las cinco turbinas de 8 MW encontradas en el catálogo Vestas V164 se adapten a las velocidades que se disponen en la región seleccionada. Para ello, la velocidad media del viento que se maneja en la presente tesis es de 12.45 m/s a la altura de 200 metros. Esto debido a que la altura desde la superficie del mar hasta la parte más alta de la plataforma semisumergible WindFloat es aproximadamente esa medida. Asimismo, es importante que el modelo de la turbina soporte las velocidades máximas y rachas de viento provocados por los ciclones que han estado cerca de la zona en los últimos cuatro años, véase la Tabla 3.2.

Las velocidades que soporta el modelo Vestas V164/8000 presentadas en el Apéndice B de la hoja de datos son: velocidad mínima de viento: 4 m/s , velocidad nominal del viento: 13.0 m/s , velocidad del viento de corte: 25 m/s , velocidad del viento de supervivencia: 50 m/s , velocidad operativa del rotor: $4.8 - 12.1 \text{ rpm}$ y velocidad nominal del rotor: 10.5 rpm . En conclusión, dado que la velocidad media del viento es de 12.45 m/s a 200 m de altura al nivel del mar, las velocidades del viento registradas por los ciclones son entre 12.5 y 30.6 m/s , con rachas de entre 18 a 39 m/s , y como la velocidad mínima, la velocidad nominal y la velocidad de supervivencia son de 4 , 13 y 50 m/s , respectivamente, el modelo de turbinas que se utiliza en la presente tesis será el Vestas V164/8000. Por lo tanto, serán 5 turbinas de 8 MW para generar una potencia nominal de 40 MW. Es importante mencionar

también, que de acuerdo a la clasificación IEC 61400, las velocidades del viento se clasifican en Clase I (velocidades de 10 m/s), Clase II (velocidades de aproximadamente 8.5 m/s), clase III (velocidades de aproximadamente 7.5 m/s) y Clase S (que los valores son específicos del diseñador, y se da por lo general en las turbinas marinas) [Zhang, 2015]. En este caso, la turbinas Vestas 164/8000 es Clase S [Bauer, s.f., The Wind Power, s.f., Vestas, 2011].

Con esto, es importante mencionar que existen cuatro tipos de turbinas comerciales predominantes [Vittal y Ayyanar, 2012]: tipo 1: turbinas eólicas de velocidad fija con generadores de inducción de jaula de ardilla; tipo 2: turbinas eólicas con generadores de inducción de rotor bobinado y variación de velocidad limitada a través de un resistor externo; tipo 3: turbinas eólicas con generadores de inducción doblemente alimentados con velocidad variable; y tipo 4: turbinas eólicas con una máquina síncrona de imán permanente o una máquina de inducción con un convertidor completo y rango de velocidad variable. El modelo comercial de Vestas V164/8000 es una turbina tipo 4, es decir, dispone de una máquina síncrona de imán permanente con un convertidor completo y de velocidad variable, como se describe en la hoja de datos del Apéndice B.

Las turbinas tipo 4 disponen de un convertidor completo que interconectan al estator de la máquina síncrona de imanes permanentes con la red, como se muestra en la Figura 3.27.

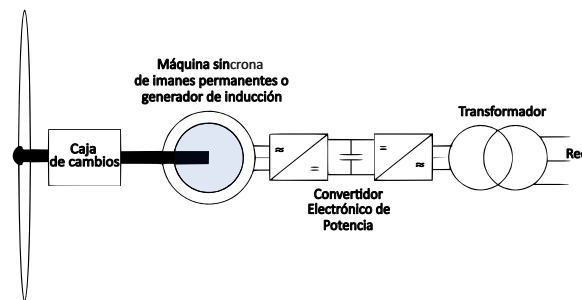


Figura 3.27: Esquema de la turbina eólica tipo 4. [Vittal y Ayyanar, 2012]. Traducida al español.

Asimismo, son de velocidad variable, esto quiere decir que tienen un amplio rango de velocidad del viento, por lo que tienen un control de grado de inclinación. Y, debido a su diseño, puede o no utilizar caja de engranajes [Huerta, 2008, Vittal y Ayyanar, 2012]. Los componentes de cada turbina como generadores y controladores, se encuentran por lo

general, dentro de la góndola. Comúnmente también disponen de un transformador en la base de la turbina, para que el voltaje nominal de salida del aerogenerador sea la misma que el voltaje nominal de los cables de interconexión del parque eólico.

Cable de Exportación. Los cables de exportación pueden ser en Corriente Alternada de Alta Tensión (HVAC, por sus siglas en inglés) o Corriente Continua de Alta Tensión (HVDC, por sus siglas en inglés). De acuerdo a [Trashorras, 2015], la primera se utiliza para distancias pequeñas o medianas, y la segunda opción se utiliza cuando las distancias en enlaces submarinos son mayores a 50 km. De acuerdo al área de la Figura 3.25 seleccionada para la presente tesis, la distancia del parque a las costas de Salina Cruz es de 14 km (véase la Figura 3.28). Este último es menor a 50 km, por lo que no será necesario utilizar el sistema de transporte de energía HVDC. En consiguiente, para el diseño, el cable de exportación para el parque de 5 turbinas de 8 MW en el Golfo de Tehuantepec será de HVAC.



Figura 3.28: Distancia del área en donde se dispondrá el parque eólico marino, a las costas de Salina Cruz. [GWA, s.f.]. Imagen obtenida el 02 de abril de 2025.

Subestación Eléctrica. Para ajustar y establecer el voltaje generado, así como posibilitar el transporte y distribución de la energía, se necesita de una subestación eléctrica [Prado, 2018]. Para parques eólicos marinos una subestación puede ubicarse en tierra o en el mar. De acuerdo a [Iberdrola, s.f.a], si el parque eólico marino se ubica próximo a la costa, se puede transportar la electricidad con un cable de exportación y posteriormente llegar a una subestación en tierra. Por otro lado, si el parque eólico marino se encuentra a distancias muy largas a la costa, se necesita de una subestación marina. En [Prado, 2018], se menciona

que la instalación de una subestación marina no es necesaria si se cumple al menos una de las siguientes condiciones: el proyecto es menor o igual a 100 MW, la distancia del parque eólico a la costa es igual o menor a 15 km y la conexión a la red es el voltaje de generación.

Por lo tanto, para el presente trabajo con 5 turbinas de 8 MW a una distancia aproximadamente de 14 km cercana a la costa de Salina Cruz, la subestación que se usará para transformar el voltaje (correspondiente al de la red) será en tierra.

3.4.5. Determinación de configuración.

Cables de Interconexión entre Turbinas. El sistema de interconexión es la red de cables que conectan a cada una de las turbinas del parque eólico, y, posteriormente, transporta la energía eléctrica ya sea a una subestación o al cable de exportación. En los parques eólicos en alta mar, los cables eléctricos de interconexión se ubican por lo general en el subsuelo. Sin embargo, en plataformas flotantes, una parte se ubica en el mar y la otra en el lecho marino. En este caso existen dos tipos de configuraciones del cable: onda floja y forma de w [Marcollo y Efthimiou, 2024]. Para las turbinas del parque eólico marino en el Golfo de Tehuantepec cuyas aguas son profundas, la opción más viable es utilizar el arreglo de onda floja mostrado en Figura 3.29, y se utiliza los accesorios necesarios para mantener la forma, tales como endurecedores de curvatura, módulos de flotación, y sujeción, entre otros, [Marcollo y Efthimiou, 2024].

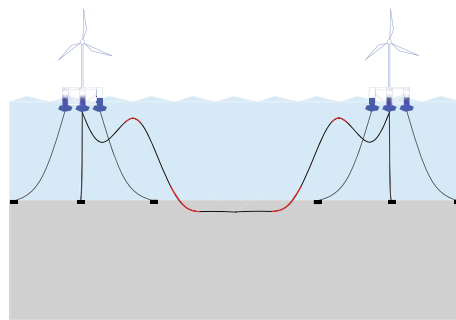


Figura 3.29: Configuración de onda floja del cable de interconexión dinámico.

También es importante considerar la manera en que se conectan los cables internos del parque hacia la subestación marina o al cable de exportación. La interconexión de dichas líneas eléctricas se realiza a través de cajas de empalmes submarinas, y se integran de distintas maneras: conexión en cadena (Daisy-chain), espina de pescado (Fishbone), estrella (Star) e híbrido de espina de pescado y estrella (Fishbone and star hybrid) [RPS, s.f.]. Para

la presente tesis la disposición que se considerará para el sistema de interconexión interna será la espina de pescado como se muestra en la Figura 3.30, evitando que una falla en una turbina perjudique a otra. No obstante, dado que el voltaje a la salida de cada turbina del modelo vestas V164/8000 es de 66 kV, descrita en el Apéndice B. Este será la tensión nominal de los cables de interconexión interna.

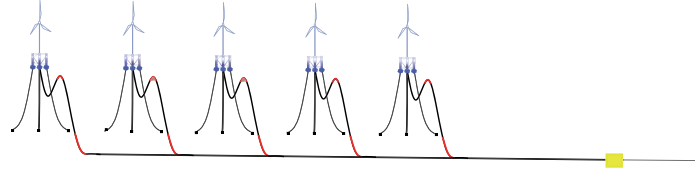


Figura 3.30: Sistema de interconexión del parque eólico marino en fishbone.

Configuración del Parque Eólico Marino. Antes de definir la disposición que tendrán las turbinas en el Golfo de Tehuantepec, es importante analizar la orientación de éstas. Para los aerogeneradores de eje horizontal, existen las formas: barlovento, en este las palas del aerogenerador hacen frente a la dirección de donde proviene el viento, y la góndola se encuentra detrás; y sotavento, en el que la góndola de la turbina se encuentra frente a la dirección de donde proviene el viento y las palas están por detrás [Prous, 2018]. Es común utilizar las turbinas de eje horizontal en configuración barlovento. Retomando la rosa de los vientos de la Sección 3.3.1.2.1, las coordenadas establecidas en el Golfo de Tehuantepec indica que la dirección proveniente del viento con más frecuencia es en el Norte, con rachas ligeras al Norte-Noreste. Ahora, las turbinas estarán en barlovento y harán frente a los vientos dominantes del Norte, con dispositivos de rotación automatizada que permita moverlos, p.ej., al Norte-Noreste, como se muestra en la Figura 3.31.

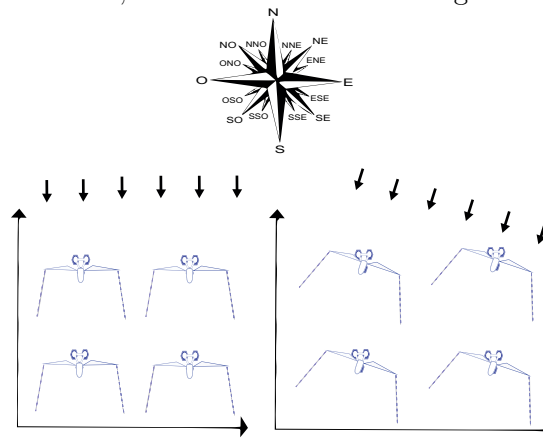


Figura 3.31: Configuración en barlovento con dirección al norte para las turbinas del Golfo de Tehuantepec.

Ahora se analiza las disposiciones de las turbinas, según [Prado, 2018], existen seis tipos de disposiciones o diseño de planta eólica, como lineal con filas y columnas paralelas, lineal al tresbolillo por filas, lineal al tresbolillo por columnas, lineal al tresbolillo por filas y columnas, circular y circular tresbolillo. En el caso de las lineales, recordemos la Figura 3.26, en donde X representa la distancia que hay entre columnas y Y sería la distancia que hay de una fila a otra. Sin embargo, en los escenarios en donde se utiliza el término “tresbolillo”, existe una tercera distancia la cual la denominamos x' . Esta longitud es un desplazamiento de la siguiente fila o columna. En general, es la mitad de la distancia X o Y , como se muestra en la Figura 3.32. Para los casos de tresbolillos, es importante señalar que, por ejemplo, si una fila o columna está normal y la siguiente desplazada, la tercera estará de nuevo normal y la posterior de esta será de nuevo desplazada, y así sucesivamente, [Prado, 2018].

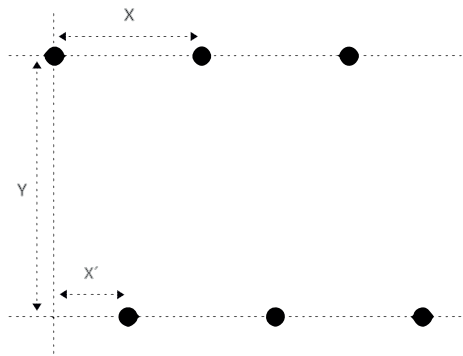


Figura 3.32: Distancias en disposiciones lineales. [Prado, 2018].

En las disposiciones circulares se toma en cuenta otros dos factores, lo cuales son el radio de la circunferencia que se forma y los ángulos como en la Figura 3.33.

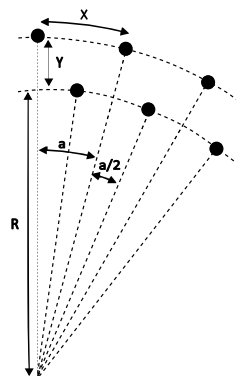


Figura 3.33: Distancias en posiciones circulares. [Prado, 2018].

Como complemento de los seis arreglos antes mencionados, se puede añadir otros dos más para parques pequeños de pocas turbinas. Estas serían la disposición lineal de distancia entre filas, en donde se utiliza únicamente la medida en Y, y la disposición de distancia entre columnas, en donde se utiliza únicamente la medida en X. Recordemos también que, de acuerdo a [Prado, 2018], la distancia entre las turbinas acomodadas en columnas, es decir, X, debe ser entre 3 a 5 veces el diámetro del rotor o área de barrido. Por otro lado, la distancia en filas es de 5 a 9 veces el diámetro de la misma, o sea, Y.

Para el parque eólico de turbinas con modelos Vestas V164/8000 del Golfo de Tehuantepec, en donde el diámetro del área de barrido es de 164 metros, se utilizará 5 y 8 veces el valor de este para X e Y, respectivamente. Con lo anterior, las distancias de los diferentes arreglos quedarían como se muestra en la Tabla B.2 del Apéndice B. La configuración más factible de las posiciones de las cinco turbinas del modelo Vestas V164/8000 en el Golfo de Tehuantepec es en Lineal de distancia entre columnas, esto debido a que, el área que abarcaría sería menor. Además, es más viable para el diseño del cable en el sistema interconexión del parque, ya que este se seleccionó como espina de pescado; de esta manera se conectaría directamente al cable de exportación, y llegar posteriormente a la subestación en tierra en las costas de Salina Cruz como se muestra en la Figura 3.34.

En consecuencia, para el parque eólico marino con cinco turbinas en el Golfo de Tehuantepec, la perspectiva desde la altura se vería como se muestra en la Figura 3.34.

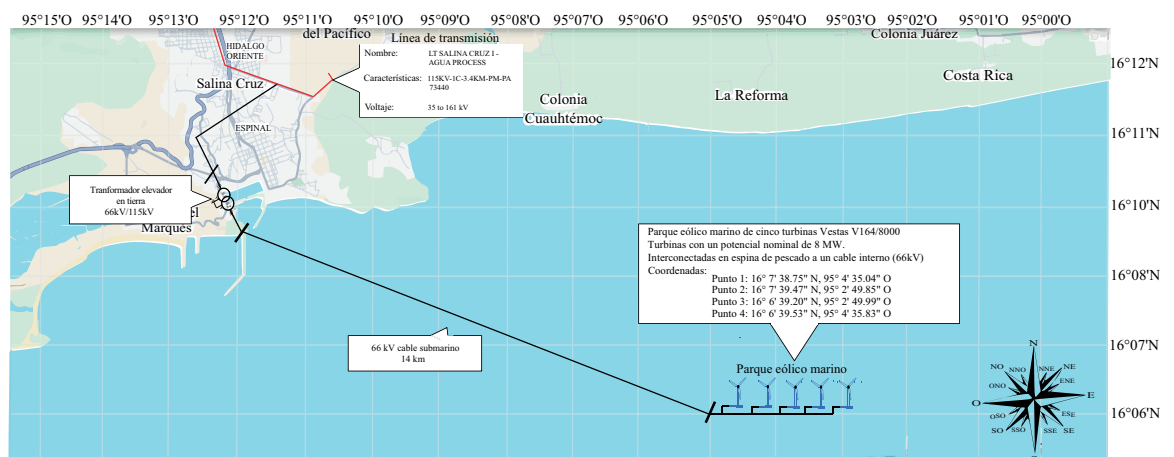


Figura 3.34: Área de estudio (captura de Google Earth, edición propia). [Google, s.f.].

Otro aspecto importante para la elección de esta disposición, es el hecho que contribuiría a que casi toda la velocidad del viento que proviene del norte pueda ser atrapada por todas las turbinas. Adicionalmente, tomando como ejemplo en la práctica en el parque de WindFloat Atlantic, este también tiene las turbinas en forma lineal. Es importante mencionar que de esta manera habría menor impacto social por el ámbito pesquero, debido a que se ocuparía menos área. En la Figura 3.35 se muestran las distancias y la distribución de las turbinas en Lineal de distancia entre columnas para el Golfo de Tehuantepec.

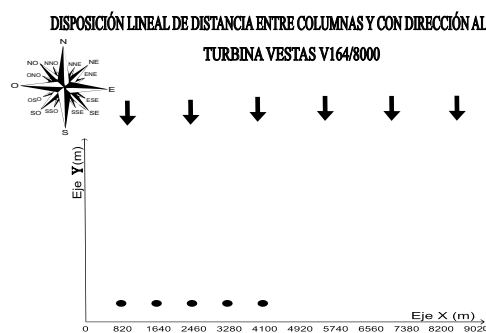


Figura 3.35: Propuesta de disposición lineal de distancia entre columnas con dirección al norte.

Para el parque eólico marino propuesto en el Golfo de Tehuantepec de cinco turbinas de 8 MW de modelo Vestas V164/8000, interconectados con cables de 66 kV que a su vez se conecta a un cable de exportación, de aproximadamente 14 km, para dirigir el voltaje a un transformador en tierra que eleve el voltaje de acuerdo a la red de 115 kV, cercana a la costa de Salina Cruz, el diagrama unifilar sería como se muestra en la Figura 3.36.

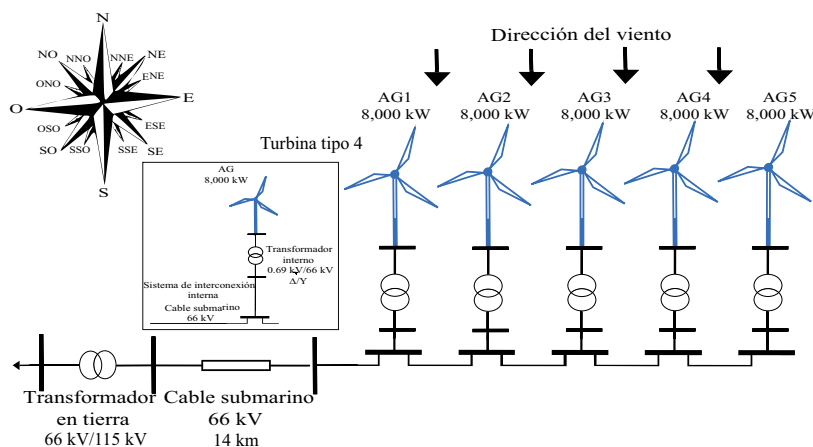


Figura 3.36: Diagrama unifilar del parque eólico marino propuesto en el Golfo de Tehuantepec.

Una vez diseñada la propuesta de un parque eólico marino, seleccionando los com-

ponentes y realizando las configuraciones más viables, se procede a estudiar su factibilidad operacional e implementación mediante el software PSCAD/EMTDC[®], para analizar el comportamiento en estado estacionario y transitorio bajo distintos estados de operación. Para ello, el diseño en el software se llevará a cabo con base en el diagrama unifilar de la Figura 3.36 y las especificaciones descritas en este Capítulo.

3.5. Conclusiones.

Debido a que se tiene un gran potencial eólico en el país durante la mayor parte de año (con velocidades de entre 9.88 y 12.75 m/s), se tiene una gran complementariedad energética con la energía solar, no es una zona que esté protegida y se dispone de redes de transmisión cercanas a las costas, la alternativa más viable para instalar un parque eólico marino en México es el Golfo de Tehuantepec, Oaxaca. Es importante mencionar que, debido a que en esta región se dispone de complementariedad energética con la energía solar durante gran parte del año, se podrían realizar estudios o trabajos futuros de investigación de un sistema híbrido eólico-solar.

En relación a la ubicación descrita en las coordenadas, es la región más factible debido a que no es una zona con mucha concentración de pesca, en consecuencia, se disminuiría el impacto social por los pobladores que toman esta actividad. Por lo cual, será la ubicación de referencia para instalar el parque eólico, aunque los km² del área cambie.

De acuerdo a los estudios de batimetría realizados por medio de páginas web, la profundidad de la zona es entre -127 y -143 metros. En consecuencia, las opciones más viables para las plataformas de las turbinas son las flotantes. Para esto, las ventajas y desventajas vistas en la Tabla 3.3, indican que la tecnología más acertada a utilizar para los aerogeneradores son las semi-sumergibles, en especial los WindFloat, en donde ya existen algunos parques eólicos en altamar con esta innovación. Las líneas de amarre más viables y comúnmente utilizadas para estas plataformas, es el catenario con un sistema de anclas de arrastre. Esto último debido a que es adecuado al suelo arenoso, arcilloso y limoso que existen en el Golfo de Tehuantepec.

La rosa de los vientos de la Figura 3.20 indica que el viento proviene con más frecuencia del Norte, lo que hace más factible que las turbinas estén colocadas en barlovento

con dirección al norte, para aprovechar el mayor potencial eólico.

Para una altura de 200 m, la velocidad de la ubicación es de 12.45 m/s. Considerando esto y las velocidades máximas y rachas del viento cuyos valores son entre 12.5 - 30.6 y 18 -39 m/s, respectivamente, el modelo de turbina más factible es la V164/8000, ya que las velocidades a las que trabaja (mostradas en el Apéndice B se adecuan a las anteriores. Este modelo V164/8000 es una turbina tipo 4 de clase s, es decir, dispone de una máquina sincrónica de imán permanente con un convertidor completo y de velocidad variable.

Considerando un área de 6 km² (debido a que es más común utilizar áreas pequeñas para plataformas semisumergibles, ya es una tecnología novedosa), y utilizando el diámetro del área de barrido de las turbinas V164/8000 para calcular el área que ocupa cada aerogenerador, se obtiene que el número de turbinas máximas para dicha área es de 5. Aunado a esto, la opción más viable para generar 40 MW son 5 turbinas de este modelo. Asimismo, las turbinas vestas son comúnmente utilizadas en las plataformas semi-sumergibles WindFloat.

Por lo general, la disposición de los cables para plataformas semisumergibles se encuentra debajo del suelo y flotando en el mar (antes de llegar al suelo) con equipos necesarios para evitar cargas y fatigas por las olas. Es por ello, que la opción ideal para la parte dinámica del cable de cada turbina es en una configuración de onda floja. Además, dado que la salida de las turbinas el voltaje nominal es de 66 kV, el cable de interconexión será de esta misma tensión para luego conectarse al cable de exportación. Este último será de HVAC, ya que la distancia del área del parque a tierra es de 14 km. Asimismo, debido a la longitud, la subestación transformadora será en tierra para elevar el voltaje del parque al voltaje que corresponde al de la red. Es decir, transformar los 66 kV a 115 kV.

Por último, la configuración más factible de las posiciones de las cinco turbinas del modelo vestas V164/8000 en el Golfo de Tehuantepec es Lineal de distancia entre columnas, para abarcar un área menor que las demás alternativas y sea más viable para el diseño del cable en el sistema de interconexión del parque. De igual manera, de que se toma como ejemplo en la práctica en el parque de WindFloat Atlantic.

Es por ello que, para el parque eólico marino propuesto en el Golfo de Tehuantepec de cinco turbinas de 8 MW de modelo Vestas V164/8000, conectados con cables de interconexión de 66 kV a un cable de exportación, de aproximadamente 14 km, para dirigir

el voltaje a un transformador en tierra que eleve el voltaje de acuerdo a la red de 115 kV, cercana a la costa de Salina Cruz, el diagrama unifilar sería como se muestra en la Figura 3.36. Este diseño se basará en la implementación en el software PSCAD/EMTDC[®], para el estudio de la factibilidad operacional mediante casos de estudios como el estado estacionario y transitorio, lo cual, será descrito en el Capítulo 4.

Capítulo 4

Operación en Estado Estacionario y Estado Transitorio de Parques Eólicos Marinos

4.1. Introducción

Para la evaluación de la factibilidad y el análisis de estabilidad de un sistema eléctrico, es fundamental considerar los estudios de condiciones en estado estacionario y estado transitorio. Este análisis implica determinar la respuesta de las magnitudes eléctricas, específicamente voltajes y corrientes, desde la fase de suministro hasta la estabilización del sistema. Además, es necesario realizar un estudio de respuesta ante condiciones de falla, incluyendo fallas trifásicas, monofásicas a tierra y otras configuraciones, con el objetivo de evaluar la estabilidad del sistema, su capacidad de recuperación y la efectividad de los esquemas de protección y control en condiciones de contingencia. Por consiguiente, en el presente capítulo se lleva a cabo el análisis de las respuestas de variables eléctricas, tales como voltaje y corriente a la salida del parque eólico marino, la línea de transmisión, los puntos de conexión a la red eléctrica o a la carga, según corresponda. Este análisis tiene como objetivo evaluar el comportamiento del sistema bajo condiciones de operación específicas, así como la identificación de posibles fenómenos transitorios o de estabilidad eléctrica.

Por lo tanto, en el presente trabajo se presenta el diseño y modelo del sistema de parque eólico marino obtenido del paquete de PSCAD/EMTDC® denominado “Type 4 Wind Turbine Generators” [PSCAD, 2018]. El modelo fue implementado y simulado en PSCAD/EMTDC®, versión 5.0, licencia educativa 426571, instalado en una laptop **DELL con procesador Intel Core i7, 11a generación, 64 bits, 2.92 GHz de velocidad y 8 GB de RAM**. Uno de los modelos que dispone para generadores de turbinas eólicas es el tipo 4, que puede ser adaptado para que cada turbina genere 8 MW con una salida de voltaje nominal de 66 kV realizando ajustes en los parámetros, según se detallan en el Apéndice C. En todos los casos, se considera un flujo de viento constante de 12.45 m/s.

4.2. Casos de Estudio.

El diseño y la simulación del parque eólico marino realizado presenta 6 casos de estudio descritos a continuación:

- El Caso de Estudio 1 presenta el diagrama esquemático obtenido a partir del diseño del parque eólico marino, como se muestra en la Figura 4.1. Este diseño, considera una instalación eólica marina de 5 turbinas de 8 MW con una salida de 66 kV que pasa por un cable submarino de 14 km hasta la conexión con la red eléctrica en la costa de Salina Cruz y posteriormente se conectará a un transformador para elevar el voltaje a 115 kV, donde se suministre a una carga.

Por ello, este caso estudia el comportamiento de las formas de onda de voltaje de fase y corrientes medidas en la salida de la planta eólica y en las terminales de la carga considerado un flujo constante del viento de 12.45 m/s, para el análisis de la solución en estado estacionario periódico.

- El caso de estudio 2 ilustra la solución en estado transitorio del parque eólico marino bajo condiciones de arranque de las cinco turbinas eólicas marinas de 8 MW. Además, en esta simulación se analizan las magnitudes de los voltajes y corrientes a la salida de la planta y las terminales de la carga. Este análisis caracteriza el arranque de las turbinas y el tiempo que tarda en llegar a su estado estacionario de operación.
- El caso de estudio 3 aborda las respuestas obtenidas de las formas de onda de los voltajes de fase y las corrientes instantáneas a la salida de la planta eólica, en la línea

de distribución y en las terminales de la carga ante la presencia de una falla monofásica a tierra, según se muestra en la Figura 4.8. Esta falla ocurre durante un corto-circuito en la fase A en el sistema de distribución a 1.5 segundos a partir de que las turbinas generan energía eléctrica en estado estacionario de operación.

- El caso de estudio 4 presenta el parque eólico marino para el estudio del sistema con la presencia de una falla trifásica aplicada en la línea de distribución de la Figura 4.15.
- El caso de estudio 5 presenta al parque eólico marino conectado a un bus infinito, después de elevar el voltaje a 115 kV, (voltaje disponible en las líneas de transmisión cercanas a Salina Cruz). Por ello, se analiza el comportamiento de las formas de onda de voltajes de fase y corrientes instantáneas a la salida de la planta eólica y en la línea de distribución aérea, para el análisis de la solución en estado estacionario periódico.
- El caso de estudio 6 analiza el parque eólico conectado a un bus infinito ante la presencia de una falla trifásica, según se muestra en la Figura 4.26.

4.2.1. Caso de Estudio 1: Operación en Estado Estacionario

La Figura 4.1 ilustra el diagrama esquemático del parque eólico marítimo conectado a una carga y a un bus infinito, para el análisis de la solución en estado estacionario. Este sistema consta de un aerogenerador tipo 4 basado en el modelo vestas V164/8000.

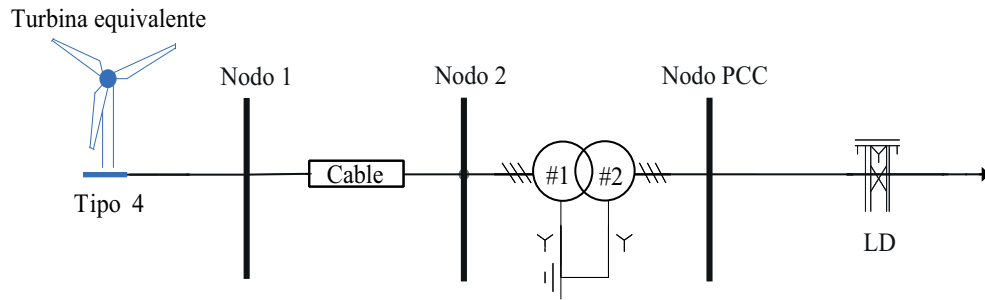


Figura 4.1: Diagrama esquemático del sistema de parque eólico marítimo.

El diseño de la turbina eólica en PSCAD/EMTDC[®] se configuró para representar 5 aerogeneradores de 8 MW de potencia nominal con una salida de voltaje de 66 kV. Se utilizaron velocidades nominales del viento de 13.0 y 25 m/s entre otras características descritas en el Apéndice C. Además, se adaptó con un sistema de distribución mediante un cable marítimo de exportación que lleva el voltaje nominal de 66 kV del sistema de conexión interna de la planta hasta las costas de Salina Cruz, a una distancia de 14 km. Asimismo,

se ajustó un transformador estrella-estrella cercana a las costas de Salina Cruz para elevar el voltaje de 66 a 115 kV (voltaje al que corresponde a las redes cercanas a la zona), una línea de distribución aérea y una carga.

4.2.1.1. Datos de Simulación:

A partir de la simulación del sistema eléctrico de la Figura 4.1 se presentan los resultados obtenidos de la operación del parque eólico marítimo diseñado e implementado para el análisis en estado estacionario, considerando una velocidad del viento constante de 12.45 m/s en cada unidad. Las Figuras 4.2, 4.3, 4.4 y 4.5 muestran a las magnitudes de las corrientes I_a , I_b y I_c y los voltajes de fase V_a , V_b y V_c en la carga y en el parque eólico marino. Dichos resultados se obtuvieron para 5 turbinas de 8 MW de potencia nominal con un diámetro de área de barrido de 164 metros y velocidad de corte del viento de 25 m/s.

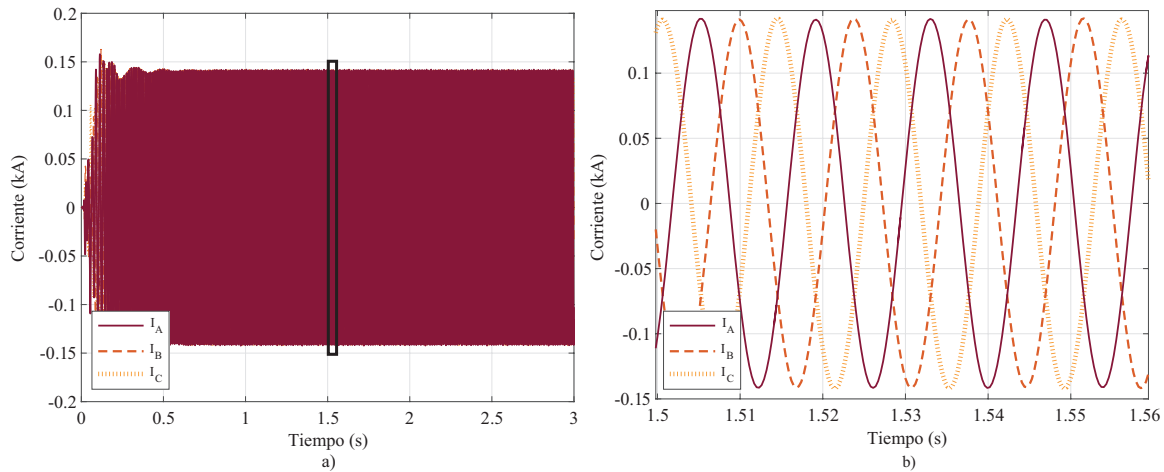


Figura 4.2: Formas de onda de corrientes en estado estacionario medidas en terminales de la carga: a) Corriente en la carga, b) Ampliación de corriente en la carga.

Por ejemplo, en las Figuras 4.2a y 4.3a se observa que, en un intervalo de tiempo de 0 a 0.6 segundos, se presenta un transitorio inicial de corta duración, tras el cual el sistema alcanza el estado estacionario en aproximadamente 0.6 segundos. Por otro lado, las Figuras 4.2b y 4.3b muestran el comportamiento de las formas de onda de las corrientes en la carga y en el parque eólico marino, respectivamente, según se detalla en una ampliación en el intervalo entre 1.5 y 1.56 segundos. En el caso de las Figuras 4.3a y 4.3b se observa que, cuando las turbinas eólicas se encuentran en reposo, no se genera corriente. Posteriormente, cuando un flujo de viento las atraviesa, se produce el transitorio inicial de arranque de

las turbinas, y, finalmente, la corriente comienza a estabilizarse hasta llegar a su estado estacionario después de los 0.6 segundos. Ahora, en un acercamiento en la Figura 4.2b entre 1.5 y 1.56 segundos, se muestra que la amplitud de las tres fases de la corriente I_a , I_b e I_c alcanzan 0.14 kA de magnitud, que se encuentra dentro de su rango nominal de operación.

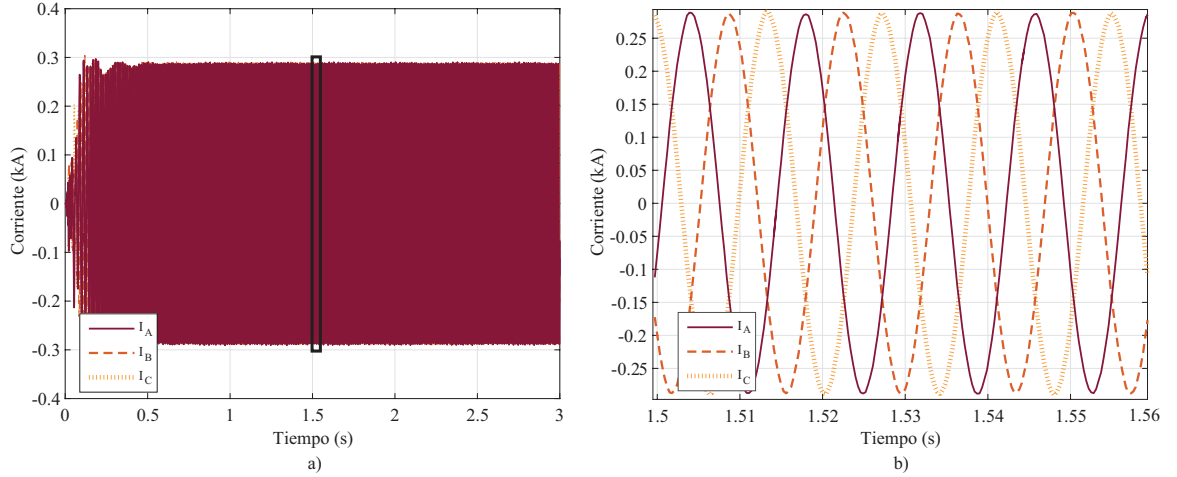


Figura 4.3: Formas de onda de corrientes en estado estacionario en el parque eólico marino: a) Corriente instantánea b) Ampliación de corriente instantánea.

Las Figuras 4.4 y 4.5 se presentan las formas de onda de los voltajes de fase medidos en la carga y en el sistema de parque eólico marino, respectivamente. Las Figuras 4.4a y 4.5a muestran la condición en estado estacionario del sistema, alcanzada tras un período de simulación de 3 segundos, durante el cual el sistema se estabiliza después de la puesta en marcha. En estas gráficas se puede observar que, tras la fase inicial, los voltajes de fase alcanzan valores relativamente constantes, lo que indica que el sistema ha llegado a un equilibrio dinámico. Cabe destacar que, durante el proceso de arranque del sistema eólico, se identifican transitorios de baja amplitud que ocurren en los primeros instantes de la simulación. Estos transitorios tienen una duración aproximada de 0.71 y 0.6 segundos en las Figuras 4.4a y 4.5a. Estos fenómenos transitorios se caracterizan por variaciones abruptas en las magnitudes de los voltajes de fase, las cuales disminuyen progresivamente conforme el sistema se acerca a la condición estable. La presencia de estos transitorios se atribuye a la respuesta dinámica propia de la puesta en marcha del parque eólico, cuyos componentes del sistema, como generadores, convertidores y/o controladores, interactúan y sincronizan ante la conexión inicial con el sistema eléctrico. Se puede observar que las amplitudes de los voltajes en la Figura 4.4, no corresponden al voltaje de línea a línea de 115 kV, debido a

que PSCAD/EMTDC® transmite la información de los voltajes de fase.

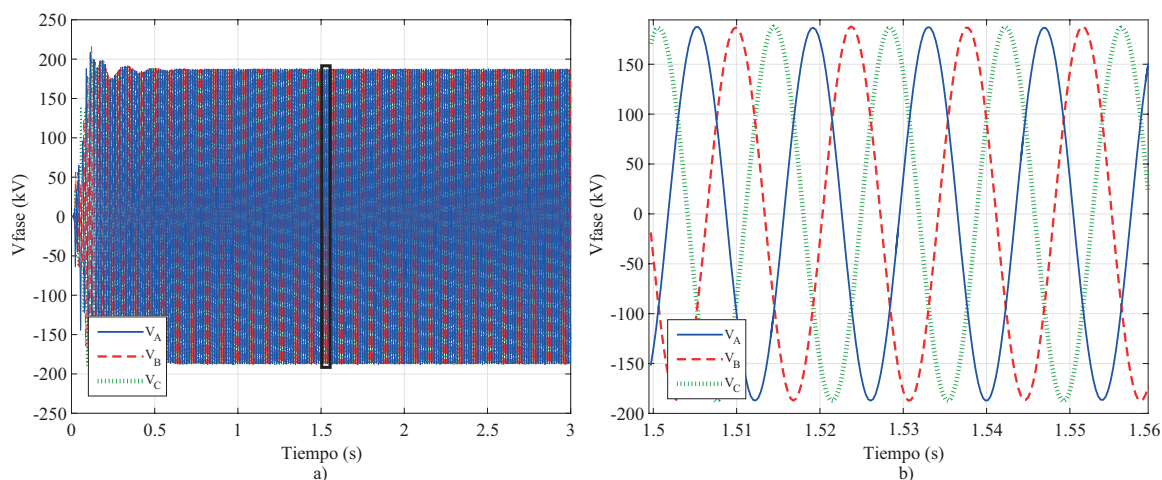


Figura 4.4: Formas de onda de voltaje en estado estacionario: a) Voltajes de fase en la carga, c) Ampliación de las formas de onda de voltaje de fase en la carga.

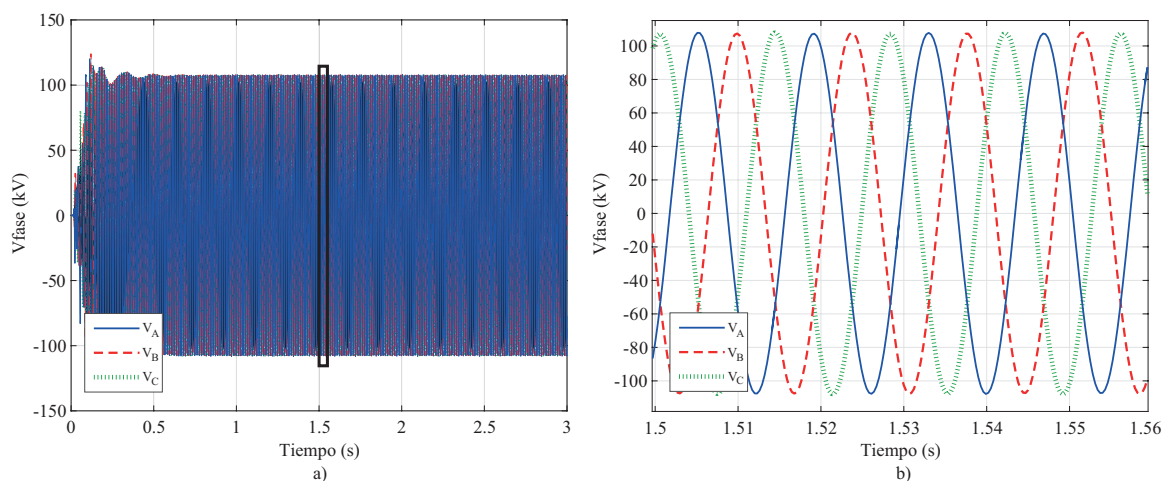


Figura 4.5: Formas de onda de voltaje en estado estacionario: a) Voltaje en los puntos del parque eólico, c) Ampliación de las formas de onda de voltaje de fase.

Además, en las Figuras 4.4b y 4.5b se realiza una ampliación en el lapso de tiempo comprendido entre 1 y 1,56 segundos, seleccionado particularmente para analizar con mayor detalle las características de las formas de onda en estado estable. En estas ampliaciones, se observan claramente las formas de onda de los voltajes de fase V_a , V_b y V_c . Los valores máximos de estos voltajes alcanzan aproximadamente 186.5 kV y 107.07 kV, respectivamente. La forma de onda de cada fase muestra la presencia de oscilaciones periódicas que corresponden a las variaciones propias del sistema en condiciones de operación estable, así como a las fluctuaciones típicas en voltajes de línea en sistemas de generación eólica marina.

4.2.2. Caso de Estudio 2: Operación en Estado Transitorio

Como se mencionó previamente, durante arranque del sistema eólico de la Figura 4.1, se distinguen transitorios de baja amplitud al inicio de la simulación. Por ejemplo, en el transitorio de la Figura 4.6a, se observa un aumento en la amplitud de las corrientes en las tres fases hasta alcanzar un pico máximo, posteriormente disminuye acercándose a su condición estable. De la misma manera, se muestra el cambio abrupto de los voltajes de fase en el parque eólico en la Figura 4.6b. En ambos casos la duración de este estado es de 0.6 segundos. El comportamiento de las corrientes y los voltajes de fase medidos en la carga se muestran en las Figuras 4.7a y 4.7b. En donde se observa un incremento alcanzando un valor pico 0.16 kA y 213 kV, y subsiguientemente disminuyen, logrando su condición estable con amplitudes de 0.14 kA y 186.5 kV para las corrientes y los voltajes, respectivamente. En ambos casos se tuvo una duración de 0.71 segundos en estado transitorio.

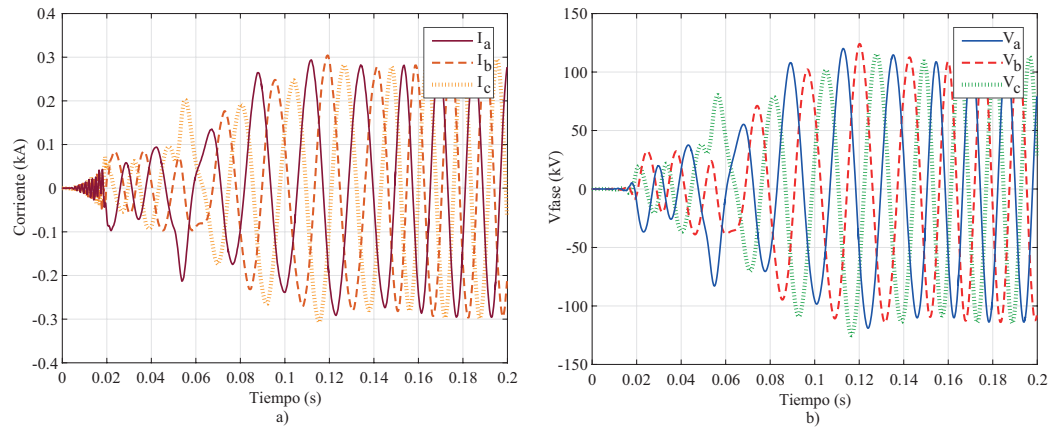


Figura 4.6: Transitorios iniciales: a) Corrientes de rama, b) Voltajes de fase.

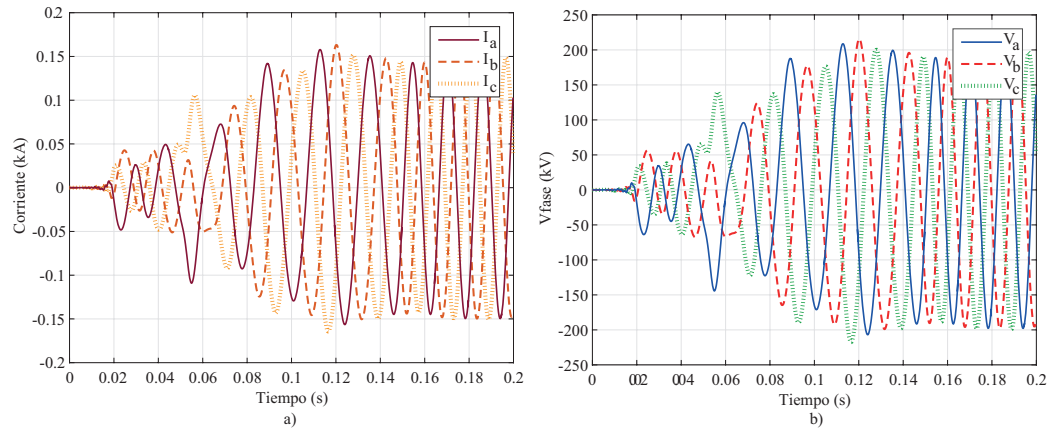


Figura 4.7: Transitorios iniciales: a) Corrientes en la carga, b) Voltajes de fase en la carga.

4.2.3. Caso de Estudio 3: Falla Monofásica a Tierra en la Línea de Distribución.

En este caso de estudio se considera una falla monofásica, según se ilustra en los diagramas esquemáticos del diseño de un parque eólico marino de las Figuras 4.8a y 4.8b. Este estudio permite observar variaciones de corriente y voltaje en el sistema del parque eólico marítimo, la línea de distribución y el PCC entre la carga y el sistema. Asimismo, se analiza el tiempo que tarda el parque en estabilizarse después de ocurrir la falla, la cual se presenta en la fase A, en 1.5 segundos con duración de 0.25 segundos en el Nodo PCC, entre la carga y el sistema, según se observa en la Figura 4.8b.

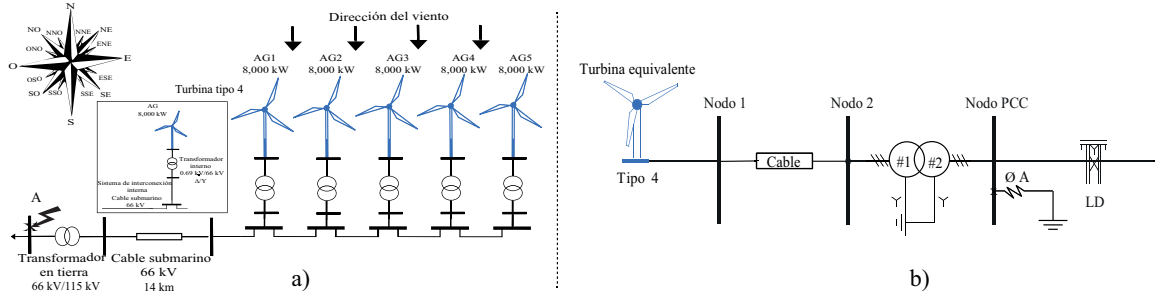


Figura 4.8: Diagramas esquemáticos del sistema de parque eólico marino con una falla monofásica: a) Configuración de turbinas de tipo 4, b) diagrama unifilar aplicando un fallo monofásico.

Un acercamiento en la Figura 4.9b entre 1.5 y 1.75 segundos, muestra el voltaje V_a en terminales del parque eólico, disminuyendo en 98.4 %, mientras el V_c incrementa 42.15 %, debido a la asimetría generada por la falla, provocando que el neutro busque el equilibrio.

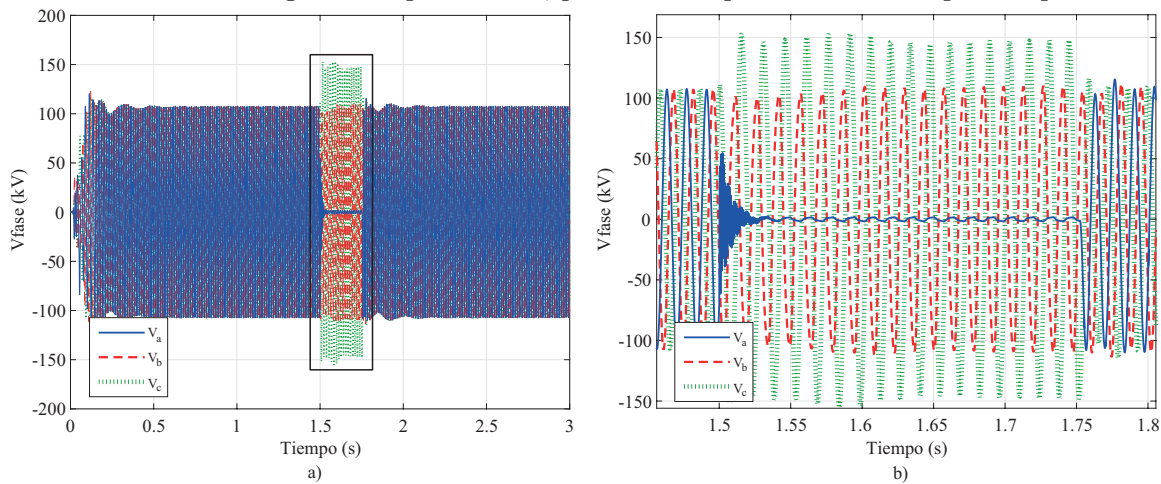


Figura 4.9: Formas de onda de voltaje durante Falla monofásica: a) Voltaje en los puntos del parque eólico, b) Ampliación de las formas de onda de voltaje de fase

Por el contrario, en una ampliación de la Figura 4.10b, se ilustra un incremento de las corrientes I_a y I_c de 40 % y 42.15 %, respectivamente, y la corriente en la fase B es prácticamente constante. Posteriormente, los voltajes y las corrientes comienzan a estabilizarse progresivamente hasta llegar a su condición estable en los segundos 2.27 y 1.75, respectivamente, según se muestran en las Figuras 4.9a y 4.10a.

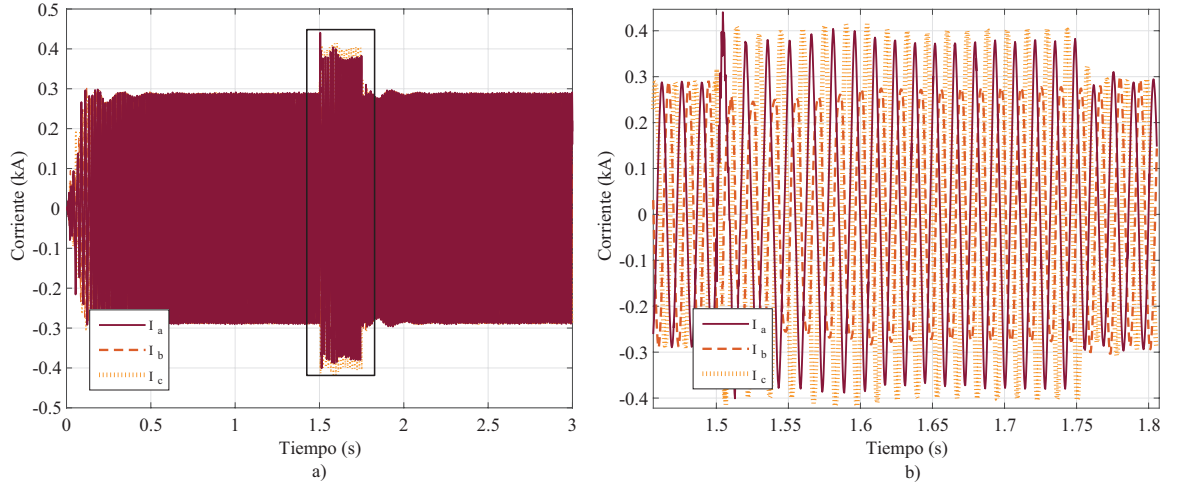


Figura 4.10: Formas de onda de corriente durante falla monofásica: a) Corriente en los puntos del parque eólico, b) Ampliación de corriente

Por otra parte, en las Figuras 4.11 y 4.12 se presentan las formas de onda de los voltajes de fase y corrientes, respectivamente, medidas en la línea de distribución.

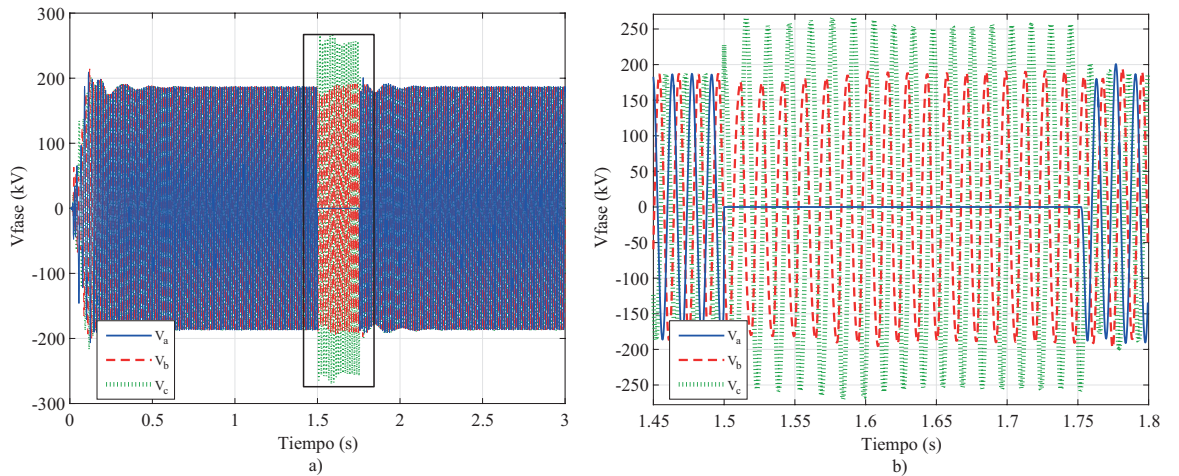


Figura 4.11: Formas de onda de voltaje de línea con carga durante falla monofásica: a) Voltaje de línea con carga, b) Ampliación de voltaje de línea con carga.

En una ampliación en la Figura 4.11b entre los segundos 1.5 y 1.75, se tiene que la magnitud del voltaje V_a decrece el 100 %, el voltaje V_c incrementa 41.82 % y la fase B

no presenta cambios considerables durante la falla. Durante el lapso de tiempo en la Figura 4.12b de 1.5 a 1.75 segundos, la corriente I_a se reduce 99.29 %, la corriente I_c crece 42.85 %, y en la corriente I_b no hay cambios significativos. Al liberarse la falla, los voltajes y corrientes se estabilizan hasta llegar a su estado estacionario en 2.27 segundos, según se muestra en las Figuras 4.11a y 4.12a.

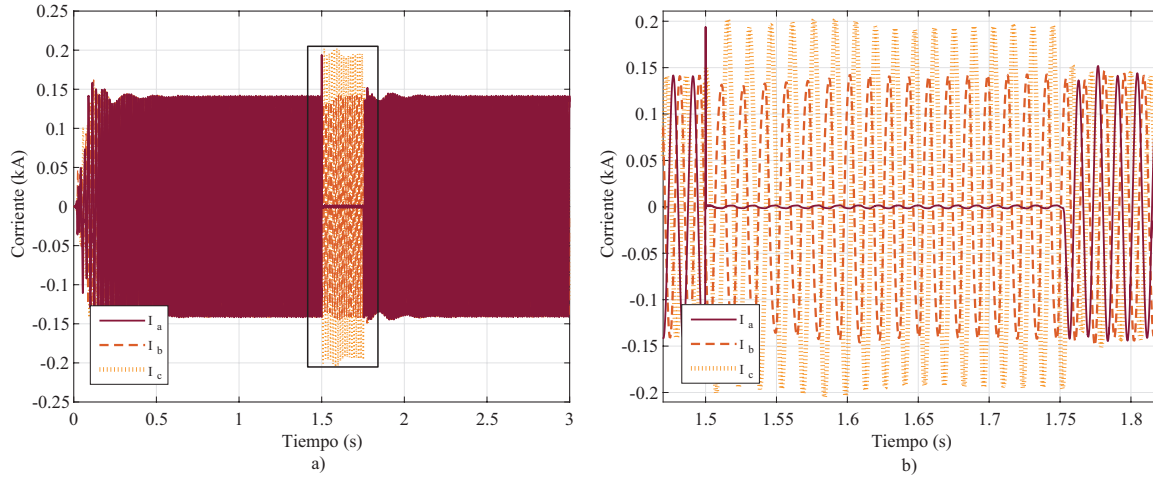


Figura 4.12: Formas de onda de corriente de la línea con carga durante falla monofásica: a) Corriente de línea con carga, b) Ampliación de corriente de línea con carga.

Las formas de onda de los voltajes y las corrientes en la carga, se muestran en las Figuras 4.13 y 4.14 respectivamente.

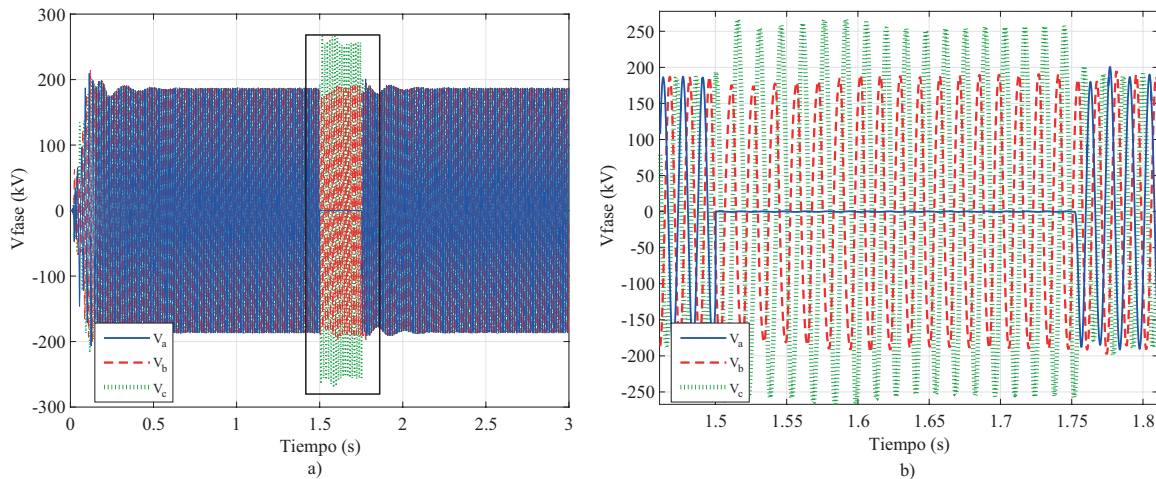


Figura 4.13: Formas de onda de voltaje de carga con carga durante falla monofásica: a) Voltaje de carga con carga, b) Ampliación de voltaje de carga con carga.

Ampliando la falla mostrada en la Figura 4.13b entre los segundos 1.5 y 1.75, se observa un incremento en el voltaje V_c del 41.82 %, mientras que, el voltaje V_a decrece a

ceros y el voltaje V_b tiene cambios mínimos durante la falla. De la misma manera, en un acercamiento en de la Figura 4.14b se observa que la corriente I_a es prácticamente cero debido a que la carga es un elemento pasivo y solo la consume, I_c incrementa 42.85 % y I_b no presenta cambios significativos. Al removerse la falla, los voltajes de fase y corrientes comienzan a estabilizarse hasta llegar a su estado estacionario en el segundo 2.27, según se muestra en las Figura 4.13a y 4.14a.

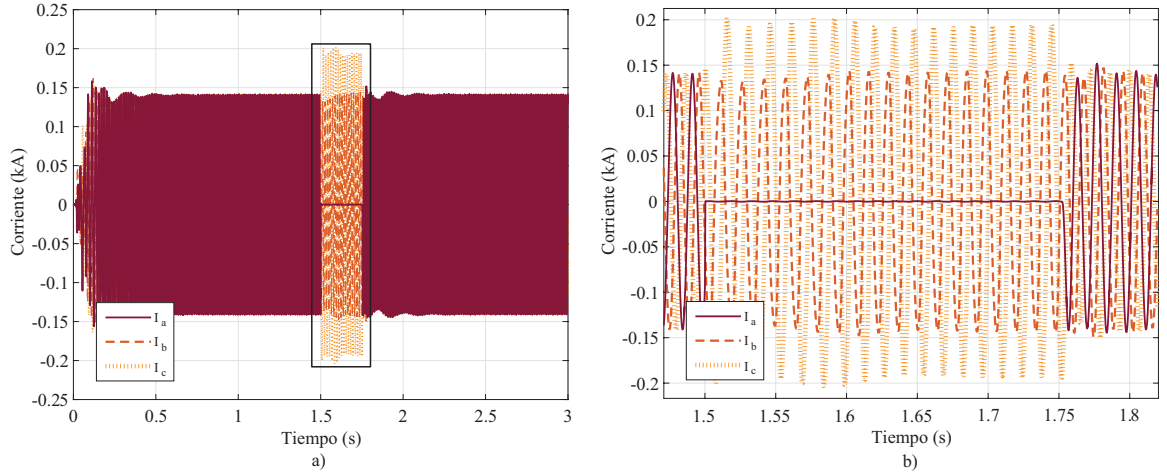


Figura 4.14: Formas de onda de corriente de carga con carga durante falla monofásica: a) Corriente de carga con carga, b) Ampliación

4.2.4. Caso de Estudio 4: Falla Trifásica en la Línea de Distribución.

A partir de las simulaciones de los diagramas esquemáticos de las Figuras 4.15 aplicando una falla trifásica en el Nodo PCC, sostenida durante 0.25 segundos, se obtienen los resultados de las Figuras 4.16a-4.21a, en donde se ilustran las respuestas de las formas de onda de voltaje y corriente durante una simulación de 3 segundos, mientras que en las Figuras 4.16b- 4.21b se ilustran ampliaciones entre 1.5 y 1.75 segundos.

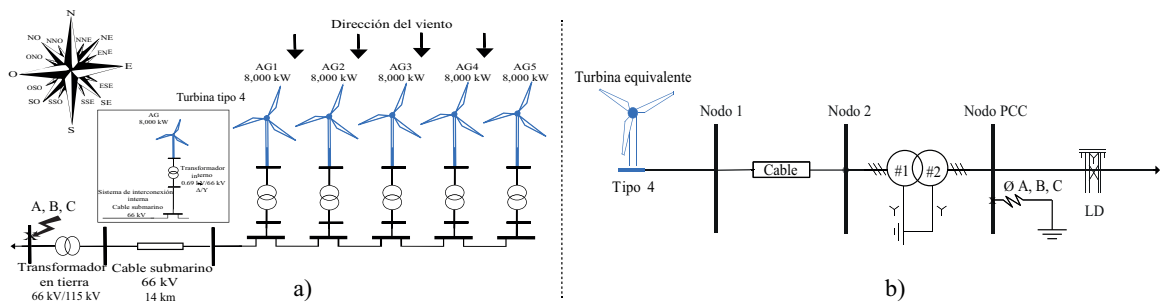


Figura 4.15: Diagramas esquemáticos del diseño de un parque eólico marino con una falla trifásica: a) Configuración de turbinas de tipo 4, b) diagrama unifilar aplicando un fallo trifásico.

En el acercamiento en la Figura 4.16b, se muestra un decremento del 98 % de las formas de ondas del voltaje a la salida del parque eólico en las tres fases a, b y c. La Figura 4.17a muestra el transitorio en las formas de onda al presentarse la falla. Mientras la falla está sostenida, se produce un aumento de las corrientes a la salida del parque eólico de entre 0.43 y 0.44 kA. Sin embargo, al removerse la falla en el segundo 1.75 comienza a estabilizarse el voltaje y la corriente hasta alcanzar su condición estable los segundos 2.37 y 2.3, respectivamente, según se muestra en las Figuras 4.16a y 4.17b.

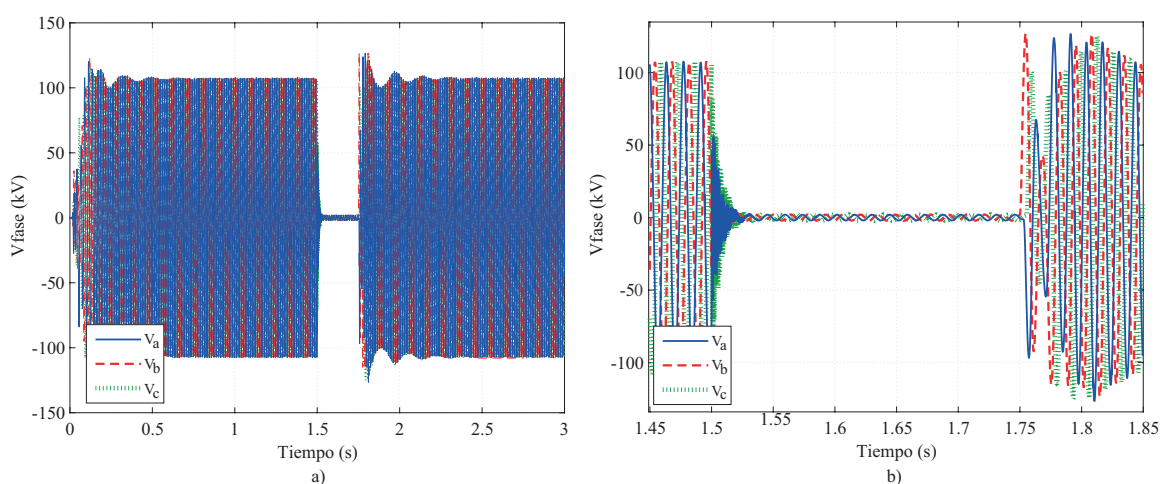


Figura 4.16: Formas de onda de voltaje en el parque eólico durante falla trifásica: a) Voltaje de fase con carga, b) Acercamiento de las formas de onda del voltaje en el con carga.

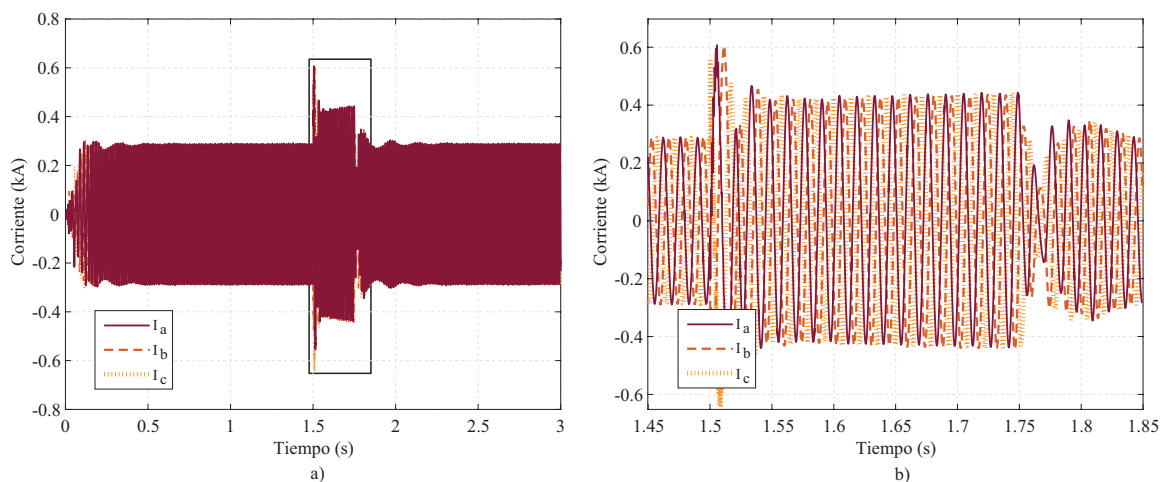


Figura 4.17: Formas de onda de corriente en el parque eólico marino con carga durante falla trifásica: a) Corriente en el parque con carga, b) Ampliación de corriente con carga.

En las Figuras 4.18 y 4.19 se muestran las formas de onda de los voltajes y corrientes de fases a, b y c en la línea de distribución. En ambos casos las amplitudes son prácticamente

cero durante la falla trifásica, sin embargo, durante la presencia de una falla los voltajes tienden a cero, y en este caso la corriente igual tiende a cero debido a que la carga es un elemento pasivo. Posteriormente, al removerse la falla, los voltajes de fase y las corrientes aumentan progresivamente en magnitud conforme el sistema se acerca a su condición estable, en los segundos 2.37 y 2.3, respectivamente, según se muestra en las Figuras 4.18a y 4.19a.

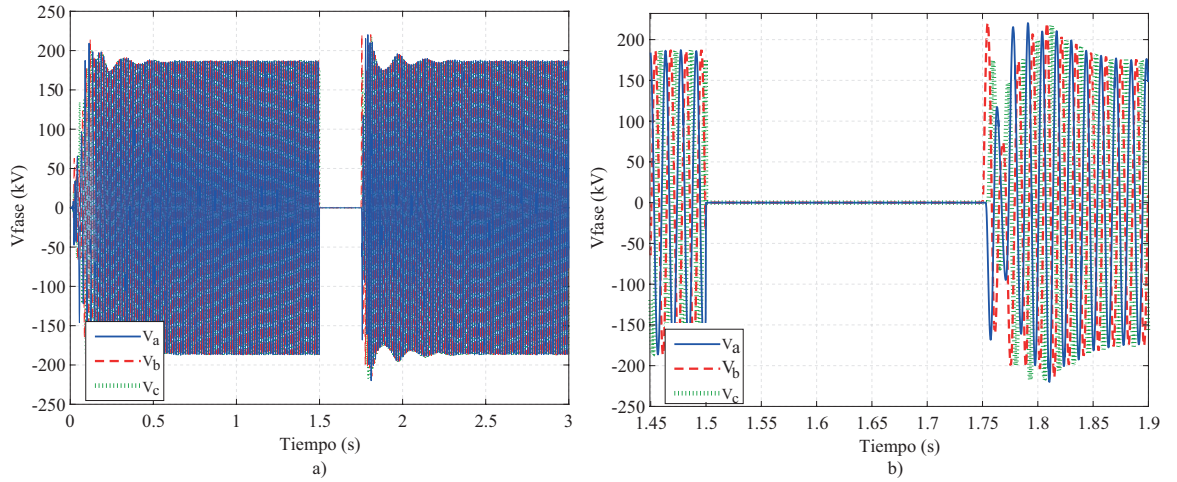


Figura 4.18: Formas de onda de voltaje de la línea de distribución con carga durante falla trifásica: a) Voltaje de fase con carga, b) Ampliación del voltaje con carga.

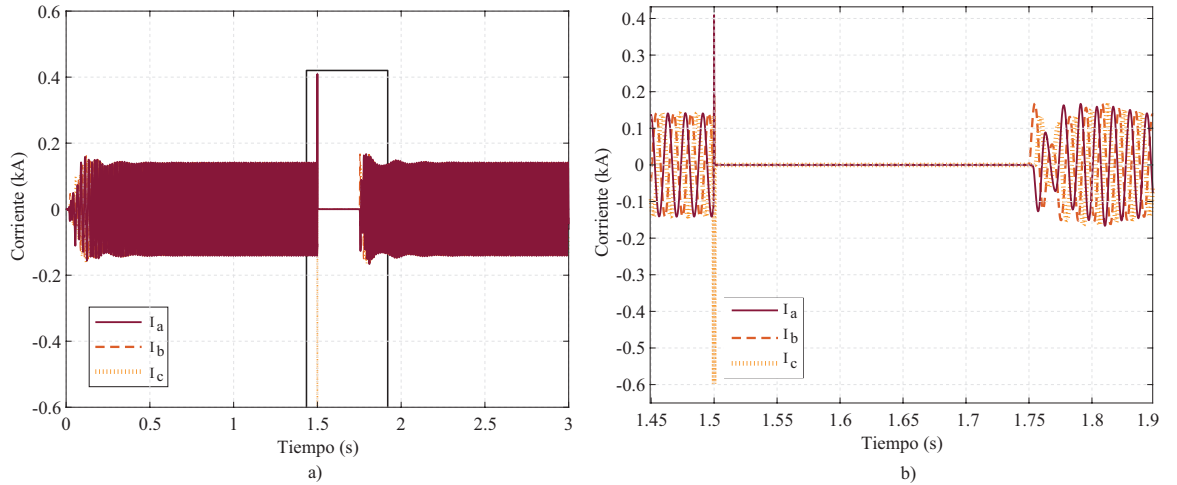


Figura 4.19: Formas de onda de corriente de la línea de distribución con carga durante falla trifásica: a) Corriente con carga, b) Ampliación de corriente con carga.

Finalmente, en las Figuras 4.20 y 4.21 se ilustra el comportamiento de las formas de onda de los voltajes y corrientes en las fases a, b y c en la carga, donde los voltajes de fase V_a , V_b y V_c , así como en las corrientes I_a , I_b y I_c , decrecen a cero mientras la falla está sostenida. Al liberarse la falla, en ambos casos comienzan a estabilizarse entre 2.43 y 2.44

segundos, según se observa en las Figuras 4.20a y 4.21a.

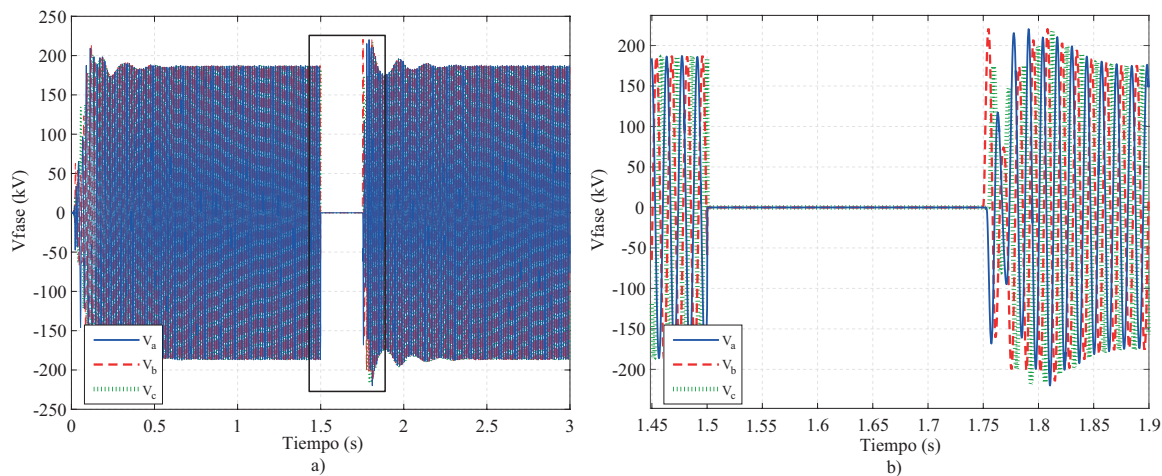


Figura 4.20: Formas de onda de voltaje en la carga durante falla trifásica: a) Voltajes de fase con carga, b) Ampliación de los voltajes con carga.

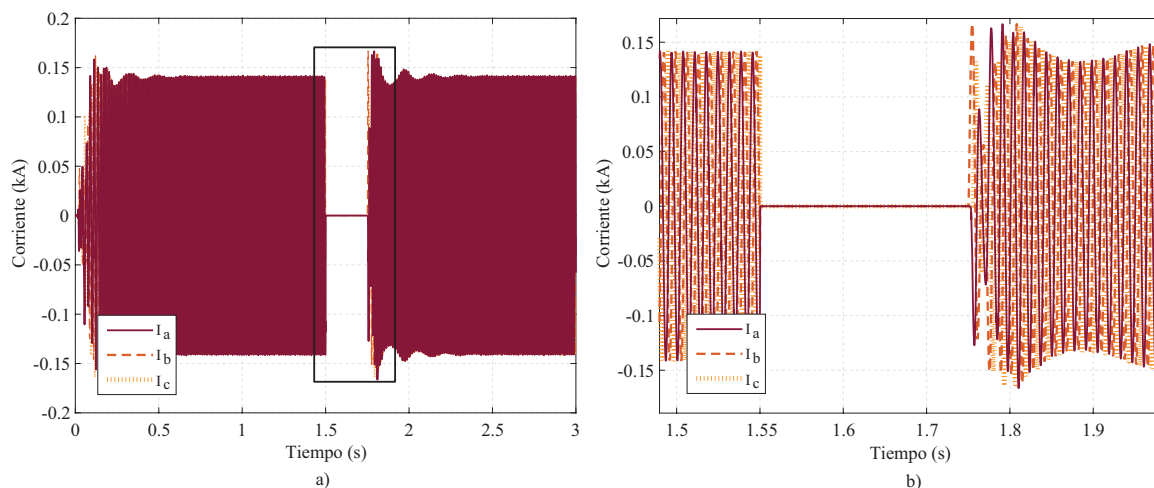


Figura 4.21: Formas de onda de corriente con carga durante falla trifásica: a) Corriente con carga, b) Ampliación de corriente con carga.

4.2.5. Caso de Estudio 5: Operación Conectada a un Bus Infinito.

A partir del diagrama esquemático de la figura 4.1, pero ahora cuando se está conectado a un bus infinito, se puede observar el comportamiento en estado estacionario del parque eólico marino. La red a la que se conecta presenta una tensión nominal igual a la que se tiene en la línea de transmisión cercana a Salina Cruz, que de acuerdo a los datos obtenidos de [CONAHCYT, s.f.] es de 115 kV, mostrados en la Tabla C.1 del Apéndice C de esta tesis. Por ejemplo, en las Figuras 4.22a y 4.23a se ilustran las respuestas obtenidas de las formas de onda de voltaje y corriente a la salida del parque eólico marino durante una simulación

de 3 segundos, mientras que en las Figuras 4.22b y 4.23b se muestran ampliaciones entre 1.5 segundos y 1.75 segundos, en donde se manifiesta con mayor nitidez algunas muescas o ruidos provocados por la intermitencia de los aerogeneradores en la Figura 4.23b. Los voltajes de fase y las corrientes van incrementando progresivamente conforme el sistema se acerca a la condición estable, en donde sus amplitudes alcanzan aproximadamente 54.57 kV y 0.47 kA, respectivamente, entre 0.6 y 1.5 segundos.

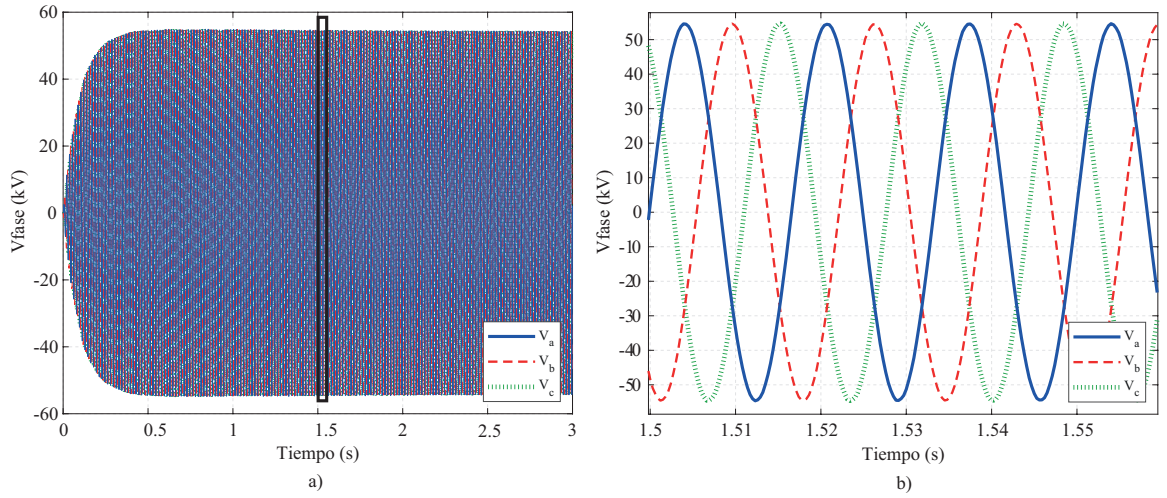


Figura 4.22: Formas de onda de voltaje a la salida del parque marítimo conectado a la red en estado estacionario: a) Voltaje en el parque conectado a la red, b) Acercamiento de voltaje en el parque eólico marino conectado a la red.

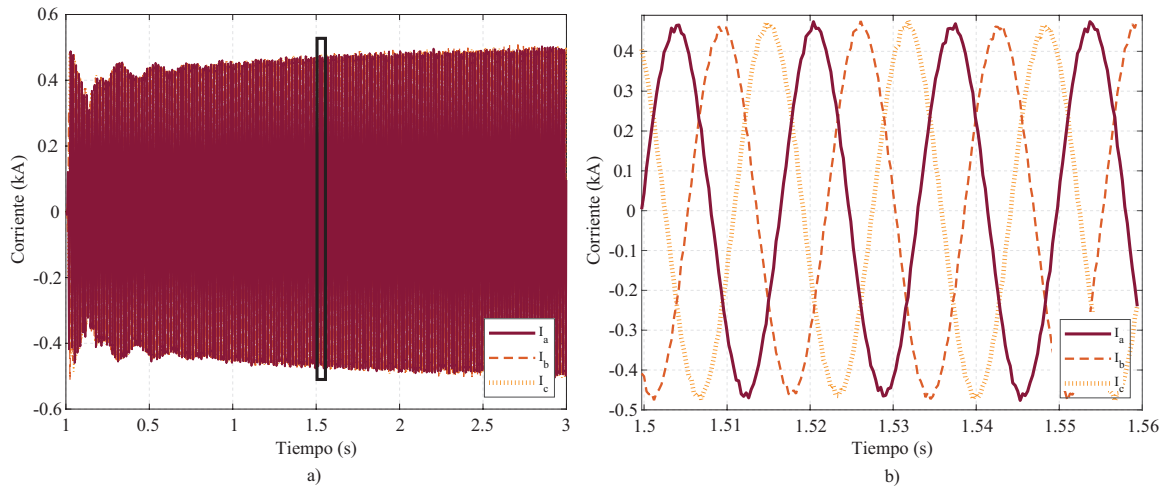


Figura 4.23: Formas de onda de corriente en estado estacionario en el parque eólico marino conectado a la red: a) Corriente en el parque conectado a la red, b) Ampliación de corriente en el parque eólico marino conectado a la red.

Ahora, en las Figuras 4.24 y 4.25 podemos observar las formas de ondas de los voltajes y corrientes medidas en la línea de distribución que va en dirección hacia la red. En la Figura 4.24a se muestra el crecimiento de los voltajes en las fases a, b y c hasta que alcanzan máxima amplitud de 93.57 kV, según se muestra en un acercamiento en la Figura 4.24b, y se mantiene en su estado estacionario. Asimismo, en la Figura 4.25a se ilustra el incremento de las corrientes I_a , I_b y I_c hasta estabilizarse y lograr su estado estacionario a los 1.5 segundos con amplitud máxima de 0.27 kA, según se muestra en la Figura 4.25b.

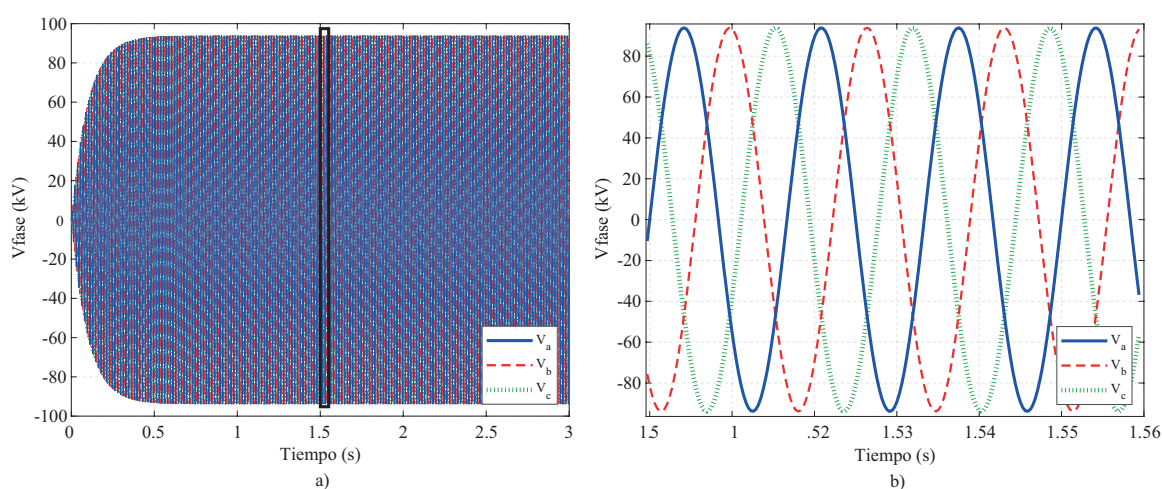


Figura 4.24: Formas de onda de voltaje en la línea de distribución cuando el parque se conecta a la red: a) Voltaje en la línea de distribución, b) Ampliación de voltaje en la línea de distribución.

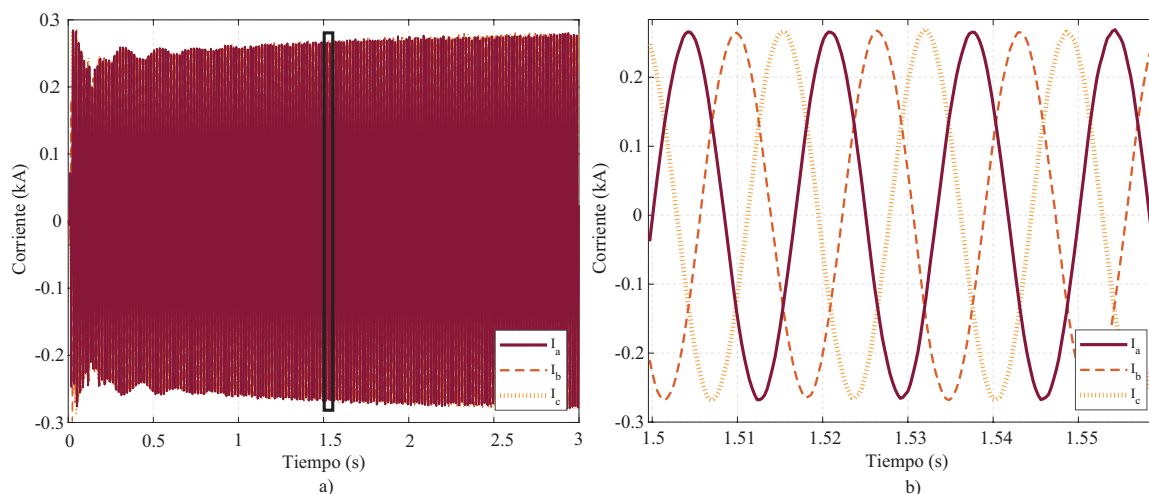


Figura 4.25: Formas de onda de corriente en la línea de distribución cuando el parque se conecta a la red: a) Corriente de en la línea de distribución cuando el parque se conecta a la red, b) Ampliación de corriente de la línea de distribución cuando el parque se conecta a la red.

4.2.6. Caso de Estudio 6: Falla Trifásica Cercana al Bus Infinito.

La configuración del diagrama que se muestra en Figura 4.26 establece la interconexión entre el parque eléctrico, la línea de distribución y la conexión al Sistema Eléctrico Nacional, el cual permite el análisis de la operación del sistema ante condiciones de falla trifásica en distintos puntos del sistema. El parque eólico marino de cinco turbinas de 8 MW, dispone un voltaje nominal de salida de 66 kV, en donde a través de cables submarinos, viaja hasta el litoral cercano a Salina Cruz para posteriormente llegar a un transformador para elevar el voltaje a 115 kV. Este último es el voltaje nominal de la línea de transmisión más próxima, de acuerdo a los datos obtenidos de [CONAHCYT, s.f.], mostrados en la Tabla C.1 del Apéndice C de esta tesis. Se presenta una falla trifásica a tierra cercana a la red, a los 1.5 segundos, en que los aerogeneradores se encuentran operando en estado estacionario. La duración de la falla es de 0.25 segundos, y los resultados obtenidos de las formas de onda del voltaje y corrientes en distintos puntos del diagrama aplicado en la simulación, se observan en las Figuras 4.27a-4.32a. Mientras que en las Figuras 4.27b-4.32b se detallan acercamientos entre 1.45 segundos y 1.85 segundos.

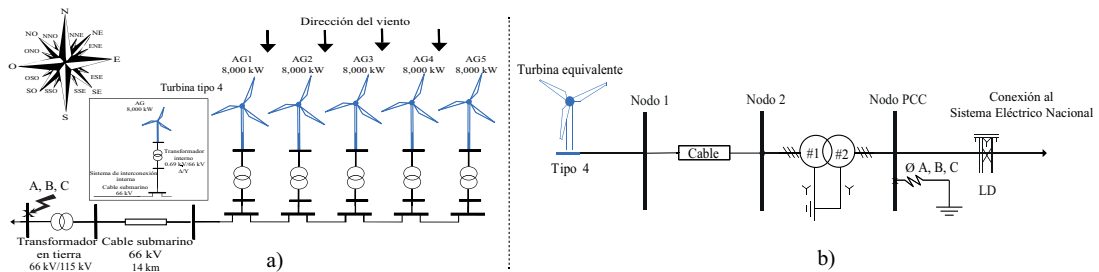


Figura 4.26: Diagramas esquemáticos del diseño de un parque eólico marino conectado a la red, con una falla trifásica: a) Configuración de turbinas de tipo 4, b) diagrama unifilar aplicando un fallo trifásico.

En la Figura 4.27a se muestran las formas de onda del voltaje a la salida del parque eólico marino. Cuando se presenta la falla, las amplitudes de los voltajes en las tres fases disminuyen aproximadamente 96.51 %, según se muestra en la Figura 4.27b. Cuando la falla se libera, se genera un pico transitorio de aproximadamente 116.7 kV de magnitud y, posteriormente, comienza a estabilizarse, lo cual se logra en 2.05 segundos. Por otro lado, las amplitudes de las corrientes se incrementan en aproximadamente 4 %, según se muestra en la Figura 4.28b, y al liberarse la falla, el sistema se estabiliza en aproximadamente 2.48

segundos. Después de la perturbación, el voltaje y la corriente alcanzan su condición estable en 2 y 2.5 segundos, respectivamente.

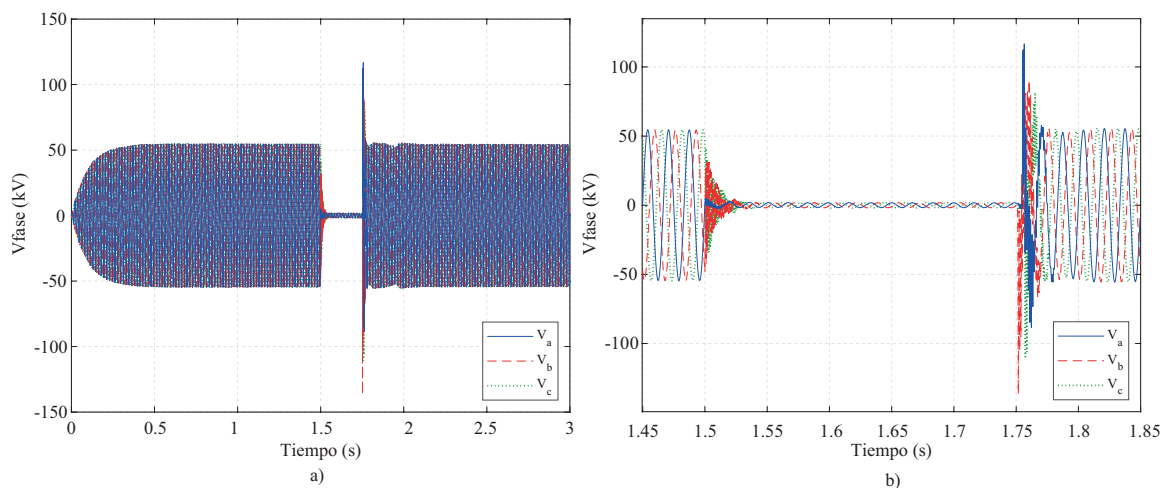


Figura 4.27: Formas de onda de voltaje del parque marítimo conectada a la red durante falla trifásica: a) Voltaje en el parque, b) Acercamiento de voltaje en el parque eólico marino.

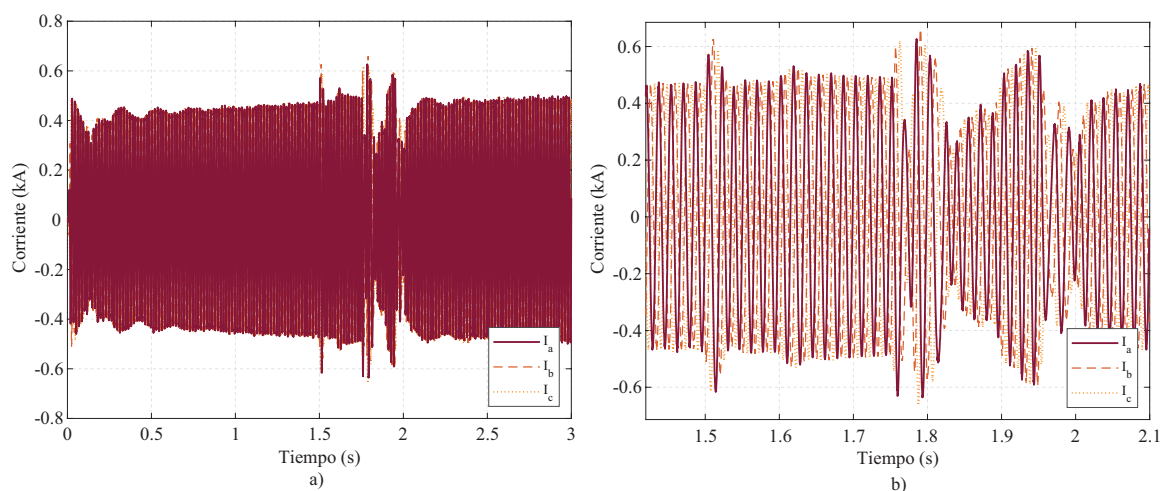


Figura 4.28: Formas de onda de corriente en el parque eólico marino conectado a la red durante falla trifásica: a) Corriente en el parque, b) Ampliación de corriente en el parque eólico marino.

Las Figuras 4.29 y 4.30 se muestran las formas de onda de los voltaje y corrientes medidas en la línea de distribución. Durante la falla, las amplitudes de los voltajes en las tres fases a, b y c son prácticamente cero, con un pico de voltaje momentáneo cuando termina la perturbación, como se ilustra en la Figura 4.29a. En cuanto a las formas de ondas en la corriente, las amplitudes máximas aumentan alrededor de 59.36 kA con un pico al inicio de la falla, según se ilustra en la Figura 4.30a. Al removerse la falla, los voltajes y corrientes

disminuyen y se estabilizan, alcanzando su condición estable en los segundos 1.8 y 1.78, respectivamente, como se muestra en las Figuras 4.29b y 4.30b.

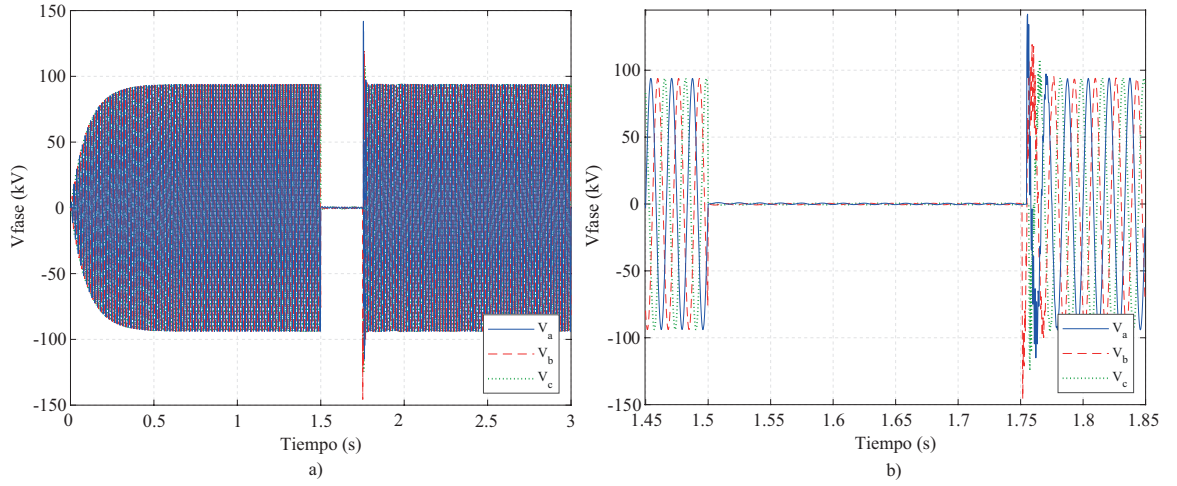


Figura 4.29: Formas de onda de voltaje de línea de distribución, cuando el parque se conecta a la red, durante falla trifásica: a) Voltaje de la línea, b) Ampliación de voltaje de la línea.

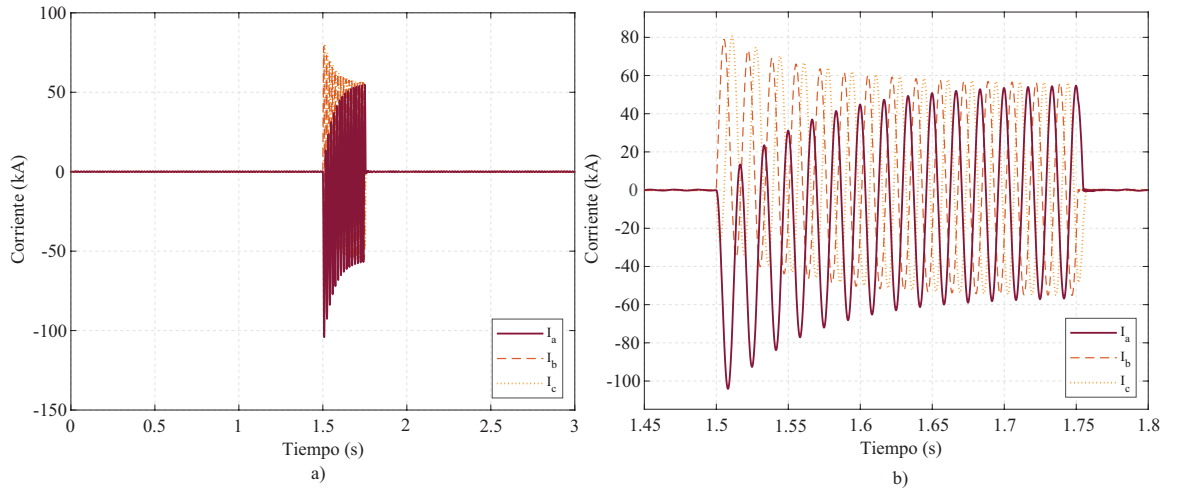


Figura 4.30: Formas de onda de corriente de línea de distribución, cuando el parque se conecta a la red, durante falla trifásica: a) Corriente de la línea, b) Ampliación de corriente.

Finalmente, las Figuras 4.31 y 4.32 muestran el comportamiento de las formas del voltaje de fase y corrientes en la red. Se considera que se aplica una falla trifásica a tierra en la línea de distribución a los 1.5 segundos. Los voltajes V_a , V_b y V_c disminuyen 22.1 %, como se ilustra en la Figura 4.31a. Por otro lado, las amplitudes de las corrientes I_a , I_b e I_c incrementan hasta alcanzar 59.36 kA, según se muestra en la Figura ampliada 4.32a. Posteriormente, al liberarse la falla, los voltajes y corrientes se estabilizan en los segundos 1.75 y 1.78, según se ilustra en las Figuras 4.31b y 4.32b.

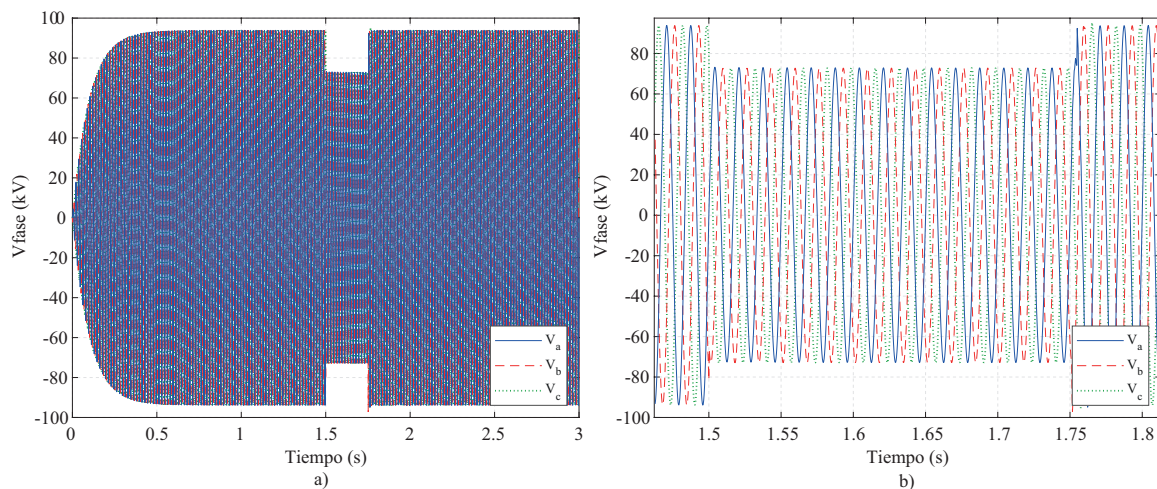


Figura 4.31: Formas de onda de voltaje en la red durante falla trifásica: a) Voltaje de línea, b) Ampliación de voltaje de línea.

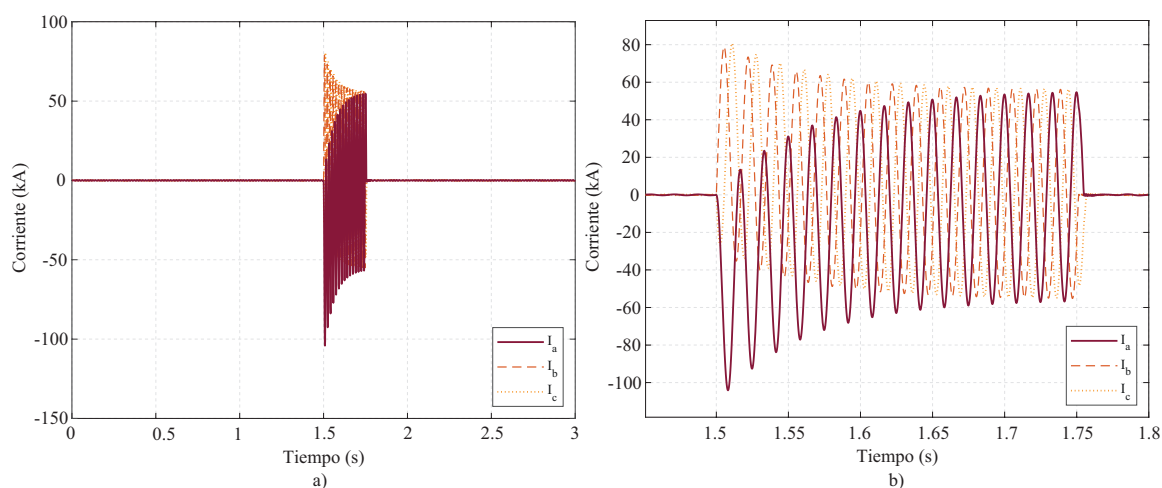


Figura 4.32: Formas de onda de corriente en la red durante falla trifásica: a) Corriente de línea, b) Ampliación de corriente de línea.

4.3. Conclusiones

En este capítulo se presentaron varios casos de estudio, bajo distintas condiciones de operación, asociados con la operación en estado estacionario y bajo condiciones de falla del parque eólico marino propuesto. El análisis se realizó considerando distintos puntos del sistema del parque eólico marino, ya sea interconectado a la red o a una carga. El diseño de la instalación eólica es propuesto en el capítulo 3.

El estudio y análisis del parque eólico marino en el Golfo de Tehuantepec, fue una revisión de la respuesta dinámica de las formas de las formas de onda de las corrientes y

voltajes mediante el software de simulación PSCAD/EMTDC®. Las mediciones de dichos perfiles se realizaron a la salida del parque eólico marino, la línea distribución y en la carga o interconexión a la red. Se estudió el comportamiento en estado estacionario, transitorio, falla trifásica a tierra en la línea de distribución, falla monofásica a tierra en la línea de distribución, operación conectada a un bus infinito y falla trifásica cercana al bus infinito.

La falla más severa fue la trifásica, afectando a las 3 fases, disminuyendo las amplitudes máximas en el caso de los voltajes, y aumentando las amplitudes en el caso de las corrientes en aproximadamente 96.51 % y 4 % veces, respectivamente, de su valor nominal. En una falla monofásica, la fase directamente afectada es la fase donde se aplica la falla. Para las condiciones de operación del parque eólico marino conectado a la red externa o aislado, respectivamente, el tiempo de duración para lograr estabilizarse fue entre milésimas a un segundo. Asimismo, después del arranque transitorio de los aerogeneradores, (conectados a la carga o a la red), el tiempo que tardan los voltajes y corrientes para estabilizarse son alrededor de 0.75 segundos. Todo esto debido al diseño del parque eólico, y el tipo 4 de la turbina eólica.

Los estudios realizados en el presente capítulo pueden ser utilizados para el diseño y selección de protecciones adicionales del sistema.

Capítulo 5

Conclusiones Generales y Sugerencias de Trabajo Futuro

El presente trabajo cumplió su objetivo de analizar la factibilidad técnica y operacional en una ubicación viable en México, para la implementación de un proyecto piloto de parque eólico marino flotante, y, además, de proponer un diseño conceptual complementado de evaluaciones dinámicas y transitorias que permiten validar aspectos clave de su integración al sistema eléctrico.

Para la selección del emplazamiento se aplicó la estrategia o elementos importantes descritos en el Capítulo 2 mediante la recopilación de la información encontrada, es decir, la caracterización del recurso eólico mediante el GWA, zonas candidatas, análisis batimétrico y de factibilidad tecnológica, dimensionamiento conceptual de disposición de turbinas y trazado de cableado, y validación mediante simulaciones en PSCAD/EMTDC®. La reunión de estos pasos estratégicos condujo a identificar que la región del Golfo de Tehuantepec reúne las condiciones más favorables para un proyecto demostrativo: las velocidades medias del viento a la altura del rotor (que es aproximadamente 200 m) se encuentra en el rango de 9.8 y 12.75 m/s, con un valor representativo de 12.45 m/s a 200 m, según GWA, lo cual es compatible con la operación eficiente de aerogeneradores de gran escala; no es un área natural protegida de México, como se muestra en la Figura 3.7; está cercana a la línea de Transmisión de Salina Cruz; y las profundidades batimétricas registradas en el área es entre -127 m y -143 m, lo cual, descartan soluciones de cimentación fijas, y hacen preferible una

solución flotante, que en este caso, de acuerdo al análisis comparativo en la Tabla 3.3 la alternativa más adecuada para las condiciones del sitio es el semisumergible, y en particular, la configuración asociada a la tecnología de WindFloat de Principle Power, con cadenas en catenaria y anclas de arrastre.

Como se mencionó con anterioridad, se concluye que, a una altura de 200 m obtenida mediante el GWA, la velocidad media del viento es de aproximadamente 12.45 m/s en dichas coordenadas, lo que representa un rango aceptable para los aerogeneradores Vestas V164/8000. Estos modelos, que corresponden a turbinas del tipo 4 con un diseño que incluye un generador de imán permanente y convertidor de escala completa, serán adecuados para operar en la región. Además, son capaces de soportar las velocidades del viento que podrían ser provocadas por ciclones, según se muestra en la Tabla 3.2, lo cual es relevante para evaluar la viabilidad de proyectos eólicos en zonas susceptibles a eventos meteorológicos extremos. Un aspecto clave en el diseño del parque eólico marino es su configuración. En este estudio, se adoptó una disposición lineal de cinco aerogeneradores, debido a que, de esta manera, cada aerogenerador atraparía velocidad suficiente sin provocar el efecto estela. Cada turbina tiene una potencia nominal de 8 MW, logrando una capacidad total instalada de 40 MW. La superficie de área de ocupación del parque se estima en aproximadamente 6 km², considerando la separación entre unidades y las restricciones operativas en el entorno marino. Además, se contempla el tendido del cable inter array de 66 kV, que conecta las turbinas, y su unión a un cable de exportación HVAC de 14 km de longitud, que transmite la energía hasta la subestación terrestre de 115 kV ubicada en la región de Salina Cruz.

Este diseño constituye una base técnica sólida, abarcando aspectos teóricos y estadísticos como aplicaciones prácticas mediante la realización de simulaciones dinámicas y transitorias en simuladores de sistemas eléctricos, en particular, PSCAD/EMTDC[®]. Las simulaciones transitorias dentro de rangos aceptables ante eventos modelados: la falla trifásica en la línea de distribución se identificó como el evento más severo de los simulados. Y los tiempos de estabilización observados tras una falla fue en el rango de entre 0.1 y 1 segundos. Por otro lado, el tiempo para estabilizarse después del arranque del parque fue de 0.75 segundos aproximadamente. Lo cual, lo convierte una opción factible en el aspecto operacional. A pesar de ello, se subraya la necesidad de esquemas de protección y coordinación rápidos.

Es decir, los resultados confirman la pertinencia de la elección y diseño de protecciones, la coordinación de relés y la validación de estrategias de control de convertidores.

Tomando en cuenta lo mencionado anteriormente, el diseño y configuración del parque eólico marino en el Golfo de Tehuantepec, es una opción factible en el aspecto técnico y operacional. La tesis contribuye al conocimiento y la práctica de proponer una estrategia replicable para la selección de sitios y el dimensionamiento conceptual de parques eólicos marinos en contexto de datos preliminares, integrando análisis de recurso, aspecto ambiental, criterios de batimetría y validación eléctrica. El trabajo ofrece parámetros concretos como la velocidad promedio, profundidades, tipos de plataformas compatibles, nivel de voltaje de inter-array, que facilitan la toma de decisiones tempranas. Sin embargo, aún cuando la tesis aporta una base técnica y operacional sólida en fase conceptual, aún deben de realizarse la siguientes etapas de validación, como los estudios de factibilidad económica y ambiental.

5.1. Aportaciones

Las aportaciones en esta tesis se resumen a continuación.

1. Se incorporó una estrategia para evaluar la factibilidad técnica de parques eólicos marinos, de tal manera que se identifique los componentes, diseño y configuración más óptimos. Asimismo se implementó el esquema de la factibilidad operacional. Además, se añadieron propuestas para analizar el aspecto económico y operacional, dirigidos para trabajos futuros.
2. Se recopilaron datos importantes y necesarios para proyectos de parques eólicos marinos mediante datos estadísticos por entes públicas, como el INEGI, Secretaría de energía, entre otras. Este análisis permitió, establecer las regiones con mayores velocidades del viento y su dirección mediante la rosa de los vientos, las limitaciones en sus áreas naturales protegidas, su sistema eléctrico nacional para su conexión, la batimetría, así como su configuración interna, entre otros.
3. Se seleccionó los componentes más factibles para la central eólica, para que su diseño y configuración sea una propuesta viable para la instalación de parques eólicos marinos en la región del Golfo de Tehuantepec, México.
4. Se aportaron 6 casos de estudio de factibilidad operacional, en estado estacionario y transitorio bajo condiciones de fallas monofásicas y trifásicas considerando su opera-

ción aislada y conectado al sistema eléctrico litoral de Salina Cruz.

5.2. Sugerencias para Trabajos de Investigación Futuros.

El estudio de factibilidad y diseño de parques eólicos marinos en México genera una serie de desafíos que deben ser examinados de manera detallada y sistemática. Por ello, a continuación, se proponen posibles líneas de investigación adicionales a este campo:

- Realizar estudios de factibilidad económica y ambiental para los componentes, diseño y configuración del parque eólico marino propuesto en esta tesis.
- Estudiar la factibilidad del diseño y configuración para la implementación de un sistema híbrido (generación de energía eólica y fotovoltaica). Ya que, de acuerdo a los estudios de complementariedad energética, en Oaxaca, cerca de Salina Cruz, la energía eólica puede complementarse con la energía solar durante casi todo el año.
- Realizar un análisis operacional en el simulador PSCAD/EMTDC® cuando ocurre una falla en uno o en varios aerogeneradores. Esto debido a que se propuso un arreglo entre turbinas como espina de pescado o fishbone (por su nombre en inglés).
- Analizar, diseñar y simular diversos sistemas de protección en cada etapa del sistema, (p.ej. en las unidades de generación, distribución y/o conexión a la carga), ante posibles contingencias del sistema eléctrico y/o fenómenos naturales asociados al clima, tales como fallas, interrupciones temporales, oscilaciones, entre otras.
- Análisis del impacto del efecto estela en parques eólicos terrestre y marinos (on-shore y off-shore, respectivamente).
- Estudios y análisis de calidad de la energía en el sistema de parque eólico marino, p.ej. distorsión armónica, fallas, disturbios, entre otros.
- Análisis y estudio en tiempo real del sistema implementado del parque eólico marino, mediante el simulador OPAL-RT®.
- Implementación de sistemas de control mediante inteligencia artificial para los diversos componentes electrónicos, tales como inversores y convertidores.

Apéndice A

Carta Batimétrica del Golfo de Tehuantepec

En la Figura A.1 se presenta la carta batimétrica del Golfo de Tehuantepec, la cual fue elaborada a partir de datos recopilados y procesados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Este documento muestra variaciones en la presión atmosférica en la región, permitiendo un análisis detallado de las condiciones meteorológicas y su influencia en los fenómenos atmosféricos locales.



Figura A.1: Carta Batimétrica del Golfo de Tehuantepec. [Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 1983].

Apéndice B

Parámetros del sistema

En las Tablas B.1 y B.2 se presentan los parámetros técnicos y de diseño utilizados para la planificación y optimización de un parque eólico marino. Específicamente, la Tabla B.1 detalla las características del modelo de aerogenerador Vestas V164/8000, incluyendo datos como la potencia nominal (8 MW), diámetro del rotor (164 metros), altura del centro de la góndola, coeficiente de potencia, eficiencia aerodinámica, límites operativos y condiciones de operación estándar. Estos parámetros son fundamentales para realizar análisis de rendimiento, simulaciones de producción energética y evaluación de impacto estructural. Por otro lado, la Tabla B.2 especifica las diferentes configuraciones espaciales del parque eólico, detallando las distancias de separación entre las turbinas en distintas disposiciones (por ejemplo, alineación en línea, en cuadrícula, o disposición aleatoria).

Tabla B.1: Hoja de datos del modelo Vestas V164/8000. [Bauer, s.f., The Wind Power, s.f., Vestas, 2011].

Datos Generales		Hélice		Grupo electrógeno		Otros	
Potencia nominal:	8,000 kW	Diámetro:	164 m	Generador:	Imán Permanente	Peso de una hojas:	35 t
Velocidad mínima del viento:	4 m/s	Área de barrido:	21, 124 m ²	Voltaje:	66, 000 V	Longitud de la hoja:	80 m
Velocidad nominal del viento:	13 m/s	Número de hojas:	3	Tipo de convertidor	Convertidor de escala completa	Máxima cuerda de la pala:	5.4 m
Velocidad del viento de corte:	25 m/s	Velocidad, máx.:	12.1 U/min	Frecuencia de red:	50 Hz	Altura de la góndola:	8 m
Velocidad del viento de supervivencia:	50 m/s	Velocidad de punta:	104 m/s			Longitud de la góndola:	20 m
Velocidad operativa del rotor:	4.8-12.1 rpm	Designación del tipo:	80			Anchura de la góndola:	7.5 m
Velocidad nominal del rotor:	10.5 rpm	Fabricante:	Vestas			Peso de la góndola:	375 t
		Densidad de potencia 1:	378 W/m ²			Peso de las palas:	37 t
		Densidad de potencia 2	2.6 m ² /kW			Wind class:	IEC S
		Velocidad mínima del rotor:	4.8 vuelta /min			Ángulo máximo de entrada:	0°
		Velocidad máxima del rotor:	12.1 vuelta /min			Temperatura de funcionamiento:	-10 ±25°C
						Temperaturas extremas:	-15 ±35°C
						Tipo de torre:	Torre acero tubular
						Altura del buje:	Sitio específico
						Offshore:	Sí
						Onshore:	Sí

Tabla B.2: Distancias de las diferentes disposiciones de las turbinas para el parque eólico marino del Golfo de Tehuantepec. Nota: En las circulares podría tomarse un ángulo de 3000 m y ángulo de 9.6° como referencia.

DISTANCIAS ENTRE TURBINAS DEL PARQUE EÓLICO MARINO											
Clasificación de la disposición lineal	X		Y		X'		Y'		R	a	a/2
Lineal de distancia entre filas			8 veces el diámetro de la turbina	1, 312 m							
Lineal de distancia entre columnas	5 veces el diámetro de la turbina	820 m									
Lineal paralelo	5 veces el diámetro de la turbina	820 m	8 veces el diámetro de la turbina	1, 312 m							
Lineal tres bolillos (filas)	5 veces el diámetro de la turbina	820 m	8 veces el diámetro de la turbina	1, 312 m	2.5 veces el diámetro de la turbina	410 m					
Lineal tres bolillos (columnas)	5 veces el diámetro de la turbina	820 m	8 veces el diámetro de la turbina	1, 312 m			4 veces el diámetro de la turbina	656 m			
Lineal tres bolillo (doble)	5 veces el diámetro de la turbina	820 m	8 veces el diámetro de la turbina	1, 312 m	2.5 veces el diámetro de la turbina	410 m	4 veces el diámetro de la turbina	656 m			
Circular	5 veces el diámetro de la turbina	820 m	8 veces el diámetro de la turbina	1, 312 m					3, 000 m	9.6°	4.8°
Circular tresbolillos	5 veces el diámetro de la turbina	820 m	8 veces el diámetro de la turbina	1, 312 m					3, 000 m	9.6°	4.8°

Apéndice C

Parámetros del sistema para la simulación en PSCAD/EMTDC[®].

C.1. Datos de la turbina de viento.

En la Tabla C.1 se muestran los parámetros utilizados para la simulación del parque eólico marino, el cual consiste de cinco turbinas de 8 MW, desde la perspectiva de la turbina de viento, hasta los datos de los cables y las líneas de transmisión.

Tabla C.1: Parámetros utilizados para la simulación del parque eólico marino de cinco turbinas de 8 MW.

Nombre	Símbolo	Unidad	Valor
Parámetros de la turbina			
Potencia activa nominal	P	MW	8
Potencia nominal (Sbase)	Sbase	MVA	8
Voltaje base	Vbase	kV	66
Velocidad del viento de entrada	Vw	m/s	12.45
Velocidad de arranque del viento	vWcutin	m/s	4
Velocidad de corte del viento	vWcutout	m/s	25
Radio de la turbina	Rad_turb	m	82
Radio de la góndola	–	m	3.73
Revoluciones por minuto a velocidad nominal	VRot_nom	rpm	10.5
Frecuencia base de la máquina	freq_PM	Hz	8
Ganancia del regulador	Kp_Ptch	pu	5
Constante de tiempo del regulador	Ti_Ptch	pu	0.5
Datos de la máquina de imanes permanentes (tipo 4)			
Resistencia del devanador del estator	–	pu	0.0017
Reactancia de fuga del estator	–	pu	0.0364
Reactancia no saturada (d)	Xd	pu	0.55
Reactancia no saturada (q)	Xq	pu	1.11
Resistencia devanado amortiguador (d)	Rkd	pu	0.055
Reactancia devanado amortiguador (d)	Xkd	pu	0.62
Resistencia devanado amortiguador (q)	Rkq	pu	0.183
Reactancia devanado amortiguador (q)	Xkq	pu	1.175
Fuerza magnética	–	pu	1.0
Momento de inercia angular ($J=2H$)	–	s	4
Amortiguación mecánica	–	pu	0.01
Datos de los convertidores CA-CC-CA			
Voltaje base cc	Vdc_base	kV	2.19
Inductancia convertidor (lado red)	Lconv_G	H	0.00035
Inductancia convertidor (lado máquina)	Lconv_M	H	0.00075
Capacitor cc	DC_cap	μ F	10 000
Datos de los Nodos			
Nodo 1 & 2: Voltaje base	–	kV	66
Nodo PCC: Voltaje base	–	kV	115
Datos del cable			
Longitud del segmento	–	km	14
Datos de la línea de transmisión y la red / carga			
LD (longitud)	–	km	4
Red (voltaje)	–	kV	115
Carga	–	MW	10

Apéndice D

Diagramas Esquemáticos en PSCAD/EMTDC[®] de los casos de estudio.

D.1. Datos de la turbina de viento.

Las Figuras D.1, D.2 y D.3 muestran la configuración de la turbina tipo 4, p.ej. la parte mecánica de las palas (que adopta un controlador de ángulo de paso) está conectado a una máquina de imanes permanentes que a su vez se acopla a un convertidor CA-CC-CA y finalmente a la salida se tiene un transformador interno para elevar el voltaje de la máquina. Este aerogenerador se estableció para simular cinco turbinas de 8 MW, (con datos del modelo V164/8000 mostrados en la Tabla C.1), que se ensamblan a un cable de exportación submarino de 66 kV a una distancia de 14 km hasta llegar a un transformador para elevar el voltaje a 115 kV y llegar a la red o a una carga por medio de la línea de distribución aérea de 4 km. El tiempo de simulación se estableció para tres segundos, con un paso de tiempo channel plot step de 300 us.

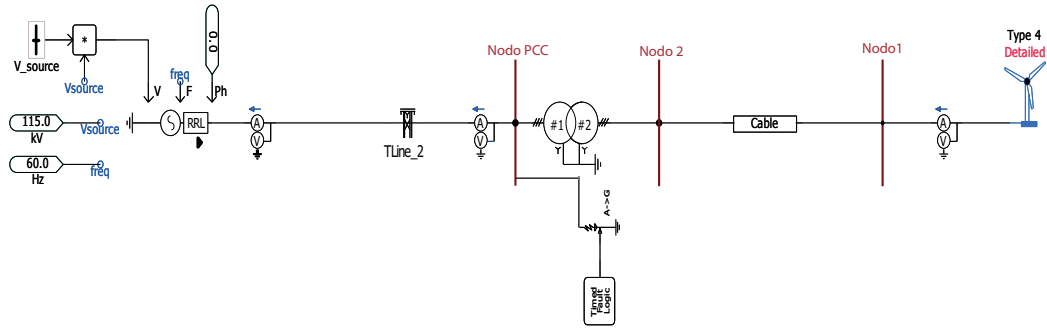


Figura D.1: Diagrama del parque eólico marino de cinco turbinas conectadas a la red a través de un transformador en tierra en el simulador PSCAD/EMTDC®.

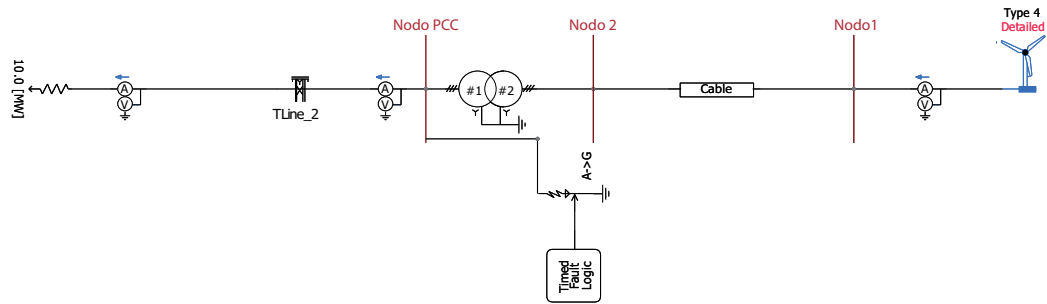


Figura D.2: Diagrama del parque eólico marino de cinco turbinas conectadas a una carga a través de un transformador en tierra en el simulador PSCAD/EMTDC®.

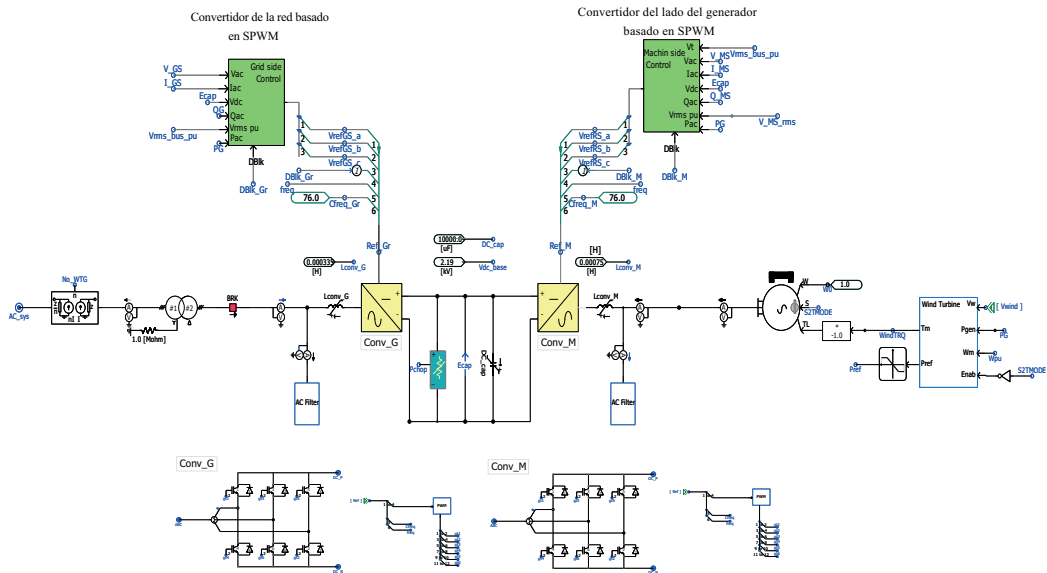


Figura D.3: Diagrama del sistema electromecánico de la turbina tipo 4 en el simulador PSCAD/EMTDC®.

Referencias

- [AMDEE, 2024] AMDEE. “Reporte Anual 2024.” <https://amdee.org/en/noticias/el-sector-eolico-en-mexico-analisis-sobre-lo-que-hay-y-lo-que-falta/>, 2024. Disponible en línea.
- [AMDEE, s.f.] AMDEE. “AMDEE.” <https://amdee.org/>, s.f. Asociación Mexicana de Energía Eólica.
- [Arredondo *et al.*, 2022] Arredondo G.M., García Nava H., Rodríguez Hernández O., Lámbert-Arista A. “Estimación del recurso eólico marino en la península de Baja California, México, utilizando la base de datos ERA5.” páginas 543–550, 2022. Ponencia presentada en el XII Congreso de la Asociación Española de Climatología, Santiago de Compostela, 19–21 de octubre de 2022.
- [Bauer, s.f.] Bauer L. “Vestas V164-8.0, 8,00 MW, Aerogenerador.” <https://es.wind-turbine-models.com/turbines/318-vestas-v164-8.0>, s.f.
- [BVG Associates, 2023] BVG Associates. “Guide to a Floating Offshore Wind Farm.” 2023. Recuperado el 4 de marzo de 2025 de: <https://guidetofloatingoffshorewind.com/guide/b-balance-of-plant/b-3-mooring-system/>.
- [Carmona, 2014] Carmona R. *Statistical Analysis of Financial Data in R*. Springer Texts in Statistics. Springer, New York, NY, 2nd edición, 2014.
- [Carranza *et al.*, 1998] Carranza E.A., Morales De La Garza E., Rosales H. L. “Tectónica, sedimentología y geoquímica.” En “El Golfo de Tehuantepec: el ecosistema y sus recursos,” Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, México, 1998.

- [CENAPRED, 2022] CENAPRED. “El ciclón Agatha se degrada a baja presión remanente.” 2022. Gobierno de México.
- [Cervantes, 2023] Cervantes P.T. “Energía eólica marina, ¿para cuándo en México?” 2023. Forbes México.
- [Cervantes-Hernández *et al.*, 2008] Cervantes-Hernández P., Gallardo-Berumen M.I., Ramos-Cruz S., Gómez-Ponce M.A., Gracia Gasca A. “Análisis de las temporadas de veda en la explotación marina de camarones del Golfo de Tehuantepec, México.” *Revista de biología marina y oceanografía*, tomo 43(2):páginas 285–294, 2008.
- [CONAHCYT, s.f.] CONAHCYT. “Transmisión, Red Nacional de Transmisión.” s.f. Gobierno de México.
- [Dagnino, 2014] Dagnino J. “Coeficiente de correlación lineal de Pearson.” *Chilena de Anestesia*, tomo 43(1):páginas 150–153, 2014.
- [de Gobernación, s.f.] de Gobernación S. “La energía eólica en México: Una perspectiva social sobre el valor de la tierra.” s.f. Gobierno de México.
- [Derry y Williams, 1995] Derry T.K., Williams T.I. *Historia de la tecnología. I: Desde la antigüedad hasta 1750*. Siglo XXI de España Editores, S.A., España, 1995.
- [Flores y Montes, 2007] Flores B.L.F., Montes G.A. “La tecnología para la generación de energía eléctrica a partir del viento.” 2007.
- [Gallardo *et al.*, 2020] Gallardo R.P., Ríos A.M., Ramírez J.S. “Analysis of the solar and wind energetic complementarity in Mexico.” *Journal of Cleaner Production*, tomo 268:página 122323, 2020.
- [Galván, 2022] Galván A.S. “Factibilidad de ubicación y planeación de parques eólicos en México.” 2022. Tesis de maestría.
- [Geodatos, s.f.] Geodatos. “Coordenadas Geográficas de México.” s.f. Geodatos.
- [Gobierno de México, 2024] Gobierno de México. “Áreas Naturales Protegidas.” 2024. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas.

- [González, 2012] González J. *Energías Renovables*. Reverté, 2012.
- [Google, s.f.] Google. “Google Earth.” <https://www.google.es/intl/es/earth/index.html>, s.f. Captura propia; edición propia.
- [Google Maps, 2024] Google Maps. “Golfo de Tehuantepec [captura de pantalla].” <https://www.google.com.mx/maps>, 2024. Recuperado de: https://www.google.com.mx/maps/search/Golfo+de+Tehuantepec/@16.3096669,-95.847348,221908m/data=!3m1!1e3?entry=tту&g_ep=EgoyMDIOMTIwNC4wIKXMDSOASAFQAw%3D%3D.
- [GWA, s.f.] GWA. “Global Wind Atlas.” <https://globalwindatlas.info/>, s.f.
- [Henestroza, 2009] Henestroza R. “Centrales eólicas en el Istmo de Tehuantepec; su impacto ambiental y socioeconómico.” *Redalyc - Sistema de Información Científica*, tomo 16(74):páginas 39–44, 2009.
- [Hernández, 2015] Hernández G.A. *Estudio de una planta de desalación alimentada por energía eólica para el suministro de agua de riego para la recuperación del entorno hidrológico del parque nacional de Doñana*. Trabajo de fin de máster, Universidad de Cádiz, 2015.
- [Hernández, 2006] Hernández J.J.C. *Conceptos básicos de estadística para ciencias sociales*. Delta Publicaciones, 2006.
- [Huerta, 2008] Huerta J.A. *Modelado y Análisis de la operación dinámica de parques eólicos*. Proyecto Fin de Carrera, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Eléctrica, División de Estudios de Posgrados, Morelia, Michoacán, México, 2008. Tesis de maestría.
- [Iberdrola, s.f.a] Iberdrola. “La energía eólica marina flotante: un hito para impulsar las renovables gracias a la innovación.” s.f.a.
- [Iberdrola, s.f.b] Iberdrola. “¿Cómo se sustentan los aerogeneradores en el mar?” s.f.b.
- [INEGI, 2000] INEGI. “XII Censo de Población y Vivienda 2000. Subsistema de Información Demográfica y Social.” 2000. Recuperado del sitio web oficial del INEGI.

- [INEGI, s.f.] INEGI. “Mapa Digital de México.” <https://gaia.inegi.org.mx/mdm6/>, s.f. Edición propia a partir de datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- [Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 1983] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). “Carta Batimétrica del Golfo de Tehuantepec.” 1983. Actualización 2014.
- [Joskow, 2011] Joskow P.L. “Comparing the Costs of Intermittent and Dispatchable Electricity Generating Technologies.” *American Economic Review*, tomo 101(3):páginas 238–241, 2011.
- [Jurasz *et al.*, 2020] Jurasz J., Canales F.A., Kies A., Guezgouz M., Beluco A. “A Review on the Complementarity of Renewable Energy Sources: Concept, Metrics, Application and Future Research Directions.” *Solar Energy*, tomo 195:páginas 703–724, 2020.
- [Kendall y Kendall, 2005] Kendall K.E., Kendall J.E. *Análisis y diseño de sistemas*. Pearson Educación, 2005.
- [Kuo, 2019] Kuo G. “When Fossil Fuels Run Out, What Then?” <https://mahb.stanford.edu/library-item/fossil-fuels-run/>, 2019. Accedido el 20 Febrero 2026.
- [Lalinde *et al.*, 2018] Lalinde J.D.H., Castro F.E., Rodríguez J.E., Rangel J.G.C., Sierra C.A.T., Torrado M.K.A., Pirela V.J.B. “Sobre el uso adecuado del coeficiente de correlación de Pearson: definición, propiedades y suposiciones.” *Archivos Venezolanos de Farmacología y Terapéutica*, tomo 37(5):páginas 587–595, 2018.
- [Li *et al.*, 2009] Li Y., Agelidis V.G., Shrivastava Y. “Wind-Solar Resource Complementarity and its Combined Correlation with Electricity Load Demand.” En “Proceedings of the 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA),” páginas 3623–3628. Xi’an, China, 2009.
- [Luque, 2019] Luque L.M.V. *Estudio de pre-factibilidad de un parque eólico offshore para aumentar la capacidad energética del Parque Eólico Jepírachi*. 2019. Trabajo de investigación.

- [Marcollo y Efthimiou, 2024] Marcollo H., Efthimiou L. “WFO?floating offshore wind dynamic cables: overview of design and risks.” 2024. Disponible en línea.
- [Meteoblue, 2025] Meteoblue. “Datos climáticos y meteorológicos históricos para 16.08°N 95.05°O.” Datos proporcionados por: <https://www.meteoblue.com>, 2025. Meteoblue. A Windy.com Company.
- [Morales de la Garza y Carranza-Edwards, 1995] Morales de la Garza E.A., Carranza-Edwards A. “Sedimentos fosfatos en el Golfo de Tehuantepec.” *HIDROBIOLOGÍA*, tomo 5(1,2):páginas 25–36, 1995. Recuperado de: <https://hidrobiologica.izt.uam.mx/index.php/revHidro/article/view/579>.
- [Moreno, 2018] Moreno C.M. *Enfoque práctico de las finanzas bursátiles en México 2018*. Ediciones Fiscales ISEF, México, 2018.
- [Mukund, 1999] Mukund R.P. *Wind and Solar Power Systems*. CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 1999.
- [Musial *et al.*, 2004] Musial W., Butterfield S., Boone A. “Feasibility of Floating Platform Systems for Wind Turbines.” En “24th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit,” American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA), Reno, Nevada, 2004.
- [Myers y Well, 2003] Myers J.L., Well A.D. *Research Design and Statistical Analysis*. Lawrence Erlbaum Associates Inc, New Jersey, 2nd edición, 2003.
- [National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), s.f.] National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). “Bathymetric Data Viewer.” s.f. National Centers for Environmental Information.
- [Offshore Wind Scotland, s.f.] Offshore Wind Scotland. “Manufacturing Supply Chain Factsheets: Factsheet 2 ? Anchor and Mooring Systems.” s.f. Recuperado de: <https://www.offshorewindscotland.org.uk/the-scottish-offshore-wind-industry/manufacturing-factsheets/>.
- [Ortega *et al.*, 2000] Ortega S., Trigueros J., Rodríguez R., Lluch S., Villalobos H. “El Golfo de Tehuantepec como un centro de actividad biológica y su importancia en las

- pesquerías.” En D. Lluch, J. Elorduy, G. Lluch, G. Ponce, editores, “BAC: Centro de Actividades Biológicas del Pacífico Mexicano,” páginas 335–356. CIBNOR, CICIMAR, CONACYT, La Paz, México, 2000.
- [Peña, 2006] Peña G.R. *Factibilidad y diseño de sistemas de generación distribuida basados en micro-generación hidráulica*. 2006. Disponible en línea.
- [Prado, 2018] Prado I. *Estudio de implantación de un parque eólico offshore flotante en la costa de Cantabria*. Trabajo fin de máster, Universidad de Cantabria, Escuela Politécnica y Energía, 2018.
- [Prous, 2018] Prous M. *Diseño y construcción de convertidor eléctrico Back to Back para grupo de generación DFIG de 5 KVA para turbinas eólicas*. Proyecto Fin de Carrera, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Madrid, 2018. Trabajo de fin de máster.
- [PSCAD, 2018] PSCAD. “Type 4 Wind Turbine Generators.” <https://www.pscad.com/knowledge-base/article/227>, 2018. Last date verified: December 5, 2018. Accedido el 24 Febrero 2026.
- [REPSOL, 2023] REPSOL. “La Energía del viento.” <https://www.repsol.com/es/energia-futuro/futuro-planeta/energia-eolica/index.cshtml>, 2023.
- [Roberts y Prado, 2011] Roberts J.J., Prado P.O. *Estudios de Prefactibilidad para la Instalación de un Parque Eólico en el Partido de General Pueyrredon*. 2011. Octubre de 2011.
- [Roldán *et al.*, 2014] Roldán M.C., Martínez M., Peña R. “Scenarios for a hierarchical assessment of the global sustainability of electric power plants in México.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, tomo 33:páginas 154–160, 2014.
- [RPS, s.f.] RPS. “Volume 1. Chapter 3: Project Description. Array EIA Report.” Informe técnico, RPS Group, s.f.
- [Ruiz *et al.*, 2009] Ruiz F.A.C., Hillaire M.C., De Vernal A., Machain C.M.L., Vásquez L., Ghaleb B., Páez O.F. “Changes of coastal sedimentation in the Gulf of Tehuantepec,

- South Pacific Mexico, over the last 100 years from short-lived radionuclide measurements.” *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, tomo 82(3):páginas 525–536, 2009.
- [Ruppert y Matteson, 2015] Ruppert D., Matteson D.S. *Statistics and Data Analysis for Financial Engineering*. Springer Texts in Statistics. Springer, New York, NY, 2nd edición, 2015.
- [Ruvalcaba García, 2021] Ruvalcaba García A. “Estudio de factibilidad de sitios apropiados para el aprovechamiento del viento, en la parte norte de la República Mexicana.” 2021. Tesis de licenciatura.
- [Salazar, 2000] Salazar M.E.R. *Coeficientes de asociación*. Plaza y Valdés, México, 2000.
- [Saldivar, 2009] Saldivar G.U. *Estudios de Factibilidad Técnica, Diseño y Operación de Generación Distribuida Basada en Fuentes Maremotrices*. 2009.
- [Santos-Alamillos *et al.*, 2015] Santos-Alamillos F.J., Pozo-Vazquez D., Ruiz-Arias J.A., Von Bremen L., Tovar-Pescador J. “Combining wind farms with concentrating solar plants to provide stable renewable power.” *Renewable Energy*, tomo 76:páginas 539–550, 2015.
- [Santos-Alamillos *et al.*, 2012] Santos-Alamillos F.J., Tovar-Pescador J., Lara-Fanego V., Ruiz-Arias J.A., Pozo-Vázquez D. “Analysis of Spatiotemporal Balancing between Wind and Solar Energy Resources in the Southern Iberian Peninsula.” *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, tomo 51(10):páginas 2005–2024, 2012.
- [Secretaría de Energía (SENER), 2019] Secretaría de Energía (SENER). “V. Infraestructura del Sistema Eléctrico Nacional. Programa de Desarrollo Eléctrico Nacional (PRODESEN) 2019-2033.” 2019. Gobierno de México.
- [SEMARNAT, 2018] SEMARNAT. “Océanos y mares de México.” 2018. Gobierno de México.
- [SEMARNAT *et al.*, 2021] SEMARNAT, CONAGUA, SMN. “Resumen de la temporada de ciclones tropicales del año 2021.” 2021. Gobierno de México.

- [SEMARNAT *et al.*, 2022] SEMARNAT, CONAGUA, SMN. “Huracán ?Agatha? del Océano Pacífico: del 27 al 31 de mayo de 2022.” 2022. Gobierno de México.
- [SEMARNAT *et al.*, 2023] SEMARNAT, CONAGUA, SMN. “La tormenta tropical Pilar se localiza frente a las costas de El Salvador y Honduras.” 2023. Gobierno de México.
- [SEMARNAT *et al.*, 2024] SEMARNAT, CONAGUA, SMN. “Información Histórica.” 2024.
- [SENER, 2018] SENER. “Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2018-2032.” <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/331770/PRODESEN-2018-2032-definitiva.pdf>, 2018. Disponible en línea.
- [SENER, 2019] SENER. “PRODESEN 2019-2033.” https://base.energia.gob.mx/dgaic/DA/P/SubsecretariaElectricidad/ConjuntosProyectosInversion/SENER_07_ProgramaDesarrolloSistemaElectricoNacionalPRODESEN-2019-2033.pdf, 2019. Junio 2019, Disponible en línea.
- [SMN *et al.*, 2023] SMN, SEMARNAT, CONAGUA. “La tormenta tropical Pilar se localiza frente a las costas de El Salvador y Honduras.” 2023. Gobierno de México.
- [Stiebler, 2008] Stiebler M. *Wind Energy Systems for Electric Power Generation*. Springer Science & Business Media, Berlin, Germany, 2008.
- [Tapia, 2023] Tapia P. “Energía eólica marina, {?}para cuándo en México?” <https://forbes.com.mx/energia-eolica-marina-para-cuando-en-mexico/>, 2023. Publicado el 9 de junio de 2023. Accedido el 24 de febrero de 2026.
- [The Wind Power, s.f.] The Wind Power. “V164/8000.” https://www.thewindpower.net/turbine_es_867_vestas_v164-8000.php, s.f. Wind Energy Market Intelligence.
- [Trashorras, 2015] Trashorras M.J. *Subestaciones eléctricas*. Ediciones Paraninfo, S.A., 2015.
- [Vallarta-Zárate *et al.*, 2024] Vallarta-Zárate J., Martínez-Magaña V., Osuna-Soto J., Vásquez-Ortiz M., Pérez-Flores E., Altamirano-López L., Huidobro-Campos L.,

Hernández-Cruz D., Rojas-González R. “Evaluación de recursos pesqueros en el Pacífico sur mexicano: Golfo de Tehuantepec. Campaña Océano Pacífico 2023, B/I Dr. Jorge Carranza Fraser.” Informe Técnico 24, Instituto Mexicano de Investigación en Pesca y Acuacultura Sustentables, Dirección de Investigación Pesquera en el Atlántico, 2024.

[Vestas, 2011] Vestas. “V164 8.0 MW.” https://pdf.archiexpo.com/pdf/vestas/vestas-v164-80-mw/88087-134417-_8.html, 2011. Vestas Wind Systems A/S.

[Vittal y Ayyanar, 2012] Vittal V., Ayyanar R. *Grid Integration and Dynamic Impact of Wind Energy*. International Series in Engineering and Computer Science: Power Electronics & Power Systems. Kluwer Academic Publishers, 2012.

[Zhang, 2015] Zhang M.H. *Appendix II: IEC Classification of Wind Turbines*, páginas 269–270. John Wiley & Sons, 2015. Consultado el 25 de febrero de 2026.

[Zárate y Fraga, 2016] Zárate T.E., Fraga J. “La política eólica mexicana: Controversias sociales y ambientales debido a su implantación territorial. Estudios en Oaxaca y Yucatán.” *Trace (México, DF)*, 2016.

Herlinda Tututi Guillen

Factibilidad y Diseño de Parques Eólicos Marinos en México.pdf

 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::3117:550251421

Fecha de entrega

28 ene 2026, 11:58 a.m. GMT-6

Fecha de descarga

28 ene 2026, 12:13 p.m. GMT-6

Nombre del archivo

Factibilidad y Diseño de Parques Eólicos Marinos en México.pdf

Tamaño del archivo

31.5 MB

145 páginas

39.771 palabras

196.306 caracteres

9% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 9%  Fuentes de Internet
- 3%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

-  **Caracteres reemplazados**
22 caracteres sospechosos en N.º de páginas
Las letras son intercambiadas por caracteres similares de otro alfabeto.
-  **Texto oculto**
24 caracteres sospechosos en N.º de página
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	Maestría en Ciencias en Ingeniería Eléctrica	
Título del trabajo	Factibilidad y diseño de parques eólicos marinos en México	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	Herlinda Tututi Guillén	1209791b@umich.mx
Director	J. Aurelio Medina Ríos	aurelio.medina@umich.mx
Codirector		
Coordinador del programa	Norberto García Barriga	norberto.garcia@umich.mx

Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	Sí	Consulta y mejora en la redacción del documento. Así como consulta de sinónimos.

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	Sí	Traducción al español de documentos de consulta, así como en una Figura de un documento referenciado
Traducción a otra lengua	No	
Revisión y corrección de estilo	Sí	Corrección de ortografía y revisión de sinónimos
Análisis de datos	No	
Búsqueda y organización de información	Sí	Consulta de información, y búsqueda de artículos, libros o documentos de consulta relacionada al tema
Formateo de las referencias bibliográficas	Sí	Ajuste de las referencias, con respecto al nombre y años, para que se mantengan en el mismo estilo
Generación de contenido multimedia	No	
Otro	Sí	Corregir errores, y ayuda para verificar el uso correcto del software utilizado

Datos del solicitante	
Nombre y firma	Herlinda Tututi Guillén 
Lugar y fecha	Morelia, Michoacán, a 26 de enero de 2026