

# UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO



## FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRICISTA

### “FACTIBILIDAD DE UBICACIÓN Y PLANEACIÓN DE PARQUES EÓLICOS EN MÉXICO”

PRESENTA:

SARAI ATZIMBA GALVÁN LEMUS

ASESOR:

DR. J. AURELIO MEDINA RÍOS

MORELIA, MICH., ENERO 2022

## **Resumen**

En la presente tesis se presenta un análisis de lugares y regiones con mayor potencial eólico marino y terrestre en México, así como de irradiación solar. En la tesis se describen los elementos de planeación necesarios para la construcción de un parque eólico, tales como:

- Estudios batimétricos.
- Cimentación.
- Modelo de aerogenerador.
- Sistema de transmisión utilizando cable submarino.
- Costos etc.

Con base a la investigación realizada, en la tesis se presentan dos propuestas de diseño de parque eólico marino para el Golfo de Tehuantepec; en consideración a que los vientos promedio de este lugar alcanzan velocidades mayores a 9 m/s a una altura de 150 m. El primer diseño del parque eólico marino es una disposición lineal a tresbolillo columnas con 24 turbinas y el segundo diseño es una disposición circular con 21 turbinas. En la tesis se incluye un diagrama unifilar para cada diseño propuesto del parque eólico.

## **Palabras clave**

Aerogenerador, potencia, velocidad, energía, turbina.

## **Abstract**

This thesis presents an analysis of places and regions with greater wind potential required either offshore and onshore in Mexico, as well as solar irradiation. The thesis describes the required planning elements for the construction of a wind farm, such as:

- Bathymetric studies.
- Foundations.
- Wind turbine model.
- Submarine cable transmission system.
- Estimated costs.

Based on the conducted research, this work presents two proposals for the design of an offshore wind farm in the Gulf of Tehuantepec: in consideration that the average wind speed in this region is above 9 m/s at a height of 150 m.

The first proposed design of the offshore wind farm is a linear tresbolillo columns arrangement with 24 turbines and the second is a circular arrangement with 21 turbines. This work includes a single-phase diagram for each proposed design of the wind farms.

## **Agradecimientos**

Agradezco a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en especial a la Facultad de Ingeniería Eléctrica por darme todas las herramientas para desarrollarme en el campo de la ingeniería eléctrica.

Al Dr. J. Aurelio Medina Ríos, quien me brindó buena parte de sus conocimientos, tiempo y herramientas para concluir esta tesis, además de impartir otras materias.

Por el apoyo incondicional y motivación de mi madre, Alicia Lemus Jiménez y de mi familia en general.

A todos mis profesores de la Facultad de Ingeniería Eléctrica que, con mucha paciencia y dedicación me enseñaron los conocimientos y el amor por el mundo de la ingeniería.

A todos mis amigos fuera y dentro de la facultad que me han acompañado a lo largo de mis estudios, no podría nombrar a todos, porque podría omitir alguno de ellos. Cada uno me dio motivación para seguir adelante, y, lo más importante, recuerdos de alegría y nobleza.

## **Dedicatoria**

Dedico esta tesis a mi madre.

## Capítulo 1 Contenido

Capítulo 1 Introducción.....	1
1.1.- Introducción.....	1
1.2.- Antecedentes.....	5
1.3.- Justificación.....	12
1.4.- Objetivos.....	12
1.4.1.- Objetivo General.....	12
1.4.2.- Objetivos específicos.....	12
1.5.- Metodología.....	13
1.6.- Descripción de los capítulos.....	13
Capítulo 2 . Mapas energéticos, origen de la energía eólica y perspectivas de generación eólica mar adentro.....	15
2.1 Introducción.....	15
2.2 Principios de operación de una máquina eólica.....	16
2.3 Recurso eólico en México.....	18
2.4 Recurso eólico mar adentro en México.....	21
2.4.1 Golfo de Tehuantepec, Oaxaca.....	21
2.4.2 Laguna Madre y Delta del Rio Bravo, Tamaulipas.....	23
2.5 Predicción del viento.....	26
2.6 Distribución de Weibull.....	26
2.7 Ciclones Tropicales.....	27
2.7.1 Ciclones tropicales en el año 2018.....	27
2.7.2 Ciclones tropicales en el año 2019.....	28
2.7.3 Resumen de ciclones tropicales en las costas de Oaxaca y Tamaulipas del 2018-2019.....	30
2.8 Impactos de la energía eólica.....	31
2.8.1 Impactos positivos.....	32
2.8.2 Impactos negativos.....	33
2.9 Conclusiones.....	35
Capítulo 3 . Diseño del parque eólico marino.....	37
3.1 Introducción.....	37
3.2 Potencia extraíble en México.....	37
3.3 Curvas Batimétricas.....	44
3.3.1 Batimetría de Oaxaca.....	44
3.3.2 Batimetría de Tamaulipas.....	46

# ***DISEÑO Y PLANEACIÓN DE UN PARQUE EÓLICO MARINO***

3.4 Cimentación.....	48
3.4.1. Cimentaciones Superficiales .....	49
3.4.2. Cimentaciones Profundas y Ultra Profundas .....	52
3.4.3. Cargas que pueden afectar a estructuras sumergidas .....	54
3.5 Instrumentos de Medición y Orientación .....	55
3.6 Torre de contención.....	56
3.7 Generador eléctrico .....	60
3.7.1 Generadores asíncronos .....	60
3.8 Elección de la turbina .....	64
3.8.1 Elección de la turbina Siemens .....	64
3.8.2 Elección de turbina Vestas .....	66
3.9 Propuesta de instalación de parques eólicos en los sitios identificados .....	68
3.10 Configuración del parque eólico marino.....	69
3.10.1 Ubicación de aerogeneradores en el Golfo de Tehuantepec, Laguna Madre y Delta del Rio Bravo. .....	70
3.10.2 Disposición Lineal.....	71
3.10.3 Disposición Circular .....	72
3.10.4 Disposición Lineal y Circular para el Golfo de Tehuantepec .....	74
3.11 Conexión Eléctrica.....	88
3.11.1 Subestación Eléctrica .....	89
3.11.2 Cable de Transmisión.....	90
3.11.3 Diagrama unifilar .....	91
3.14 Conclusiones .....	93
Capítulo 4. Conclusiones generales y trabajo futuro.....	95
4.1 Conclusiones generales .....	95
4.2 Propuesta de trabajos de investigación futuro .....	96
Bibliografía.....	97
<b>APÉNDICE A.....</b>	<b>102</b>
<b>APÉNDICE B.....</b>	<b>103</b>

## **LISTA DE FIGURAS**

Figura 1.1 Pronóstico de consumo bruto del SEN 2019-2033, escenarios de Bajo, Alto y Planeación.....	3
Figura 1.2 Dióxido de nitrógeno (NO <sub>2</sub> ) en China y Corea del Sur 2019 .....	4
Figura 1.3 Dióxido de nitrógeno(NO <sub>2</sub> ) 2020 en China y Corea del Sur .....	5
Figura 1.4 Aerogenerador Darrieus .....	6
Figura 1.5 Mini parque eólico en Japón por la empresa Eteo, instalación de 6 turbinas de 3 KW cada una.....	7
Figura 1.6 Aerogenerador Monopala de la NASA. ....	8
Figura 1.7 Aerogenerador bipala de la NASA. ....	9
Figura 1.8 Vindeby Offshore Wind Farm. ....	10
Figura 1.9 Desmatelamiento de Vindeby Offshore Wind Farm. ....	11
Figura 1.10 Torre eólica tipo offshore de tres palas en España. ....	11
Figura 2.1 Latitudes de la tierra. ....	15
Figura 2.2 Fuerza de sustentación y arrastre.....	17
Figura 2.3 Sistemas Montañosos en México .....	19
Figura 2.4 Estados con parques eólicos en México año 2020. ....	20
Figura 2.5 Plataforma del Golfo de Tehuantepec .....	22
Figura 2.6 Mapa energético del recurso eólico en el Golfo de Tehuantepec, Oaxaca.....	22
Figura 2.7 Rosa de los vientos para la costa del estado de Oaxaca.....	23
Figura 2.8 Laguna Madre y Delta del Río, Tamaulipas. ....	24
Figura 2.9 Mapa energético del recurso eólico en Laguna Madre y Delta del Río, Tamaulipas. ....	24
Figura 2.10 Rosa de los vientos de las costas del estado de Tamaulipas.....	25
Figura 2.11 Trayectoria de la tormenta tropical “Tara”. ....	28
Figura 2.12 Trayectoria del Ciclón Tropical Potencial “Diecisiete E”.....	29
Figura 2.13 Trayectoria de la Tormenta Tropical “Fernand”. ....	30
Figura 2.14 Parque Onshore Whitelee, Escocia. ....	33
Figura 2.15 Cimentación de los Parques Eólicos Marinos. ....	34
Figura 2.16 Mapa de Sitios Prioritarios Marinos para la Conservación de la Biodiversidad. ....	35
Figura 3.1- Mapa del potencial eólico en México en los meses de enero-abril 2018.....	38
Figura 3.2 Mapa del potencial eólico en México en los meses de mayo-agosto 2018.....	39
Figura 3.3 Mapa del potencial eólico en México en los meses de septiembre-diciembre 2018. ....	39
Figura 3.4 Zonas disponibles con alto potencial de energía eólica. ....	40
Figura 3.5 Zonas destacadas por el potencial de energía eólica .....	40
Figura 3.6 Velocidad media del viento en México a una altura de 150 m.....	41
Figura 3.7 Área con mayor potencial del viento en el mar y costa de Oaxaca.....	42
Figura 3.8 Densidad de potencia media vs Áreas ventosas, para el área del sureste de México .....	42
Figura 3.9 Área del potencial del viento en Laguna Madre y Delta del Río Bravo, Tamaulipas.....	43
Figura 3.10 Densidad de potencia media vs Áreas ventosas, para el área noreste de México. ....	43
Figura 3.11 Región 1 y 2 conformadas por las costas de Oaxaca y Chiapas .....	44
Figura 3.12 Carta batimétrica del Golfo de Tehuantepec. Oaxaca. ....	45
Figura 3.13 Punto en la primera curva batimétrica del Golfo de Tehuantepec .....	45
Figura 3.14 Parque Tuno Knob en Dinamarca.....	46
Figura 3.15 Laguna Madre y Delta del Río Bravo. ....	47
Figura 3.16 Carta batimétrica de Laguna Madre y Delta del Río Bravo. ....	47
Figura 3.17 Punto en la primera curva batimétrica de la costa de Laguna Madre y Delta del Río Bravo .....	48
Figura 3.18 Jacket, Cimentación Superficial. ....	49

# ***DISEÑO Y PLANEACIÓN DE UN PARQUE EÓLICO MARINO***

Figura 3.19 Monopilote, Cimentación Superficial. ....	50
Figura 3.20 Estructura de gravedad, Cimentación Superficial. ....	51
Figura 3.21 Tri-Pilote, Cimentación Superficial. ....	51
Figura 3.22 Tipos de Plataformas Flotantes. ....	52
Figura 3.23 Sensores para medir la velocidad del viento y dirección. ....	56
Figura 3.24 Altura significativa de las olas, 15 de octubre del 2018. Estación meteorológica Puerto Ángel, Oaxaca.....	58
Figura 3.25 Altura significativa de las olas, 15 de octubre del 2019. Estación Puerto Ángel, Oaxaca. ....	59
Figura 3.26 Altura significativa de las olas ciclón Fernand, 13 de septiembre del 2019. Estación Matamoros, Tamaulipas.59	
Figura 3.27 Generador Asíncrono a Velocidad Fija. ....	61
Figura 3.28 Generador Asíncrono a Velocidad Variable. ....	62
Figura 3.29 Generador Síncrono a Velocidad Variable. ....	63
Figura 3.30 Curva de Potencia de la turbina SWT-3.6-120. ....	65
Figura 3.31 Curva de potencia de la turbina SWT-3.2-113. ....	66
Figura 3.32 Curva de potencia de la turbina V164/8000. ....	67
Figura 3.33 Configuración Barlovento .....	70
Figura 3.34 Configuración Sotavento .....	70
Figura 3.35 Distancias en diseños lineales. ....	71
Figura 3.36 Clasificación de la disposición lineal; a) lineal paralelo, b) lineal tresbolillo filas, c) lineal tresbolillo columnas, d) lineal tresbolillo doble.....	72
Figura 3.37 Esquema del diseño circular.....	73
Figura 3.38 Clasificación de la disposición Circular; a) Circular, b) Circular tresbolillos .....	73
Figura 3.39 Acomodo de turbinas tipo barlovento, a) Dirección Norte, b) Dirección Noreste .....	74
Figura 3.40 Disposición lineal con la turbina V164/800, Vestas. ....	76
Figura 3.41 Disposición lineal con filas y columnas paralelas modelo SWT-3.6-120, Siemens.....	77
Figura 3.42 Disposición lineal con filas y columnas paralelas de 42 turbinas modelo SWT-3.6-120, Siemens .....	78
Figura 3.43 Disposición lineal tresbolillo filas para la Turbina Vestas V164/8000.....	79
Figura 3.44 Disposición lineal tresbolillo columnas para la Turbina Vestas V164/8000. ....	80
Figura 3.45 Disposición lineal tresbolillo doble para el Golfo de Tehuantepec. ....	80
Figura 3.46 Ubicación del parque eólico marino en el Golfo de Oaxaca. ....	81
Figura 3.47 Disposición circular para el Golfo de Tehuantepec. ....	86
Figura 3.48 Área de la disposición circular. ....	87
Figura 3.49 Líneas de transmisión y parques eólicos del Istmo de Tehuantepec. ....	88
Figura 3.50 Transmisión de energía eléctrica con cable submarino de C.A. para un parque eólico marino. ....	90
Figura 3.51 Transmisión de energía eléctrica con cable submarino de C.C. para un parque eólico marino. ....	91
Figura 3.52 Diagrama Unifilar Disposición Lineal Tresbolillo Columnas. ....	92
Figura 3.53 Diagrama Unifilar Circular. ....	93



## **LISTA DE TABLAS**

Tabla 1.1 Pronóstico del Consumo Bruto 2019-2033, escenarios de Bajo, Alto consumo y Planeación. ....	2
Tabla 2.1 Características generales del viento en los Sitios 1 y 2. ....	25
Tabla 2.2 Clasificación del viento de acuerdo a su intensidad. ....	26
Tabla 2.3 Resumen de los ciclones tropicales que afectaron a las costas de Oaxaca ....	30
Tabla 2.4 Resumen de ciclones tropicales que afectaron las costas de Tamaulipas ....	31
Tabla 3.1 Características de la turbina SWT-3.6-120. ....	65
Tabla 3.2 Características de la turbina SWT-3.2-113 ....	66
Tabla 3.3 Características de la turbina V164/800. ....	67
Tabla 3.4 Distancias entre turbinas del parque eólico. ....	75

## **LISTA DE ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS**

APIs	Administraciones Portuarias Integrales Federales
AMDEE	Asociación Mexicana de Energía Eólica
CA	Corriente Alterna
CD	Corriente Directa
fem	Fuerza Electromotriz
GEI	Gases de Efecto Invernadero
CENACE	Centro Nacional de Control de Energía
GCR	Gerencia de Control Regional
GW	Giga Watt
hr	Hora
INECC	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
kms	Kilómetro
kg	Kilogramo
KW	Kilo Watt
MW	Mega Watt
m	Metro
mbar	Milibar
min	Minuto
KPa	Kilopascal
PRODESEN	Programa de Desarrollo del Sector Eléctrico Nacional
rpm	Revoluciones por minuto
SEN	Sistema Eléctrico Nacional
SIN	Sistema Interconectado Nacional
s	Segundo
TW	Tera Watt
tmca	Tasa Media de Crecimiento Anual

ton            Tonelada

W             Watt

## Capítulo 1 Introducción

### 1.1.- Introducción

La energía eléctrica es un bien esencial para la sociedad, es un insumo básico para la realización de las actividades diarias y productivas, de transformación, y servicios del país. Un buen sector eléctrico es un promotor del desarrollo económico-social de un país, además, si se cuenta con un suministro eficiente de energía eléctrica, promueve la seguridad de la sociedad, así como la competitividad y la capacidad de las empresas e industrias para ofrecer mejores productos y servicios al mercado. En definitiva, a medida que la sociedad es más desarrollada, se consume una mayor cantidad de energía eléctrica.

En México, la mayor parte de la energía utilizada proviene de los combustibles fósiles, tal es el caso del carbón, petróleo, y gas natural, a lo que denominan “tecnologías convencionales”. Para la generación de energía eléctrica en el país, las tecnologías convencionales contribuyen el 18% de Gases de Efecto Invernadero (GEI) a nivel nacional, es la segunda actividad del país con mayor impacto al medio ambiente, después del transporte, con un volumen anual equivalente a 125 mil millones de toneladas de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), de acuerdo al Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero, del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) [SENER 2018].

En el 2015 México se integró al Acuerdo de París [SENER 2019], comprometiéndose a realizar las acciones necesarias que contribuyeran a lograr el objetivo global de limitar el incremento de la temperatura global por debajo de 1.5°C, lo que conlleva a tratar de disminuir el cambio climático. Además, en el año 2000 el gobierno de México ratificó su pertenencia al protocolo de Kioto, el cual entró en vigor el 16 de febrero del 2005 para todas las naciones participantes. El protocolo es un instrumento jurídico vinculado a comprometer a los países industrializados a reducir las emisiones de los gases de efecto invernadero, asimismo, se decretó una serie de mecanismos de mercado para facilitar el cumplimiento de los compromisos de mitigación en los países industrializados y promover el desarrollo sustentable en los países en vías de industrialización [SENER 2019].

El sector energético enfrenta importantes cambios a nivel mundial, ya que se está dando la reducción de energías fósiles para añadir energías limpias al sistema eléctrico. México ocupa la posición 4 de 71 economías con mayor atractivo para inversiones en energías limpias, atrás de China, Jordania, y Brasil [Real Estate 2020].

Debemos de preguntarnos, ¿hacia dónde va la matriz energética en México? Como muchos otros países, México está en pleno desarrollo de su matriz energética, la cual está compuesta principalmente por “tecnologías convencionales”, que se considera como carga controlada,

además de la energía nuclear, que acapara la carga base. Sin duda, México tiene un gran potencial para el desarrollo para lo que se conoce como “energías limpias”, esto permite tener una matriz energética con la capacidad de ampliarse aún más en energías renovables.

En el país la demanda de energía eléctrica va en aumento; por lo tanto, México debe de tener un sistema seguro en el suministro eléctrico, incorporando nuevas fuentes que garanticen esta demanda. Para darnos un contexto de la demanda de energía eléctrica en México, la Secretaría de Energía (SENER) publicó el Programa de Desarrollo del Sector Eléctrico Nacional 2019-2033 (PRODESEN).

En este programa se encuentran los pronósticos de demanda y análisis que ayudan a disminuir las pérdidas de electricidad en el Sistema Eléctrico Nacional (SEN) así como, el ahorro y uso eficiente de electricidad.

En el Capítulo VI “Consumo Bruto 2019-2033” del Programa de Desarrollo del Sector Eléctrico Nacional 2019-2033 se presenta la Tasa Media de Crecimiento Anual (tmca), de tres escenarios denominados, Bajo, Alto y, de Planeación. Es aplicable para cada Gerencia de Control Regional (GCR) y Sistema Interconectado Nacional (SIN) en el periodo 2019-2033 [SENER 2019].

En la Tabla 1.1 se muestra el pronóstico promedio de la tmca para SIN y GCR, donde se presenta las tasas medias de crecimiento anual 2019-2033 (<https://www.gob.mx/sener/articulos/prodesen-2019-2033-221654>).

Tabla 1.1 Pronóstico del Consumo Bruto 2019-2033, escenarios de Bajo, Alto consumo y Planeación.

Promedio de las tasas medias de crecimiento anual 2019 — 2033			
Sistema / GCR	tmca (%)		
	Alto	Planeación	Bajo
SIN	3.5	3.0	2.7
Central	2.9	2.4	2.2
Oriental	3.3	3.2	2.4
Occidental	3.8	3.1	2.9
Noroeste	3.7	3.3	3.1
Norte	3.8	3.2	3.0
Noreste	3.5	2.9	2.7
Peninsular	3.9	3.2	3.0
Baja California	3.6	2.9	2.7
Baja California Sur	3.7	3.0	2.7
Mulegé	4.2	3.8	3.4

En la Figura 1.1 se muestra la gráfica del Pronóstico del Consumo Bruto del SEN 2019-2033 (https://www.gob.mx/sener/articulos/prodesen-2019-2033-221654). En el eje de las ordenadas se encuentra marcado el consumo bruto en GW del SEN para los próximos 15 años y en el eje de las abscisas está el periodo del 2014 al 2033. La gráfica fue elaborada por el SENER con información del Centro Nacional de Control de Energía (CENACE) [SENER 2019].

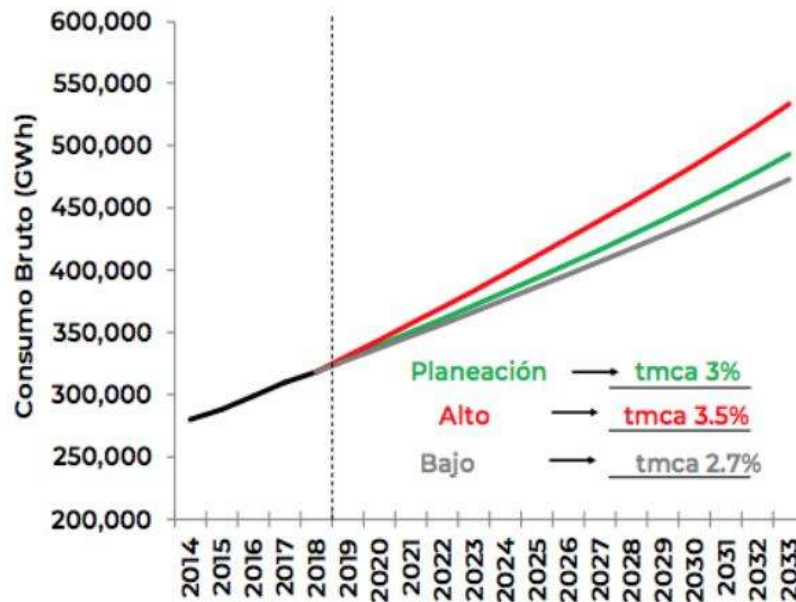


Figura 1.1 Pronóstico de consumo bruto del SEN 2019-2033, escenarios de Bajo, Alto y Planeación.

Se estima que el escenario de Planeación tenga un tmca de 3.0%, para el escenario Alto de 3.5% y para el escenario Bajo de 2.7%. Para tener una aproximación de la demanda de energía eléctrica se toma como referencia el escenario de Planeación. Un análisis rápido a largo plazo en la demanda de tmca en el Sistema Mulugé tiene un 3.8%, superando el escenario Alto y de Planeación [SENER 2019]. Esto confirma aún más el deber de ampliar la matriz energética del Sistema Nacional.

Estudios han estimado un potencial eólico de alrededor de 70 MW en el país, es decir, la misma cantidad de energía que se genera actualmente mediante las “tecnologías convencionales” [Siete24 2020].

Según la SENER, la capacidad instalada en la generación de electricidad hasta el año 2017 fue de 75 mil 685 MW, de los cuales el 70.5% corresponden a centrales eléctricas convencionales y 29.5% a plantas eléctricas con tecnologías limpias [Siete24 2020].

¿Valdrá la pena apostar a las energías renovables? A principios del año 2020 en el transcurso de la pandemia por el SARS-COVID-19 se han tenido respuestas a todas estas preguntas. Como referencia, está bien documentado el incremento de las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmosfera durante el último siglo. Los satélites de la NASA detectaron caídas entre el 20% y el 30% de las emisiones de dióxido de carbono en algunas regiones específicamente en países golpeados fuertemente por el SARS-COVID-19, tal es el caso de Italia, China y Estados Unidos [Cereceda y Murga 2020].

Según el científico Ryan Stauffer de la NASA-GSFC, se estudió la contaminación del aire y el ozono. En la Figura 1.2 se muestra las emisiones de dióxido de carbono antes del SARS-COVID-19 en China y parte del Corea del Sur (<https://es.euronews.com/2020/03/02/la-nasa-confirma-caida-de-las-emisiones-de-gases-de-efecto-invernadero-en-china-por-el-cor>).

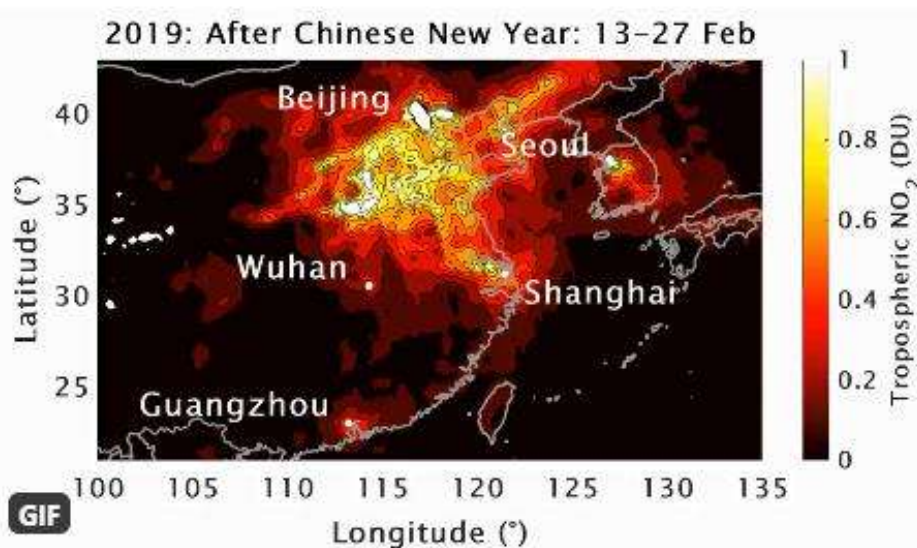


Figura 1.2 Dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) en China y Corea del Sur 2019

En la Figura 1.3 se muestra los cambios registrados en China y parte de Corea del Sur al inicio de la pandemia SARS-COVID-19 (<https://es.euronews.com/2020/03/02/la-nasa-confirma-caida-de-las-emisiones-de-gases-de-efecto-invernadero-en-china-por-el-cor>).

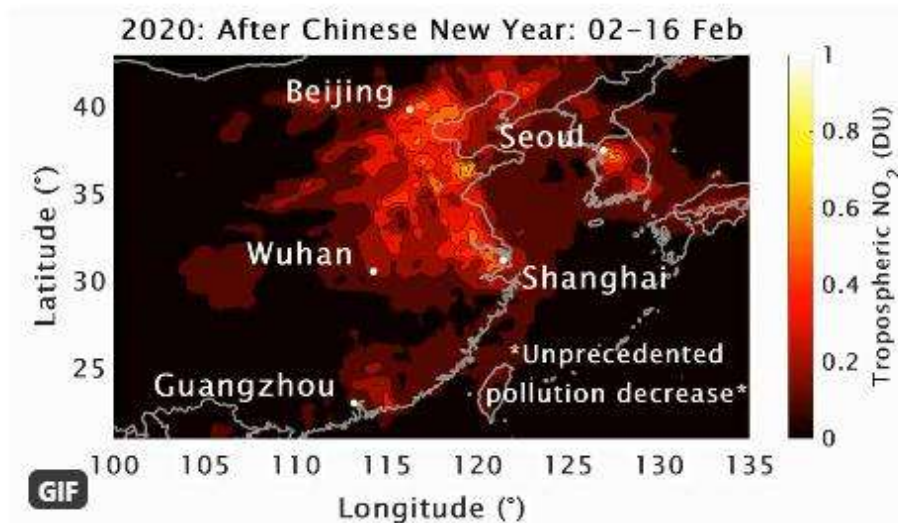


Figura 1.3 Dióxido de nitrógeno(NO<sub>2</sub>) 2020 en China y Corea del Sur

## 1.2.- Antecedentes

La primera noticia que se tiene referido a un molino de viento fue gracias al matemático, ingeniero, inventor, Herón de Alejandría. En el siglo II a. C. Herón inventó un molino de viento para proporcionar aire a un órgano musical, fue el primer molino de viento registrado en la historia. En la época del matemático, el trabajo de la molinería utilizaba la fuerza de personas y animales, mientras que los dispositivos hidráulicos apenas estaban en desarrollo. La máquina eólica de Herón no servía para moler grano, sino para accionar un órgano musical. Esta máquina funcionaba con la acción del viento sobre una rueda que tenía aspas, poniendo así en funcionamiento una especie de bomba neumática que proporcionaba aire al instrumento [Museo Virtual 2016].

Hacia el siglo VIII aparecieron en Europa grandes molinos de eje horizontal con cuatro aspas. Este modelo fue fabricado en gran número por los holandeses, pese a la dimensión de las aspas, necesitaban una regulación de la orientación de la tela. Estos molinos eran muy adecuados para vientos del orden de 5 m/s.

A partir del siglo XII-XIII se empezó a generalizar el uso de los molinos de viento para la elevación de agua y la molienda de granos; los más antiguos aparecieron en Turquía, Irán y Afganistán a principios del siglo XII. Europa se llenó a su vez de molinos, sobre todo en Bélgica y en los Países Bajos. Los molinos con gran número de palas determinan velocidades



de rotación relativamente bajas y un funcionamiento útil a partir de velocidades del viento del orden de 2 m/s.

El desarrollo de los molinos de viento se interrumpió por la revolución industrial y la utilización masiva de vapor, la electricidad y los combustibles fósiles como fuentes de energía motriz. Fue entre las guerras mundiales cuando volvieron aparecer, como progreso técnico de las hélices de aviación, y con ellas los proyectos de grandes aerogeneradores de dos y tres palas. Se inclinaron más hacia la construcción de dos palas ya que eran más baratos. Actualmente predominan las turbinas eólicas tripalas. Estos aerogeneradores giran más rápido que los múltipalas, lo que contribuye una ventaja cuando se trata de alimentar máquinas de gran velocidad de rotación.

Los aerogeneradores de eje vertical tienen la ventaja de adaptarse a cualquier dirección del viento, por ello se llaman panémonas (todos los vientos), el cual no necesita dispositivo de orientación. En la forma más moderna de este tipo de aerogenerador proviene del ingeniero francés Darrieus 1925, el cual fue patentado en Estados Unidos y luego, olvidado. No fue hasta 1973 cuando Canadá retomó su estudio y posteriormente Estados Unidos en 1975. Los laboratorios de Sandia en Albuquerque, Nuevo México, estudiaron y comercializaron los molinos de viento Darrieus [Talayero y Telmo 2011]. En la Figura 1.4 se muestra un aerogenerador Darrieus ([<https://docplayer.es/16649999-Diseno-y-construccion-de-un-prototipo-de-generador-elico-de-eje-vertical.html>]), con 64 m de diámetro, 96 m de altura y una potencia nominal de 4 MW.



*Figura 1.4 Aerogenerador Darrieus*

En Rusia se puso en funcionamiento un aerogenerador de eje vertical en 1931, específicamente en Crimea, frente al mar muerto, un aerogenerador de 30 m, que proporcionó 100 KW a la red de Sebastopol [Talayero y Telmo 2011].

Actualmente los aerogeneradores panémoas son recomendados para instalaciones pequeñas como se muestra en la Figura 1.5 (<https://www.etneo.com/es/turbina-ds3000/>), ya que no ocupan mucha superficie, no necesita mucha velocidad del viento y hay una disminución de ruido. Las razones principales por la que no son tan comunes estos aerogeneradores de eje vertical a gran escala, son por su baja eficiencia, menor estabilidad y un mayor número de problemas operativos que los aerogeneradores de eje horizontal [Prous 2018].



*Figura 1.5 Mini parque eólico en Japón por la empresa Etno, instalación de 6 turbinas de 3 KW cada una.*

En 1941 en Estados Unidos la NASA construyó un aerogenerador bipala de 53 m de diámetro, para una potencia máxima de 1250 KW que se instaló en Vermont, en el noroeste de E.U. La primera prueba se dio en octubre de 1941, continuando 15 meses, hasta en 1943 cuando ocurrió un pequeño incendio el cual bloqueó la máquina durante dos años. Las dificultades causadas por la segunda guerra mundial retrasaron la fabricación de las piezas [Talayero y Telmo 2011].

En Alemania se construyó entre 1955 y 1957 un aerogenerador de dos palas de 34 m de diámetro, de fibra de vidrio, a 80 kms al este de Stuttgart. Esta máquina funcionó hasta 1968 [Talayero y Telmo 2011].

En 1975 se pusieron en servicio los aerogeneradores Mod 0, con unas palas de metal con un diámetro de 38 m, produciendo 100KW. En 1978 la General Electric terminó el bipala Mod. 1 con un diámetro de 60 m que accionaba un alternador de 2MW [Talayero y Telmo 2011].

Los molinos de viento bipala y monopala son más económicos que los tripala y multipala, ya que solo poseen dos o una pala, respectivamente, por lo tanto, su peso también es menor. Sin embargo, no son muy utilizados debido a que se necesita una mayor velocidad de giro para generar la misma energía de salida [Prous 2018]. En la Figura 1.6 se aprecia un aerogenerador monopala (<https://naukas.com/2010/10/25/cuando-la-nasa-construia-aerogeneradores/>), y en la Figura 1.7 se muestra un aerogenerador bipala (<https://naukas.com/2010/10/25/cuando-la-nasa-construia-aerogeneradores/>).



*Figura 1.6 Aerogenerador Monopala de la NASA.*



*Figura 1.7 Aerogenerador bipala de la NASA.*

En los años 50's 60's en Francia un programa patrocinado por Electricité de France realizó un estudio del viento en todas las regiones y construyó varios aerogeneradores experimentales. El aerogenerador "Best, Romani" tripala de 30 m de diámetro con chapas de aleación ligera fue instalado en Nogent le Roy en Beauce. Podía proporcionar 800 KW a la red con un viento de 60 km/hr. Gracias a esta máquina experimental en el año de 1958 y 1962 se aportó una gran cantidad de información sobre su funcionamiento en condiciones extremas de generación [Talayero y Telmo 2011].

El bajo precio del petróleo determinó entonces la suspensión total de los grandes proyectos en todo el mundo. Sin embargo, los años 70's, coincidieron con la primera crisis del petróleo, se inició una nueva etapa en el aprovechamiento de las energías del viento. Las aplicaciones de las tecnologías modernas, y en especial las desarrolladas para la aviación, han dado como resultado la aparición de nuevas tecnologías eólicas [Talayero y Telmo 2011].

El primer parque eólico marino fue construido en Dinamarca en 1991 llamado "Vindeby Offshore Wind Farm". En esa época el parque tuvo una inversión aproximada de 10 millones de dólares. Su tamaño estaba muy alejado de los aerogeneradores actuales; estaba compuesto por 11 aerogeneradores fabricados por Bonus Energy, actualmente propiedad de Siemens, con una potencia de 450 KW cada aerogenerador. En total el parque aportaba una potencia de 4.95 MW. Actualmente una sola turbina eólica marina puede generar más energía que Vindeby.

El aprovechamiento de este parque eólico marino fue de 25 años. Anualmente tuvo una generación media de 9.61 GW y durante su operación el parque offshore aportó 243 GW de energía limpia y libre de emisiones [Fernández 2018]. En la Figura 1.8 se puede apreciar el parque Vindeby Offshore Wind Farm (<https://www.diariorenovables.com/2018/03/primer-parque-eolico-marino-del-mundo.html>).



*Figura 1.8 Vindeby Offshore Wind Farm.*

En el 2016 fue desmantelado ya que el costo de mantenimiento era alto y superaba los beneficios económicos. Muchos de sus componentes fueron desmontados y transportados por un buque a la costa; estos componentes fueron reutilizados como repuestos para otros generadores offshore [Oliveira 2018]. En la Figura 1.9 se muestra el desmantelamiento del parque Vindeby Offshore Wind Farm (<https://vadebarcos.net/2018/09/25/vindeby-offshore-wind-farm-el-primer-parque-eolico-marino-del-mundo/>).



*Figura 1.9 Desmatelamiento de Vindeby Offshore Wind Farm.*

En un molino de viento, en un menor número de palas obliga al aerogenerador a girar más rápido y eso implica más ruido, además, aumentan las vibraciones cuando una pala pasa junto a la torre y este queda fuera del flujo del viento. Un diseño de tres palas en un aerogenerador como se muestra en la Figura 1.10 (<https://canariasnoticias.es/2019/03/28/el-aerogenerador-marino-de-gran-canaria-situa-a-espana-en-el-mapa-mundial-eolico-offshore>), resulta ser una solución más barata y con menos problemas de orientación [Liceaga 2010]



*Figura 1.10 Torre eólica tipo offshore de tres palas en España.*

## 1.3.- Justificación

México es un país de gran potencial para la utilización de energías renovables, en particular, la energía eólica y solar. En septiembre del 2016, México ratificó el Acuerdo de París, el cual, afirma el compromiso a reducir las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en su sector industrial. Otra meta a alcanzar es generar el 35% de energía limpia para el 2024 y el 43% a más tardar en el 2030. Además, México se comprometió a reducir el 22% de la emisión de gases de efecto invernadero y en 51% las emisiones de carbón negro. Una matriz energética diversificada asegura el suministro de energía de la demanda eléctrica para promover el crecimiento y satisfacer las necesidades básicas de la sociedad mexicana.

Una de las distintas alternativas para lograr los compromisos mencionados previamente, es la generación de energía eléctrica mediante parques eólicos marinos. A la fecha no hay un solo parque eólico de esta naturaleza operando en el país, así que su diseño y planeación representan campos teóricos-prácticos de gran importancia y potencial para la generación de energía eléctrica en el país a corto, mediano y largo plazo.

La generación masiva de energía eléctrica mediante parques eólicos marinos representa un área de investigación científico-práctica muy importante para el país porque apoyaría la capacidad de generación de energía eléctrica instalada actualmente en el país, sin deterioro al medio ambiente y con los evidentes y muy importantes beneficios para el desarrollo social, económico, productivo y de la sociedad, entre otros.

## 1.4.- Objetivos

### 1.4.1.- Objetivo General

Con base a estudios de factibilidad técnica, basados en estudios de complementariedad y recursos energéticos, identificar potenciales regiones de la República Mexicana con características adecuadas para el diseño e instalación de parques eólicos marinos.

### 1.4.2.- Objetivos específicos

- Proponer los elementos necesarios que conlleva un parque eólico marino, mediante referencias de parques eólicos marinos ya existentes.

- Realizar estudios de factibilidad técnica para la identificación de regiones potenciales en el país con la capacidad eólica para la instalación en su caso de un parque eólico marino.
- Proponer el diseño, instalación y configuración del parque eólico marino correspondiente a la región o regiones identificadas con mayor potencial eólico mar adentro en el país.

## 1.5.- Metodología

La realización de tesis está basada en la siguiente metodología:

1. Revisión de información documental en bases de datos del Gobierno de México, en páginas de Internet, y en portales científicos-académicos. En particular en las siguientes fuentes:
  - a) Bibliotecas de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, tales como la biblioteca de la Facultad de Ingeniería Eléctrica, biblioteca de la Facultad de Ingeniería Mecánica “Ing. Donaciano Tizcareño Reynoso”, biblioteca de la Facultad de Biología “Centro de Información Biológico-Ambiental” y la biblioteca general de la universidad “Mariano de Jesús Torres”.
  - b) Área de atención a usuarios del INEGI para la adquisición de las cartas batimétricas.
  - c) Portales oficiales diversos de noticias verificadas en internet.
  - d) Artículos Científicos del Institute Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
  - e) Información de la Secretaria de Energía (SENER) en el Departamento de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional.
2. Identificación de la potencia útil en las regiones elegidas con potencial eólico mar adentro en la República Mexicana.
3. Propuesta de configuración del parque eólico marino y elección de sus componentes.

## 1.6.- Descripción de los capítulos

En el Capítulo 1 se presenta un panorama sobre la importancia del desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional, enfatizando los compromisos del Estado Mexicano para reducir las emisiones de dióxido de carbono. Además, de una breve explicación de la posibilidad de llevar a cabo un cambio en el planeta para su beneficio. Se da una introducción de la historia



general de los parques eólicos, así como, ejemplos en la actualidad del desarrollo y eficiencia que han alcanzado. Se detallan los antecedentes, justificación, objetivos, y metodología de la tesis, así como se presenta una breve descripción del contenido de cada uno de los capítulos de esta tesis.

En el Capítulo 2 se expone el potencial que tiene México para el desarrollo de las energías renovables, específicamente de la energía eólica. Así mismo, se presenta el registro histórico de los ciclones tropicales en las costas de Oaxaca, y Tamaulipas. Con el propósito de tomar en cuenta las dificultades con las que se puede presentar un proyecto de esta magnitud. Finalmente, en este capítulo, se analizan los cambios positivos y negativos de la construcción de parques eólicos marinos.

En el Capítulo 3 se hace mención de los componentes de un proyecto de parque eólico marino y su elección, tal como, los componentes eléctricos, mecánicos, estructuras de cimentación, mediadas aproximadas de hélices y torre, además, modelos de aerogeneradores de marcas comerciales. También en este capítulo se hace referencia a la identificación de la potencia útil que existe en México y el diseño del parque eólico marino. Se considera el campo de la estructura geológica de cada zona, en particular de Laguna Madre y Delta del Rio Bravo, Tamaulipas y del Golfo de Tehuantepec, Oaxaca. También incluye ingeniería naval para el diseño de cada aerogenerador. Se hace una propuesta de diseño de parques eólico marinos, considerado su configuración, número de unidades, distintos elementos que lo conforman y su configuración eléctrica.

En el Capítulo 4 se presentan las conclusiones generales de esta investigación y se sugieren distintos vértices de investigación futura.

## Capítulo 2 . Mapas energéticos, origen de la energía eólica y perspectivas de generación eólica mar adentro

### 2.1 Introducción

La energía eólica es una forma de energía solar o de “tipo solar”, es decir, la radiación solar calienta el aire, lo que provoca que cambie su densidad. La diferencia de densidades entre masas de aire provoca el movimiento y las corrientes de aire, entre más frío o denso sea la masa de aire este tiende a pesar más, por lo tanto, tendera a bajar [Jáuregui 2003].

El planeta tierra y su atmosfera se calienta por la radiación que recibe del sol. El sistema irradia la misma cantidad de calor recibida, pero esta vez hacia el espacio exterior, de manera que, en conjunto se mantiene el equilibrio y la temperatura global para no cambiar. Este equilibrio de calor es válido para todo el planeta y no para una determinada zona, ya que, la región ecuatorial recibe más calor que el desprendido hacia la atmosfera; sin embargo, ni los polos se vuelven más fríos ni las zonas ecuatoriales aumentan su temperatura o calor, lo cual se debe a que el calor viaja a las regiones polares manteniendo así la temperatura relativamente uniforme [Jáuregui 2003]. En la Figura 2.1 se muestran las líneas de latitud de la tierra (<http://www.authorstream.com/Presentation/tiaveronica-1168469-ppt-lineas-imaginarias/>).

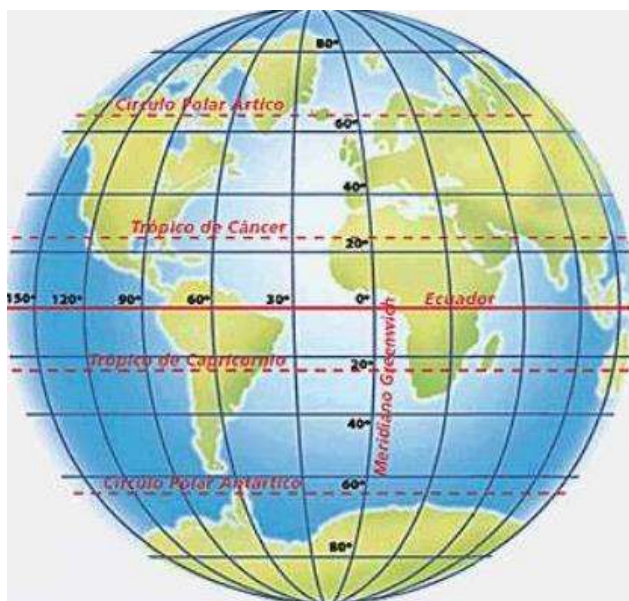


Figura 2.1 Latitudes de la tierra.

Todos estos intercambios de calor se realizan por medio de los movimientos atmosféricos a una escala planetaria, esto denominado la circulación general de las masas de aire. De no existir esta circulación, los trópicos se volverían intolerantemente calientes y el resto del planeta se tornaría muy helado, las ciudades se ahogarían en sus propias emanaciones tóxicas. Por otra parte, si cesara de pronto la fuente de energía del sol que mueve a la atmósfera, los vientos desaparecerían en unos 12 días, ya que la pérdida de energía por fricción entre el viento y la superficie de la tierra es grande [Jáuregui 2003].

## 2.2 Principios de operación de una máquina eólica

Los molinos de viento son dispositivos que convierten la energía cinética del viento en energía mecánica. Existen dos tipos de aerogeneradores, de eje horizontal y eje vertical, respectivamente, su principio de operación es esencialmente el mismo. La captación de la energía eólica se realiza mediante la acción del viento sobre las palas, las cuales están unidas al eje a través de un rotor [Moragues y Rapallini 2003].

El viento posee energía debido a su masa y velocidad; si consideramos un metro cúbico de aire que se mueve a una velocidad de 10 m/s, podríamos calcular su energía cinética. Para estos cálculos, hay que tomar en cuenta que un metro cúbico tiene una masa de aproximadamente 1.2 kg. La energía cinética del viento está definida como [Wildi 2007]:

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.1)$$

En donde  $E_k$  es la energía cinética (J),  $m$  la masa del aire (kg), y  $v$  la velocidad del viento (m/s). El cálculo para la energía cinética con una velocidad del viento de 10 m/s es:

$$E_k = \frac{1}{2}(1.2 \text{ kg})(10 \text{ m/s})^2 = 60 \text{ J}$$

Debido a la parte mecánica de la turbina que posee el aerogenerador disminuye su velocidad. El viento al chocar con la turbina cede una parte de su energía cinética, como resultado, la turbina eólica producirá una salida de potencia mecánica que se utiliza para impulsar un generador eléctrico [Wildi 2007].

El principio aerodinámico por el cual el conjunto de palas gira en un aerogenerador es similar al de los aviones. Según este principio, el aire es obligado a fluir por las caras superior e inferior de un perfil inclinado o placa, generando una diferencia de presión entre ambas caras, dando así el origen a una fuerza resultante  $R$  que actúa sobre el perfil. La fuerza resultante  $R$  provoca dos tipos de direcciones:

- Fuerza de sustentación (Lift). Es la dirección perpendicular al viento.
- Fuerza de arrastre (Drag). Es la dirección paralela al viento [Moragues y Rapallini 2003].

En la Figura 2.2 se muestra la fuerza de sustentación, arrastre y resultante en un aerogenerador (<https://blogs.publico.es/ignacio-martil/2018/06/01/las-claves-del-funcionamiento-de-una-turbina-eolica/>).

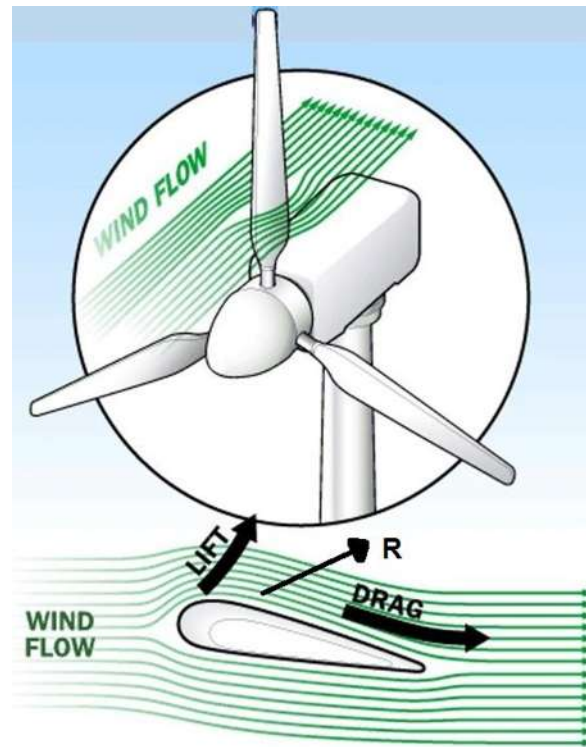


Figura 2.2 Fuerza de sustentación y arrastre

Una alternativa para favorecer la circulación del aire sobre la superficie de las palas, además de evitar la formación de torbellinos y maximizar la diferencia de presiones, es elegir palas con perfiles aerodinámicos. De acuerdo a como estén montadas las palas respecto al viento y al eje de rotación, la fuerza que producirá el par-motor será dominante la fuerza de arrastre o la de sustentación. En todas las máquinas modernas la fuerza dominante es la fuerza de sustentación, esta permite obtener con menor peso y costo, mayor potencia por unidad de área del rotor [Moragues y Rapallini 2003].

Para que un aerogenerador se ponga en marcha se necesita de un valor mínimo del viento para vencer los rozamientos y comenzar a producir trabajo útil, a la cual se le denomina velocidad de conexión. Esta velocidad está comprendida entre 3 a 5 m/s. A partir de este

punto empezará a rotar el aerogenerador convirtiendo la energía cinética en mecánica, hasta alcanzar la potencia nominal. A partir de este momento empiezan actuar los mecanismos activos y pasivos de regulación para evitar que la máquina trabaje bajo condiciones que no fue diseñada. Aunque continúe operando a velocidades mayores, la potencia que entrega no será diferente a la nominal, y esto será hasta que alcance la velocidad de corte [Henestroza 2009].

La potencia generada por el aerogenerador en una determinada corriente de viento al atravesar una sección es proporcional a la velocidad del viento al cubo. La potencia generada por el viento está definida como [Araújo et al., 2009]:

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \rho A_w V_w^3 \quad (2.2)$$

donde la variable  $P_{wind}$  potencia generada por el aerogenerador,  $\rho$  densidad del viento,  $A_w$  el área que abarca el diámetro de la turbina y  $V_w$  que es la velocidad instantánea del viento.

### 2.3 Recurso eólico en México

México es un país con gran potencial para las energías solar y eólica. Esto es debido a la estructura del territorio mexicano en forma de embudo, ancho en el norte y estrecho en el sur, además, de poseer el territorio mexicano sistemas montañosos, como la Sierra Madre, que convergen hacia el sur y suroeste de México, permite que la acción de los vientos alisios y la oscilación estacional del cinturón subtropical de alta presión contribuyan a un patrón climático tan diverso que, al aplicar cualquier sistema de clasificación, todos los climas quedan representados en el país, desde muy secos en el norte, hasta subhúmedos y muy húmedos al sur; secos y subhúmedos en la vertiente pacífica hasta húmedos con lluvias todo el año en la vertiente del Golfo de México; tropicales sobre las costas y depresiones, hasta fríos en los picos de las montañas más altas, por encima de los 4,000 m de altitud [Silva, et al., 2014]. En la Figura 2.3 se muestra los sistemas montañosos del país (<https://www.cerebriti.com/juegos-de-geografia/sistema-montanoso-de-mexico>).



*Figura 2.3 Sistemas Montañosos en México*

La mayor parte del territorio de México se encuentra bajo la influencia de los vientos alisios, cargados de humedad, que penetran desde el este y norte del país. Debido a la interferencia de los complicados sistemas de montañas, valles y depresiones, la dirección real del viento varía notablemente de una zona a otra y muchas veces entre áreas muy cercanas entre sí.

En México se han realizado estudios exploratorios y reconocimiento puntual del recurso energético eólico. Existen numerosas zonas con vientos aprovechables y económicamente viables, algunas de estas zonas son:

- El Istmo de Tehuantepec.
- La Península de Baja California.
- La Península de Yucatán.
- El Altiplano Norte
- La Región Central [González, et al., 2006].

Actualmente hay 13 estados que tienen parques eólicos terrestres, pero, ninguno marino. En la Figura 2.4 se muestra los parques eólicos terrestres que tiene México publicada por la Asociación Mexicana de Energía Eólica (AMDEE) en el año 2020 (<https://amdee.org/>).



Figura 2.4 Estados con parques eólicos en México año 2020.

Las condiciones eólicas en el Istmo de Tehuantepec son de las mejores a nivel mundial. En Oaxaca hay zonas con velocidades de viento medidas a 50 m de altura superiores a 8.5 m/s, con una potencia de 6.250 MW y otras con velocidades de 7.7 a 8.5 m/s, con una potencia de 8.800 MW, de acuerdo a un estudio de clasificación de velocidades del viento realizado por los Laboratorios Nacionales de Energía Renovable/ Recursos de Energía del Viento de los Estados Unidos [Henestroza 2009].

Actualmente en México existen dos modalidades de generación eléctrica:

- Producción independiente de energía.
- Autoabastecimiento.

Las subastas o licitaciones se han realizado en los últimos años por Comisión Federal de Electricidad (CFE). Los Productores Independientes de Energía confirman que en México los mecanismos de subasta permiten el desarrollo de esta tecnología a precios competitivos. Si se cuenta con una matriz de generación diversificada, esto permite mitigar el riesgo de fluctuación en los precios de los combustibles fósiles, fortaleciendo la eficiencia económica del sistema eléctrico a mediano y largo plazo.

## 2.4 Recurso eólico mar adentro en México

Sin duda el recurso eólico en México es muy alto, de hecho, es uno de los países con mayor potencial para la generación de energía eléctrica a partir del viento. Los estados como Oaxaca, Yucatán, y Tamaulipas han registrado velocidades de viento mayores a 8 m/s, es decir, mayores a 28.8 k/hr [Siete24 2020].

Mediante mapas de recursos eólicos se puede identificar los lugares con mayor potencial para un parque eólico marino [Zamora 2018]. A continuación, se mostrarán los mapas de recurso eólico de las costas de Oaxaca y Tamaulipas.

### 2.4.1 Golfo de Tehuantepec, Oaxaca

Como se mencionó anteriormente el Sitio 1 se encuentra en las costas del estado de Oaxaca. El estado actualmente cuenta con 28 parques en funcionamiento, todos estos parques tienen la característica de estar en tierra y ser catalogados como parques onshore o parques eólicos que se encuentran en tierra; en conjunto, tienen una capacidad de generación de 2 mil 756 MW. Uno de ellos, es el más grande de Latinoamérica se encuentra ubicado en los municipios de El Espinal y Juchitán de Zaragoza en la región del Istmo de Tehuantepec llamado “Energía Eólica del Sur”; cuenta con 132 aerogeneradores, obteniendo así, una capacidad instalada de 396 MW [El Universal 2020].

El potencial en tierra para la construcción de parques eólicos terrestres es alta, como en las costas del estado de Oaxaca. La plataforma continental del Golfo de Tehuantepec tiene una extensión de 18,489  $km^2$  con una latitud que abarca de 16°08'24'' a 14°12'36'' y una longitud de 96°35'24'' a 92°16'48''. Esta área suele tener un clima cálido subhúmedo con vientos estacionales y lluvias en otoño; ocurren vientos fuertes llamados por los lugareños de la región “vientos tehuantepecanos” y huracanes [Cabrera, et al., 1998]. En la Figura 2.5 se puede apreciar la plataforma continental del Golfo de Tehuantepec (<https://www.google.com.mx/maps/>).



# DISEÑO Y PLANEACIÓN DE UN PARQUE EÓLICO MARINO

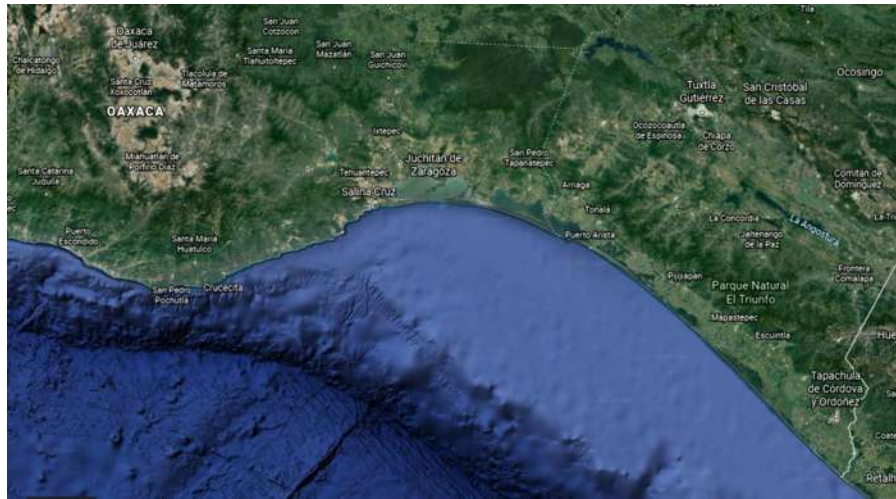


Figura 2.5 Plataforma del Golfo de Tehuantepec

La plataforma de Oaxaca cuenta con una velocidad del viento mar adentro entre 9 a 10.5 m/s, a una altura de 50 m, en la zona se tiene una temperatura promedio de 15°C, una presión ambiental de 101.3 KPa, la densidad del aire es 1.221 kg/m<sup>3</sup>. La distancia máxima mar adentro a partir de la costa hasta el lugar con mayor potencial es una distancia dentro de los 40 a 50 km [Zamora 2018]. En la Figura 2.6 se muestra el mapa del recurso eólico del Golfo de Tehuantepec, Oaxaca (Zamora, 2018, pág. 47).

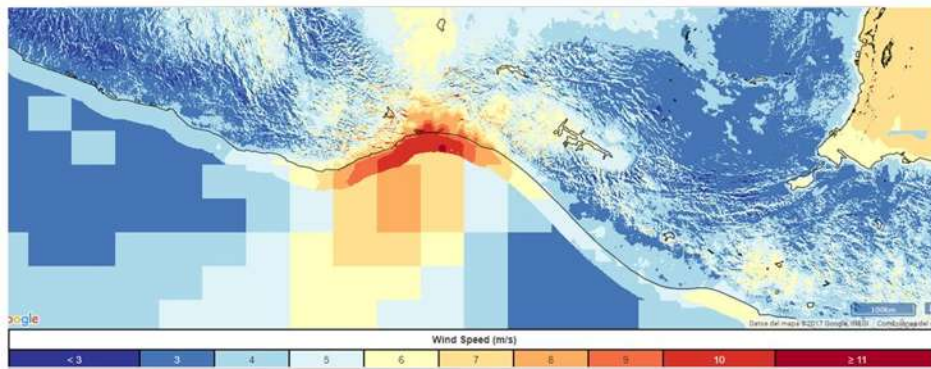


Figura 2.6 Mapa energético del recurso eólico en el Golfo de Tehuantepec, Oaxaca

En el Golfo de Tehuantepec existen turbulencias de viento alrededor de los 22 m/s lo cual podría afectar el rendimiento del aerogenerador. Para localizar adecuadamente un aerogenerador se tiene que conocer la dirección del viento predominante, es decir, generalmente habrá una dirección en la cual la velocidad de la masa de aire sea mayor, una forma de obtener esta información es mediante la rosa de los vientos [Serrano 2015]. En la

Figura 2.7 se muestra la dirección del viento, la cual proviene del norte con rachas al noreste (Zamora, 2018, pág. 67).

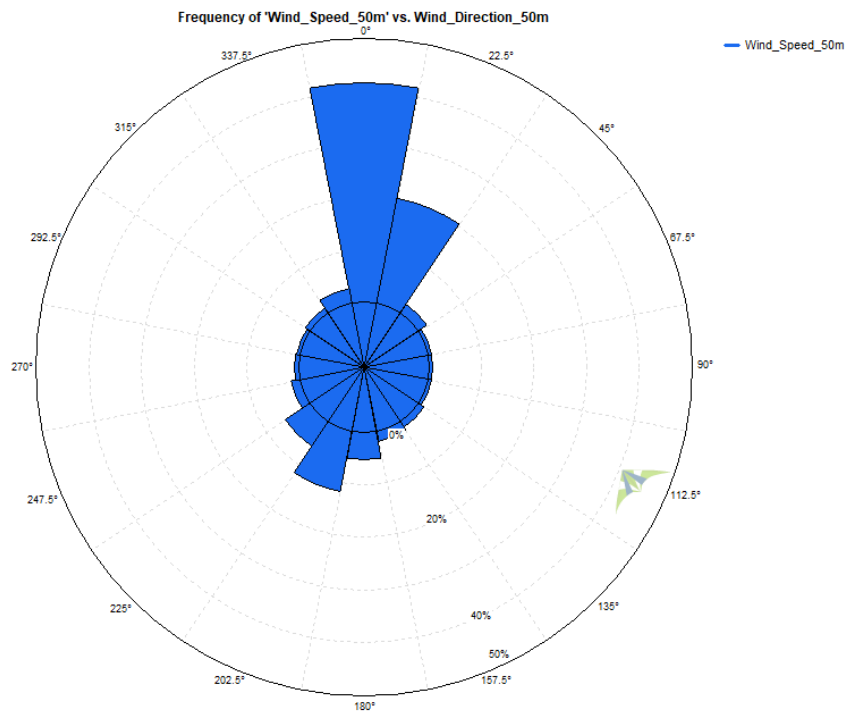


Figura 2.7 Rosa de los vientos para la costa del estado de Oaxaca.

## 2.4.2 Laguna Madre y Delta del Río Bravo, Tamaulipas

El Sitio 2 se encuentra en las costas del estado de Tamaulipas, que cuenta con un parque eólico terrestre en operación, llamado Parque Eólico Tres Mesas III; este parque fue construido por la empresa francesa Engie, en el municipio de Llera de Canales, Tamaulipas. El parque eólico está conformado por 15 aerogeneradores que alcanzan una altura de 112 m, con rotores de 136 m de diámetro. De acuerdo a al SENER, el parque forma parte de un grupo de 5 proyectos eólicos ubicados en Tres Mesas, de los cuales en conjunto producen una generación de 593 MW, es decir, el 8.4% de la capacidad eólica que tiene México y el 0.8% de la capacidad total eléctrica nacional [El Economista 2019].

Tamaulipas cuenta con un sitio potencial en la costa, entre Laguna Madre y Delta del Río Bravo. La velocidad promedio del viento mar adentro en este sitio es de 5.32 m/s a una altura

## DISEÑO Y PLANEACIÓN DE UN PARQUE EÓLICO MARINO

de 80 m, tiene la característica ambiental de  $24.5^{\circ}\text{C}$ , presión media 1,015 mbar (101.5 KPa), la densidad del aire es de  $1.186 \text{ kg/m}^3$  [Zamora 2018].

La Laguna Madre cuenta con una extensión aproximada de  $27,537 \text{ km}^2$ , esta área abarca las coordenadas, latitud  $25^{\circ}58'33''$  a  $23^{\circ}31'04''$  con una longitud  $97^{\circ}57'10''$  a  $96^{\circ}17'38''$ . Tiene una costa rocosa sedimentaria, con una plataforma estrecha y una depresión inundable [Cabrera, et al., 1998]. En la Figura 2.8 se muestra un panorama de la Laguna Madre y Delta del Río Bravo (https://www.google.com.mx/maps/).

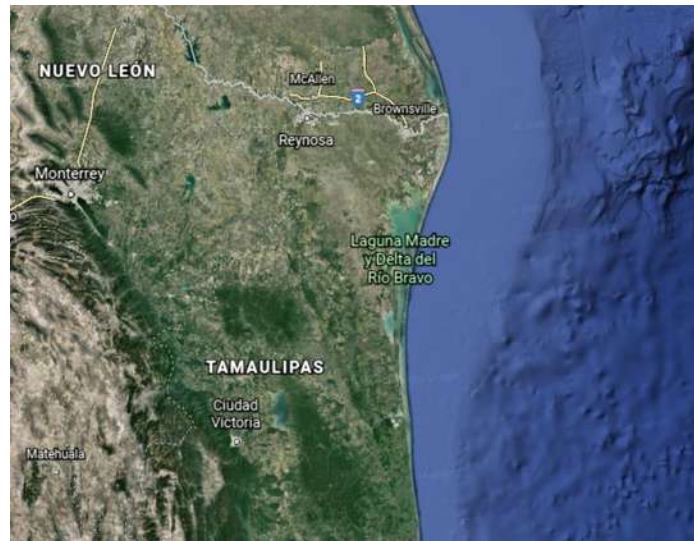
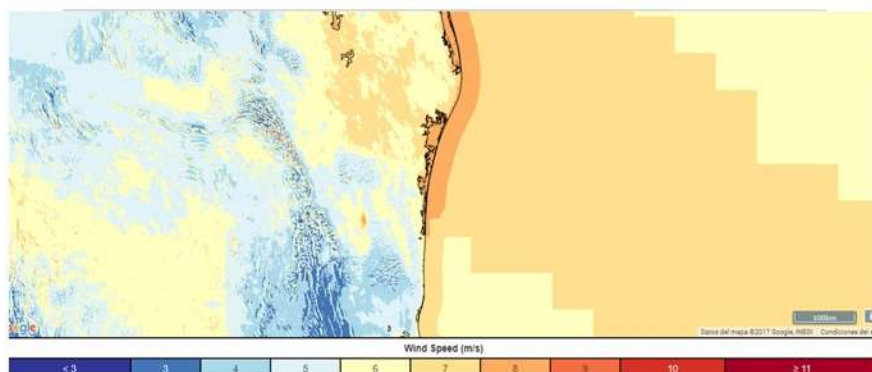


Figura 2.8 Laguna Madre y Delta del Río, Tamaulipas.

La distancia máxima hasta donde se tiene este potencial eólico es de 40 km [Zamora 2018]. La Figura 2.9 muestra el mapa energético del recurso eólico en la costa de Tamaulipas (Zamora, 2018, pág. 50); se puede apreciar que el potencial eólico se encuentra desde la costa.



De acuerdo a la rosa de los vientos de la Figura 2.10 (Zamora, 2018, pág. 64), la dirección de los vientos predominante proviene del sureste, es decir a  $157.5^\circ$ .

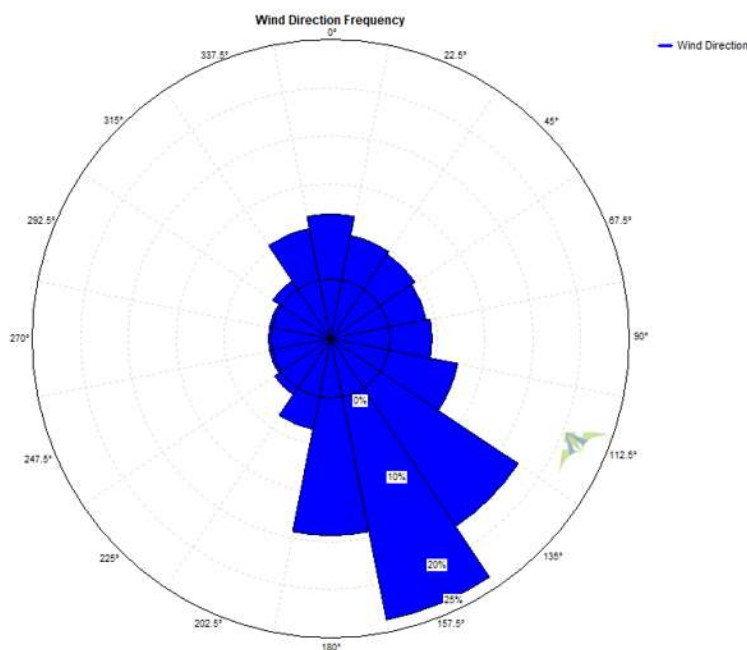


Figura 2.10 Rosa de los vientos de las costas del estado de Tamaulipas.

El resumen del análisis de los dos lugares con mayor potencial eólico para un parque eólico marino se presenta en la Tabla 2.1 (tabla del autor).

Tabla 2.1 Características generales del viento en los Sitios 1 y 2.

<b>CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL VIENTO EN EL GOLFO DE TEHUANTEPEC, OAXACA Y LAGUNA MADRE-DELTA DEL RIO BRAVO, TAMAULIPAS</b>				
Lugar	Altura	Dirección del viento	Velocidad promedio mar adentro	Distancia máxima de potencial
Golfo de Tehuantepec, Oaxaca	50 m	Norte $0^\circ$	9 – 10.5 m/s	40 – 50 km
Laguna Madre y Delta del Rio Bravo, Tamaulipas	80 m	Suroeste a $157.5^\circ$	5.32 m/s	40

## 2.5 Predicción del viento

Hacer una predicción en cualquier género de estudio es una tarea complicada, en el caso de los parques eólicos, consiste en calcular la cantidad de energía que esté generando, así como las horas de funcionamiento y fiabilidad. Para las predicciones del viento, existen dos modalidades, llamadas vientos locales y vientos globales. Los vientos globales son fijos y no varían con el tiempo, en cambio, los vientos locales se generan como resultado de la orografía y los obstáculos que se encuentran en el terreno, tienen una mayor variabilidad y pueden ser generados por los vientos procedentes de las mareas o las montañas [Serrano 2015].

Los vientos se pueden clasificar en función a la intensidad con la que se desplazan. En la Tabla 2.2 se muestra la clasificación de los vientos de acuerdo a su intensidad (Wildi, 2017, pág. 692).

*Tabla 2.2 Clasificación del viento de acuerdo a su intensidad.*

<b>Categoría</b>	<b>Velocidad en m/s</b>	<b>Velocidad en km/h</b>
Brisa leve	3	11
Brisa moderada	7	25
Brisa fuerte	12	43
Ventarrón	18	65
Huracán	>32	115

De la Tabla 2.2 se pueden definir los vientos de acuerdo a su desplazamiento en las dos costas de los estados. En el Golfo de Tehuantepec, Oaxaca los vientos tienen velocidades entre 7 y 10 m/s, clasificados como brisa moderada, a velocidad igual o mayores de 25 km/hr. Para la Laguna Madre y Delta del Rio Bravo, Tamaulipas se tiene vientos que se considera brisa fuerte, ya que su velocidad promedio es de 8 m/s.

## 2.6 Distribución de Weibull

En el campo de la ingeniería eólica, se utiliza una función de distribución para las predicciones de los datos del viento en un determinado lugar durante un periodo de tiempo señalado, además de considerar una distribución de probabilidad que reproduce la

variabilidad de los datos; esta función se llama distribución de Weibull, la cual está definida como [Prado 2018]:

$$f(U) = k \cdot \frac{U^{k-1}}{c^k} \cdot e^{-\left(\frac{U}{c}\right)^k} \quad (2.3)$$

En donde  $f(U)$  es la función de probabilidad,  $U$  la velocidad media del viento,  $k$  el factor de forma que describe la variación sobre la media y  $c$  el parámetro de escala [Prado 2018].

## 2.7 Ciclones Tropicales

Los huracanes y tormentas tropicales deben considerarse cuidadosamente para propósitos de diseño y construcción de los parques eólicos. Lo anterior porque proporcionan información importante sobre la velocidad alcanzada por los vientos globales, altura máxima de las olas, entre otros datos importantes. En este subcapítulo 2.7 Ciclones Tropicales se analizará el historial de los ciclones tropicales que han afectado a las costas de Oaxaca y Tamaulipas, en los años 2018 y 2019.

### 2.7.1 Ciclones tropicales en el año 2018

Durante el año 2018 se generaron 41 ciclones tropicales, de los cuales 25 fueron en el Océano Pacífico Nororiental, y 16 en el Océano Atlántico. De los 25 ciclones en el Océano Pacífico, 12 fueron huracanes, 10 fueron tormentas tropicales y 3 solo alcanzaron la etapa de depresión tropical. Estos ciclones impactaron en los estados de Baja California Sur, Sonora, Colima, Guerrero, y Michoacán [CONAGUA *et al.*, 2018].

#### 2.7.1.1 Tormenta tropical “Tara”

Se presentó del 14 al 16 octubre, su trayectoria inicio en el Golfo de Tehuantepec y se mantuvo con desplazamientos paralelos y muy cercanos a las costas de Oaxaca, Guerrero, Michoacán, Colima y Jalisco, con vientos máximos sostenidos de 55 km/ hr y rachas de 75 km/ hr [CONAGUA *et al.*, 2018].

“Tara” no tocó tierra, su trayectoria se ubicó a 40 km al sur-suroeste de Manzanillo, Colima y se consideró como uno de los 8 ciclones de la temporada 2018 que afectaron las costas de México por el lado del Océano Pacífico [CONAGUA *et al.*, 2018]. En la Figura 2.11 se muestra la trayectoria de la tormenta tropical Tara (<https://smn.conagua.gob.mx/es/ciclones-tropicales/informacion-historica>).



Figura 2.11 Trayectoria de la tormenta tropical “Tara”.

En el Océano Atlántico se generaron un total de 16 ciclones tropicales, de ellos 8 alcanzaron la categoría de huracán, 7 fueron tormentas tropicales y 2 más fueron depresiones tropicales. Los huracanes más intensos fueron “Florence” y “Michael”, ambos en Quintana Roo [CONAGUA *et al.*, 2018].

### 2.7.2 Ciclones tropicales en el año 2019

Durante la temporada de ciclones tropicales en el 2019 se generaron 41 ciclones tropicales, 21 en el Océano Pacífico Oriental y 20 en el Océano Atlántico. De los 21 ciclones de la temporada 2019 en el Océano Pacífico, 7 alcanzaron categoría de huracán, 11 fueron tormentas tropicales, 2 alcanzaron etapa de depresión tropical y uno se clasificó como ciclón tropical [CONAGUA *et al.*, 2019].

## 2.7.2.1 Ciclón tropical potencial “Diecisiete E”

El día 15 de octubre el ciclón tropical potencial “Diecisiete E” tocó tierra a 6 km al este-sureste de Ayutla, Oaxaca, entre Salina Cruz y Bahía de Huatulco, con vientos máximos sostenidos de 55 km/ hr y desplazamientos hacia el noroeste a 22 km/ hr, pero, este terminó el 16 de octubre [CONAGUA *et al.*, 2019]. En la Figura 2.12 se muestra la trayectoria del ciclón tropical Diecisiete E (<https://smn.conagua.gob.mx/es/ciclones-tropicales/informacion-historica>).



Figura 2.12 Trayectoria del Ciclón Tropical Potencial “Diecisiete E”.

En el Océano Atlántico, durante la temporada del año 2019, se generaron un total de 20 ciclones tropicales, de los cuales, 6 alcanzaron la categoría de huracán, 12 categoría de tormenta tropical y 2 más fueron depresiones tropicales sin nombre. Los huracanes más intensos fueron “Dorian” y “Lorenzo” [CONAGUA *et al.*, 2019].

## 2.7.2.2 Tormenta tropical “Fernand”

En la cuenca del Océano Atlántico, “Fernand”, afectó directamente al país al tocar tierra en la costa del estado de Tamaulipas. Estuvo presente del 13 al 14 de septiembre del 2019. Una vez formado como ciclón tropical potencial, en frente de la costa de Tamaulipas, “Fernand” evolucionó a depresión tropical y después a tormenta tropical, se desplazó hacia el occidente



y en la primera semana de septiembre el centro del ciclón tocó tierra en las inmediaciones de Boca de Catán, Tamaulipas, a 55 km al norte de La Pesca, Tamaulipas, con vientos máximos sostenidos de 75 km/ hr y rachas de 95 km/ hr [CONAGUA *et al.*, 2019]. En la Figura 2.13 se muestra la trayectoria de la tormenta tropical “Fernand” (<https://smn.conagua.gob.mx/es/ciclones-tropicales/informacion-historic>).

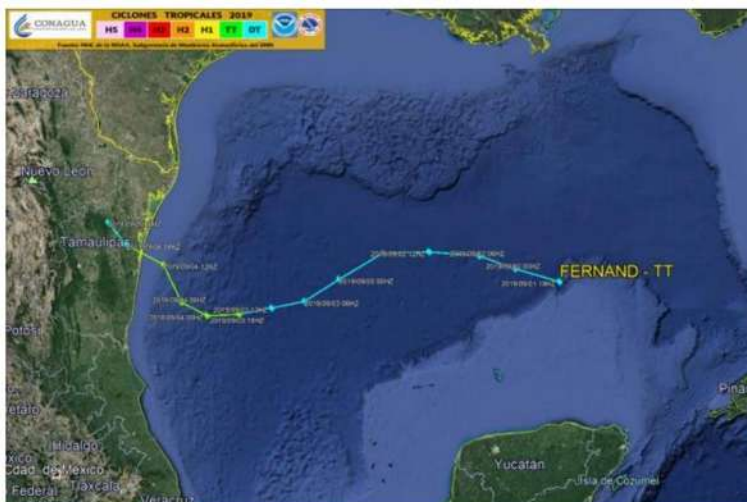


Figura 2.13 Trayectoria de la Tormenta Tropical “Fernand”.

2.7.3 Resumen de ciclones tropicales en las costas de Oaxaca y Tamaulipas del 2018-2019.

En la Tabla 2.3 se muestra el resumen de los ciclones tropicales que han afectado a las costas de Oaxaca en los años 2018 y 2019 (tabla del autor).

Tabla 2.3 Resumen de los ciclones tropicales que afectaron a las costas de Oaxaca

<b>CICLONES TROPICALES QUE AFECTARON LAS COSTAS DE OAXACA EN LOS AÑOS 2018 Y 2019</b>			
<b>Nombre</b>	<b>Fecha</b>	<b>Lugar</b>	<b>Velocidad del viento</b>
Tara	14 - 16 octubre del 2018	Golfo de Tehuantepec y se desplaza hacia Guerrero, Michoacán, Colima y Jalisco	55 km/ hr
Diecisiete E	15 - 16 de octubre del 2019	a 6 km al este-sureste de Ayutla, Oaxaca, entre Salina Cruz y Bahía de Huatulco.	55 km/ hr

En la Tabla 2.4 se muestra el resumen de los ciclones tropicales que han afectado a las costas de Tamaulipas en los años 2018 y 2019 (tabla del autor).

*Tabla 2.4 Resumen de ciclones tropicales que afectaron las costas de Tamaulipas*

<b>CICLONES TROPICALES QUE AFECTARON LAS COSTAS DE TAMAULIPAS EN LOS AÑOS 2018 Y 2019</b>			
<b>Nombre</b>	<b>Fecha</b>	<b>Lugar</b>	<b>Velocidad del viento</b>
Fernand	13 -14 de septiembre del 2019	Boca de Catán, Tamaulipas	75 km/ hr

Hasta ahora no se ha encontrado ningún parque eólico marino afectado por algún huracán o ciclón. Existen estudios donde demuestran que la construcción de un parque eólico marino puede reducir la magnitud de un huracán. Estos resultados fueron publicados en la revista Nature Climate Change, por el profesor de Ingeniería Civil y Ambiental de Stanford, Mark Jacobson, quien ha pasado 24 años desarrollando este complejo modelo eólico. Sus estudios muestran que los parques eólicos marinos pueden frenar a gran medida las tormentas tropicales, incluso hasta un 50% los picos de viento y puede llegar a atenuar hasta un 79% la violencia del huracán [Corral 2014].

## 2.8 Impactos de la energía eólica

Todo proyecto genera alteraciones al medio ambiente en mayor o menor grado, desde la construcción de carreteras, construcción de viviendas, la edificación de fábricas, etc. Para esto se tiene que evaluar la relación de perjuicio-beneficio para determinar la viabilidad del proyecto. Debemos ser conscientes de los impactos medioambientales positivos y negativos ante un proyecto de generación eólica. Un objetivo es conseguir mayores impactos positivos y un mínimo de impactos negativos [González 2012].

El consumo de energía en México y en el mundo seguirá creciendo irremediablemente. Se estima que las necesidades energéticas mundiales para el año 2030 superarán en más del 50% las existentes en el 2020 [Mares 2020].

### 2.8.1 Impactos positivos

- No se produce emisiones de  $CO_2$ , por lo tanto, no se contribuye a incrementar el efecto invernadero.
- No hay emisión de  $SO_2$  (Óxido de azufre), ni de  $NO_2$  (Óxido de nitrógeno), con lo que no se contribuye a la generación de lluvia ácida ni a la degradación de la capa de ozono
- No hay emisiones de cenizas, humos, ni partículas sólidas en suspensión.
- No se producen enfermedades respiratorias.
- No hay producción de desechos radioactivos.
- Reduce la dependencia de los combustibles fósiles o nucleares [González 2012].

Otro impacto positivo de la energía eólica es el impacto socioeconómico. Debemos recordar que la energía eléctrica es esencial para la economía de los países. Hoy más que nunca es fundamental contar con una matriz integral que busque el equilibrio para alcanzar la máxima eficiencia [Henestroza 2009].

La llegada de inversiones para el impulso de los parques eólicos estimula el empleo, tanto en el ámbito de la construcción, como en el del mantenimiento y la operación de las instalaciones, genera una derrama económica a nivel local, como pueden ser los gastos de transporte, alimentación y alojamiento de las personas que laboran en esta área [Henestroza 2009].

Cabe señalar que las empresas privadas que instalen parques eólicos en cualquier región de México tienen que pagar impuestos al gobierno federal y/o estatal, estos impuestos a la vez serán retribuidos en la región. El pago por el arrendamiento de terrenos beneficia a la comunidad local. Además, está el pago por licencias municipales y el aporte que estas empresas tendrán que realizar para la mejora de caminos e infraestructura local [Henestroza 2009].

Un parque eólico marino o terrestre que se encuentre en operación y en construcción, atrae a varios visitantes ya que es una maravilla de la ingeniería e implica ofrecer un atractivo turístico para todos los visitantes de la región.

Un ejemplo del turismo provocado por la ingeniería, es el parque eólico en tierra Whitelee, que se muestra en la Figura 2.14 (<http://eoliccat.net/turismo-activo-entre-turbinas/?lang=es>), con la capacidad de generar 536 MW, se encuentra en Escocia y es operado por Iberdrola a través de su filial británica Scottish Power. Se localiza a 15 km de Glasgow, el parque ofrece 130 km de rutas trazadas entre sus 215 turbinas, que se pueden recorrer a pie, en bicicleta o a caballo, la actividad más popular es el circuito de bicicletas de montaña [EOLICCAT 2016].



*Figura 2.14 Parque Onshore Whitelee, Escocia.*

Así como Whitelee existen otras obras más de la ingeniería de igual o mayor atractivo, tal es el caso del edificio Burj Khalifa, Dubai, el aeropuerto de Kansai, Osaka Japón, la presa Tres Gargantas, Yangtsé China, entre otros [EADIC 2013].

### 2.8.2 Impactos negativos

La energía eólica es una energía renovable y alterna que ofrece un menor impacto ambiental comparado con el uso de “tecnologías convencionales”. Los impactos negativos que comúnmente se asocian a un parque eólico son:

- Ruido generado por el movimiento de las aspas de los aerogeneradores.
- Daño a la avifauna de la región, al chocar las aves sobre las aspas de los aerogeneradores.
- La producción de los componentes que se requieren para el parque eólico.
- Aspecto paisajista, caracterizado por elementos horizontales y la aparición de un elemento vertical como es el aerogenerador, lo cual produce el efecto discoteca, que aparece cuando el sol está detrás de los aerogeneradores y su sombra se proyecta.
- El costo que implica un proyecto eólico tanto en tierra firme como en el mar [Henestroza 2009].

Algunos de los aspectos negativos anteriormente mencionados se han sobreexponen, como es el ruido, actualmente existen diseños más silenciosos o el choque de las aves, ya los

edificios ocupan el primer lugar de estos incidentes. El diseño del parque eólico marino tendrá un menor impacto en el ruido generado por las aspas, así como el efecto discoteca. Un impacto negativo mayor en los parques offshore es producido por la cimentación de los aerogeneradores. En la Figura 2.15 se muestra algunos tipos de cimentación para los parques eólicos marinos (<https://www.worldenergytrade.com/energias-alternativas/energia-eolica/la-ubicacion-de-los-parques-eolicos-determina-cimientos-de-sus-aerogeneradores>).

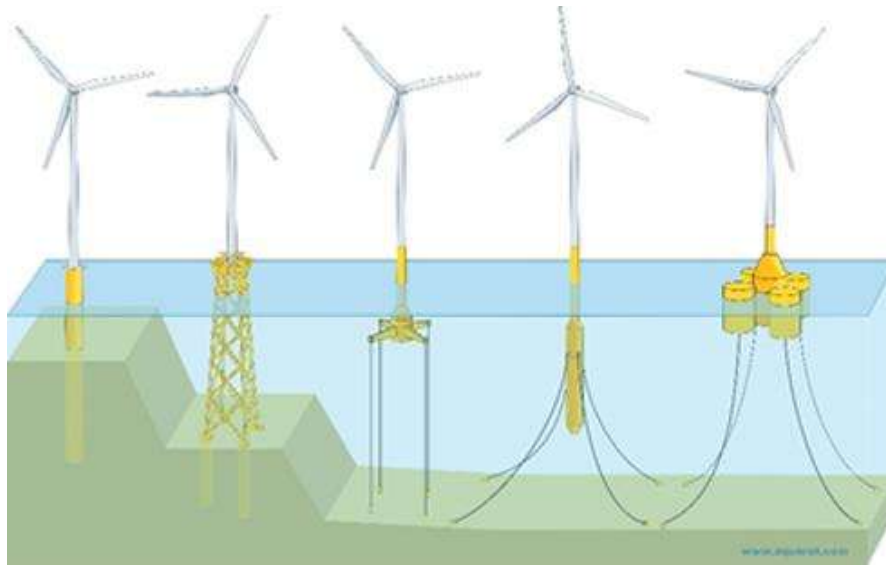


Figura 2.15 Cimentación de los Parques Eólicos Marinos.

Los parques marinos pueden ser desmantelados, como se mencionó en el Capítulo 1. Un claro ejemplo de este tema es el caso de “Vindeby Offshore Wind Farm”. Después de su vida útil fue desmantelado, tuvo una duración de 20 a 25 años aproximadamente. Además, algunas de sus piezas fueron reutilizadas en otros parques, o expuestas en museos.

En la construcción de un parque eólico marino se tiene que tomar en cuenta la biodiversidad marina. La planificación de la biodiversidad marina es muy importante ya que es un componente esencial de la mega diversidad de México que incluye los ambientes costeros, oceánicos e insulares [CONABIO *et al.*, 2007].

México cuenta con 105 sitios marinos protegidos para la conservación de la biodiversidad [CONABIO *et al.*, 2007]. En la Figura 2.16 se muestra los sitios prioritarios que se deben proteger en el país, el cual incluye costas, islas y océanos (<http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/layouts/spm1mgw.png>).

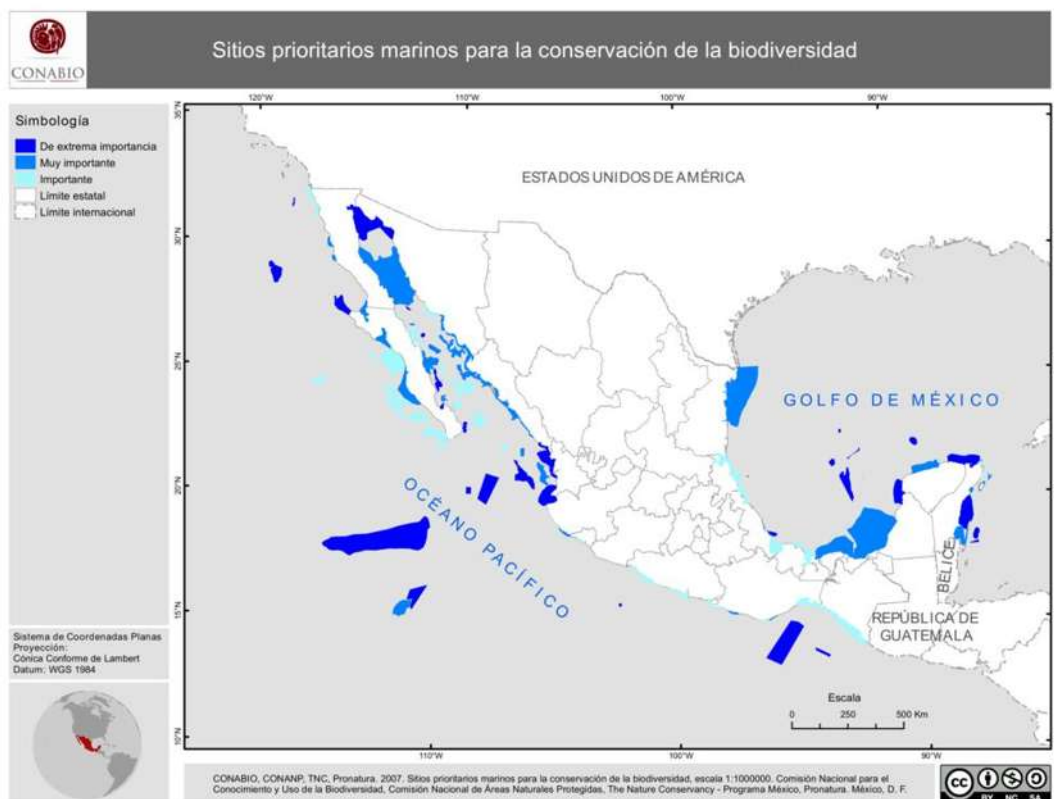


Figura 2.16 Mapa de Sitios Prioritarios Marinos para la Conservación de la Biodiversidad.

## 2.9 Conclusiones

El recurso eólico y solar en México son muy altos, por lo que hay varios lugares en el país con capacidad eólica y fotovoltaica, pero los estados que más destacan son Oaxaca, Yucatán y Tamaulipas con velocidades de viento igual o mayor a 5 m/s. Los dos estados más adecuados para el aprovechamiento eólico son Tamaulipas y Oaxaca cuentan con 28 parques eólicos terrestres con una potencia total a 2,756 MW y Tamaulipas genera 593 MW por medio de un complejo eólico conformado por etapas.

La ubicación del parque eólico marino en Oaxaca sería precisamente en el Golfo de Tehuantepec; esta plataforma tiene velocidades de viento igual o mayores de 9 m/s a una altura de 50 m. Del mapa energético de esta zona, mostrado en la Figura 2.6, se observa que existe una velocidad igual o mayor a 9 m/s desde la costa y de acuerdo a la rosa de los vientos del Golfo de Tehuantepec, la dirección dominante del viento es hacia el Norte, con rachas hacia el Noreste. A esta velocidad de viento se le considera como brisa fuerte la cual es

adecuada para la generación de energía eólica por su velocidad aproximada de 12 m/s lo que equivale a 43 km/ hr.

En el estado de Tamaulipas la ubicación del parque eólico marino se encontraría en las costas de Laguna Madre y delta del Río Bravo. En este lugar existen velocidades iguales o mayores a 5.32 m/s a una altura de 80 m con vientos dominantes hacía el Sureste de acuerdo a la rosa de los vientos. A esta velocidad de viento se le considera como brisa moderada, debido a la velocidad del viento que se maneja en la zona (igual o mayor a 5.32 m/s).

La presencia de ciclones en los últimos 3 años en Tamaulipas ha sido en menor grado con la presencia de “Fernand”; por otro lado, en las costas de Oaxaca se han presentado mayor número de presencia tal es el caso de “Beatriz”, “Calvin”, “Tara” y “Diecisiete E”. El efecto de estos ciclones en la generación de energía eólica en los parques eólicos terrestres ya existentes en Oaxaca no ha repercutido de manera negativa en la generación de energía eléctrica, de lo contrario, se ha tratado de aprovechar.

## Capítulo 3 . Diseño del parque eólico marino

### 3.1 Introducción

El diseño de un parque eólico marino requiere ser considerado desde distintas perspectivas, debido a que se debe analizar varios factores que permitan lograr el máximo aprovechamiento del recurso renovable del viento, así como la factibilidad de su instalación. No solamente es necesario considerar los componentes eléctricos de un parque eólico marino, sino también los elementos mecánicos, los estudios de oleaje, estudios batimétricos, costos, mapas energéticos, diseño de la subestación, entre otros aspectos.

En el siguiente capítulo se hará un análisis detallado del diseño y simulación de un parque eólico marino, en las zonas identificadas como potenciales del territorio mexicano, así como los estudios que fundamentan esta teoría.

### 3.2 Potencia extraíble en México

México está identificado como uno de los países con potencial adecuado para la instalación de energía solar y eólica. El país tiene un área de  $1,964,374 \text{ km}^2$ , siendo así, el decimotercer país más grande del mundo. México tiene una gran diversidad de climas, entre ellos se encuentra húmedo-caliente, semihúmedo cálido, entre otros. La temperatura es variable, dependiendo de la ubicación del estado, ya que en el área central del territorio mexicano tienen una temperatura promedio de  $24^\circ\text{C}$ . En los estados del norte con frontera a los Estados Unidos se encuentran las temperaturas más altas, alrededor de los  $43^\circ\text{C}$ . En la misma frontera, pero en zonas montañosas puede disminuir considerablemente la temperatura, hasta llegar a los  $0^\circ\text{C}$  [Peña *et al.*, 2020].

Una forma para determinar el potencial de las energías renovables es mediante mapas energéticos. Estos mapas cumplen la función de identificar los lugares con mayor potencial para la instalación de sistemas de generación, basados en la energía solar y eólica, respectivamente, además de que pueden ser utilizados para otras aplicaciones energéticas.

Los mapas de radiación solar varían dependiendo el mes del año; existen meses con mayor potencial para el aprovechamiento de las energías renovables, y en otros, donde el potencial sigue ahí, pero en menor medida.



A continuación, se muestran el potencial del viento en México, en el año 2018. El área con mayor potencial se encuentra al sureste del país, en los estados de Oaxaca y Chiapas. El lugar con mayor índice para el aprovechamiento de la energía eólica es el lugar conocido como La Ventosa, Oaxaca. En la Figura 3.1 (Peña et al., 2020, pág.5), se aprecia el potencial de los meses de enero-abril; la zona del sureste tiene un potencial de  $800 \text{ W/m}^2$ .

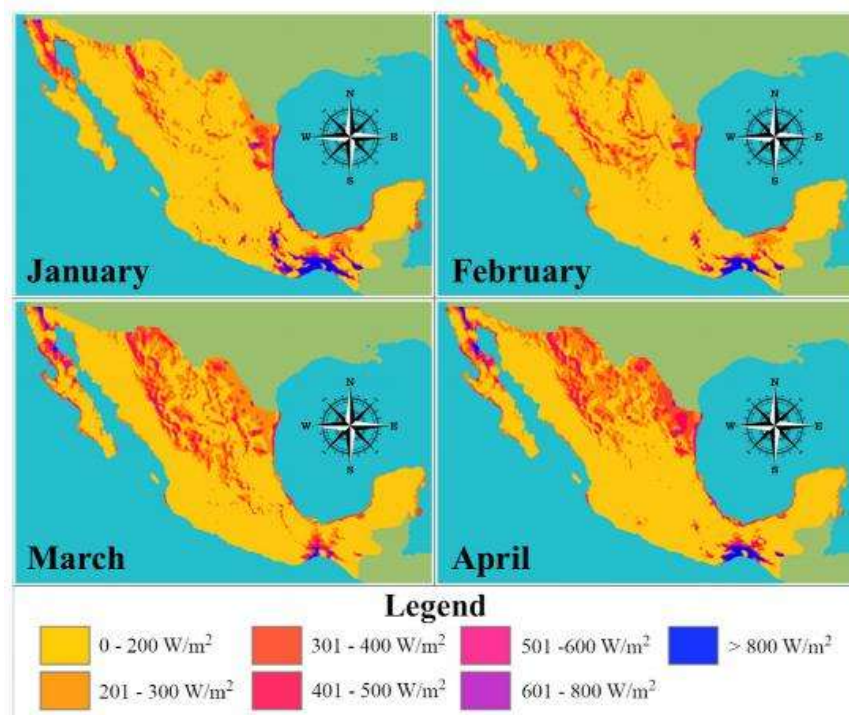


Figura 3.1- Mapa del potencial eólico en México en los meses de enero-abril 2018.

En la Figura 3.2 (Peña et al., 2020, pág.6), se muestra la radiación solar de los meses de mayo-agosto, la cual disminuye en la región del sureste, la cual anteriormente se tenía un potencial de  $800 \text{ W/m}^2$  ahora se reduce casi a la mitad, en el rango de  $401$  a  $500 \text{ W/m}^2$ . En general, se observa que la radiación solar en el país decrece [Peña et al., 2020].

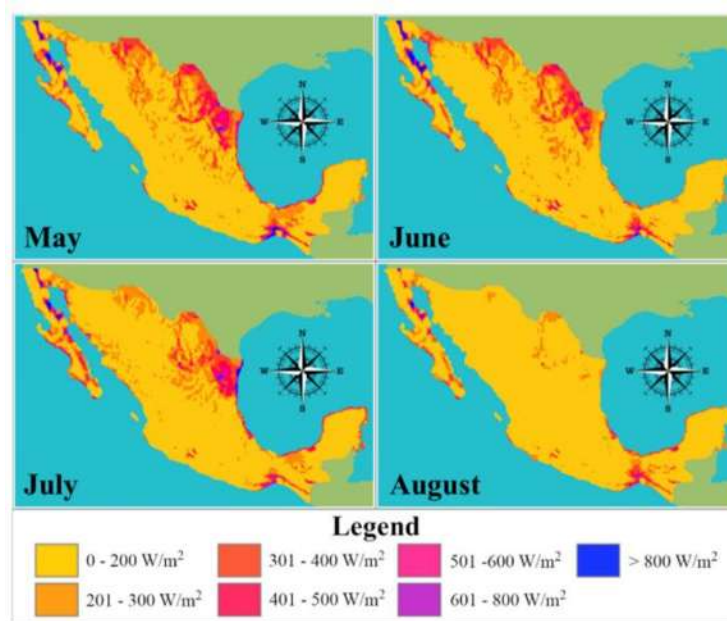


Figura 3.2 Mapa del potencial eólico en México en los meses de mayo-agosto 2018.

Para los meses de septiembre-diciembre se aprecia en la [Figura 3.3 \(Peña et al., 2020, pág.7\)](#) que el potencial de irradiación solar vuelve a incrementar, pero esta vez en más zonas, como en los estados que colindan con el Golfo de México, el Mar Caribe y los estados de Baja California Norte-Sur.

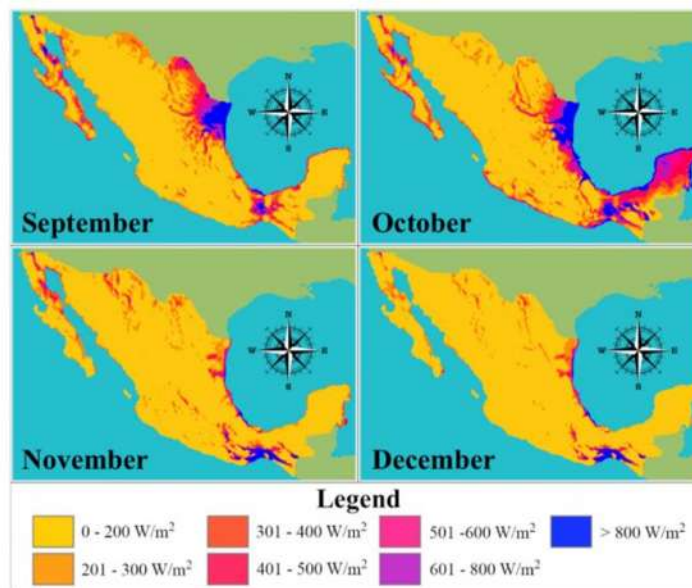


Figura 3.3 Mapa del potencial eólico en México en los meses de septiembre-diciembre 2018.

## DISEÑO Y PLANEACIÓN DE UN PARQUE EÓLICO MARINO

En la Figura 3.4 se muestra las zonas disponibles con alto potencial de energía eólica (escenario 1 de 4) en la República Mexicana (<https://dgel.energia.gob.mx/azel/mapa.html?lang=es>); la figura muestra los resultados obtenidos del proyecto “Atlas de Zonas Factibles para la Producción de Electricidad por Fuentes Renovables de Energía” [Fernández, et al., 2016].



Figura 3.4 Zonas disponibles con alto potencial de energía eólica.

En la Figura 3.5 se muestra una ampliación de las dos zonas del país con un alto porcentaje del potencial eólico (<https://dgel.energia.gob.mx/azel/mapa.html?lang=es>). Para la Figura 3.5 a) al Suroeste se tiene un factor de planta de 40 a 60%, y b) al Noreste el factor de planta es de 30 a 40%.

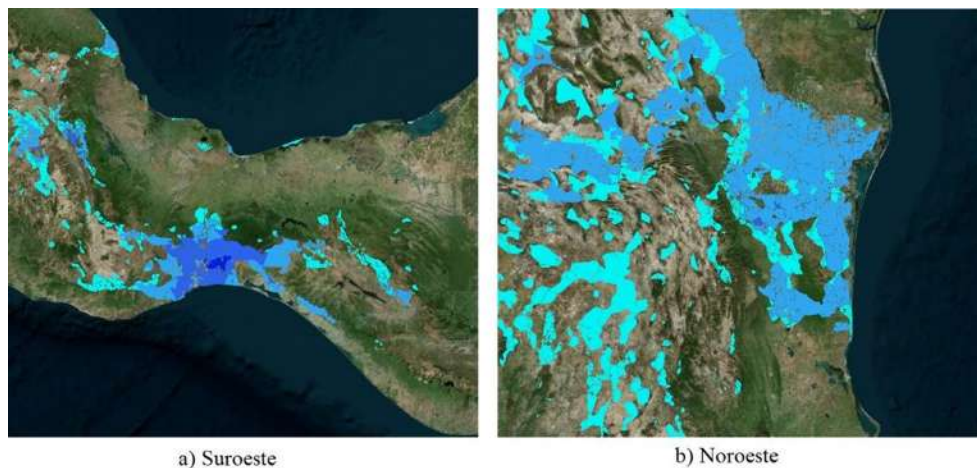


Figura 3.5 Zonas destacadas por el potencial de energía eólica

Para el promedio de la velocidad del viento a una distancia considerable, la aplicación Global Wind Atlas <https://globalwindatlas.info/> identifica las mejores áreas de viento para la generación de energía eólica prácticamente en cualquier parte del mundo, con excepción del polo norte, sur y zonas muy alejadas. Global Wind Atlas realiza cálculos preliminares de las velocidades del viento a diferentes alturas (10, 50, 100, 150 y 200 m). Los mapas cuentan con una escala cromática con valores de < 2.5 a > 9.5 m/s, siendo así el color azul la velocidad más baja y el color guinda la más altas. En la Figura 3.6 se muestra el mapa “Velocidad media del viento en México” a una altura de 150 m (<https://globalwindatlas.info/>).

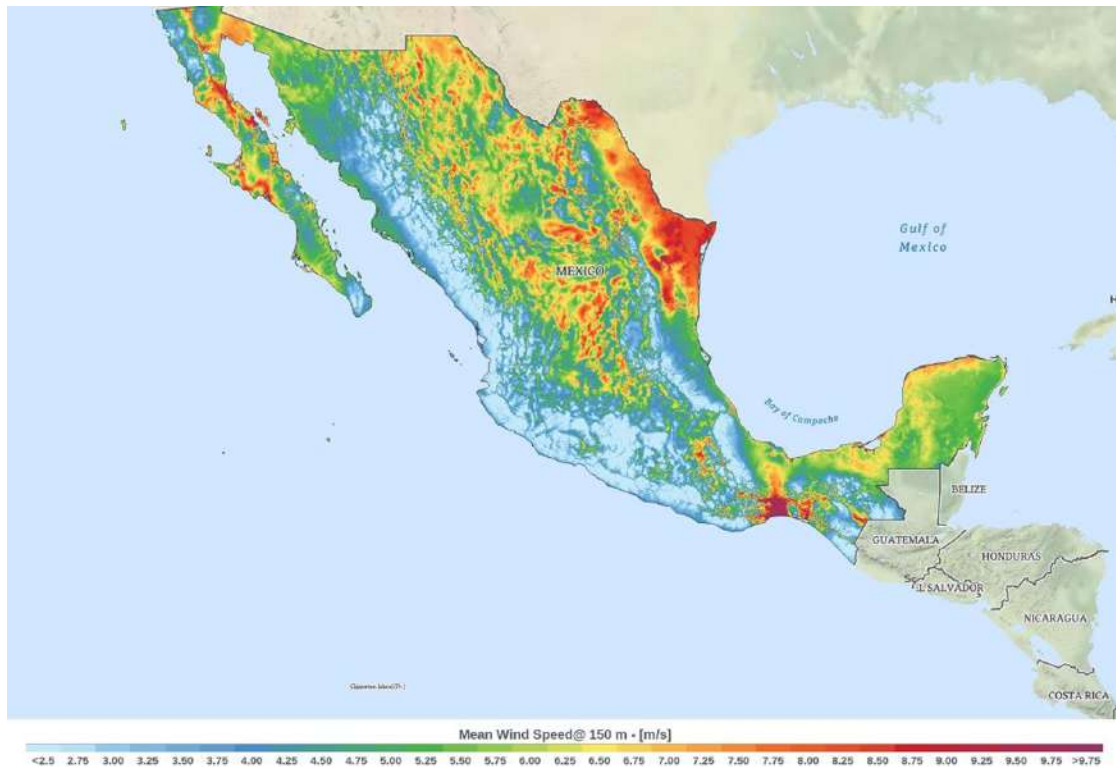


Figura 3.6 Velocidad media del viento en México a una altura de 150 m.

De acuerdo a la Figura 3.6 las velocidades de viento más altas en el país se encuentran en los estados de Baja California Norte-Sur, Nuevo León, Tamaulipas y Oaxaca, con velocidades mayores a 8.75 m/s.

La primera zona con mayor potencial de viento ubicado tanto en superficie como mar adentro está al sureste del país, precisamente en Oaxaca. En la Figura 3.7 se muestra el área con el potencial del viento en el mar (<https://globalwindatlas.info/>), en la figura se muestra una magnitud de 24,664 km<sup>2</sup>, con velocidades de viento mayores a 8.5 m/s; la velocidad promedio para el área de la Figura 3.7 es de 12.15 m/s a una altura de 150 m.

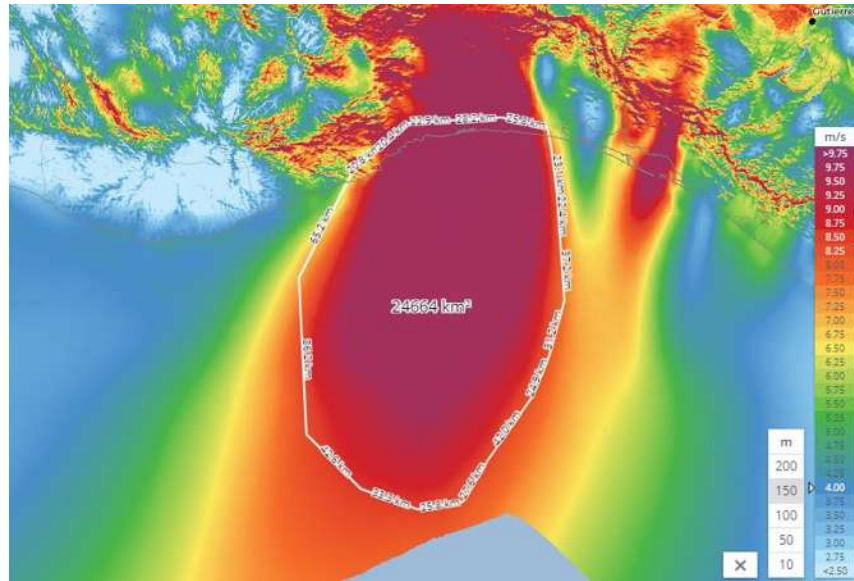


Figura 3.7 Área con mayor potencial del viento en el mar y costa de Oaxaca.

En la Figura 3.8 se muestra la densidad de potencia media para el 80% del área de la Figura 3.7 la cual es de  $1,944.46 \text{ W/m}^2$  y para el 10%  $2,572 \text{ W/m}^2$  (<https://globalwindatlas.info/>).

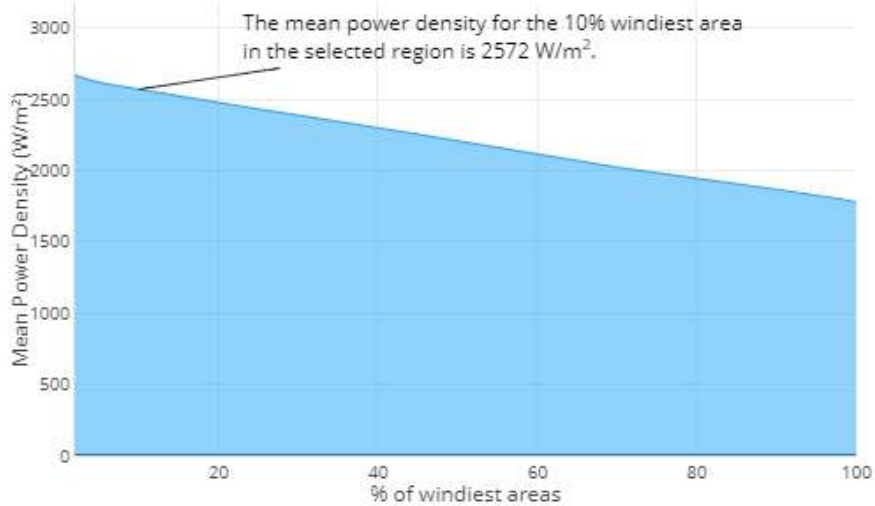


Figura 3.8 Densidad de potencia media vs Áreas ventosas, para el área del sureste de México

Para la zona del Noreste del país, en Tamaulipas, en la Figura 3.9 se muestra el mapa en forma cromática de las velocidades del viento. Como se observa, no toda la costa de Tamaulipas tiene velocidades de viento altas; la costa más destacadas para la construcción de un parque eólico marino es a partir de Laguna Madre hasta la frontera de Matamoros con

## DISEÑO Y PLANEACIÓN DE UN PARQUE EÓLICO MARINO

Estados Unidos. Toda esta zona tiene un área aproximada de  $11,041 \text{ km}^2$  con una velocidad de viento promedio a  $8.34 \text{ m/s}$  a una altura de  $150 \text{ m}$ . En la Figura 3.9 también se muestra el mapa con los datos de la velocidad del viento (<https://globalwindatlas.info/>).

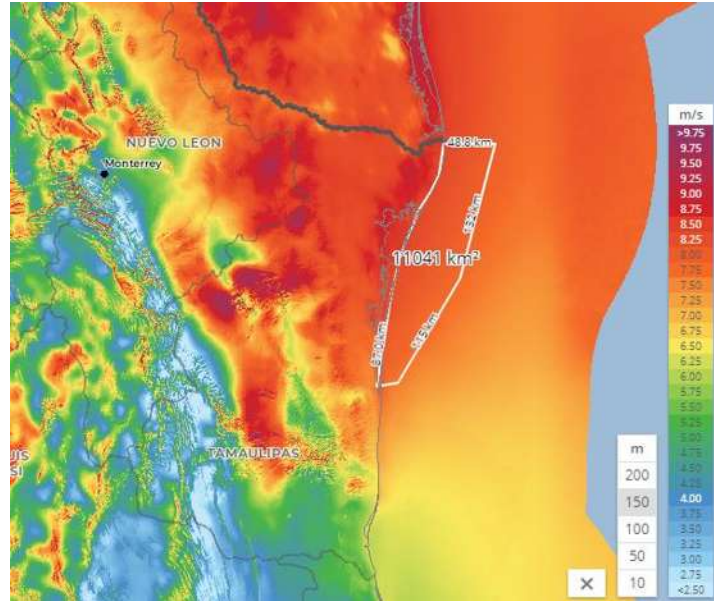


Figura 3.9 Área del potencial del viento en Laguna Madre y Delta del Río Bravo, Tamaulipas.

En la Figura 3.10 se muestra la densidad de potencia media para el 80 % del área, la cual es de  $522.22 \text{ W/m}^2$  y para el 10% de  $555 \text{ W/m}^2$  (<https://globalwindatlas.info/>).

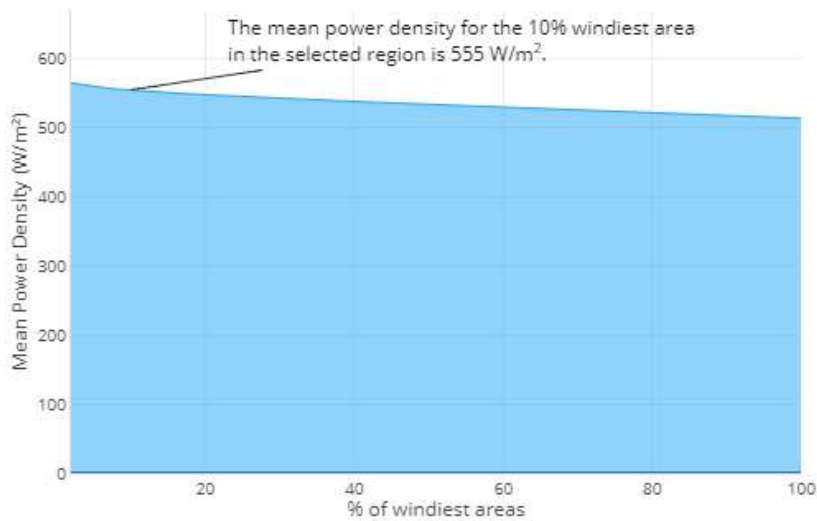


Figura 3.10 Densidad de potencia media vs. Áreas ventosas, para el área noreste de México.

## 3.3 Curvas Batimétricas

Se puede definir la batimetría como la identificación de la configuración general del fondo marino; es decir, la carta morfológica del lecho de una extensión de agua o de una parte de la misma. Por lo general, las cartas batimétricas muestran las profundidades por medio de curvas de nivel o también llamadas isobatas, al mismo tiempo es utilizado los cambios de coloración llamadas tintas hipsométricas [INEGI 2008].

La extensión costera en México es amplia, es un país con 17 estados que cuentan con esta característica, de los cuales, tienen un total de 151 municipios que hacen frente hacia una superficie marina, representando el 56% del territorio nacional [Silva *et al.*, 2014].

### 3.3.1 Batimetría de Oaxaca

Las curvas batimétricas juegan un papel muy importante en la dinámica de la zona; el origen del Golfo de Tehuantepec se puede asociar con la actividad de las placas tectónicas de la región. La costa que conforma Oaxaca y Chiapas la podemos dividir en dos regiones: La “Región 1” es la que comprende la mayor parte del Golfo de Tehuantepec de Salinas del Marqués, Oaxaca, al Rio Suchiate, Chiapas; ambos se caracterizan por una plataforma amplia de fondos blandos. Por otra parte, la “Región 2” es un litoral rocoso, conformada por la parte oeste de la costa de Oaxaca [Arias y Ortega 2005]; en la Figura 3.11 se muestran las dos regiones (Imagen de archivo personal).

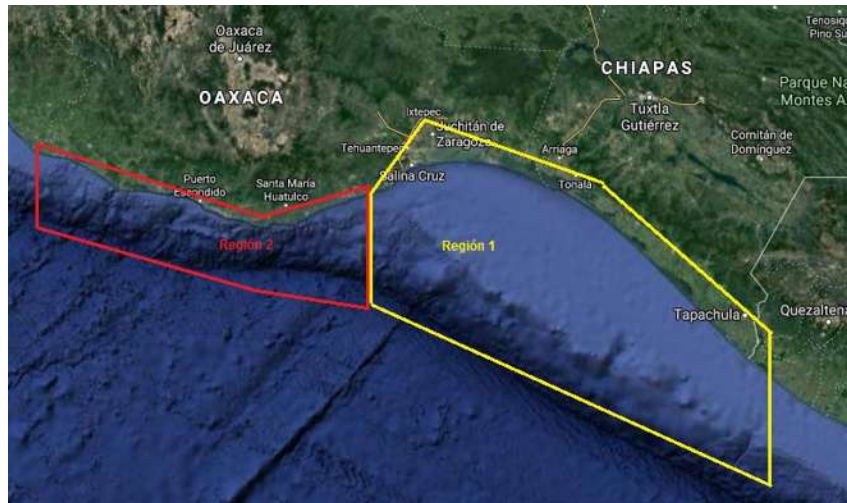


Figura 3.11 Región 1 y 2 conformadas por las costas de Oaxaca y Chiapas

## DISEÑO Y PLANEACIÓN DE UN PARQUE EÓLICO MARINO

La Figura 3.12 se muestra parte de la carta batimétrica del Golfo de Tehuantepec (consultar el Apéndice A para ver la carta batimétrica completa del Golfo de Tehuantepec) (<https://www.inegi.org.mx/app/mapas/?tg=3614>).



Figura 3.12 Carta batimétrica del Golfo de Tehuantepec. Oaxaca.

En la separación del Golfo de Tehuantepec con el Océano Pacífico se encuentra la Trinchería Mesoamericana, donde se encuentran varios relieves con profundidades de 500 a 2,000 m, pero la mayoría de la plataforma del Golfo de Tehuantepec tiene una profundidad menor a 500 m.

De acuerdo a la Figura 3.7 el potencial eólico se encuentra desde la costa. La distancia entre un punto en la costa entre el puerto de Salina Cruz y el municipio de San Mateo del Mar hacia la primera curva batimétrica de 100 m de profundidad tiene una distancia de 28.2 kms, según se muestra en la Figura 3.13 (Imagen del autor).

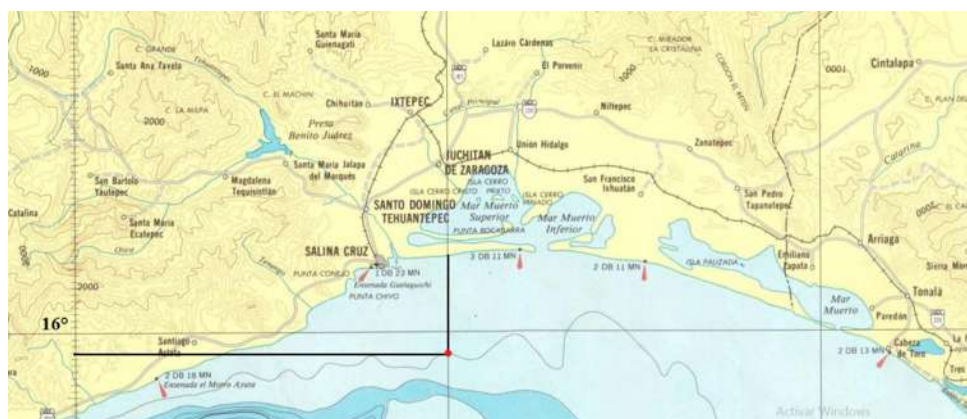


Figura 3.13 Punto en la primera curva batimétrica del Golfo de Tehuantepec



La instalación de un parque eólico marino en el Golfo de Tehuantepec puede situarse a una distancia igual o menor a 10 kms de la costa. Un ejemplo de un parque eólico marino cercano a la costa es el parque “Tuno Knob” en Dinamarca, el cual se muestra en la Figura 3.14 (<https://www.google-earth.es/index.php?name=Forums&file=download&id=18984>), ubicado a 5 km de la costa, puesto en servicio en el año 1995 conformado por 10 turbinas de la empresa Vestas modelo V39/500. Cada aerogenerador del parque tiene una potencia nominal de 500 KW.



*Figura 3.14 Parque Tuno Knob en Dinamarca.*

### 3.3.2 Batimetría de Tamaulipas

Laguna Madre y Delta del Río Bravo está situado en la planicie costera del Golfo de México, tiene una superficie aproximada de  $2,200 \text{ km}^2$ , la cual está limitada hacia el norte del Río Bravo y hacia el sur por el Río Soto la Marina.

Esta laguna tiene una longitud aproximada de 210 kms y su parte más ancha ubicada en el extremo norte, tiene un ancho aproximado de 60 kms. La parte más angosta de la laguna tiene un ancho promedio de 10 kms [Estavillo y Aguayo 2019], la cual se muestra en la Figura 3.15 (<https://www.google.com.mx/maps>).

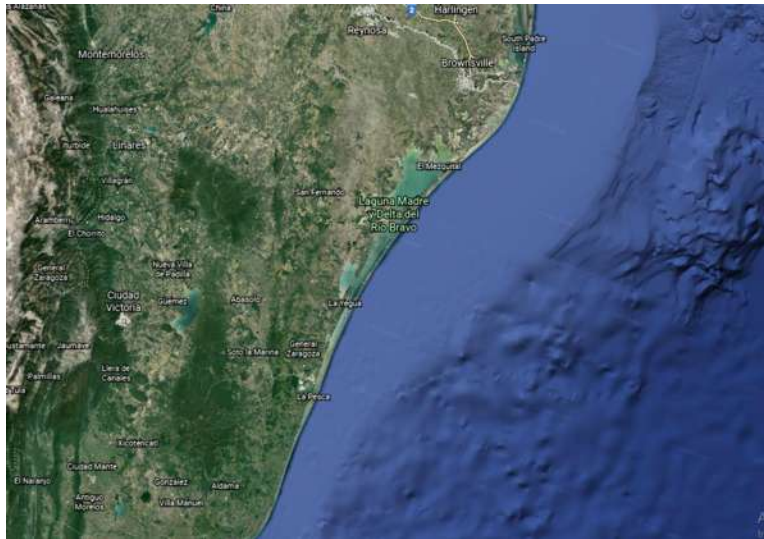


Figura 3.15 Laguna Madre y Delta del Rio Bravo.

En la Figura 3.16 se muestra la carta batimétrica de la costa de Laguna Madre y Delta del Río Bravo (consultar el Apéndice B para ver la carta batimétrica completa del Golfo de México) (<https://www.inegi.org.mx/app/mapas/?tg=3614>).

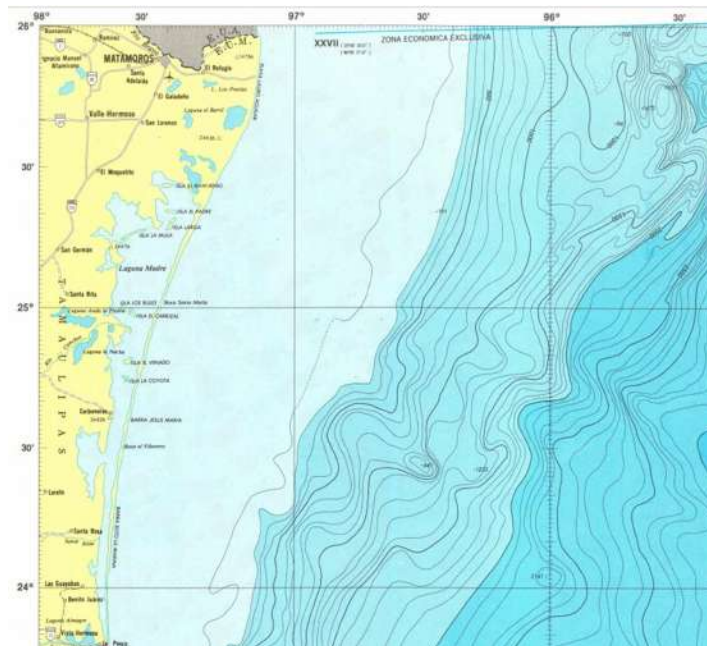


Figura 3.16 Carta batimétrica de Laguna Madre y Delta del Rio Bravo.

La distancia en un punto en la costa de Laguna Madre y Delta del Rio Bravo hacia la primera curva batimétrica con valor de 100 m de profundidad es de 71.7 kms, según se muestra en la Figura 3.17 (Imagen del autor).

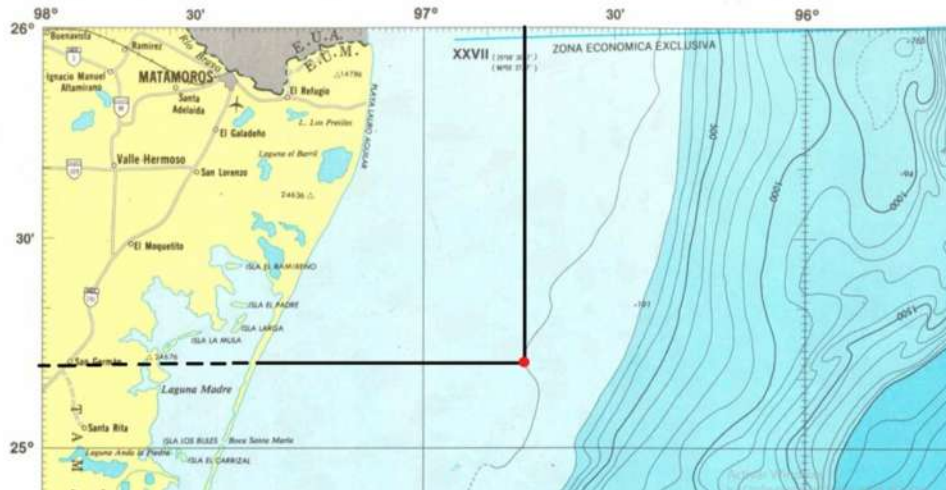


Figura 3.17 Punto en la primera curva batimétrica de la costa de Laguna Madre y Delta del Rio Bravo

El potencial en Tamaulipas se puede encontrar desde la costa, como en el caso del Golfo de Tehuantepec. De esta manera, el parque eólico marino puede ubicarse a una distancia igual o menor de 10 kms de la costa. Cabe destacar, que la costa de Tamaulipas tiene una mayor superficie con una profundidad menor a 100 m, esto permite la construcción de un parque eólico marino conformado por varias etapas.

## 3.4 Cimentación

La cimentación de una torre eólica marina debe cumplir con ciertas características para lograr un buen funcionamiento. Algunas de estas características son: ser resistentes a la carga del viento, a las olas, a las corrientes marinas, soportar su propio peso y permanecer estable, [Prado 2018].

A continuación, se presenta la clasificación principal de las cimentaciones de acuerdo a la profundidad a la que se suele construir:

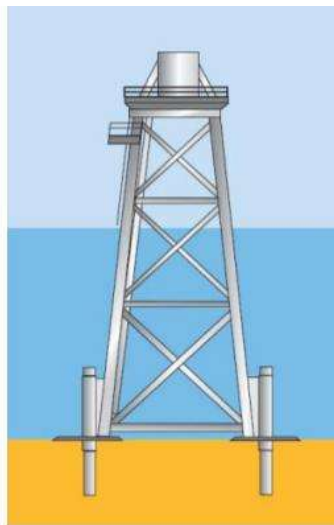
- A. Cimentación superficial o de poca profundidad. Se trata de una construcción a menos de 50 m de profundidad.
- B. Cimentación profunda, a más de 50 m de profundidad.
- C. Cimentación ultra profunda, a más de 150 m de profundidad [Prado 2018].

## 3.4.1. Cimentaciones Superficiales

La tecnología de cimentación marina superficial corresponde a estructuras fijas, las cuales se clasifican en estructuras directas (fijas), estructuras de gravedad (gravity base structures o GBS), estructura Jacket (celosía), flexibles (compliant structures), monopilotes, tri-pilotes, etc. [Prado 2018].

### 3.4.1.1 Estructura tipo Jacket

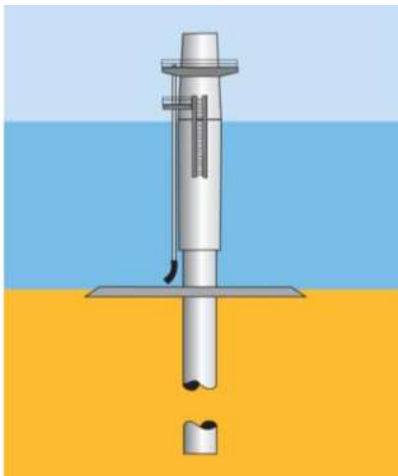
La estructura tipo Jacket o estructura en celosía se ha utilizado desde antes de los años 50's para la industria del gas, petróleo y posteriormente para la instalación de parques eólicos marinos. Se caracteriza por el poco peso de la estructura y porque puede ser utilizada en aguas con profundidades mayores de 20 m. La estructura Jacket más común es la estructura de cuatro caras, sin embargo, también están disponibles en el mercado la estructura de tres caras. Estas cimentaciones están hechas de vigas delgadas soldadas y unidas al lecho marino por pilotes situados en cada una de las esquinas de la estructura. Este sistema puede ser rentable para profundidades mayores de 40 m [Prado 2018]. La Figura 3.18 muestra una estructura Jacket (Prado, 2018, pág. 25).



*Figura 3.18 Jacket, Cimentación Superficial.*

### 3.4.1.2 Estructura tipo Monopilote

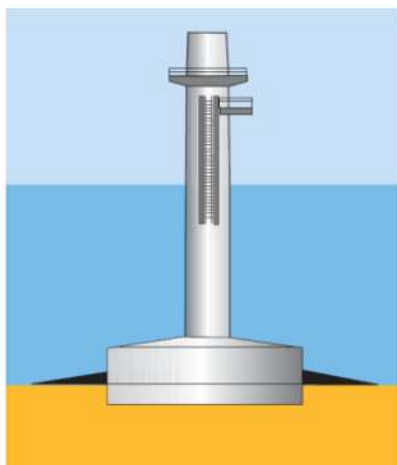
La cimentación está basada en la experiencia del diseño de la industria del gas y petróleo, las cuales han sido adaptadas a la industria de los parques eólicos marinos. Debido a su menor costo, su simplicidad y sus características son adecuadas para la instalación en aguas poco profundas de 10 a 30 m con cargas de oleaje moderadas. Es una de las estructuras más utilizadas en los proyectos del Mar del Norte. Esta cimentación es similar a la utilizada en los aerogeneradores en tierra y consiste en un tubo cilíndrico de acero introducido profundamente en el fondo marino, normalmente a 30 m mediante hinca de pilotes o perforación. Las estructuras monopilote típicamente instalados llegan entre unos 5 o 10 m por encima de la superficie del mar. La Figura 3.19 muestra la estructura monopilote (Prado, 2018, pág. 25).



*Figura 3.19 Monopilote, Cimentación Superficial.*

### 3.4.1.3 Estructuras de gravedad (GBS)

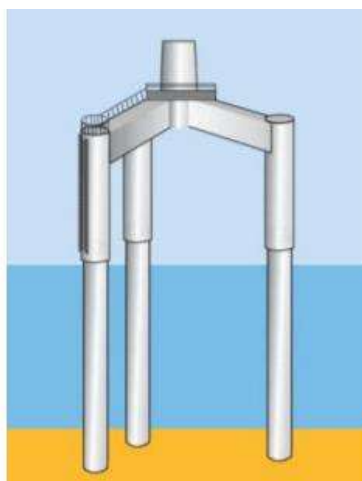
La cimentación GBS tiene la característica de estar sobre la superficie marina, la estructura no es introducida como las monopilote. Actualmente, este diseño es el segundo más utilizado después del monopilote. La estructura de gravedad es utilizada en aguas poco profundas con profundidades máximas de 30 m y han demostrado ser muy rentables. La cimentación se encuentra situada directamente sobre el lecho marino y su estabilidad está asegurada por el gran peso que constituye la propia construcción. La base consiste en un gran recipiente de hormigón o de acero que se sumerge hasta el fondo marino y es rellenado hasta la parte superior con piedras, hormigón, u otros materiales de alta densidad [Prado 2018]. En la Figura 3.20 se muestra una estructura GBS (Prado, 2018, pág. 26).



*Figura 3.20 Estructura de gravedad, Cimentación Superficial.*

#### 3.4.1.4 Estructura tipo Tri-pilote

La cimentación Tri-pilote es una adaptación de la cimentación monopilote. La estructura en vez de contar con un solo pilote, son tres pilotes introducidos en el fondo marino; los tres monopilotes están conectados un poco encima del nivel del mar a un elemento de transición usando juntas cementadas. Este elemento de transición va conectado a la base de la torre del aerogenerador, teniendo que soportar enormes fuerzas; esto hace que requiera una buena soldadura, incrementando el costo la cimentación. Dependiendo de las condiciones de profundidad y del fondo marino, cada pilote puede llegar a medir más de 90 m y pesar más de 400 ton [Prado 2018]. La Figura 3.21 muestra la estructura Tri-pilote (Prado, 2018, pág. 27).



*Figura 3.21 Tri-Pilote, Cimentación Superficial.*

## 3.4.2. Cimentaciones Profundas y Ultra Profundas

Las cimentaciones profundas y ultra profundas comúnmente están basada en estructuras flotantes, desde 1970 se han instalado para la extracción del petróleo. Una estructura flotante puede ser reconocida por el hecho de que el apoyo es en el agua y no en el fondo marino [Prado 2018].

Se han desarrollado muchas estructuras flotantes a lo largo de los años; generalmente una estructura flotante hace contacto con el fondo marino mediante líneas de anclaje, o mejor conocidas como líneas de amarre o amarras. Una de las empresas que actualmente está acaparando el mercado en la construcción, instalación, adquisición e ingeniería de sistemas de producción flotante, es la empresa MODEC <https://www.modec.com/index.html>. Las principales estructuras flotantes se muestran en la Figura 3.22 (<https://www.modec.com/business/floater/>). A continuación, se describe cada estructura.

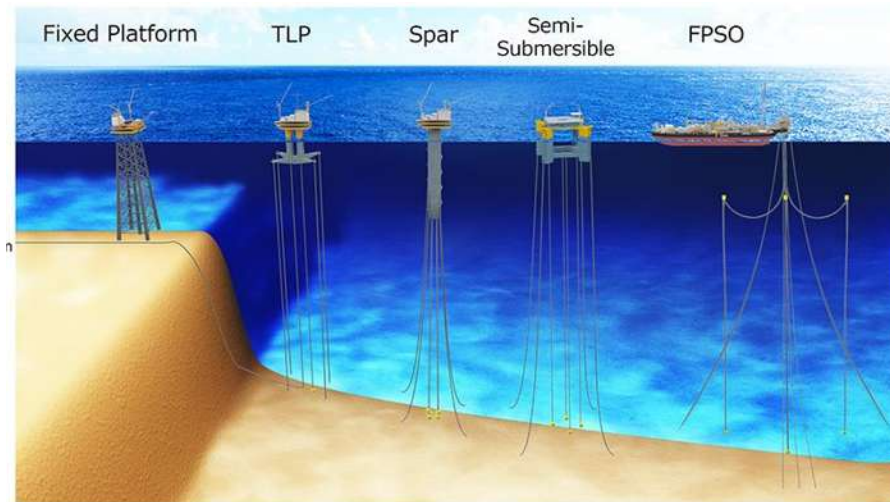


Figura 3.22 Tipos de Plataformas Flotantes.

### 3.4.2.1 Estructura tipo TLP (Plataforma de Patas de Tensión)

La estructura TLP consta de amarres y conexiones en el fondo marino con tubos de acero llamados tendones. Esta plataforma se mantiene anclada por la tensión creada por el flote de la misma, lo que provoca una fuerza forzada en dirección hacia la superficie. La estructura TLP es adecuada para aguas profundas y condiciones oceánicas severas. Actualmente, aproximadamente 25 TLP están en operación en el Golfo de México asociadas con las plataformas para la extracción del petróleo, y las demás en el Mar del Norte, altamar en Indonesia y África occidental, todas construidas por MODEC, [Prado 2018].

### 3.4.2.2 Estructura tipo FPSO (Almacenamiento y Descarga Flotante de Producción)

La plataforma FPSO tiene forma de barco y se puede asegurar al mar a través de una variedad de sistemas de amarre de acuerdo al entorno específico. En aguas tranquilas el amarre extendido suele ser superficial, por el contrario, en entornos donde ocurren ciclones o huracanes se utilizan sistemas de amarre que se desconectan para que la embarcación pueda retirarse de la tormenta y remplazarse cuando haya pasado [Prado 2018].

### 3.4.2.3 Estructura tipo Semi-Sumergible

El diseño Semi-Sumergible consta de una estructura de embarcación o casco con forma de plataforma (pontón) central octogonal y cuatro columnas orientadas radialmente fuera del pontón. La orientación radial de las columnas mejora la estabilidad de la plataforma durante la integración del muelle de los lados superiores, al tiempo que minimiza el desplazamiento innecesario [MODEC 2016].

### 3.4.2.4 Estructura tipo SPAR Floater

Las estructuras tipo SPAR se basan en un cilindro flotante para soportar las cargas en su lado superior. Cuenta con un sistema de anclaje tradicional en el fondo marino para mantener su posición. Existen tres clases de estructura SPAR, la primera de ellas es la estructura tradicional, formada por un gran cilindro y pesados lastres ubicados al fondo de este. La segunda llamada Truss SPAR, de características similares a la anterior, pero la parte central de la estructura está hecha de celosía, y, por último, la estructura Cell SPAR, donde el casco está conformado por un cilindro central rodeado de otro de menor tamaño unidos por placas circulares [Prado 2018].

La instalación de un parque eólico marino en cualquiera de las dos regiones definidas en el Subtema 3.2 tienen la característica de explotar un gran potencial desde la costa, esto permite que los aerogeneradores que se instalen tengan como primera opción una cimentación superficial. Dependiendo del diseño del parque eólico marino puede llegar a utilizarse plataformas flotantes.

Para la instalación de la cimentación superficial, la opción más viable es la cimentación Jacket, esto debido a que es una plataforma que se puede colocar a casi cualquier profundidad, en un rango de 20 m hasta mayores de 40 m de profundidad. En cambio, la plataforma



monopilote tiene un rango muy pequeño para instalación, de 10 a 30 m de profundidad. La plataforma tipo Jacket es una de las plataformas más económicas en el mercado.

La instalación de plataformas flotantes para profundidades mayores depende de las dimensiones a las que se quiere llevar el parque. México está muy relacionado con la instalación de plataformas de tipo TLP debido a la ingeniería petrolera, por lo que en esta tesis se propone este tipo de plataforma para una profundidad igual o mayor a 60 m.

A lo largo de la segunda mitad del siglo pasado y de una forma exponencial, la industria de los parques eólicos marinos, del petróleo y del gas se ha establecido como un agente líder dentro del sector de explotación mineral marino [Torrecillas 2019].

La primera plataforma de tipo TLP instalada en México con fines de explotación de minerales marinos fue en mayo de 1989 en el Golfo de México en el campo Jolliet [Rodríguez 2009].

México en la actualidad cuenta con 25 Plataformas de Patas de Tensión (TLP) para extracción de minerales marinos, el fondo marino mexicano tiene experiencia en este tipo de plataforma flotante, por lo que es recomendable inclinarse a la instalación este tipo.

### 3.4.3. Cargas que pueden afectar a estructuras sumergidas

Para las estructuras sumergibles se tienen que tomar en cuenta las perturbaciones de equilibrio que se pudieran producir. Para esto es importante considerar el siguiente principio de la ingeniería naval:

#### 3.4.3.1 Principio de Arquímedes

Esta es una ley fundamental para explicar la flotabilidad de las estructuras que soportan a los aerogeneradores y cualquier cuerpo que esté sumergido en un fluido [Serrano 2015].

*“Un cuerpo parcial o totalmente sumergido en un fluido experimenta una fuerza de flotación igual en magnitud al peso en volumen desalojado”.*

El principio de Arquímedes está definido como [Serrano 2015]:

$$F_{\nabla} = \rho g \nabla \quad (3.1)$$

donde  $F_{\nabla}$  es la fuerza de flotabilidad o empuje (N),  $\rho$  densidad del fluido ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $g$  la gravedad ( $\text{m}/\text{s}^2$ ),  $\nabla$  volumen del cuerpo sumergido ( $\text{m}^3$ ). La densidad del agua

marina suele ser del orden de  $1025 \text{ kg/m}^3$  pero dependerá de la temperatura y la salinidad [Serrano 2015].

## 3.5 Instrumentos de Medición y Orientación

Los instrumentos de medición y orientación son fundamentales para el mundo de la energía eólica. Los aerogeneradores de eje horizontal necesitan ser orientados al viento mediante un sistema de control. Los más pequeños se orientan mediante una vela, mientras que los aerogeneradores más grandes utilizan un sensor de dirección y se orientan por servomotores o motorreductores [Prous 2018].

El sistema de orientación tiene el objetivo de mantener el aerogenerador en un plano perpendicular al viento, la motivación de este subsistema es considerar la dirección cambiante de este, además de encargarse de optimizar el aprovechamiento eólico, maximizando la superficie de barrida por el viento. Existen dos tipos de orientación y medición, los pasivos, que son elementos mecánicos y los activos que son elementos eléctricos [Prous 2018].

En las instalaciones de los parques eólicos marinos los más utilizados son los activos, los cuales están compuestos por sensores que detectan la dirección del viento. En estos, un microprocesador analiza las variaciones de la posición del generador respecto de la nueva dirección del viento y un motor eléctrico es accionado por el microprocesador para variar la posición de la turbina [Prous 2018].

Los instrumentos de medición trabajan a la par con el sistema de orientación pasivo para obtener un buen funcionamiento en el aerogenerador. Los instrumentos de medición más destacados para el uso de turbinas eólicas son los siguientes:

- A. Anemómetros. Este instrumento es utilizado para determinar la velocidad del viento, su clasificación consiste según su principio de operación:
  - Rotación.
  - Presión.
  - Hilo caliente.
  - Basado en el efecto sónico.
  - Láser. Ultrasónico.
  - SODAR, de efecto Doppler.

La Figura 3.23 muestra algunos ejemplos de anemómetros (<https://www.windygrid.org/manualEolico.pdf>).

- B. Veleta. Mide la dirección del viento, el cual consiste en un mecanismo montado en un eje vertical y de giro libre, de tal modo, que pueda moverse cuando el viento cambie de dirección.
- C. Termómetros. La medida de la temperatura se utiliza para evaluar la climatología local para determinar la potencia suministrada.
- D. Barómetro meteorológico. Es una herramienta que se utiliza para la medición de la presión atmosférica, dado que esta presión se utiliza para la determinación de la potencia suministrada [Mur 2001].



Figura 3.23 Sensores para medir la velocidad del viento y dirección.

La frecuencia de las mediciones de los instrumentos anteriormente mencionados es dependiente del uso que se le va a dar a los datos. Por ejemplo, la medición de la presión atmosférica variará muy lentamente, basta con realizar medidas cada 3 horas. En cambio, para medir la potencia eólica de manera precisa es recomendable tomar muestras de valores de viento con frecuencia de 5 a 10s, y promedios de intervalos de 10 min a 1 h. La duración de las medidas también depende directamente del propósito de las mismas [Mur 2001].

### 3.6 Torre de contención

Para determinar las dimensiones de una torre eólica se debe tomar en cuenta algunos factores adicionales tales como los vientos que operan ordinariamente, así como las tormentas o ciclones más fuertes que pueden presentarse en un determinado tiempo.

El problema de diseño es distinto para una situación en tierra que en el mar. La primera diferencia y quizás la mayor se debe a la torre; una torre terrestre debe mantenerse rígida contra los vientos, mientras que la estructura flotante debe ceder a las ráfagas e inclinarse con el viento para reducir la tensión [Prado 2018].

La altura de la torre es variable ya que depende de la altura de las olas más altas y las dimensiones de las aspas del aerogenerador. Para obtener información de la altura máxima de las olas, existen portales en internet en los cuales pueden proporcionar información por medio de series de tiempo o bien, mapas.

Un ejemplo de las series de tiempo, es la página perteneciente al Grupo de Interacción Oceánica Atmósfera (<http://grupo-ioa.atmosfera.unam.mx/pronosticos/index.php>). Este sitio pertenece al Centro de Ciencias de la Atmósferas de la UNAM. La página cuenta con un historial de datos sobre el oleaje, meteorología atmosférica, mareas de tormentas, calidad de aire, entre otros. La información está dividida por zonas, las cuales son:

- Golfo de México.
- Pacífico.
- Global

La representación de mapas está basada en el modelo de oleaje Wave Watch III (WWIII). Este modelo es utilizado de igual manera por el Servicio Meteorológico Nacional <https://smn.conagua.gob.mx/es/>.

La página del grupo Interacción Oceánica Atmósfera (<http://grupo-ioa.atmosfera.unam.mx/pronosticos/index.php>) tiene la opción de proporcionar series de tiempo o mapas. En las series de tiempo se puede encontrar información de la temperatura, precipitación, humedad, dirección del viento, altura significativa, presión, entre otros. En los mapas se grafican las variables altura significativa y dirección. Para delimitar la altura de la torre de contención es importante la serie de tiempo para “altura significativa de las olas”.

La altura significativa de la ola es calculada como el promedio del tercio de olas de mayor altura (valle a cresta) registrado en un intervalo de una hora. Esta variable se muestra en el mapa como líneas de contornos cuyos valores están dados por una barra de colores en la parte inferior del gráfico y en las series de tiempo como una línea de color negro.

Entre los fenómenos naturales que más afectan las estructuras de ingeniería costera está el oleaje. El oleaje de tormenta permite conocer la ola máxima y una cierta ola de diseño, lo cual a su vez permitirá conocer la fuerza que ejerce sobre una obra. El oleaje de diseño son las características correspondientes al oleaje máximo que se selecciona para definir una obra [Aldeco y Montoña 1986].

Las tablas 2.3 y 2.4 presentan un resumen de los ciclones tropicales que afectaron las costas de Tamaulipas y Oaxaca, siendo importantes para esta sección.

Para acceder a la información de los mapas y series de tiempo correspondientes a cada región, se debe identificar la estación meteorológica para cada sitio. Por ejemplo, cerca del Golfo de Tehuantepec se encuentra la estación meteorológica Puerto Ángel en Oaxaca, y cerca de

Laguna Madre y Delta del Río Bravo esta la estación meteorológica de Matamoros en Tamaulipas.

## 3.6.1 Estación meteorológica Puerto Ángel, Oaxaca

A partir del 2018 al 2019 la estación Puerto Ángel ha reportado un total de 2 ciclones que han afectaron a las costas de Oaxaca. A continuación, se describen las características de cada ciclón.

### 1. Tara.

El ciclón Tara se presentó en el Golfo de Tehuantepec y se desplazó hacia los estados de Guerrero, Michoacán, Colima y Jalisco. Tuvo lugar en los días 14, 15 y 16 de octubre del 2018. El 14 de octubre tuvo presencia en el Golfo de Tehuantepec y los tres días restantes se desplazó hacía los estados restantes.

La Figura 3.24 muestra la serie de tiempo de la altura máxima de las olas (<http://grupo-ioa.atmosfera.unam.mx/pronosticos/index.php/meteogramas/oax1-meteo>), la cual fue de 2.5 m (línea negra) con una dirección de 200° (línea punteada azul), El área sombreada gris indica la barra de incertidumbre y la línea amarilla es la humedad relativa.

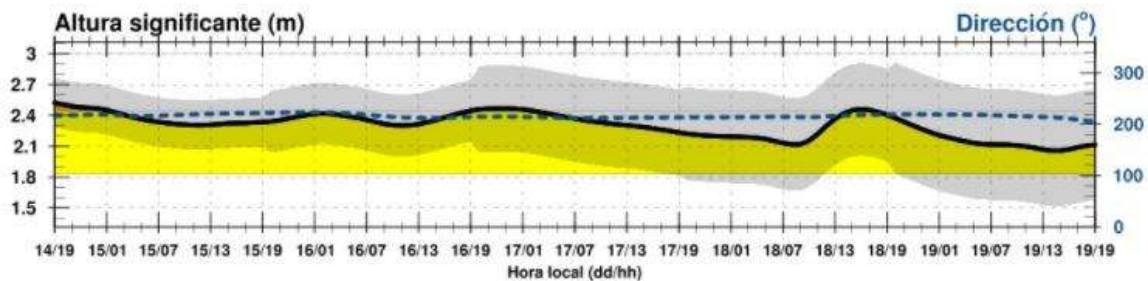


Figura 3.24 Altura significativa de las olas, 15 de octubre del 2018. Estación meteorológica Puerto Ángel, Oaxaca

### 2. Diecisiete E

Diecisiete E se presentó a 6 kms, al este-sureste de Ayutla, Oaxaca, entre Salina Cruz y Bahía de Huatulco, con una duración de 1 a 2 días aproximadamente, del 15 al 16 de octubre del 2019. Como se aprecia en la serie de tiempo de la Figura 3.25 (<http://grupo-ioa.atmosfera.unam.mx/pronosticos/index.php/meteogramas/oax1-meteo>), la altura máxima de las olas fue de 3.1 m (línea negra) con una dirección de 240° (línea punteada azul), la altura máxima de las olas fue provocada por el ciclón tropical Diecisiete E con una magnitud de 3.1 m en una dirección de 240°.

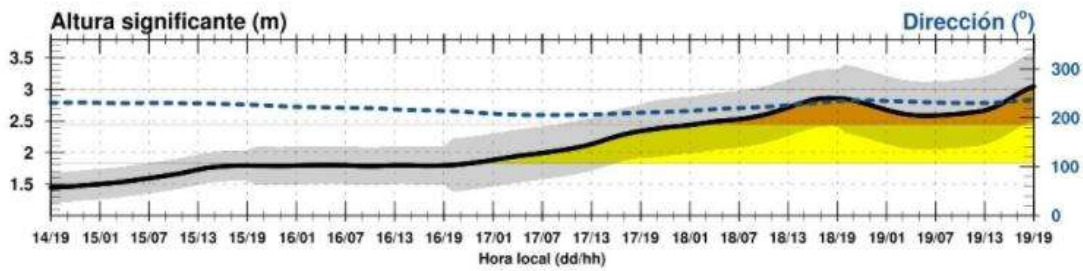


Figura 3.25 Altura significativa de las olas, 15 de octubre del 2019. Estación Puerto Ángel, Oaxaca.

### 3.6.2 Estación meteorológica Matamoros, Tamaulipas

Para la Laguna Madre y Delta del Río Bravo en Tamaulipas, la Tabla 2.4 Resumen de los ciclones tropicales que afectaron las costas de Tamaulipas, se encuentra la información resumida de los ciclones tropicales registrados en los años 2018 y 2019 con un total de un ciclón llamado Fernand, el cual tuvo lugar en Boca de Catán, Tamaulipas. La Figura 3.26 se puede apreciar la altura significativa de las olas provocada por Fernand (<http://grupo-ioa.atmosfera.unam.mx/pronosticos/index.php/meteogramas/oax1-meteo>). La altura máxima presentada en los años 2018 y 2019 de acuerdo al mapa de la Figura 3.26, fue de 1.5 m para la costa de Laguna Madre y Delta del Rio Bravo, Tamaulipas.

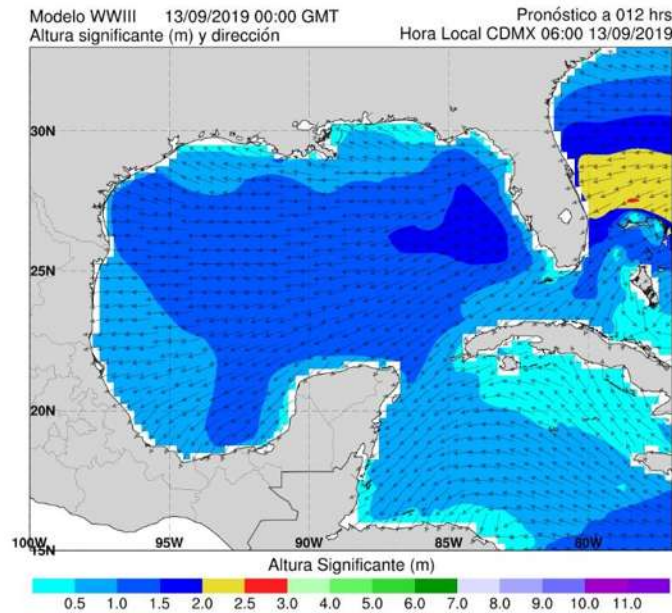


Figura 3.26 Altura significativa de las olas ciclón Fernand, 13 de septiembre del 2019. Estación Matamoros, Tamaulipas.

## 3.7 Generador eléctrico

Un generador eléctrico transforma la energía cinética de rotación en energía eléctrica. El generador de cualquier parque eólico ya sea en tierra firme o mar adentro opera con fluctuaciones de potencia provocadas por las variaciones de la velocidad del viento. Actualmente, los generadores más empleados para los parques eólicos son los generadores asíncronos y los generadores síncronos polos salientes en el estator polos salientes en el rotor y sin escobillas.

La operación de un generador síncrono se basa en la ley de Faraday de inducción electromagnética [Nasar 1982]. La ley de Faraday establece que:

1. Si el flujo magnético que vincula a una vuelta varía como una función de tiempo, se induce un voltaje entre sus terminales.
2. El valor del voltaje inducido es proporcional a la velocidad de cambio del flujo [Wildi 2007].

El generador síncrono trabaja de manera muy semejante a un generador de CA (Corriente Alterna), en el que la generación de la fem (fuerza electromotriz) se logra por medio del movimiento relativo entre conductores y un flujo magnético, sin embargo, un generador síncrono no tiene un conmutador como el generador de CD (Corriente Directa) [Nasar 1982].

Por otra parte, sí un motor asíncrono o de inducción gira por encima de su velocidad síncrona actúa como generador, convirtiendo así, la energía mecánica que recibe en energía eléctrica, para después llevar la energía al sistema de transmisión [Wildi 2007].

Actualmente la mayoría de los aerogeneradores están equipados con generadores asíncronos tanto de tipo jaula de ardilla, rotor devanado y generador asíncrono doblemente alimentado. Los generadores asíncronos son simples y poseen una construcción robusta, presentan una alta eficiencia bajo operación nominal y requieren poco mantenimiento [Montilla 2010]. A continuación, se describen las conexiones de los generadores asíncronos más utilizadas en las turbinas eólicas marinas.

### 3.7.1 Generadores asíncronos

Existen tres tipos de generadores eléctricos predominantes en la instalación de los aerogeneradores. Estos se caracterizan por su forma de conexión a la red.

## 3.7.1.1 Configuración 1. Generador Asíncrono a Velocidad Constante

La configuración 1 consiste en un generador asíncrono tipo jaula de ardilla conectado directamente a la red. El rotor de la turbina eólica se conecta al generador a través de una caja multiplicadora y gira a una velocidad casi constante. El generador tiene las características de ser robusto, simple y requiere de poco mantenimiento. Su inconveniente es que requiere consumir potencia reactiva para su magnetización, tanto en vacío como a plena carga. Por esta razón requiere conectar a las terminales del generador un banco de condensadores con el fin de obtener un factor de potencia cercano a la unidad [Montilla 2010]. En la Figura 3.27 se muestra la Configuración 1 (Montilla, 2010, pág. 13).

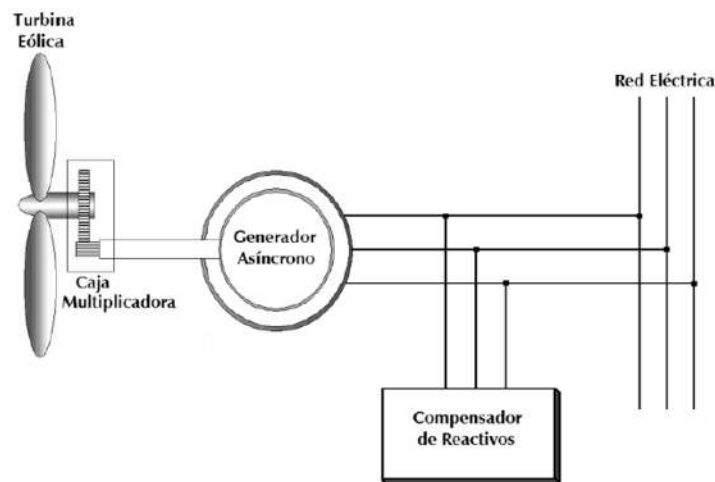


Figura 3.27 Generador Asíncrono a Velocidad Fija.

Como se mencionó, una característica de la Configuración 1 es que es robusta debido a que debe soportar las fluctuaciones de la velocidad del viento que si no se cuidan son trasladadas directamente al sistema mecánico de transmisión de la turbina, lo que produce oscilaciones del par y oscilaciones en la potencia generada; así como un incremento del ruido acústico cuando la velocidad del viento es menor que la velocidad nominal del aerogenerador. El diseño de esta primera configuración no es tan eficiente ya que no puede seguir los cambios óptimos de potencia impuestos por las variaciones en la velocidad del viento [Montilla 2010].

## 3.7.1.2 Configuración 2. Generador Asíncrono a Velocidad Variable Doblemente Alimentado (GADA)



La Configuración 2 se muestra en la Figura 3.28 (Montilla, 2010, pág. 14). La Configuración 2 tiene el estator de la máquina eléctrica directamente conectado a la red, los devanados del rotor están alimentados a través de un convertidor eléctrico de potencia mediante un arreglo conocido como Back-to-Back. Este convertidor eléctrico tiene la capacidad de variar la frecuencia eléctrica aplicada al rotor. De esta forma se consigue que la frecuencia mecánica y eléctrica del rotor estén desacopladas, haciendo posible la operación a velocidad variable del aerogenerador, lo que resulta en que la frecuencia del estator y del rotor pueden ser sincronizados independientemente de la velocidad mecánica en la turbina. Debido a que la velocidad de la turbina es baja, es necesario conectar al generador una caja multiplicadora, además de incluir un sistema de control implementado en los convertidores para poder controlar independientemente la potencia activa y reactiva que entrega el generador [Montilla 2010].

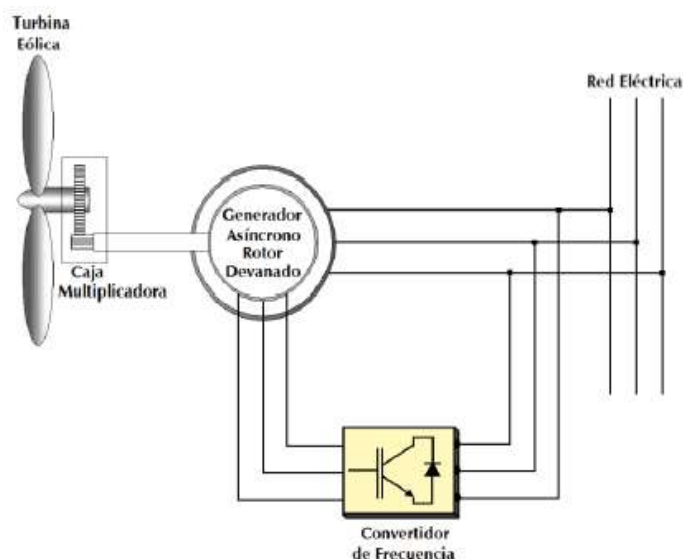


Figura 3.28 Generador Asíncrono a Velocidad Variable.

En la actualidad, el uso de generadores eólicos ha aumentado considerablemente, como consecuencia, la turbina o turbinas deben permanecer conectadas a la red a pesar de que se presenten fallas, para contribuir a la regeneración del sistema una vez que la falla o fallas se hayan removido [León, et al., 2014].

### 3.7.1.3 Configuración 3. Generador Síncrono a Velocidad Variable

En la Figura 3.29 se muestra la Configuración 3 del generador síncrono (Montilla, 2010, pág. 14), este puede ser de rotor devanado o de imanes permanentes. Con la configuración del

generador de imanes permanentes la turbina no necesita caja multiplicadora, aunque el generador suele girar a bajas velocidades, ya que el estator está acoplado a la red eléctrica a través de un convertidor de electrónica de potencia que varía la frecuencia del generador para acoplarla a la frecuencia de la red [Montilla 2010].

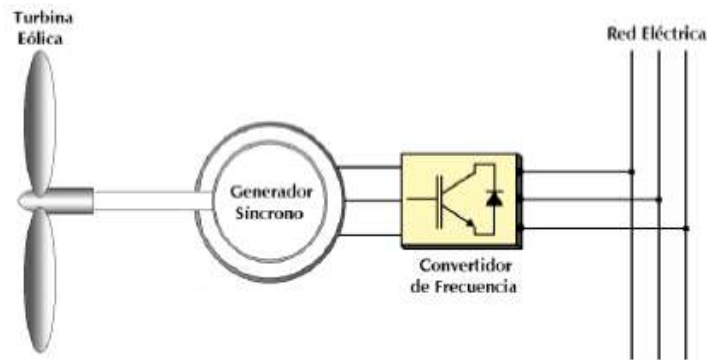


Figura 3.29 Generador Síncrono a Velocidad Variable.

En la configuración 2 y 3 las ráfagas del viento pueden ser absorbidas por la turbina, la energía es almacenada en la inercia de la turbina o del sistema que absorbe transitoriamente las pulsaciones del par generadas por las ráfagas del viento. Debido a esto, en ambas configuraciones la eficiencia aerodinámica de las turbinas es bastante elevada debido a que no tienen dificultad en operar a velocidad variable, lo que permite obtener la máxima potencia ante cambios en la velocidad del viento. Otra ventaja es que el ruido acústico se reduce debido a que el aerogenerador opera a bajas velocidades del viento. Las desventajas que pudieran tener tanto de la configuración 2 y 3 es en el costo del mantenimiento y algunas pérdidas generadas por los convertidores electrónicos. De las dos configuraciones anteriores, la número 2 es la de menor costo debido a los convertidores de la configuración 2 tienen una potencia nominal de la máquina típicamente del 25% y a diferencia de los convertidores de la configuración 3, que tienen la misma potencia nominal de la máquina eléctrica [Montilla 2010].

Tomando en consideración las características técnicas mencionadas previamente, la propuesta del generador para el diseño del parque eólico marino en el Istmo de Tehuantepec, Oaxaca es la configuración 2, un generador asíncrono a velocidad variable doblemente alimentado (GADA), la cual sería también la más económica.

## 3.8 Elección de la turbina

La característica principal que determina la elección de un aerogenerador es la potencia del mismo. Los factores determinantes para la elección de la turbina son la densidad del aire  $\rho$ , el área de barrido del rotor o su diámetro  $A$  y la velocidad del viento  $v$  [Prado 2018].

Las marcas más conocidas en el campo de la energía eólica, así como las más utilizadas para la implementación de parques eólicos marinos son Vestas y Siemens.

Para la elección de la turbina correspondiente a cada lugar, es apropiado tomar en cuenta la gráfica de la curva de potencia que proporciona las empresas Siemens y Vestas, para elegir el modelo más adecuado.

### **Velocidad del viento en el Istmo de Tehuantepec y Tamaulipas**

Para el Istmo de Tehuantepec la velocidad promedio de acuerdo a el área determinada de la Figura 3.7 es de 12.15 m/s, en Laguna Madre y Delta del Río Bravo, Tamaulipas, la velocidad del viento promedio determinado en el área de la Figura 3.8 es de 8.34 m/s; ambas velocidades de viento son a una altura de 150 m.

### 3.8.1 Elección de la turbina Siemens

De acuerdo al catálogo de las curvas de potencia de la empresa Siemens, la turbina adecuada tanto para las costas de Oaxaca como de Tamaulipas es el modelo SWT-3.6-120. La elección de la turbina se basó en la comparación de las curvas de potencia de todas las turbinas que se presentan en el catálogo de Siemens y que pueden ser utilizadas para parques eólicos marinos. De esta forma se escogió el aerogenerador que mayor potencia entrega de acuerdo a las velocidades del viento en cada área determinada, además de tomarse en cuenta el diámetro del aerogenerador. Para el parque eólico marino en Oaxaca, el modelo SWT-3.6-120 tiene la capacidad de entregar 3,567 KW a una velocidad de 12 m/s. Para el Sitio 2 en Tamaulipas el mismo modelo SWT-3.6-120 a una velocidad de 8 m/s proporciona una potencia de 1,544 KW.

La Figura 3.30 se muestra la curva de potencia de la turbina de la empresa Siemens modelo SWT-3.6-120 ([https://www.thewindpower.net/turbine\\_es\\_79\\_siemens\\_swt-3.6-120.php](https://www.thewindpower.net/turbine_es_79_siemens_swt-3.6-120.php)). En el eje de las abscisas esta la velocidad del viento y en el eje de las ordenadas la potencia en KW.

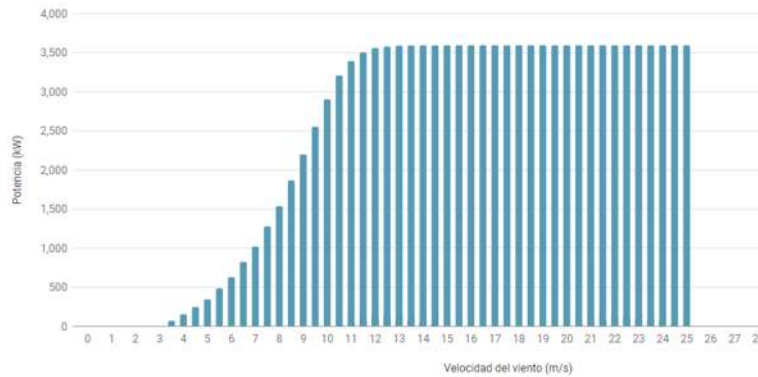


Figura 3.30 Curva de Potencia de la turbina SWT-3.6-120.

En la Tabla 3 se enlistan las características de la turbina SWT-3.6-120 ([https://www.thewindpower.net/turbine\\_es\\_79\\_siemens\\_swt-3.6-120.php](https://www.thewindpower.net/turbine_es_79_siemens_swt-3.6-120.php)).

Tabla 3.1 Características de la turbina SWT-3.6-120.

<b>Turbina SWT-3.6-120</b>			
Potencia	3,000 KW	Masa de la torre	210 ton
Diámetro	120 m	Masa del rotor	100 ton
Compatible offshore	Si	Velocidad mín. del rotor	5 rpm
Área de barrido	11,310 m <sup>2</sup>	Velocidad máx. del roto.	13 rpm
Número de palas	3	Velocidad mín. requerida	3.5 m/s
Altura de la góndola	90 m	Velocidad nominal	14 m/s
Masa de la góndola	125 ton	Velocidad máx.	25 m/s

Para el parque eólico en Tamaulipas, otra opción viable de la empresa Siemens, es la turbina SWT-3.2-113, la cual tiene un menor diámetro que el modelo SWT-3.6-120. A una velocidad de 8 m/s, la turbina entrega una potencia de 1,506 KW. La Figura 3.31 muestra la curva de potencia Velocidad del viento vs Potencia ([https://www.thewindpower.net/turbine\\_es\\_887\\_siemens\\_swt-3.2-113.php](https://www.thewindpower.net/turbine_es_887_siemens_swt-3.2-113.php)).

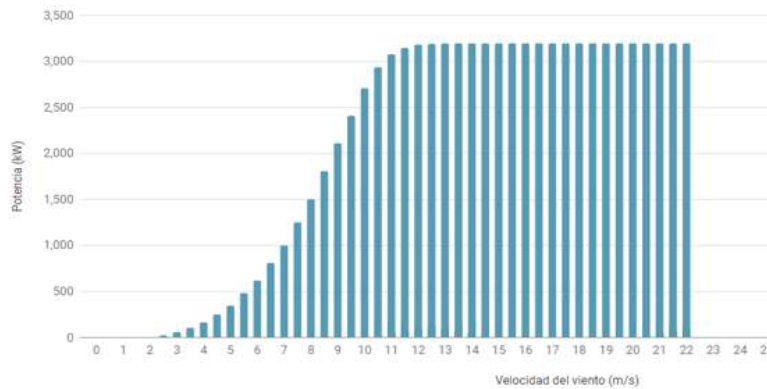


Figura 3.31 Curva de potencia de la turbina SWT-3.2-113.

En la Tabla 3.2 se resumen las características de la turbina SWT-3.2-113 ([https://www.thewindpower.net/turbine\\_es\\_887\\_siemens\\_swt-3.2-113.php](https://www.thewindpower.net/turbine_es_887_siemens_swt-3.2-113.php)).

Tabla 3.2 Características de la turbina SWT-3.2-113

<b>Turbina SWT-3.2-113</b>			
Potencia	3,200 KW	Masa de la torre	75 ton
Diámetro	113 m	Masa del rotor	67 ton
Compatible offshore	Si	Velocidad máx. del roto.	15.5 rpm
Área de barrido	10, 029 m <sup>2</sup>	Velocidad mín. requerida	2.5 m/s
Número de palas	3	Velocidad nominal	13.5 m/s
Altura de la góndola	79.5 - 142 m	Velocidad máx.	22 m/s
Masa de la góndola	78 ton	Altura máx. de la góndola	142 m

### 3.8.2 Elección de turbina Vestas

Considerando la información del catálogo de la curva de potencia de la empresa Vestas, la turbina adecuada para el Istmo de Tehuantepec, Laguna Madre y Delta del Río Bravo corresponde al modelo V164/8000, el cual proporciona una potencia de 7,800 KW a una

velocidad de 12 m/s. Esta es la velocidad del Istmo de Tehuantepec para la costa de Tamaulipas, que tiene una velocidad de viento promedio a 8 m/s; la turbina entrega una potencia de 2,900 KW.

En la Figura 3.32 se muestra la curva de potencia ([https://www.thewindpower.net/turbine\\_es\\_867\\_vestas\\_v164-8000.php](https://www.thewindpower.net/turbine_es_867_vestas_v164-8000.php)), y en la Tabla 3.3 las características correspondientes al modelo V164/8000 ([https://www.thewindpower.net/turbine\\_es\\_867\\_vestas\\_v164-8000.php](https://www.thewindpower.net/turbine_es_867_vestas_v164-8000.php)).

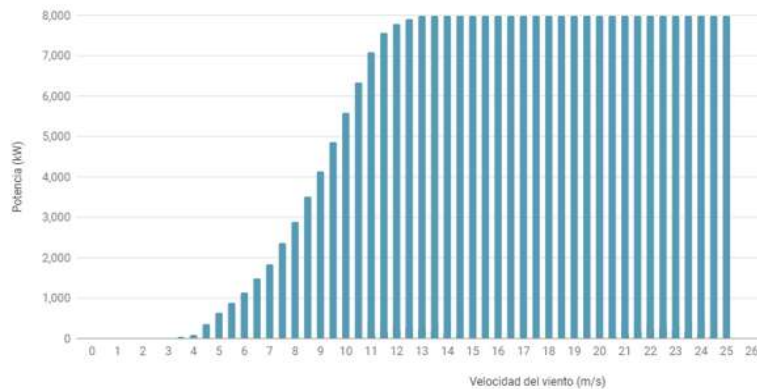


Figura 3.32 Curva de potencia de la turbina V164/8000.

Tabla 3.3 Características de la turbina V164/800.

<b>Turbina V164/8000</b>			
Potencia	8,000 KW	Velocidad mín. del rotor	4.8 rpm
Diámetro	164 m	Velocidad máx. del roto.	12.1 rpm
Compatible offshore	Si	Velocidad mín. requerida	3.5 m/s
Área de barrido	21,125 m <sup>2</sup>	Velocidad nominal	13 m/s
Número de palas	3	Velocidad máx.	25 m/s
Masa de la góndola	375 ton	Tensión de salida del generador	66 KV

La elección adecuada del modelo del aerogenerador depende del área donde se va a trabajar; de acuerdo a las dimensiones de la turbina se define el número de aerogeneradores que se deseen instalar; la potencia del aerogenerador es otro factor importante.

El área ubicada en el Golfo de Tehuantepec tiene un área de  $24,664 \text{ km}^2$ , y el área de la costa de Tamaulipas con vientos mayores a  $8 \text{ m/s}$  es de  $11,041 \text{ km}^2$ . Estas áreas son muy extensas, en ellas se puede instalar un parque eólico que incluya varias fases en el futuro. Las áreas definidas como sitios potenciales de parques eólicos marinos en México tienen la capacidad de competir con los dos parques eólicos más grandes del mundo como Walney Extension y London Array, ambos en Reino Unido.

Walney Extensión abarca un área aproximada de  $73 \text{ km}^2$ , con 87 turbinas, de las cuales 40 son de la empresa Vestas y tienen la capacidad de entregar  $8,25 \text{ MW}$ ; las 47 turbinas restantes pertenecen a la empresa Siemens con una potencia de  $7 \text{ MW}$  cada una. En total el parque eólico Walney Extensión proporciona  $659 \text{ MW}$  al Reino Unido. Este parque eólico está conformado por tres etapas, la profundidad de las cimentaciones de los aerogeneradores se encuentra entre  $19$  a  $23 \text{ m}$  de profundidad, el parque eólico marino está ubicado a  $14 \text{ kms}$  al oeste de Walney Island [Roca 2018]. En cambio, London Array ocupa un área de aproximada de  $100 \text{ km}^2$  con 175 aerogeneradores de la empresa Siemens, en total entrega una potencia de  $630 \text{ MW}$  y se encuentra a  $20 \text{ kms}$  de la costa de Essex; fue inaugurada en julio del 2013 [Roca 2018].

### **3.9 Propuesta de instalación de parques eólicos en los sitios identificados**

Para la propuesta adecuada del modelo de la turbina debemos de analizar las características del lugar, como la velocidad del viento, la altura a la que se colocará, la velocidad del viento y la potencia que se generará, entre otras características.

El primer lugar con mayor potencial en el país es en el Istmo de Tehuantepec, Oaxaca, en este lugar se propone instalar un parque eólico marino compuesto por 24 turbinas a una distancia de  $5 \text{ kms}$  de la costa; este parque estará conformado por dos etapas, cada etapa con 12 turbinas.

Cada una de las turbinas propuestas para el parque eólico marino sería de tipo V164/8000 de la empresa Vestas, la cual proporciona una potencia de  $7,800 \text{ KW}$ , a una velocidad promedio de viento de  $12 \text{ m/s}$ . En la primera etapa del proyecto generará una potencia de  $96.3 \text{ MW}$ . Una vez en operación, el parque eólico con las 24 turbinas entregaría una potencia al SEN de  $187.2 \text{ MW}$ .

Ahora bien, el modelo SWT-3.6-120 de la empresa Siemens genera 3,567 KW a una velocidad promedio del viento de 12 m/s. Para la primera etapa del Istmo de Tehuantepec, conformada por 12 turbinas, la potencia equivalente es de 42.804 MW, y para el parque completo de 24 turbinas, la potencia entregada al SEN sería de 85.608 MW.

El segundo lugar con mayor potencial para un parque eólico marino es en la costa de Tamaulipas, Laguna Madre y Delta del Río Bravo, el cual se conformará por 24 turbinas; el área considerada tiene una velocidad de viento promedio de 8 m/s. El modelo V164/8000 Vestas generará una potencia de 2,900 KW a la velocidad del viento promedio de 8 m/s. La primera etapa de 12 turbinas equivale a una potencia de 34.8 MW y con el parque operando con 24 turbinas, tendría una generación total de 69.6 MW.

Si se considera el aerogenerador SWT-3.6-120 de la empresa Siemens, este generara 1,544 KW a una velocidad de viento promedio de 8 m/s. La potencia generada por 12 unidades sería de 18.528 MW y con 24 turbinas esta sería de 37.056 MW.

Con base al análisis anterior, la mejor opción de acuerdo a la generación de potencia de entrega al SEN con un total de 24 unidades es el tipo V164/8000 de la empresa Vestas; esto debido a que puede redituarse más rápido la inversión del parque eólico marino. En el Istmo de Tehuantepec, Oaxaca se generará un aproximado de 187.2 MW con 24 unidades de la empresa Vestas; para el sitio potencial de Laguna Madre y Delta del Río Bravo, Tamaulipas la generación con 24 turbinas V164/8000 sería de 69.6 MW.

### **3.10 Configuración del parque eólico marino**

Para la configuración del parque eólico marino el número de turbinas y la orientación de estas, depende de cada caso en particular y de la exactitud requerida en el análisis. Para la clasificación de los aerogeneradores de eje horizontal, deben estar colocados de acuerdo a sus palas, ya sea barlovento o sotavento.

- Barlovento. Las palas del aerogenerador se encuentran frente al viento, este acomodo del aerogenerador es el más utilizado en la actualidad. La hélice se sitúa delante de la torre, evitando el efecto de la sombra propia [Prous 2018]. En la Figura 3.33 se muestra un ejemplo de barlovento (Prous, 2018, pág. 23).
- Sotavento. Las palas se encuentran situadas detrás del viento, no son necesarios elementos de rotación automatizada, aunque, suelen utilizarse como elementos de seguridad. Una desventaja de este acomodo de las palas es que el flujo del viento se distorsiona por entrar en contacto con la góndola antes de incidir sobre las palas



[Prous 2018]. En la Figura 3.34 se muestra un ejemplo de sotavento (Prous, 2018, pág. 23).

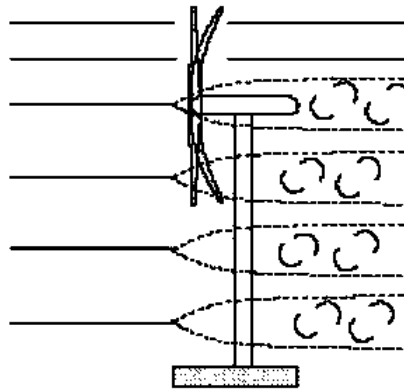


Figura 3.33 Configuración Barlovento

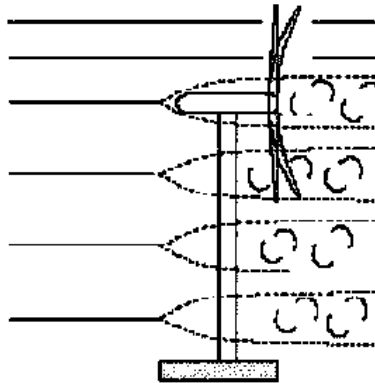


Figura 3.34 Configuración Sotavento

El viento que deja atrás de la Figura 3.33 tiene un contenido energético menor, esto debido al principio de conservación de la energía “la energía no se crea ni se destruye solo se transforma”. La distancia óptima entre aerogeneradores comúnmente está medida en diámetros del rotor; es por lo general menor en la dirección perpendicular al viento que en la dirección de éste, reduciendo de esta manera el efecto estela [Prado 2018].

### 3.10.1 Ubicación de aerogeneradores en el Golfo de Tehuantepec, Laguna Madre y Delta del Rio Bravo.

Para el diseño del parque eólico marino en el Golfo de Tehuantepec, el acomodo de las turbinas estará en Barlovento, debido a que la dirección predominante del viento es hacia el

Norte, con rachas hacía el Noreste a  $22.5^\circ$ , de acuerdo a la Figura 2.7. Para la zona de Laguna Madre y Delta del Río Bravo, Tamaulipas, las turbinas darán la cara hacía el Sureste, específicamente a  $157.5^\circ$ , esto debido a que es la dirección dominante del viento de acuerdo a la Figura 2.10.

La distancia entre turbinas de la misma fila (dirección perpendicular del viento) suele estar en un intervalo de 3 a 5 diámetros de la misma, y la distancia entre filas (dirección del viento) está en un parámetro entre 5 y 9 diámetros. Una distancia habitual son 7 diámetros del rotor [Prado 2018].

Como principales disposiciones o diseños para el aprovechamiento de parques eólicos a gran escala se encuentran las disposiciones lineales y las disposiciones circulares. A continuación, se detalla cada una de ellas.

### 3.10.2 Disposición Lineal

Para los esquemas lineales, la distancia entre turbinas de una misma fila se identificará por “X”, mientras que la distancia entre filas o columnas será “Y” [Prado 2018]. En la Figura 3.35 muestra las distancias de la disposición lineal (Prado, 2018, pág. 113).

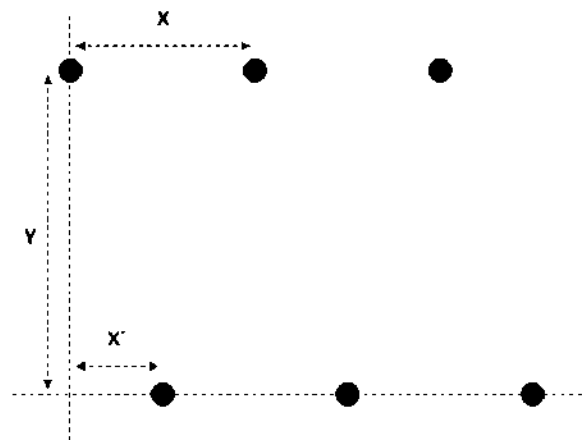


Figura 3.35 Distancias en diseños lineales.

En la disposición lineal, el acomodo de los aerogeneradores se encuentra en filas paralelas, de tal manera que cada turbina corresponda al medio de los huecos que dejan los dos aerogeneradores de la fila inmediata, a esta definición se llama tresbolillo. En el acomodo lineal de los aerogeneradores para un parque eólico está la siguiente clasificación:

- a) Lineal con filas y columnas paralelas.

- b) Lineal a tresbolillo por filas.
- c) Lineal a tresbolillo por columna.
- d) Lineal a tresbolillo por filas y columnas

El desplazamiento en el caso de los diseños a tresbolillo generalmente es la mitad de la distancia entre filas y columnas. En la Figura 3.36 se muestra la clasificación de la disposición lineal (Prado, 2018, pág. 114.).

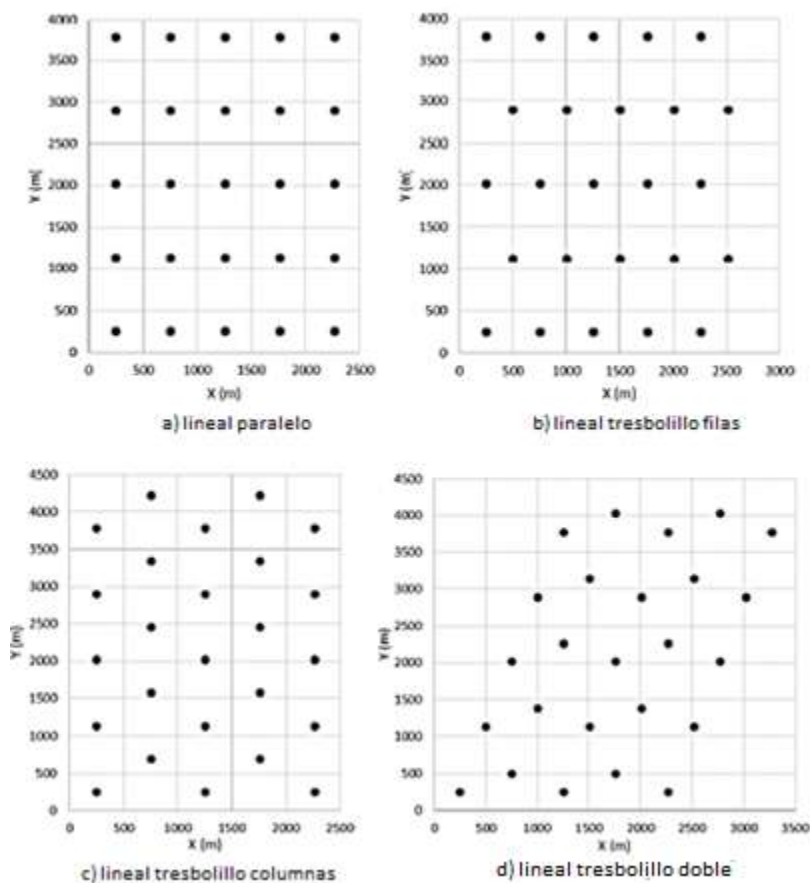


Figura 3.36 Clasificación de la disposición lineal; a) lineal paralelo, b) lineal tresbolillo filas, c) lineal tresbolillo columnas, d) lineal tresbolillo doble.

### 3.10.3 Disposición Circular

En las disposiciones circulares se encuentran dos parámetros adicionales: el radio de la circunferencia teórica “R” y el ángulo que forman las turbinas entre sí desde el centro de la circunferencia denominada “a” [Prado 2018]. La Figura 3.37 muestra el esquema de la disposición circular (Prado, 2018, pág. 113).

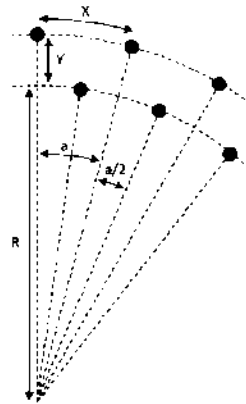


Figura 3.37 Esquema del diseño circular.

En el diseño circular existen dos variantes: Circulares y circular tresbolillo. En la Figura 3.38 muestra las variaciones circulares (Prado, 2018, pág. 115).

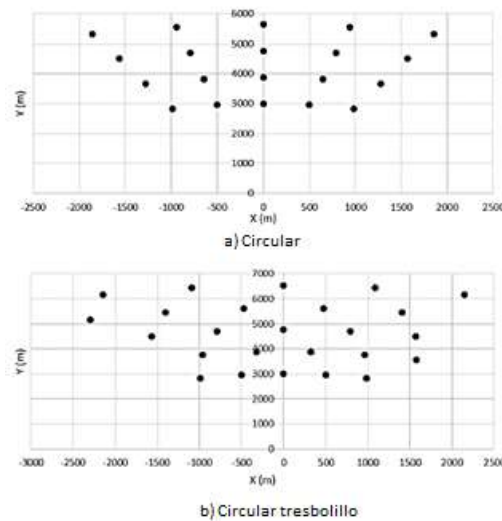


Figura 3.38 Clasificación de la disposición Circular; a) Circular, b) Circular tresbolillos

Las consideraciones que se tomarán en cuenta para determinar el tipo de disposición que tendrá el parque eólico marino dependerán de la dirección dominante del viento y el número determinado de aerogeneradores que se obtendrá. El análisis del diseño lineal y circular se hará del Golfo de Tehuantepec, Oaxaca, debido a que es el sitio con mayor potencial en México (según lo indicado en el tema 3.2).

A continuación, se describen, de manera concisa, los aspectos relevantes asociados con el diseño lineal y circular.

## 3.10.4 Disposición Lineal y Circular para el Golfo de Tehuantepec

En la Sección 3.8 se presentó dos modelos adecuados de turbinas de viento, que pueden conformar el parque eólico marino; estos corresponden al modelo Vestas V164/8000 y Siemens SWT-3.6-120.

Como se vio en la Sección 3.10.1 el acomodo de los aerogeneradores será barlovento, esto quiere decir que hará frente a los vientos dominantes del Norte con rachas hacia el Noreste ( $22.5^\circ$ ). La Figura 3.39 muestra la dirección que tomarán las turbinas cuando se coloquen en el parque eólico (Imagen del autor).

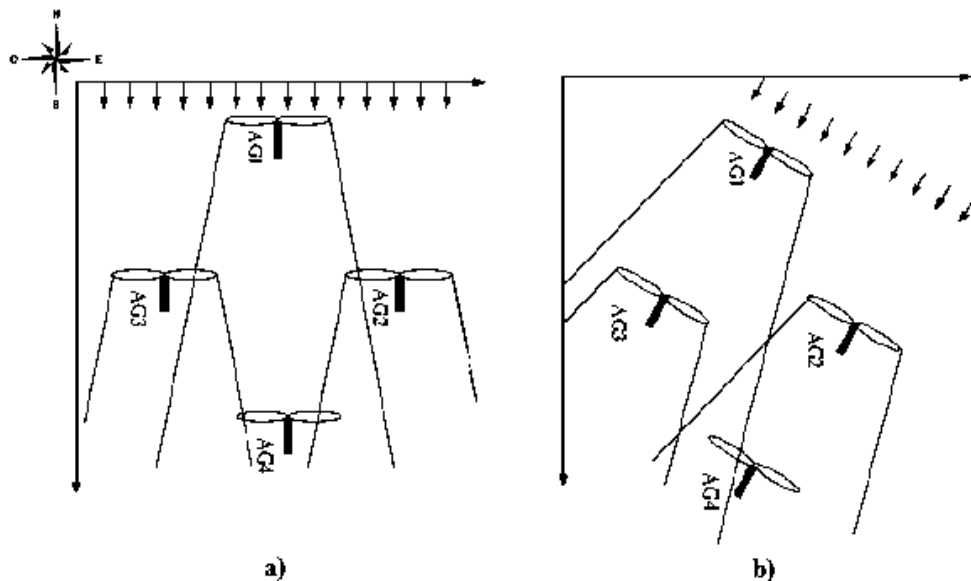


Figura 3.39 Acomodo de turbinas tipo barlovento, a) Dirección Norte, b) Dirección Noreste

Para el diseño lineal del parque eólico marino, este tendrá las siguientes características: distancia entre filas igual a 5 veces el diámetro del rotor, distancia entre columnas igual a 8 veces el diámetro. Para la primera etapa del parque eólico marino, el diseño lineal estará conformado por 12 turbinas, por lo tanto, para X' es 2.5 veces el diámetro del rotor y para Y' es igual a 4 veces el diámetro. La Tabla 3.4 muestra con mayor detalle las distancias que tendrá cada turbina una respecto a la otra en un plano X vs Y (Tabla del autor).

Tabla 3.4 Distancias entre turbinas del parque eólico

<b>DISTANCIA ENTRE TURBINAS DEL PARQUE EÓLICO MARINO</b>				
Clasificación de la Disposición Lineal	X	Y	X'	Y'
Lineal paralelo	5	8		
Lineal tresbolillo (filas)	5	8	2.5	
Lineal tresbolillo (columnas)	5	8		5
Lineal tresbolillo (doble)	5	8	2.5	2.5

Para el diseño circular, el ángulo que forman las turbinas entre sí, denominado “ $a$ ”, es igual a  $22.5^\circ$  y el radio  $R$  de 5,000 m.

#### 3.10.4.1 Diseño Lineal

En general, el esquema lineal del parque eólico marino está conformado por 6 filas y 4 columnas; la primera etapa está representada por 12 turbinas, las cuales están representadas por los puntos en color rojo y la segunda etapa que conforma las 12 turbinas restante son los puntos en color negro.

En la Figura 3.40 se muestra el diagrama lineal con filas y columnas paralelas (Imagen de archivo personal), en un arreglo de 24 turbinas de la empresa Vestas, modelo V164/8000, en un plano X vs Y. Las 24 turbinas ocupan un área real aproximada de  $25.82 \text{ km}^2$  y proporcionan una potencia de 187.2 MW.

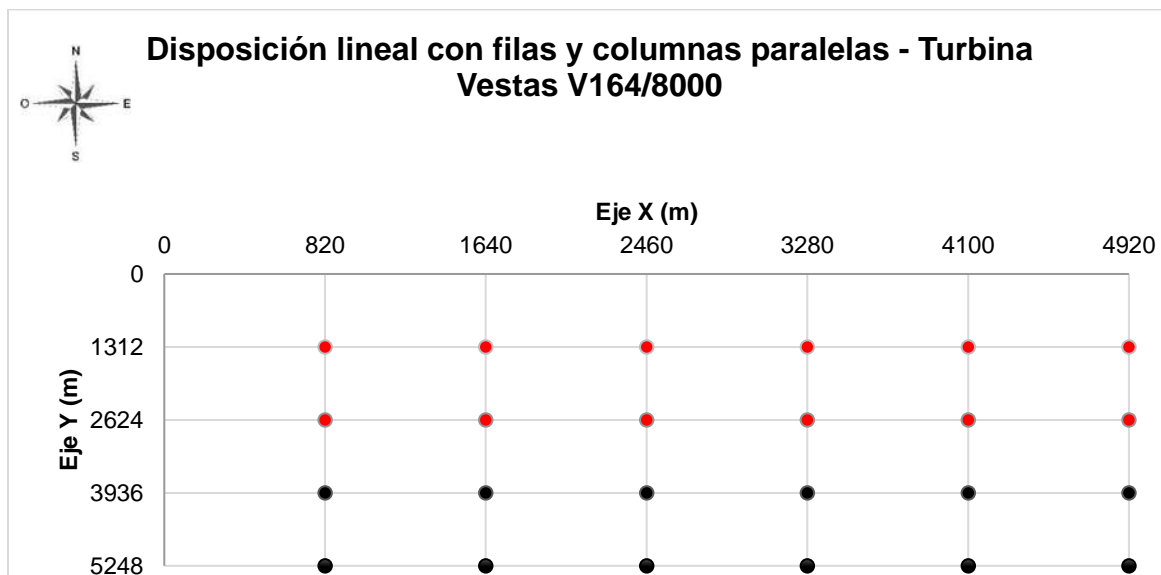


Figura 3.40 Disposición lineal con la turbina V164/800, Vestas.

Para el diseño lineal se utilizará el aerogenerador de la empresa Siemens, modelo SWT-3.6-120. Esta disposición está conformada por 6 filas y 4 columnas; el área equivalente que ocupa estos aerogeneradores es de  $13.824 \text{ km}^2$ .

En la Figura 3.41 se muestra la disposición lineal con filas y columnas paralelas (Imagen del autor). Los puntos en color rojo representan la primera etapa del parque eólico marino, conformado por 12 turbinas y los puntos en color negro representa la última etapa del parque eólico marino. Sí el modelo SWT-3.6-120 proporciona una potencia individual de 3,567 KW, por las 12 turbinas se tendría 42,804 KW, a una velocidad del viento de 12 m/s. Para la última etapa del parque eólico marino se tendría 24 turbinas, con las cuales se generaría una potencia de 85,608 KW.

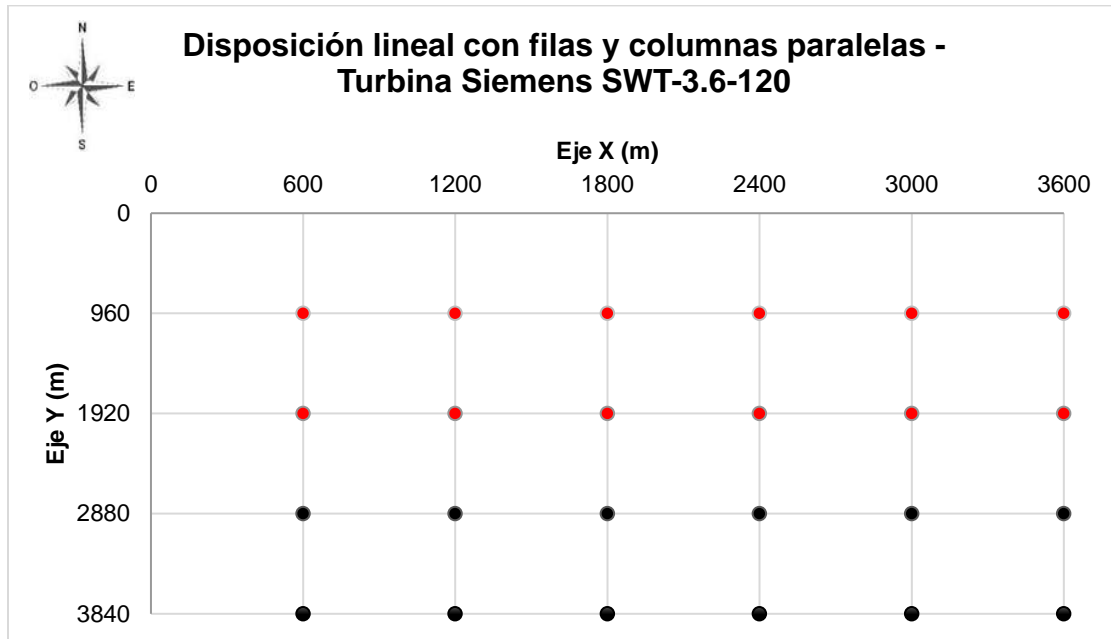


Figura 3.41 Disposición lineal con filas y columnas paralelas modelo SWT-3.6-120, Siemens

Tanto la empresa Vestas como Siemens tiene un aerogenerador adecuado para el parque eólico marino en el Golfo de Tehuantepec. Para seleccionar el aerogenerador correcto se tomará como referencia la potencia y dimensiones del modelo.

El área que ocupan las 24 turbinas Siemens equivalente a  $13.824 \text{ km}^2$ ; esta área es menor que la ocupada por las 24 turbinas de la empresa Vestas, que es de  $25.82 \text{ km}^2$ . Es importante señalar que en el área que ocupa las 24 turbinas de Vestas, podría instalarse un mayor número de turbinas Siemens, ya que su diámetro del rotor es menor que el de la turbina Vestas, para la misma potencia.

Al aumentar el número de generadores de la empresa Siemens modelo SWT-3.6-120 con 6 filas y 7 columnas, da un total de 42 turbinas, lo que ocuparía un área de  $24.192 \text{ km}^2$ , cercano al área ocupada por las 24 turbinas de la empresa Vestas de  $25.82 \text{ km}^2$ . En la Figura 3.42 se muestra el arreglo lineal de las 42 turbinas de la empresa Siemens, (Imagen de archivo personal).



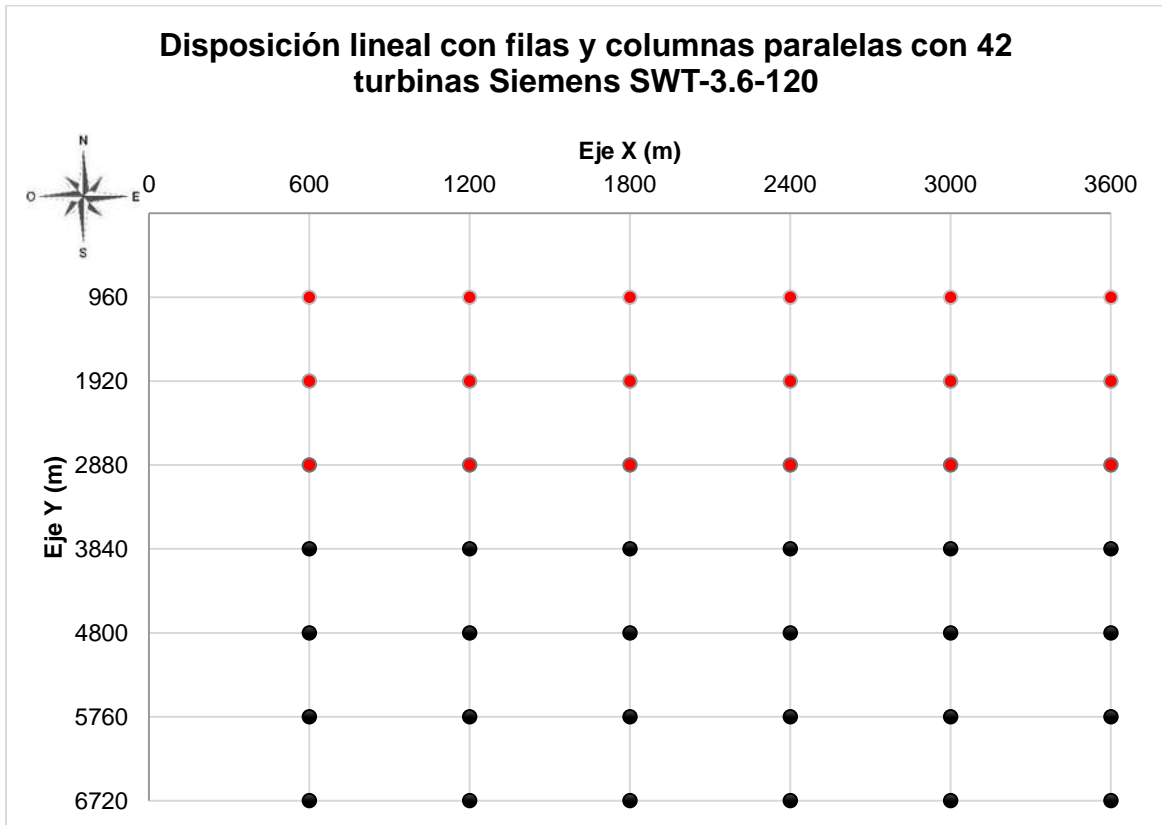


Figura 3.42 Disposición lineal con filas y columnas paralelas de 42 turbinas modelo SWT-3.6-120, Siemens

Los puntos en color rojo de la Figura 3.42 representa la primera etapa del parque, lo que equivale a 18 turbinas y los puntos negros restantes representan los aerogeneradores de la última etapa, con lo que conformarían un total de 42 aerogeneradores de la empresa Siemens.

Las 42 turbinas de la empresa Siemens generan una potencia de 149,814 KW, sin embargo, la generación de estas turbinas no es tan alta como la configuración de las 24 turbinas de la empresa Vestas ya que con solo 24 aerogeneradores puede generar una potencia igual a 187.2 MW a una velocidad de viento promedio de 12 m/s.

De lo anterior se define que es más conveniente instalar en el parque eólico marino la turbina V164/8000 de la empresa Vestas, ya que el área ocupada por las 24 turbinas de la disposición lineal con filas y columnas paralelas es de  $25.82 \text{ km}^2$  con una potencia equivalente de 187.2 MW.

Por lo tanto, para las disposiciones restantes se estará utilizando el modelo Vestas. La disposición lineal tresbolillo filas se muestra en la Figura 3.43 (Imagen del autor), con 24 turbinas modelo V164/8000.

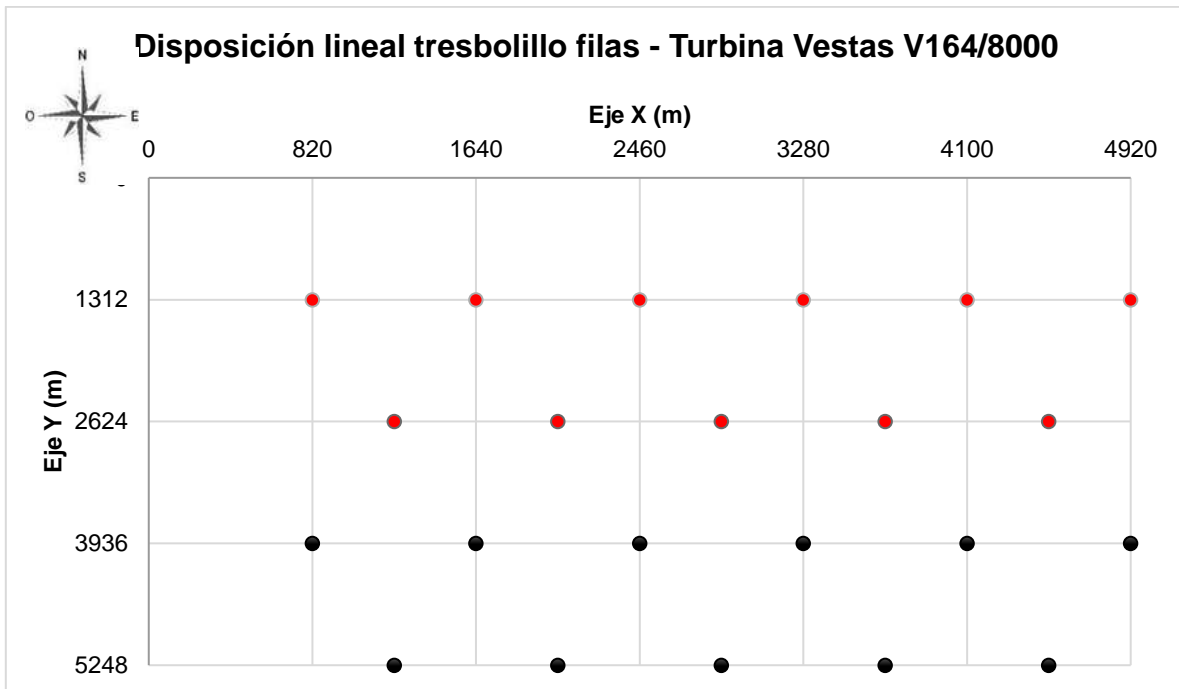


Figura 3.43 Disposición lineal tresbolillo filas para la Turbina Vestas V164/8000.

Los puntos de color rojo de la Figura 3.43 representan la primera etapa y los puntos en color negro representan la última etapa. La disposición lineal tresbolillo filas tiene un área de  $25.82 \text{ km}^2$ , como la disposición lineal con filas y columnas paralelas de la Figura 3.39.

En la Figura 3.44 se muestra la disposición lineal tresbolillo columnas (Imagen del autor), la cual tiene un área equivalente a  $17.4824 \text{ km}^2$ . Esta área es la menor a las disposiciones consideradas de la empresa Vestas. De igual forma, los puntos en color rojo representan la primera etapa del parque eólico marino.

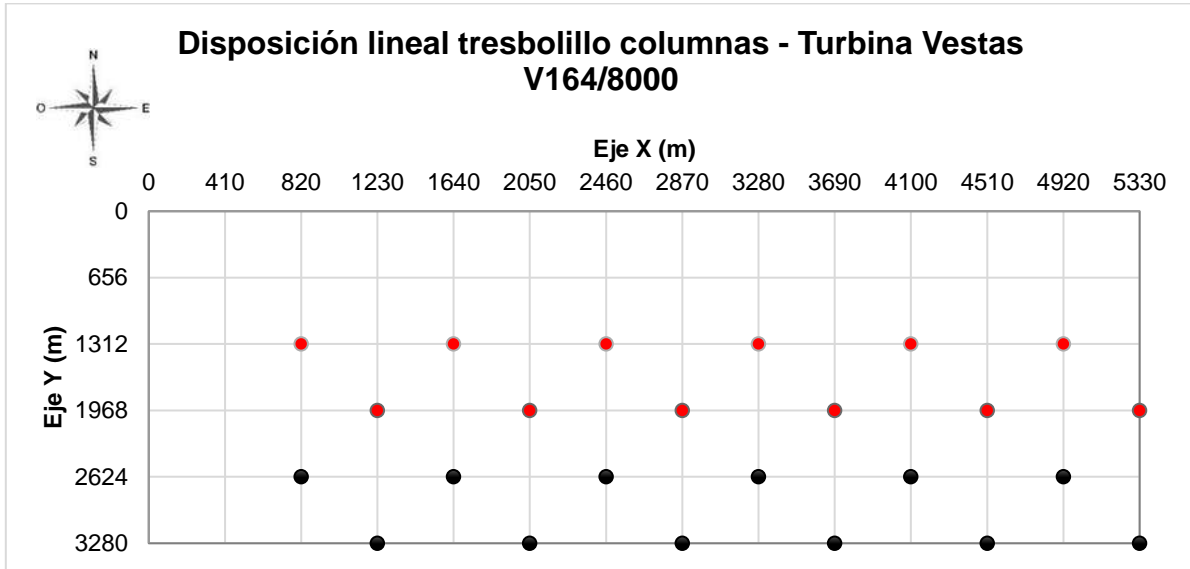


Figura 3.44 Disposición lineal tresbolillo columnas para la Turbina Vestas V164/8000.

En la Figura 3.45 se muestra la disposición lineal tresbolillo doble con la primera (puntos color rojo) y última etapa del parque eólico marino (punto color negro) (Imagen de archivo personal), ambas conforman un total de 24 turbinas, las cuales tienen un área de  $19.90 \text{ km}^2$ .

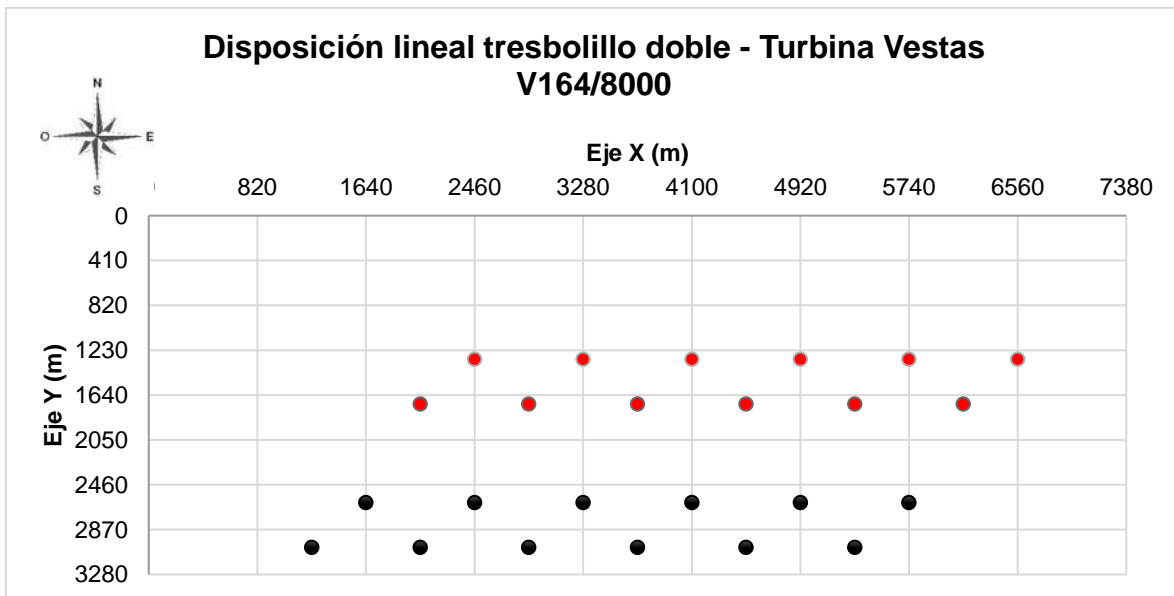


Figura 3.45 Disposición lineal tresbolillo doble para el Golfo de Tehuantepec.

### 3.10.4.1.1 Determinación del arreglo del parque eólico en el Golfo de Tehuantepec, Oaxaca.

Tomando en consideración las diferentes disposiciones lineales que se presentaron para el parque eólico marino del Golfo de Tehuantepec, la mejor opción y la más viable es la “disposición lineal tresbolillo columnas”, ya que con las 24 turbinas ocupa la menor de las áreas, respecto a las demás disposiciones; esto permite que en el futuro el parque eólico marino incorpore otras etapas de ampliación, lo que resulta en una mayor generación de energía eléctrica limpia y renovable para el consumo del país.

La magnitud del área de la disposición lineal a tresbolillo columnas es de  $17.4824 \text{ km}^2$ , como se mostró en la Figura 3.44. En la Figura 3.46 muestra la posible ubicación del parque eólico marino (Imagen del autor), el cual se encuentra a 15 km al Este del puerto de Salina Cruz, Oaxaca y a 5 km de la costa.



Figura 3.46 Ubicación del parque eólico marino en el Golfo de Oaxaca.

En la Figura 3.46 se encuentran cuatro puntos, los cuales definen el perímetro del parque eólico marino. Al lado superior derecho de la imagen está el área que conforman los cuatro puntos, estos puntos tienen las siguientes coordenadas:

- Punto 1  $16^{\circ}08'$ ,  $95^{\circ}05'$
- Punto 2  $16^{\circ}08'$ ,  $95^{\circ}02'$
- Punto 3  $16^{\circ}06'$ ,  $95^{\circ}02'$
- Punto 4  $16^{\circ}06'$ ,  $95^{\circ}05'$

## 3.10.4.2 Diseño Circular

Para el diseño circular, la magnitud del radio  $R$  es de 5 kms, el cual es la distancia de la costa hacia mar adentro. El ángulo  $\alpha$  tiene una magnitud de  $22.5^\circ$ , el ángulo es la segunda dirección dominante del viento (Noreste) después de la dirección dominante (Norte) este último con un ángulo de  $90^\circ$ .

En la disposición circular, el parque eólico marino estará conformado por 21 turbinas de la empresa Vestas, modelo V164/8000. Para la primera etapa estará conformado por 11 turbinas representadas individualmente por una X, y para la segunda etapa está conformada por 10 turbinas, representadas por medio de puntos. Las 21 turbinas corresponden a la empresa Vestas. El diseño circular proporciona una potencia de 163.8 MW a una velocidad de viento promedio de 12 m/s. El eje de las abscisas indica la costa de Oaxaca. En la Figura 3.47 muestra la disposición circular de las turbinas Vestas modelo V164/8000 (Imagen del autor).

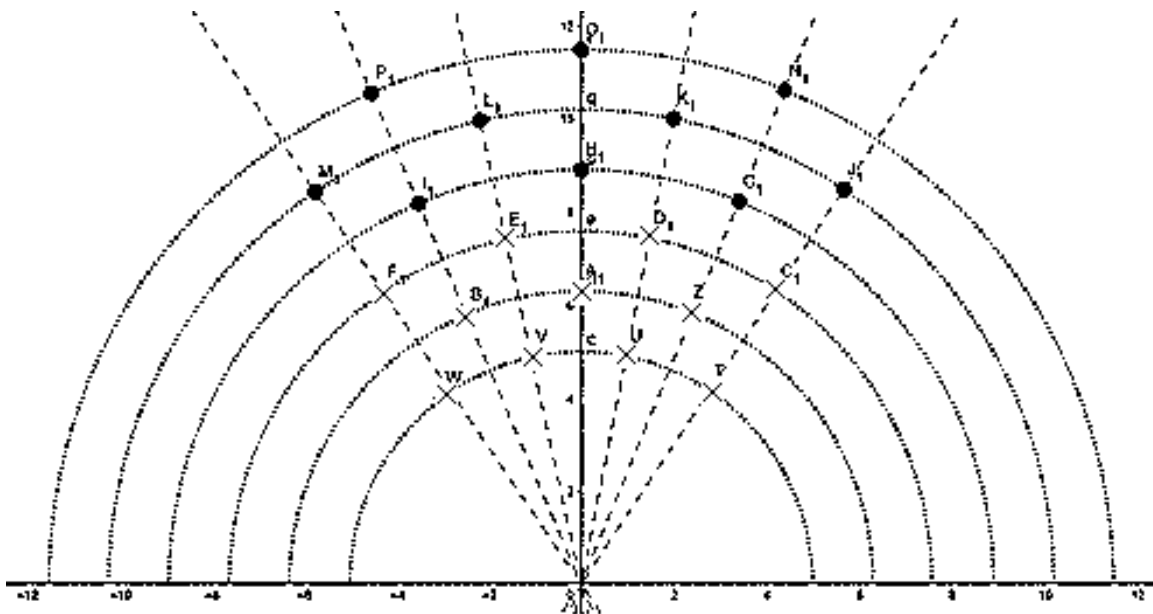


Figura 3.47 Disposición circular para el Golfo de Tehuantepec.

La Figura 3.48 muestra el área de la disposición circular con las turbinas Vestas modelo V164/8000 (Imagen del autor) el cual tiene una magnitud de  $78.47 \text{ km}^2$ .

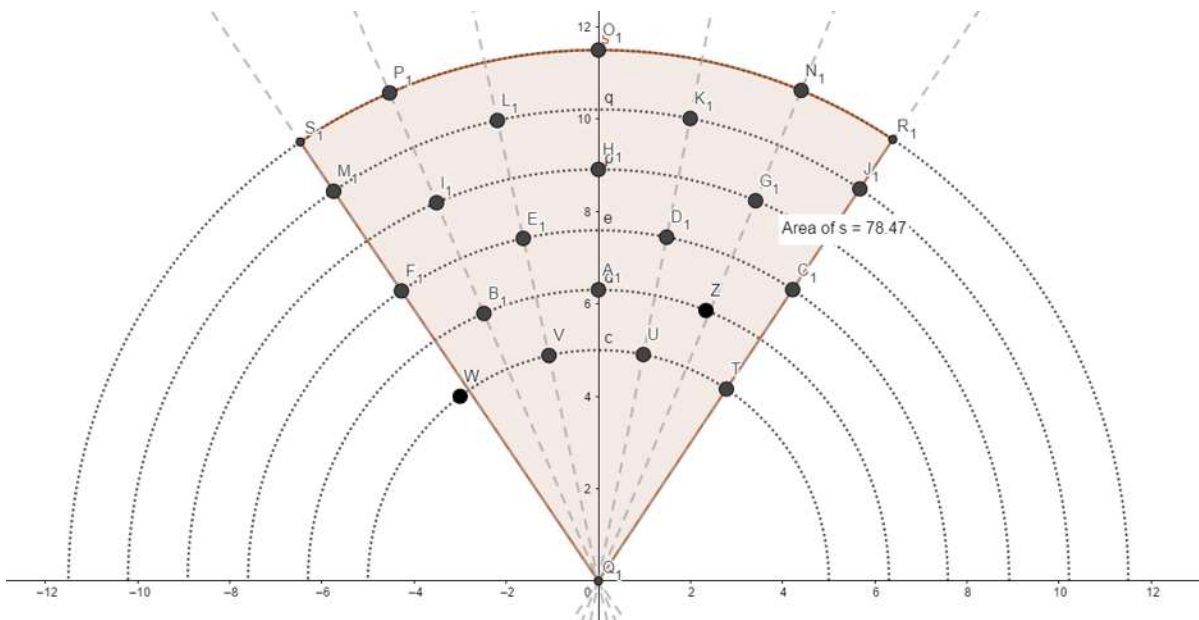


Figura 3.48 Área de la disposición circular.

Para elegir la mejor disposición lineal o circular para el parque eólico en el Golfo de Tehuantepec, Oaxaca, debe de tomarse en cuentas las características del lugar; en particular la dirección dominante del viento, la tendencia de las ráfagas y las dimensiones del aerogenerador.

El viento dominante en las costas de Oaxaca tiene una dirección hacia el Norte, con rachas al Noreste. Si se instalara un parque eólico con una disposición circular no se aprovecharía todo el potencial de la energía cinética debido a la forma de arco que tiene las filas. Los aerogeneradores de las esquinas tendrían este problema, por la forma en que el viento del Norte choca con las aspas.

La disposición lineal es la más empleada en los parques eólicos marinos y terrestres, además de que aporta un rendimiento aceptable para vientos intensos en la dirección dominante. La disposición lineal a tresbolillo columnas es la propuesta para el parque eólico marino de las costas de Oaxaca debido a que ocupa la menor de las áreas de todos los diseños ( $17.4824 \text{ km}^2$ ); con 24 turbinas, el modelo V164/8000 de la empresa Vestas, generarán una potencia de 187.2 MW, con una velocidad del viento de 12 m/s a una altura de 150 m.

## 3.11 Conexión Eléctrica

Un parque eólico marino puede transportar toda la energía que genere al SEN por medio de un adecuado arreglo para su conexión, líneas conductoras y subestaciones eléctricas [Torres 2012].

La conexión eléctrica del parque eólico marino se debe adaptar al SEN. La transmisión eléctrica en México se realiza a voltajes 115 kV, 230 kV y 400 kV. El SEN está dividido en 10 secciones: Central, Oriental, Occidental, Noroeste, Norte, Noreste, Baja California, Península, Baja California Sur, Sistema Mulegué. El Istmo de Tehuantepec se encuentra en el sistema Oriental, con líneas de 230 y 400 kV. En la Figura 3.48 se muestra con detalle el Sistema Eléctrico Oriental del país (SENER, 2015, pág. 86).

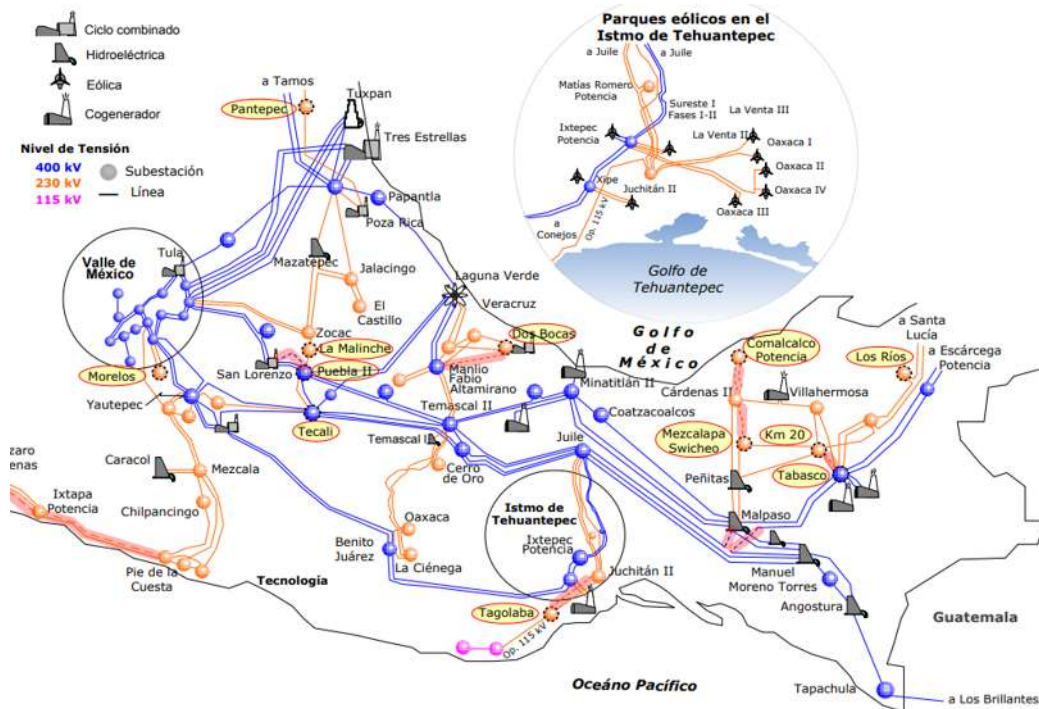


Figura 3.49 Líneas de transmisión y parques eólicos del Istmo de Tehuantepec.

Una observación de la Figura 3.49 es que para la construcción de un parque eólico marino en el Golfo de Tehuantepec se reforzaría el sistema de transmisión del área, ya que se sumaría una considerable generación de energía eléctrica al SEN.

Un parque eólico en tierra como marino se puede analizar desde dos perspectivas.

1. Cómo influye al sistema de potencia al agregar un parque eólico.

### 2. El comportamiento del sistema de potencia con el parque eólico conectado.

Un requisito para la conexión de los parques eólicos al sistema de potencia es la sincronización por medio de interruptores, esta acción permite que la potencia pueda fluir en ambas direcciones dependiendo del voltaje en magnitud y ángulo.

#### 3.11.1 Subestación Eléctrica

Una subestación eléctrica tiene como objetivo modificar y establecer los niveles de voltaje que se generen para facilitar el transporte y distribución de la energía eléctrica. Una de las secciones con las que cuenta una subestación es el transformador, seguida de la sección de medición, cuchillas de paso y sección para el interruptor, además de contar con elementos de maniobra como, interruptores, seccionadores, protecciones de fusibles, interruptores automáticos y demás [Prado 2018].

Las subestaciones en altamar ayudan a reducir las pérdidas eléctricas, mediante el aumento del voltaje, para luego transportarla hasta la costa. Una de estas pérdidas es causada por el efecto Joule en los conductores. Las pérdidas por efecto Joule está definida como [Prado 2018]:

$$P_j = I^2R \quad (3.2)$$

donde la variable  $P_j$  las pérdidas por efecto Joule,  $I$  la corriente eléctrica y  $R$  la resistencia eléctrica.

En los parques eólicos marinos, la instalación de una subestación marina no es necesaria si se cumple al menos una de las siguientes condiciones.

- El proyecto es pequeño, menor o igual a 100 MW.
- El parque eólico está cerca de la costa a una distancia igual o menor a 15 Kms.
- La conexión a la red es al voltaje de generación (230 kV) [Prado 2018].

Debido al diseño del parque eólico marino deducido en la sección 3.9, la distancia tentativa de la costa al parque es de 5 kms, lo que se considera una distancia corta. Una distancia de 5 kms no es suficiente para la instalación de una subestación mar adentro, pero la capacidad de generación eléctrica de la disposición lineal tresbolillo columnas es mayor a 100 MW y el voltaje que genera tanto en el diseño lineal como circular es diferente a la del sistema de potencia del Istmo de Tehuantepec, por lo tanto, la necesidad de una subestación eléctrica sería en la costa.



## 3.11.2 Cable de Transmisión

La transmisión de energía eléctrica del parque eólico marino a tierra se realiza mediante un cable submarino, que tiene como característica una protección de aislamiento eléctrico y un encamisado hecho con metal y plástico, para proteger el conductor ante daños de la corrosión marina y los posibles daños mecánicos [Prado 2018].

A medida que las plantas eólicas marinas continúan incrementándose en escala y más alejadas de la costa, los diseños mediante transmisión en corriente directa de alto voltaje HVDC (Corriente Directa de Bajo Voltaje), por sus siglas en inglés se vuelven técnicas y económicamente más atractivos y óptimos debido a las distancias más largas y niveles de potencia más altos [Apostolaki-Iosifidou *et al.*, 2019].

Los sistemas de transmisión HVDC son más eficientes en comparación con el sistema HVAC (Corriente Alterna de Alto Voltaje), especialmente cuando transmiten gran cantidad de energía a distancias superiores de 50 kms a 100 kms [Apostolaki-Iosifidou *et al.*, 2019]. Una línea de HVDC bipolar o tripolar puede transmitir más potencia en comparación con la línea de CA. Si la interconexión a la red de planta de energía eólica marina es de HVDC se tiene las siguientes ventajas:

1. Un flujo de potencia totalmente controlado.
2. No se transfieren a la red las fallas de CA.
3. No hay problemas con las corrientes de carga del cable.
4. Las pérdidas de energía del cable de C.D. son menores [Apostolaki-Iosifidou *et al.*, 2019].

Recapitulando, de acuerdo a la Tabla 3.3 el voltaje de salida del generador de la turbina V164/800 es de 66 KV; este voltaje es importante para definir las características del transformador y líneas de transmisión.

En la Figura 3.50 se muestra la secuencia necesaria para transportar la energía eléctrica del parque eólico al sistema eléctrico de potencia del Istmo (Imagen del autor), si se considera un conductor submarino de C.A.



Figura 3.50 Transmisión de energía eléctrica con cable submarino de C.A. para un parque eólico marino.

En la Figura 3.51 muestra la secuencia considerada para la generación y transmisión de energía eléctrica del parque eólico marino hacia el sistema eléctrico de potencia del Istmo con un conductor submarino de C.D. (Imagen del autor)



Figura 3.51 Transmisión de energía eléctrica con cable submarino de C.C. para un parque eólico marino.

Para el caso del parque eólico marino en el Golfo de Tehuantepec, Oaxaca es recomendable utilizar un cable submarino de corriente alterna debido a la ubicación de este (se encuentra a una distancia respecto a la costa de 5 kms que es considerada una distancia corta). Esta distancia incluso se puede reducir, ya que el potencial de aprovechamiento del viento se encuentra desde la orilla del mar; según se mostró en la Figura 3.7 que presenta el área que cubre los vientos, con velocidades iguales o mayores a 8.5 m/s. Por lo tanto, el esquema que se debe de tomar como referencia para el diseño del parque eólico marino es el de la Figura 3.50 con un cable submarino de C.A. debido a la distancia corta que hay de la costa al parque.

### 3.11.3 Diagrama unifilar

El diagrama unifilar es la representación gráfica del sistema eléctrico de interconexión al sistema de potencia. La Figura 3.52 muestra la disposición lineal a tresbolillo columnas (Imagen del autor), su diseño circular muestra las conexiones y componentes adecuadas para el modelo de cada parque. Tanto el diagrama unifilar lineal como circular tienen un transformador con tres devanados y cuentan con una compensación estática de potencia reactiva capacitiva e inductiva que ayuda a la corrección del factor de potencia de consumo y una unidad de compensación de reactivos dinámicos capacitivos.

Para la conexión eléctrica de un parque eólico, una forma de asegurar la operación de todos los aerogeneradores es la conexión o configuración entre ellos. Las configuraciones más relevantes son las siguientes:

- **Radial.** Todos los aerogeneradores están conectados a la misma línea eléctrica con solo un punto de salida de potencia. Es la configuración más sencilla y económica, pero, la menos fiable, ya que si en un aerogenerador ocurre una falla o se encuentre en mantenimiento el resto del parque sale de operación, a partir del aerogenerador que esta fuera de servicio.

- **Anillo.** Los aerogeneradores están conectados entre sí y con el punto de salida de potencia en dos de sus extremos. En caso de que un aerogenerador este fuera de servicio el resto del parque podría funcionar de manera normal, pero, en caso de que dos o más aerogeneradores no consecutivos tengan una avería o estén en mantenimiento, los aerogeneradores que están en medio de estos quedarán fuera de servicio.
- **Mallado.** Se trata de una conexión de grupos pequeños de aerogeneradores o incluso de un solo aerogenerador conectados de forma independiente con un solo punto de salida de potencia. Es la conexión más segura [Prado 2018].

En relación al unifilar lineal a tresbolillo columnas, la conexión de mallado con parejas de aerogeneradores proporciona garantía de continuidad del servicio al sistema eléctrico de potencia, en caso de una falla o por motivos de mantenimiento.

Los aerogeneradores del diagrama unifilar están representados por generadores de C.A. cada aerogenerador tiene su respectivo transformador de potencia; las líneas horizontales gruesas representan barras conductoras.

En la Figura 3.52 se muestra el diagrama unifilar de la disposición lineal tresbolillo columnas (Imagen del autor), compuesto por 24 turbinas Vestas modelo V164/800 para el Golfo de Tehuantepec precisamente a 15 kms al Este del puerto de Salina Cruz, Oaxaca y a 5 kms de la costa, como se mostró en la Figura 3.46.

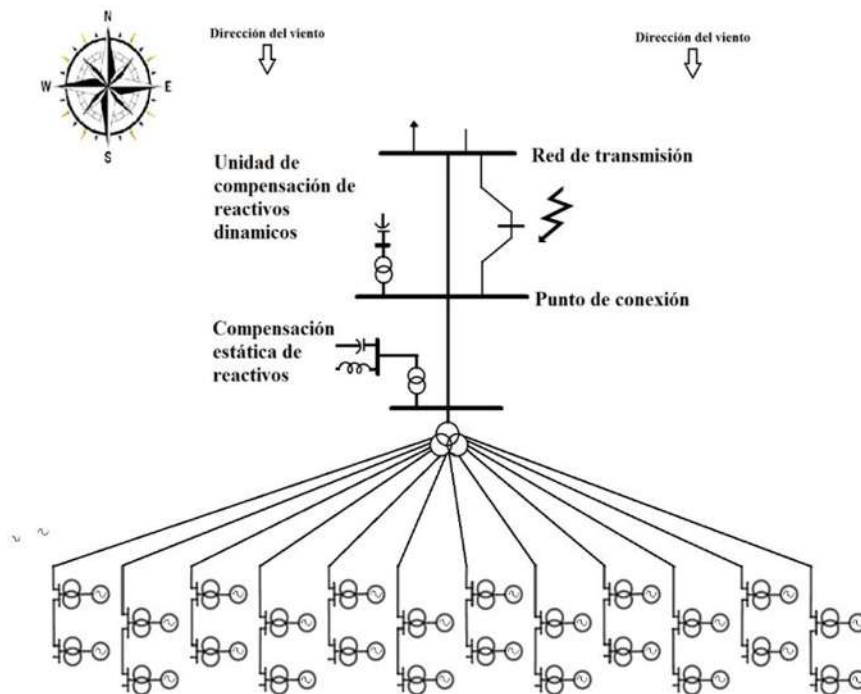


Figura 3.52 Diagrama Unifilar Disposición Lineal Tresbolillo Columnas.

La Figura 3.53 muestra el diagrama unifilar circular con 21 turbinas Vestas (Imagen del autor), modelo V164/800 también para el Golfo de Tehuantepec a 15 kms al Este del puerto de Salina Cruz, Oaxaca y a 5 kms de la costa. La conexión de mallado es igual que la del diseño lineal, pero con tres aerogeneradores cada sección.

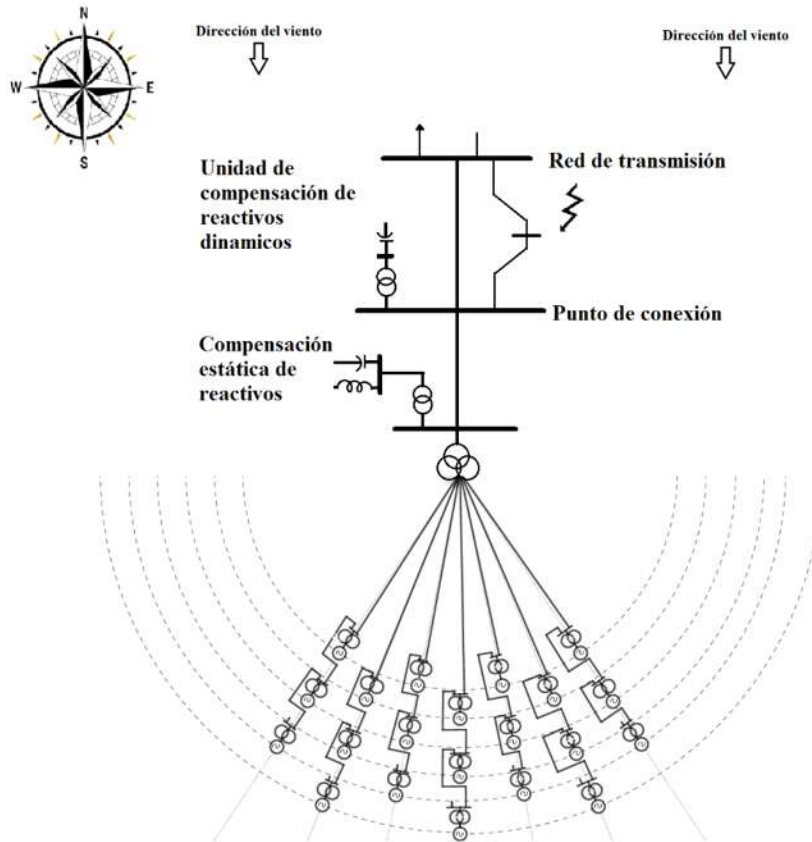


Figura 3.53 Diagrama Unifilar Circular.

## 3.14 Conclusiones

Mediante el análisis de los mapas de radiación solar y velocidad del viento se identificaron los sitios con mayor potencial en el país para la instalación de energías renovables como la energía solar y eólica. El estado de Oaxaca tiene una radiación promedio al año de  $660 \text{ W/m}^2$  y en las costas de Tamaulipas equivale a una radiación de  $630 \text{ W/m}^2$ . En el Golfo de Tehuantepec, Oaxaca, se encuentran velocidades de viento promedio de  $12.15 \text{ m/s}$  a una altura de  $150 \text{ m}$ . El área donde se tiene esta velocidad de viento es extensa, de  $24,664 \text{ km}^2$ . En la costa de Tamaulipas, entre las regiones de Laguna Madre y Delta del Río Bravo se

encuentran velocidades promedio de viento de 8.34 m/s, la extensión en la costa tiene un área de 11,041  $km^2$ .

Para complementar la instalación y diseño de un parque eólico marino se tiene que hacer un estudio batimétrico de la superficie marina. Del análisis realizado se encontró que los sitios con mayor potencial para la instalación de un parque eólico marino son en las costas de Oaxaca y Tamaulipas, los cuales de acuerdo a sus cartas batimétricas tienen profundidades menores a los 100 m a una distancia de la costa hacia el mar de 28 y 71 kms respectivamente. Con esta información se llegó a la conclusión de que lo más conveniente es instalar una cimentación superficial tipo Jacket ya que es la más adecuada para el parque eólico en Oaxaca y Tamaulipas, debido a que tiene un rango considerable para adaptarse al fondo marino, que va desde 20 hasta 40 m de profundidad, incluso más. En caso de requerir una cimentación profunda para magnitudes de 60, 70 u 80 m es recomendable una plataforma TLP.

La selección de un aerogenerador depende de la potencia eléctrica nominal que genera, la densidad del aire del lugar, del área del barrido del rotor y de la velocidad del viento. De acuerdo a la gráfica de la curva de potencia de los modelos de turbina de la empresa Siemens y Vestas el mejor aerogenerador para velocidades de viento de 8 y 12 m/s es el modelo V164/8000 Vestas.

Con base al análisis del capítulo 2 y 3 se ha llegado a la conclusión que el Golfo de Tehuantepec es uno de los sitios con mayor potencial para la instalación de un parque eólico marino. El diseño del parque tiene dos opciones: lineal y circular. Se encontró que, para la opción lineal, denominada disposición línea a tresbolillo columnas, se tendrá un parque eólico conformado por 24 turbinas; la segunda opción es el diseño circular conformado por 21 turbinas, ambas opciones tienen dos etapas de instalación. El diseño lineal proporcionó una generación de 187.2 MW en un área de 17.4824  $km^2$  y el diseño circular proporciona una potencia de generación de 163.8 MW en un área de 78.47  $km^2$ .

La energía eléctrica generada se transmitiría al sistema eléctrico interconectado nacional, mediante la conexión eléctrica adecuada. Debido a que el parque eólico marino se encuentra 5 kms de la costa, no es necesario de una subestación en el mar. Una subestación elevadora de 66/230 KV estará colocada en la costa, el cual transforma la energía de operación de la línea de enlace de 66 KV a 230 KV que es el voltaje que se transmite al sistema eléctrico interconectado nacional. El transporte de la energía eléctrica generada del parque eólico marino a la subestación sería mediante un conductor submarino de C.A. debido a la distancia corta entre estos dos puntos.

## Capítulo 4. Conclusiones generales y trabajo futuro

### 4.1 Conclusiones generales

La demanda de energía eléctrica en México crece de manera continua anualmente. El país debe de tener un suministro eléctrico confiable para la demanda de energía en crecimiento. Para esto se debe ampliar la matriz energética utilizando energías renovables, tal como la solar y eólica, para dar un soporte a las energías que se encuentran en el territorio mexicano, principalmente las energías convencionales a base de combustibles fósiles. Al apoyar al sector de energías renovables en el país se cumple además con los Acuerdo de París y el protocolo de Kioto, de los cuáles México forma parte.

Como se mostró en el Capítulo 2 que México tiene una estructura en forma de embudo conformada por sistemas montañosos permitiendo el dominio de los vientos alisios desde el Norte hasta el Sur del país. Existen muchas zonas con vientos aprovechables para la generación de energía eólica tales como la Península de Baja California, el Altiplano del Norte, la Región central, el Istmo de Tehuantepec y la Península de Yucatán. Precisamente en los estados de Tamaulipas, Oaxaca y Yucatán se han registrado velocidades de viento mayores a 8 m/s. Los vientos dominantes de Oaxaca provienen del Norte y los vientos dominantes de Tamaulipas tienen la dirección del Noreste. Para el diseño y construcción de un parque eólico marino se deben de considerar los huracanes y tormentas tropicales, esto con el objetivo de tener información de la velocidad de los vientos globales y la altura máxima de las olas.

Una herramienta para identificar las zonas con mayor potencial para energías renovables son los mapas que indican las velocidades del viento. La zona con las velocidades de viento más altas en el país es la Ventosa en Oaxaca. En las costas de Oaxaca se encuentra el Golfo de Tehuantepec que tiene velocidades de viento mayores a los 12 m/s, esta velocidad es considerada alta adecuada para la generación de energía eléctrica mediante aerogeneradores.

En base a batimetría del lugar se define la cimentación que ocupara el aerogenerador. A una distancia de 5 kms respecto de la costa la profundidad en el fondo marino es menor a los 100 m, por lo tanto, para este diseño de parque eólico se requiere de una cimentación superficial, en este caso tipo Jacket. Para el caso particular analizado, se encontró que plataforma soportaría el peso de un aerogenerador de la empresa Vestas modelo V164/8000. Cada aerogenerador tiene un costo estimado de 1,000,000€ por cada MW.

En relación a las configuraciones de los parques eólicos marinos propuestos, estos estarían constituidos por 24 turbinas Vestas V164/8000 para el modelo lineal a tresbolillo columnas y para el modelo circular 21 turbinas Vestas del mismo modelo.

Otro componente importante dentro del diseño del parque es el tipo de línea de transmisión y la subestación eléctrica, debido a que la distancia de la costa hacia el parque es una distancia corta (5 kms). Para la línea de transmisión es recomendable que sea de CA y el diseño de la subestación se colocará en tierra. Para instalar todos los componentes del parque, la obra se estimaría que pueda concluirse en aproximadamente 5 años; un parque eólico marino tiene una vida útil de 20 a 25 años.

### **4.2 Propuesta de trabajos de investigación futuro**

Con base al alcance reportado en esta tesis se propone continuar con los siguientes vértices de investigación:

1. Representar los parques eólicos marinos propuestos de forma unificada en espacio de estado para determinar de manera detallada su comportamiento dinámico, bajo condiciones de falla, así como el análisis de la calidad de la energía y sus distintos fenómenos adversos.
2. Validar los resultados del modelo unificado mediante un simulador digital comercial, tal como PSCAD/EMTDC®, ampliamente reconocido por la industria de potencia. El diseño que se pretende aplicar es la configuración lineal tresbolillo columnas descrita en el Capítulo 3. Mediante simulaciones con PSCAD/EM TDC® se obtendrán los resultados de un comportamiento más real del parque eólico marino.
3. Analizar el comportamiento dinámico de los propuestos en tiempo real, utilizando alguno de los simuladores comerciales disponibles actualmente para tal propósito, tal como OPAL-RT®.
4. Considerar el análisis financiero asociado con la instalación de cada parque eólico marino, así como de su operación durante su vida útil (entre 20 y 25 años) en el entorno de un mercado energético.

## Bibliografía

[Aldeco y Montoña 1986]

Aldeco J. y Montoña Y. “Apliación de un Método de Integración Numérica en el estudio del oleaje máximo generado por el huracán Oliva en las proximidades de Mazatlán, Sin., México”. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Estación Mazatlán, UNAM, 1986  
<http://biblioweb.tic.unam.mx/cienciasdelmar/instituto/1988-1/articulo294.html>.

[Arias y Ortega 2005]

Arias J. y Ortega S. “Oceanografía pesquera del Golfo de Tehuantepec: El caso atún aleta amarilla *Thunnus albacares* (Bonnaterre, 1788)”, Instituto Politécnico Nacional, 2005.

[Araújo *et al.*, 2009]

Araújo A., Melo M., Medeiros A. y Santos M. “Simulación de la producción de energía eléctrica con aerogeneradores de pequeño tamaño”. Información tecnológica, Vol. 20, No. 3, Pág. 37-44, Mayo 2009.

[Apostolaki-losifidou *et al.*, 2019]

Apostolaki-losifidou E., McCormack R., Kempton W., Mccoy P., y Ozkan D. “Diseño y análisis de transmisión para el desarrollo de energía eólica marina a gran escala”, IEEE Power and Energy Technology Systems Journal, Vol. 6, No.1, Pág. 22-31, Marzo 2019.

[Cabrera, *et al.*, 1998]

Cabrera A., Vázquez E., González J., Jiménez R., Muñoz E., Aguilar V. “Regiones marinas prioritarias de México”. Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad. México, 1998. <http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/marinas.html>.

[CONABIO *et al.*, 2007]

CONABIO, CONANP, TNC y PRONATURA. “Análisis de vacíos y omisiones en conservación de la biodiversidad marina de México: océanos, costas e islas”, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, The Nature Conservancy Programa México, Pronatura, 2007.

[CONAGUA *et al.*, 2018]

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional, Gerencia de Meteorología y Climatología, Subgerencia de Pronóstico Meteorológico., “Resumen de la temporada de ciclones tropicales del año 2018”, 2018.  
<https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Ciclones%20Tropicales/Resumenes/2018.pdf>

[CONAGUA *et al.*, 2019]

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional, Gerencia de Meteorología y Climatología, Subgerencia de Pronóstico Meteorológico., “Resumen de la temporada de ciclones tropicales del año 2019”, 2019.  
<https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Ciclones%20Tropicales/Resumenes/2019.pdf>



[Cereceda y Murga 2020]

Cereceda R. y Murga I. “La NASA confirma caída de las emisiones de gases de efecto invernadero en China por el coronavirus”. EURONEWS, Marzo 2020.

<https://es.euronews.com/2020/03/02/la-nasa-confirma-caida-de-las-emisiones-de-gases-de-efecto-invernadero-en-china-por-el-cor>

[Corral 2014]

Corral. M. “Los parques eólicos marinos pueden frenar los huracanes”. El Mundo. 2014.

<https://www.elmundo.es/ciencia/2014/02/27/530e2f17268e3ea9698b4576.html>

[EADIC 2013]

EADIC Formación y Consultoría . “#TopD; Las 10 mejores obras de ingeniería moderna”,

Noviembre 2013. <https://www.eadic.com/las-mejores-obras-de-ingenieria-moderna/#>

[El Economista 2019]

El Economista. “Engie inaugura el parque eólico Tres Mesas III en Tamaulipas”, 2019.

<https://www.economista.com.mx/empresas/Engie-inaugura-el-parque-eolico-Tres-Mesas-III-en-Tamaulipas-20190821-0087.html>

[EOLICCAT 2016]

EOLICCAT. “Turismo activo entre turinas”, Marzo 2016. <http://eoliccat.net/turismo-activo-entre-turbinas/?lang=es>

[Estavillo y Aguayo 2019]

Estavillo C. y Aguayo J. “Ambientes sedimentarios recientes en Laguna Madre, NE de México”, Noviembre 2018.

<http://boletinsgm.igeolcu.unam.mx/bsgm/index.php/component/content/article/235-sitio/articulos/tercera-epoca/4601-02/1101-4601-2-estavillo>

[El Universal 2020]

El Universal. “En Oaxaca se produce el 62% de la energía eólica generada en el país”, Enero 2020.

<https://oaxaca.eluniversal.com.mx/estatal/06-01-2020/en-oaxaca-se-produce-el-62-de-la-energia-eolica-generada-en-el-pais>

[Fernández, et al., 2016]

Fernández V., Comisión Federal de Electricidad (CFE), Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil/Secretaría de Energía, “Zonas disponibles con alto potencial eólico (Escenario 1)”. Secretaría de Energía, Mayo 2016. <https://dgel.energia.gob.mx/azel/mapa.html?lang=es>

[Fernández 2018]

Fernández S. “Vindeby Offshore Wind Farm, el primer parque eólico marino del mundo”, 2018.

Diario Renovable. <https://www.diariorenovables.com/2018/03/primer-parque-eolico-marino-del-mundo.html>

[González 2012]

González J. “Energías Renovables”, REVERTÉ, Enero 2012.

[González, *et al.*, 2006]

González M., Beltrán L., Troyo E. y Ortega A. “Potencial de aprovechamiento de la energía eólica para la generación de energía eléctrica en zonas rurales de México”. INCI, Caracas, Vol. 31 No. 4. Pág. 240-245, Abril 2006.

[Henestroza 2009]

Henestroza R. “Centrales eólicas en el Istmo de Tehuantepec; su impacto ambiental y socioeconómico”, Redalyc Sistema de Información Científica, Vol. 16, No. 74, Pág. 39-44, Junio 2009.

[INEGI 2008]

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). “Guía para la interpretación de cartografía batimétrica”. INEGI, 2008.

[Jáuregui 2003]

Jáuregui E. “Algunos conceptos modernos sobre la circulación general de la atmósfera”. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM., No. 50, Pág 121-143, Junio 2003.

[Liceaga 2010]

Liceaga A. “Cuando la NASA construía aerogeneradores”. NAUKAS ciencia, escepticismo y humor, Octubre 2010. <https://naukas.com/2010/10/25/cuando-la-nasa-construia-aerogeneradores/>

[León, *et al.*, 2014]

León L., Neves F. y Vilaragut M. “Análisis y modelado del generador de inducción doblemente alimentado”, Ingeniería Energetica, Vol. 35, No.2, Mayo 2014.

[Mares 2020]

Mares M. “Electrificación de todo, lo que viene”, El Economista, Junio 2020. <https://www.economista.com.mx/opinion/Electrificacion-de-todo-lo-que-viene-20200625-0026.html>

[MODEC 2016]

MODEC. “Floating Production Solutions”. <https://www.modec.com/index.html>

[Montilla 2010]

Montilla M. “Control de parques eólicos offshore conectados a red mediante enlace de continua hvdc-lcc”. Universidad Carlos III de Madrid Departamento de Ingeniería Eléctrica, Enero 2010.

[Moragues y Rapallini 2003]

Moragues J. y Rapallini A. “Energía eólica”, Instituto Argentino de la Energía, General Mosconi, 2003.

[Museo Virtual 2016]

Grandes Inventores-Museo Virtual (Museo Virtual). “Herón de Alejandría”, 2016.

[http://historico.oepm.es/museovirtual/galerias\\_tematicas.php?tipo=INVENTOR&xml=Her%C3%B3n%20de%20Alejandr%C3%ADa.xml](http://historico.oepm.es/museovirtual/galerias_tematicas.php?tipo=INVENTOR&xml=Her%C3%B3n%20de%20Alejandr%C3%ADa.xml)

[Mur 2001]

Mur J. “Curso de energía eólica”. Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Zaragoza, Febrero 2001.

[Nasar 1982]

Nasar S. “*Máquinas eléctricas y electromecánicas*”, McGRAW-HILL, 1982.

[Oliveira 2018]

Oliveira J. “*Vindeby Offshore Wind Farm, el primer parque eólico marino del mundo*”, Va de Barcos, Septiembre 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*”. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales Universidad Politécnica de Madrid, Noviembre 2018.

[Peña et al., 2020]

Peña R., Medina A. y Segundo J. “*Analysis of the solar and wind energetic complementarity in Mexico*”, Journal of Cleaner Production, 2020.

[Prado 2018]

Prado I. “*Estudio de implantación de un parque eólico offshore flotante en la costa de Cantabria*”. Universidad de Cantabria, Escuela Politécnica y Energía, Febrero 2018.

[Real Estate 2020]

Real Estate Market y Lifestyle (Real Estate). “*Energías alternativas, retos y oportunidades en México*”, Marzo 2020.

<https://realestatemarket.com.mx/infraestructura-y-construccion/27581-energias-alternativas-retos-y-oportunidades-en-mexico>

[Roca 2018]

Roca J. “*Los 10 mayores parques eólicos marinos del mundo: Walney Extension da un vuelco a la clasificación*”, El periodico de la energía, Septiembre 2018.

<https://elperiodicodelaenergia.com/los-10-mayores-parques-eolicos-marinos-del-mundo/>

[Rodríguez 2009]

Rodriguez M. “*Criterios de selección de sistemas flotantes de producción para el desarrollo de campos petroleros en aguas profundas*”, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, 2009.

[SENER 2018]

Secretaría de Energía (SENER), “Programa de desarrollo del sistema eléctrico nacional”, 2018.  
<https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/331770/PRODESEN-2018-2032-definitiva.pdf>

[SENER 2019]

Secretaría de Energía (SENER), “PRODESEN 2019-2033”, Junio 2019.  
<https://www.gob.mx/sener/articulos/prodesen-2019-2033-221654>

[Serrano 2015]

Serrano C. “Diseño de una estructura flotante para un aerogenerador offshore”, Universidad Carlos III de Madrid Escuela Politécnica Superior, Junio 2015.

[Siete24 2020]

Siete 24, “México y su gran potencial como generador de energía eólica”, Junio 2020.  
<https://siete24.mx/negocios/mexico-y-su-gran-potencial-como-generador-de-energia-eolica/>

[Silva, et al., 2014]

Silva R., Villatoro M., Ramos F., Pedroza D., Ortiz M., Mendoza E., Delgadillo M., Escudero M., Félix A. y Cid A. “Caracterización de la zona costera y planeamiento de elementos técnicos para la elaboración de criterios de regulación y manejo sustentable”, UNAM, SEMARNAT, 2014.

[Talayero y Telmo 2011]

Talayero A. y Telmo E. “Energías Renovables, Energía Eólica (2da edición)”, Prensas Universitarias de Zaragoza, 2011.

[Torrecillas 2019]

Torrecillas J. “Proyecto preliminar de una plataforma semi-sumergible para aguas profundas”, Universidad Politécnica de Cartagena, 2019.

[Torres 2012]

Torres J. “Estudio técnico-económico y viabilidad de un parque eólico offshore en el litoral de Girona”, ETSE Universitat Rovira I Virgili, Junio 2012.

[Wildi 2007]

Wildi T. “Máquinas eléctricas y sistemas de potencia”, PEARSON Educación, 2007.

[Zamora 2018]

Zamora F. “Parques eólicos marinos en México, perspectivas y factibilidad”. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Enero 2018.

**APÉNDICE A**

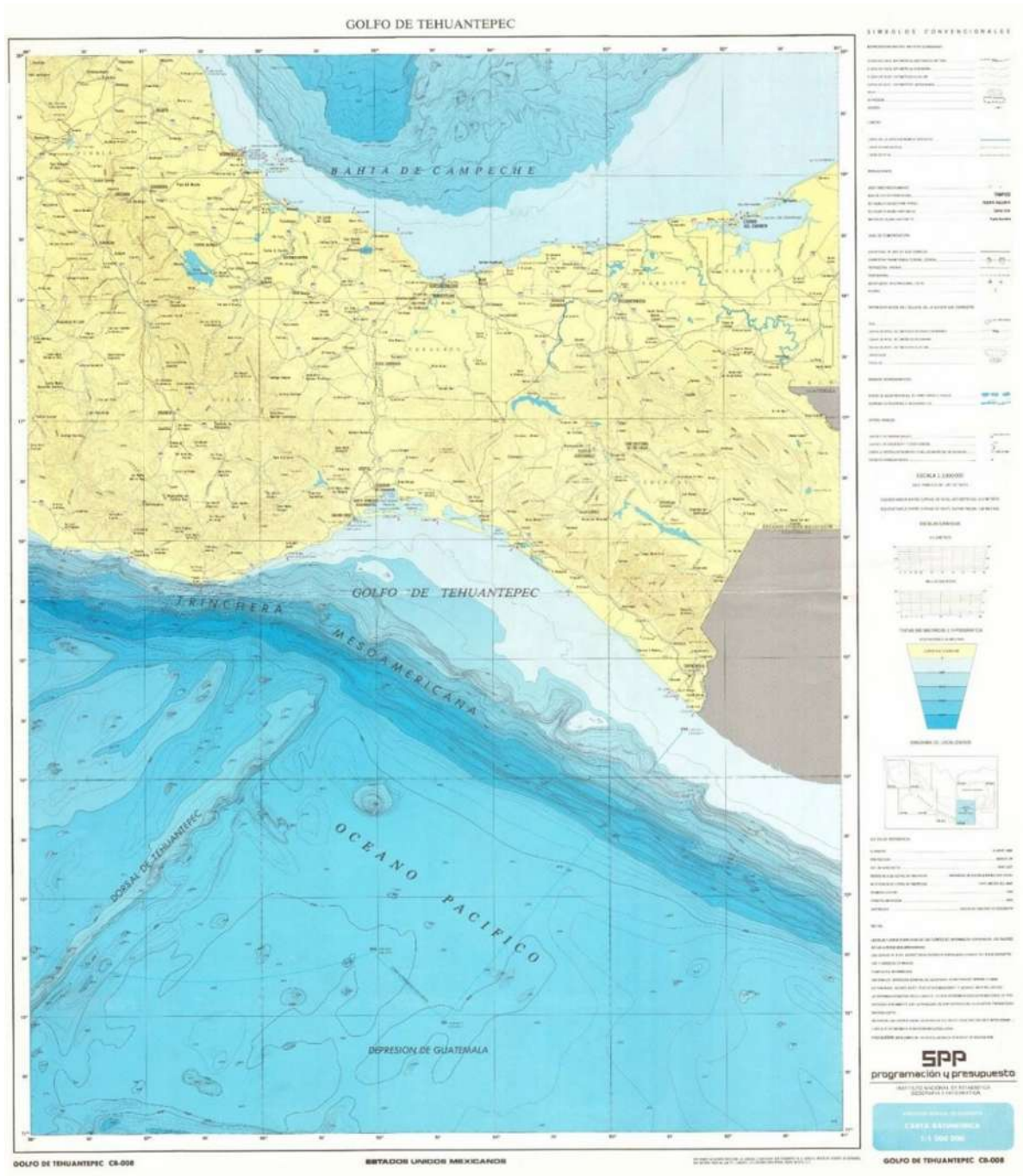


Figura A. Golfo de Tehuantepec CB-008

[ <https://www.inegi.org.mx/app/mapas/?tg=3614> ]

**APÉNDICE B**

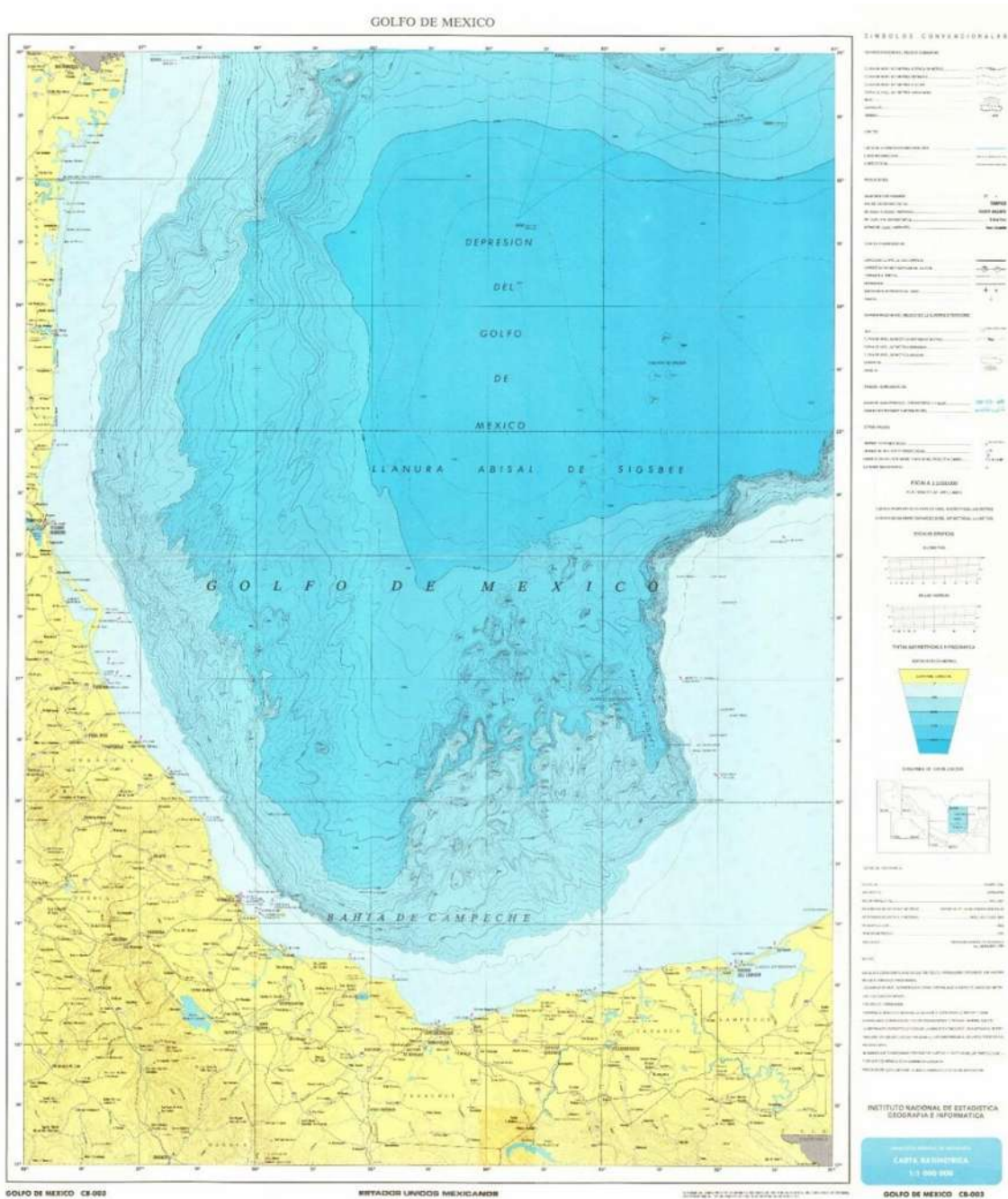


Figura B. Golfo de México CB-003

[ <https://www.inegi.org.mx/app/mapas/?tg=3614> ]