



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

FACULTAD DE QUÍMICA

**ENERGÍA EÓLICA OFFSHORE COMO UN  
RECURSO ENERGÉTICO SUSTENTABLE:  
PROPUESTA DE INSTALACIÓN EN MÉXICO**

**T E S I S  
MANCOMUNANDA**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO QUÍMICO

**PRESENTAN**

JOSÉ PABLO CEBALLOS CANTÚ  
FERNANDO SÁNCHEZ MIÑAUR



Ciudad Universitaria, CDMX, 2016



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE:** JOSÉ ANTONIO ORTIZ RAMÍREZ  
**VOCAL:** MARÍA RAFAELA GUTIÉRREZ LARA  
**SECRETARIO:** NÉSTOR NOÉ LÓPEZ CASTILLO  
**1er. SUPLENTE:** JOSÉ AGUSTÍN GARCÍA REYNOSO  
**2° SUPLENTE:** SERGIO ADRIÁN GRACÍA GONZÁLEZ

**ASESOR DEL TEMA:**

MARÍA RAFAELA GUTIÉRREZ LARA

**SUSTENTANTE (S):**

JOSÉ PABLO CEBALLOS CANTÚ

FERNANDO SÁNCHEZ MIÑAUR

## **Listado de Abreviaciones y Acrónimos**

**AED** – Agencia de Energía Danesa

**CFE** – Comisión Federal de Electricidad

**CONAGUA** – Comisión Nacional del Agua

**CRE** – Comisión Reguladora de Energía

**DOF** – Diario Oficial de la Federación

**EIA** – Acto de Impacto Ambiental

**GW** – Gigawatt

**Km** – Kilómetro

**LAERFTE** - Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el  
Financiamiento de la Transición Energética

**LAN** – Ley de Aguas Nacionales

**m/s** – Metro sobre Segundo

**mtoe** – Millones de Toneladas Equivalentes

**MBNM** – Metro Bajo el Nivel del Mar

**MW** – Megawatt

**OPEC** – Organización de Países Exportadores

**REL** – Ley de Energías Renovables

**SCA** – Empresa Sueca de Celulosa

**SEGOB** – Secretaria de Gobernación

**SEMAR** – Secretaria de la Marina

**SEMARNAT** – Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales

**SENER** – Secretaría de Energía

**SMN** – Servicio Meteorológico Nacional

## Resumen

Los desafíos que presenta México hoy en día en cuanto a sus recursos energéticos, han ido creciendo. Al ser un país dependiente del petróleo y basar sus financiamientos del gasto público en el mismo, han hecho que el país se haya encajonado en un lugar con alternativas pero pocas iniciativas para tomarlas y cambiar la sostenibilidad en la cual se vive.

Este trabajo intenta informar que México no solo es un país con grandes reservas de petróleo, sino que cuenta con recursos renovables capaces de ser aprovechados para la sustentabilidad del mismo. El recurso eólico que México puede proporcionar, fue de gran interés para llevar a cabo esta investigación y propuesta del parque eólico offshore.

México es extenso en costas, tanto así que tiene acceso al Océano Pacífico y Atlántico de los cuales aprovecha muchos recursos como la extracción del petróleo, el comercio marítimo, la pesca, etc. A pesar de esto, no se ha hecho con anterioridad un estudio que sustente la factibilidad de un parque eólico offshore; aunque por otro lado, el país cuenta con capacidad de producción instalada onshore.

Este trabajo brinda una posible solución y propuesta de desarrollo para la implementación de un prototipo de parque eólico en costas mexicanas. Se presenta un análisis de factibilidad incluyendo velocidades de viento, profundidad de costa, eventos naturales, tipo de turbina, entre otros. Esta información hace sustento a que el país es capaz de instalar este tipo de tecnología sustentable nunca antes probada en el mismo.

Algunos de los objetivos principales del trabajo fueron:

- Recabar información nacional e internacional sobre energía eólica offshore.
- Informar sobre el uso, impactos e importancia de energías eólicas para la economía del país.
- Proponer un proyecto con probabilidad de ser adaptado en México con base en las medidas de implementación de países desarrollados en el tema de energía eólica offshore.

# Contenido

<b>1</b>	<b>PANORAMA MUNDIAL DEL SECTOR ENERGÉTICO .....</b>	<b>1</b>
1.1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.2	TIPO DE ENERGÍAS NO RENOVABLES .....	2
1.2.1	<i>Fósiles</i> .....	2
1.2.2	<i>Energía Nuclear</i> .....	5
1.3	TIPOS DE ENERGÍAS RENOVABLES .....	5
1.3.1	<i>Celdas Solares</i> .....	6
1.3.2	<i>Energía Geotérmica</i> .....	8
1.3.3	<i>Bioenergía</i> .....	10
1.3.4	<i>Hidroeléctrica</i> .....	12
1.3.5	<i>Energía Marina</i> .....	13
1.3.6	<i>Hidrógeno y Celdas</i> .....	14
1.3.7	<i>Eólica</i> .....	15
<b>2</b>	<b>ESTUDIO DE ESQUEMAS REGULATORIOS DEL SECTOR EÓLICO OFFSHORE.....</b>	<b>17</b>
2.1	INTRODUCCIÓN.....	17
2.2	DINAMARCA.....	18
2.3	CHINA.....	20
2.4	SUECIA .....	22
2.5	REINO UNIDO .....	24
2.6	MÉXICO .....	26
2.7	DIFERENCIAS REGULATORIAS ENTRE LOS PAÍSES .....	33
<b>3</b>	<b>PANORAMA DE LA INDUSTRIA EÓLICA EN MÉXICO .....</b>	<b>34</b>
3.1	INTRODUCCIÓN.....	34
3.2	RECURSO EÓLICO DE MÉXICO .....	36
3.3	IMPACTO DE LA REFORMA ENERGÉTICA EN MÉXICO.....	37
<b>4</b>	<b>DESARROLLO .....</b>	<b>39</b>
4.1	INTRODUCCIÓN.....	39
4.2	OBJETIVOS.....	39
4.3	ENERGÍA EÓLICA Y SU MEDIO AMBIENTE.....	40
4.4	TIPO DE AEROGENERADORES.....	41
4.5	CÁLCULO DE COSTOS.....	48
4.6	CONSIDERACIONES PARQUE EÓLICO OFFSHORE .....	50
4.7	PARQUE EÓLICO OFFSHORE EN MÉXICO .....	53
4.7.1	<i>Selección de Sitio y Características</i> .....	53
4.7.2	<i>Análisis de Costos</i> .....	60
<b>5</b>	<b>ANÁLISIS.....</b>	<b>72</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>74</b>
<b>7</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>76</b>

## Índice de Figuras

Figura 1 Reservas Mundiales de petróleo 2014.....	2
Figura 2 Precio Mundial Histórico del petróleo 2015 en USD .....	3
Figura 3 Comercialización Mundial de Crudo en 2014 en Millones de Toneladas	4
Figura 8 Esquema de una planta de ciclo binario.....	9
Figura 9 Ciclo de la Biomasa .....	12
Figura 12 Estructura de la producción de energía primaria 2014 (Petajoules)..	35
Figura 13 Oferta interna bruta por tipo de energético, 2014 (Petajoules) .....	36
Figura 14 Turbina tipo HAWT (izq.) vs. Turbina tipo VAWT (der.).....	42
Figura 15 Componentes de la Góndola. ....	43
Figura 16 Rotor de un aerogenerador.....	44
Figura 17 Interior de la torre de un aerogenerador.....	45
Figura 18 Descripción gráfica de cimentaciones respectivamente. ....	46
Figura 19 Curva de potencia de un aerogenerador .....	47
Figura 20 Planteamiento para el desarrollo de distintos escenarios en un parque eólico offshore.....	49
Figura 21 Profundidad de la Plataforma Marina del Golfo de Campeche.....	55
Figura 22 Arrecifes Coralinos de Campeche.....	56
Figura 23 Reservas del Estado de Campeche.....	56
Figura 24 Número de ciclones que han impactado las costas mexicanas.....	58
Figura 25 Trayectorias de huracanes desde 1865.....	59

## Índice de Tablas

Tabla 1 Comparación de los países y el desarrollo de sus proyectos.....	34
Tabla 2 Características de Turbinas HAWT vs VAWT .....	42
Tabla 3 Turbinas eólicas offshore con mayor capacidad en el mundo .....	47
Tabla 4 Cargas promedio permanentes de turbinas eólicas.....	51
Tabla 5 Clases y Velocidades de viento.....	52
Tabla 6 Datos Estadísticos de la Sonda de Campeche y el Litoral de Tabasco.....	59
Tabla 7 Escenarios de demanda eléctrica WEC vs. CFE.....	61
Tabla 8 Porcentaje de costos aproximado de un parque eólico offshore. ....	63
Tabla 9 Desglose de costos en USD para cada caso propuesto.....	64

Tabla 10 Promedio de los 4 casos, su desviación y % de desviación.....	64
Tabla 11 Valores Porcentuales para turbina offshore de 5MW .....	65
Tabla 12 Costo de construcción de turbina.....	66
Tabla 13 Distribución de viento en la Sonda de Campeche. ....	67
Tabla 14 Producción Anual por Turbina y por Parque. ....	68
Tabla 15 Costos de Operación y Mantenimiento. ....	69
Tabla 16 Plan de ventas propuesta de acuerdo a los cálculos realizados.....	71
Tabla 17. Datos Financieros obtenidos .....	72
Tabla 18 Análisis de la propuesta de un parque eólico offshore en la Sonda de Campeche. ....	73

## **Índice de Gráficas**

Gráfica 1 Estimación futura del mercado eólico global.....	17
Gráfica 2 Casos de inversión 2016 para un parque eólico offshore en México. ...	63
Gráfica 3 Curva de potencia para 5 MW y 4.1MW.....	67
Gráfica 4 Producción Semestral de energía eléctrica.....	68

# **1 Panorama Mundial del Sector Energético**

## **1.1 Introducción**

El crecimiento en la población, la innovación tecnológica, el consumo energético, la insuficiencia de recursos y la necesidad de comodidad y bienestar, han llevado al ser humano a desarrollar tecnologías para satisfacer la mayoría de sus necesidades. Hoy en día, una de ellas es la que ha acaparado la vista de la mayoría de las naciones tanto desarrolladas como en vías de desarrollo. El sector energético juega un papel muy importante al tener un impacto directo en la calidad de vida que el medio ambiente brinda. Es por eso, que el cambio climático ha hecho necesario que la innovación e implementación tecnológica en el sector energético, haya tenido un crecimiento muy grande en las últimas 2 décadas.

Durante la industrialización, el crecimiento poblacional global ha mostrado una relación con la cantidad de energía utilizada. En los últimos 40 años el consumo promedio de crudo per cápita anual fue de alrededor de 1.5 toneladas de crudo equivalente (tce). Pasando de 1.2 en 1996 a 1.7 por persona en 2006. Los niveles de consumo de energías han llegado a un nivel histórico hoy en día, la producción de éstas se ha incrementado de manera récord con excepción del carbón, y gracias a los descubrimientos en materia de cambio climático, las emisiones de CO<sub>2</sub> en 2014 tuvieron su menor crecimiento desde 1998 (British Petroleum, 2015) .

El costo de las energías no renovables como las anteriormente mencionadas, ha dado como resultado la dificultad de implementar en su totalidad otro tipo de energías, aquellas generadas a partir de recursos renovables. Actualmente hay países desarrollados que invierten en este tipo de soluciones para contribuir a la disminución de gases de efecto invernadero y además, no depender de recursos no renovables como lo es el petróleo. Para 2014, el consumo total energético global de energías renovables abarcaba alrededor de un 27.7% creciendo año tras año a pesar de las fluctuaciones en precio de los energéticos no renovables (Ren21, 2015).

## 1.2 Tipo de Energías No Renovables

### 1.2.1 Fósiles

Las energías fósiles son el carbón, el petróleo y el gas natural; son productos que por aquellas características químicas que tienen se emplean como combustibles. Estos han sido formados naturalmente a lo largo de millones de años por complejos procesos biogeoquímicos y condiciones especiales. Hoy en día representan la fuente número uno para obtención energética global con una tendencia a desaparecer debido a la falta de sostenibilidad en su producción.

Las reservas mundiales del *petróleo* llegaron al final de 2014 a un total de 1700.1 billones de barriles encontrándose la mayor parte en Sudamérica (relación reservas/producción) y el Medio Oriente siendo la segunda. (Ver Figura 1)

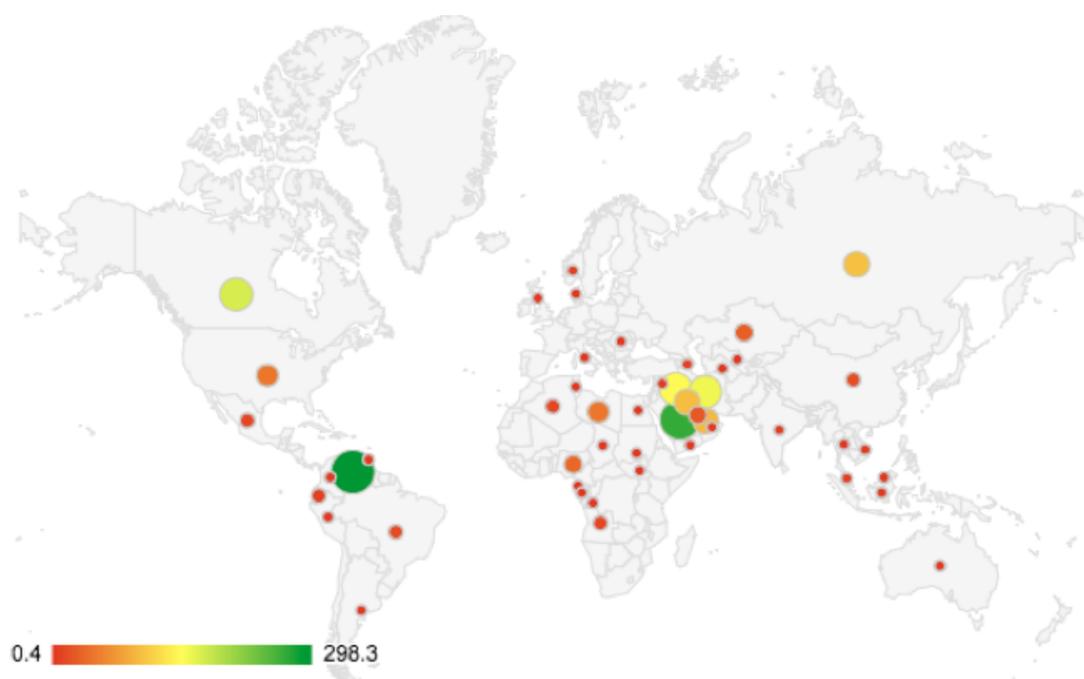


Figura 1 Reservas Mundiales de petróleo 2014, (Fuente: British Petroleum, 2014)

Los países líderes en producción de petróleo en los últimos años son: Estados Unidos, La Federación Rusa y Arabia Saudita. La producción global fue más del doble que la del consumo global, marcando un incremento de

2.1 millones (b/d) por día con respecto al año 2013 y fuera de la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP) de igual manera en 2.1 millones (b/d) siendo el mayor incremento que se ha registrado en la historia. Estados Unidos fue el primer país en donde por 3 años consecutivos produjo al menos 1 millón de barriles por día. Pasando sobre Arabia Saudita como el mayor productor de petróleo.

El consumo global incrementó en 0.8 millones (b/d) siendo un poco más débil con respecto años anteriores. Los países dentro de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económico (OECD por sus siglas en inglés) redujeron su consumo en 1.2% siendo el octavo año consecutivo donde se observa un decremento en el consumo de petróleo.

Los precios del petróleo han tenido un precio promedio previo al 2015 de \$98.95USD comenzando un descenso de \$9.71USD por barril siendo por vez primera desde el 2010 un precio por debajo de los \$100USD por barril. En 2015 el mercado petrolero sufrió un colapso debido a un incremento en la oferta de parte de los países árabes llegando a una baja actual promedio de \$51.06USD (2015-Nov). Siendo definido el 2015 como un periodo donde las economías nacionales basadas en venta y compra de petróleo se ven afectadas de manera dramática. En la Figura 2 se muestran los cambios en el precio del petróleo a lo largo de los últimos años.

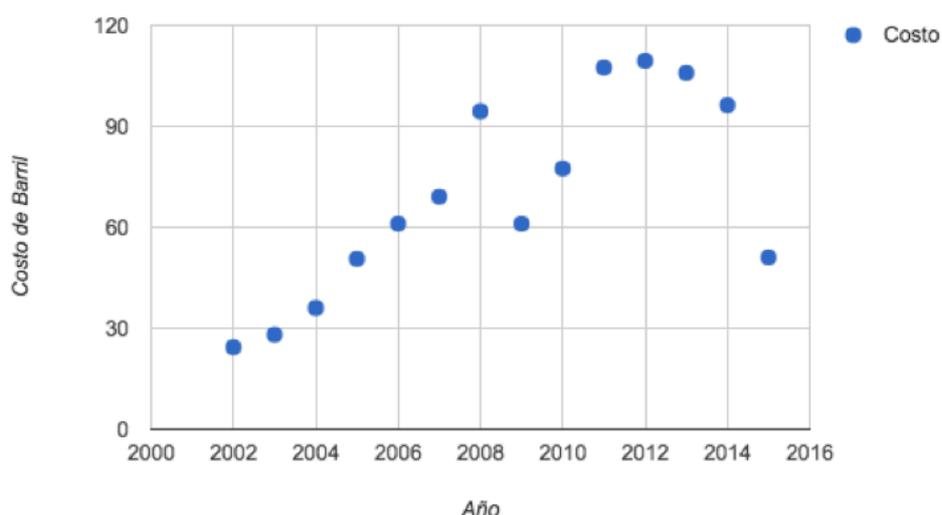


Figura 2 Precio Mundial Histórico del petróleo 2015 en USD (Fuente: Organization of Petroleum Exporting Countries , 2015)

Ahora bien, como se muestra en la Figura 3, el Medio Oriente cuenta con la mayor exportación de crudo (850 millones de Toneladas, 2014). Por otra parte, Europa, China y Estados Unidos son los países/regiones que más importan crudo. Estados Unidos, Medio Oriente y Rusia por su parte representan la mayor exportación mundial de productos derivados de la refinación del petróleo y por última Europa es la región donde más se importan dichos productos.

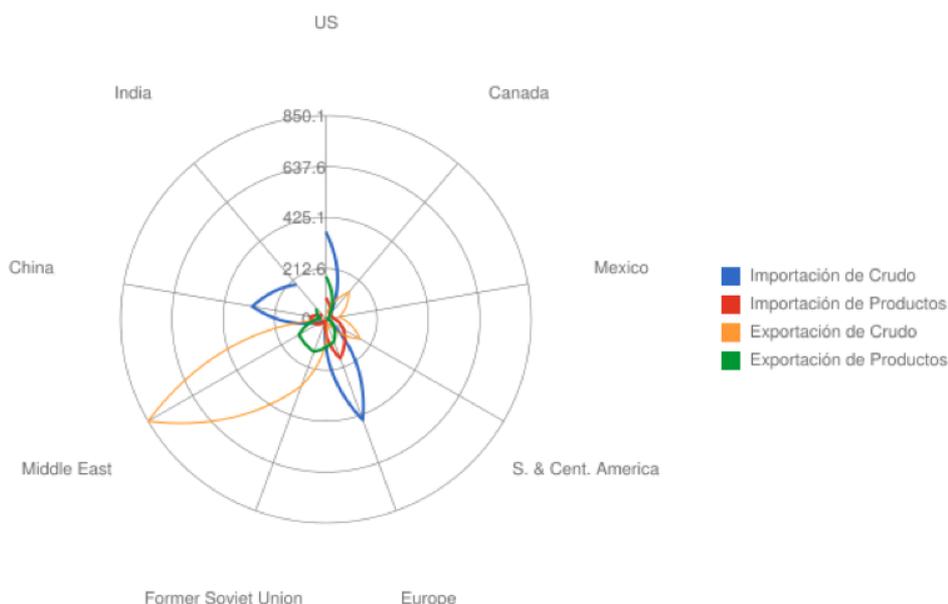


Figura 3 Comercialización Mundial de Crudo en 2014 en Millones de Toneladas, (Fuente: British Petroleum, 2014)

El consumo de *gas natural* en el mundo creció en un 0.4% para 2014, por debajo del promedio de los últimos 10 años donde era de un 2.4%. Tanto la OECD como las economías emergentes mostraron un crecimiento por debajo de su promedio. La Unión Europea mostró un decrecimiento -11.6% estableciendo su punto más bajo en la historia. Los países que mostraron un consumo creciente notable fueron: China 8.6% e Irán 6.8%. Globalmente el gas natural es responsable por el 23.7% de consumo energético.

Las reservas mundiales en su mayor parte están concentradas en Ucrania (32.6 trillones de metros cúbicos  $\text{tm}^3$ ) seguido por Israel ( $34\text{-tm}^3$ ) Siria ( $24.5\text{-tm}^3$ ) Inglaterra ( $17.5\text{-tm}^3$ ), México estando en un puesto intermedio de ( $9.8\text{tm}^3$ ).

La producción creció en un 1.6% para 2014 de igual manera por debajo del promedio de la última década, la única región que marcó un incremento al promedio fue América del Norte, donde Estados Unidos registró un aumento record del 6.1% responsable del 77% del incremento neto anual global.

El comercio Global de Gas Natural Licuado (GNL) incrementó del 2.4%, (2014) con un incremento notable en importaciones por parte de China (+10.8%) y el Reino Unido (+20.1%), la caída más notable fue por parte de España (-15.7%). La participación en el comercio mundial de gas se elevó a 33.4 % (British Petroleum, 2014) .

### **1.2.2 Energía Nuclear**

Este tipo de energía procede de reacciones de tipo fisión o fusión de átomos en los que se libera una gran cantidad de energía. El sistema más usado para este tipo de energías es a partir del átomo de uranio (U-235) que es bombardeado por neutrones ocasionando su ruptura en forma de cadena. Los residuos de este tipo de energía son extremadamente contaminantes y radioactivos aunque en tamaño son menores a los desechos residuales de un ser humano.

La Producción de Energía Nuclear aumentó por arriba del promedio por segundo año consecutivo de 1.8% (2014), primer año desde 2009 en donde la industria nuclear gana participación en el mercado. Los países con un mayor incremento en su producción son: Corea del Sur, Francia y China.

El consumo de energía nuclear está en su mayor parte dominado por Estados Unidos (836 TeraWatt/h) seguido por Francia (435 TeraWatt/h) y Corea del Sur (156 TeraWatt/h).

### **1.3 Tipos de Energías Renovables**

Las energías renovables siguen creciendo hasta un 3% del consumo global energético representando un incremento del 0.9% para el 2015 con respecto al 2014. China registró el mayor incremento en producción de energía renovable por 5º año consecutivo con un crecimiento del 15.1% con respecto al 2014. La energía eólica creció de forma global en un 10.2% (14.8

mtoe) siendo esto menos de la mitad de su promedio de los últimos 10 años. En regiones como África, Centro y Sudamérica, la producción eólica sobre pasó su media, además el porcentaje sumado de estas tres, dio un resultado de aproximadamente 4% de la producción global. La energía solar creció en un 38.2% (11.6 mtoe) y globalmente los biocombustibles crecieron por debajo del promedio 7.4% (4.9 mtoe) (Renewable Energy World, 2014).

### 1.3.1 Celdas Solares

Las celdas solares cuyo propósito es convertir la luz solar directamente en electricidad están hechas de materiales semiconductores principalmente, silicón cristalino el cual puede ser multi o mono cristalino según sea el diseño y propósito de la celda. Cuando los fotones de luz golpean la celda crean un flujo de electrones dentro de la misma dando lugar la generación de una corriente eléctrica.

Generalmente, las celdas solares se acomodan en módulos que contienen en promedio 40 celdas, éstos se montan en una formación de sistemas fotovoltaicos (páneles), los cuales pueden llegar a medir varios metros de lado a lado. Estos sistemas de placa plana son montados a un ángulo fijo viendo hacia el sur o sobre una plataforma que sigue la trayectoria del sol durante el curso del día.

Los sistemas fotovoltaicos conectados pueden ser suficientes para dar energía a uno o más sistemas eléctricos funcionando como uno solo. La demanda del sistema a alimentar determinará el área de celdas necesitadas y por tanto, el número de páneles requeridos, mismo número que se verá influenciado por la eficiencia en conversión (solar/eléctrica) de éstos.

Las celdas solares de película delgada, como la que se muestra en la figura 4, utilizan capas de materiales semiconductores de solo unos pocos micrómetros de espesor. Esta tecnología de película delgada ha permitido que se pueden replicar celdas solares en forma de tejas o fachadas de edificios. Las tejas cabe mencionar ofrecen la misma protección a una casa que una teja regular.



Figura 4 Celda solar de película delgada.

Algunas celdas están diseñadas para operar con luz solar concentrada. Estas celdas están construidas en colectores de luz solar que usan lentes para enfocar la luz a las celdas, esta configuración tiene tanto ventajas como desventajas comparada a la tecnología de paneles regulares. La idea detrás de este diseño es usar la menor cantidad de material semiconductor en las celdas. Al depender de los lentes estos deben de estar montados a un sistema que siga el movimiento del sol mismos que pueden llegar a ser muy complejos, lo cual limita su uso en la industria y edificios grandes, mencionando también que deben ser usados únicamente en las partes mas soleadas del país en donde se planeen usar .

El desempeño de una celda solar es medida en términos de su eficiencia al convertir luz solar en electricidad. Únicamente luz solar de cierta intensidad funcionará eficientemente para crear electricidad. Parte de la luz será absorbida y parte reflejada, típicamente una celda solar tiene una eficiencia del 15%. Una eficiencia baja quiere decir que una mayor área se requiere para producir una cierta cantidad de energía, lo cual incrementa el costo. El reto más grande de la industria fotovoltaica es crear celdas con una mayor eficiencia manteniendo los costos de éstas bajos, por ejemplo la primera celda creada en 1950 mostraba una eficiencia de menos del 4%.

Muchas plantas hoy en día usan combustibles fósiles para producir vapor y hacer girar una turbina, la cual, al girar activa un generador que produce electricidad. Sin embargo, una nueva generación de plantas de energía funcionan usando el calor del sol como principal elemento para calentar agua y producir vapor. Son conocidos como sistemas de concentración de energía solar. Los cuales se dividen en tres sub-clases : canal-parabólico, plato/motor y torre de energía

El sistema de canal parabólico concentra la energía del sol a través de un rectángulo de espejos curvado en “U” como se observa en la figura 5. Los espejos están inclinados en dirección al sol, concentrando toda la energía del sol en un canal central que contiene un tubo con aceite, el cual al calentarse es usado para producir vapor.



Figura 5 Sistema de canal parabólico.

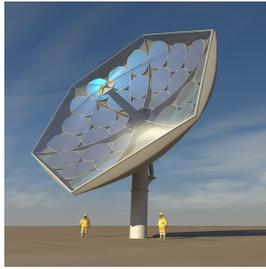


Figura 6 Sistema de plato

El sistema de plato/motor usa un espejo en forma similar a una antena de plato, la energía recolectada es canalizada a través de un receptor, el cual absorbe y transfiere el calor a un fluido dentro de un motor, que al calentarse se expande contra un pistón o turbina produciendo energía mecánica. Esta es usada para activar un generador o un alternador produciendo electricidad (ver figura 6).



Figura 7 Torre de energía.

Una torre de energía tiene un sistema que usa un gran campo de espejos que concentran la energía en la parte superior de la torre, donde un receptor con sal fundida en su interior, una vez calentada se hace pasar a través de un generador de vapor (ver figura 7). La sal fundida retiene el calor de una manera eficiente, de manera que puede ser almacenada por algunos días antes de ser convertida en electricidad. Gran ventaja de este sistema es que puede producir electricidad después de la puesta de sol o en días nublados.

### 1.3.2 Energía Geotérmica

La energía Geotérmica es energía que proviene del centro del planeta. Los recursos de esta energía varían desde subsuelos poco profundos hasta agua caliente o piedras calientes encontradas a algunos kilómetros por debajo de la superficie terrestre. En algunos puntos de la Tierra se puede llegar al magma; mismo calor que nos puede ayudar a producir vapor y generar electricidad o simplemente calentar el aire de una casa.

La mayor parte de las plantas de luz necesitan vapor para generar electricidad. Las plantas geotérmicas acceden a las reservas de vapor que se encuentran varios kilómetros en el subsuelo de la tierra creando 3 diferentes tipos de plantas Geotérmicas: Vapor Seco, Vapor Flash y de ciclo binario.

Las plantas de *Vapor Seco* sacan vapor del subsuelo de la tierra usando las reservas geológicas de vapor. Este vapor es obtenido directamente del subsuelo a través de tuberías que van de los pozos de

vapor subterráneos a la planta donde se direcciona a una turbina o generador. A pesar de que los Estados Unidos tienen varias plantas geotérmicas, solo existe una planta de vapor seco llamada Geysers en California (U.S Department of Energy, 2004).

Las plantas más comunes son las de *Vapor Flash*, estas usan reservas de agua geotérmica de temperaturas mayor a las 182 °C. Esta agua fluye hacia la superficie a través de pozos misma que durante el ascenso sufre cambios de presión haciendo que parte de esta entra en ebullición y el vapor generado se separa de la fase líquida y es direccionado a un generador mientras tanto que el condensado restante es inyectado nuevamente a la reserva haciéndolo un recurso sustentable.

Como se muestra en la figura 8, las plantas de *ciclo-binario* operan en aguas de temperaturas de entre 107 °C - 182 °C. Estas plantas usan el agua caliente para calentar un líquido orgánico llamada líquido de trabajo, el cual tiene un bajo punto de ebullición y es vaporizado en un intercambiador de calor para ser usado como mecanismo de activación para una turbina. El agua es inyectada nuevamente al subsuelo para que sea calentada nuevamente. El agua jamás entra en contacto con el líquido de trabajo.

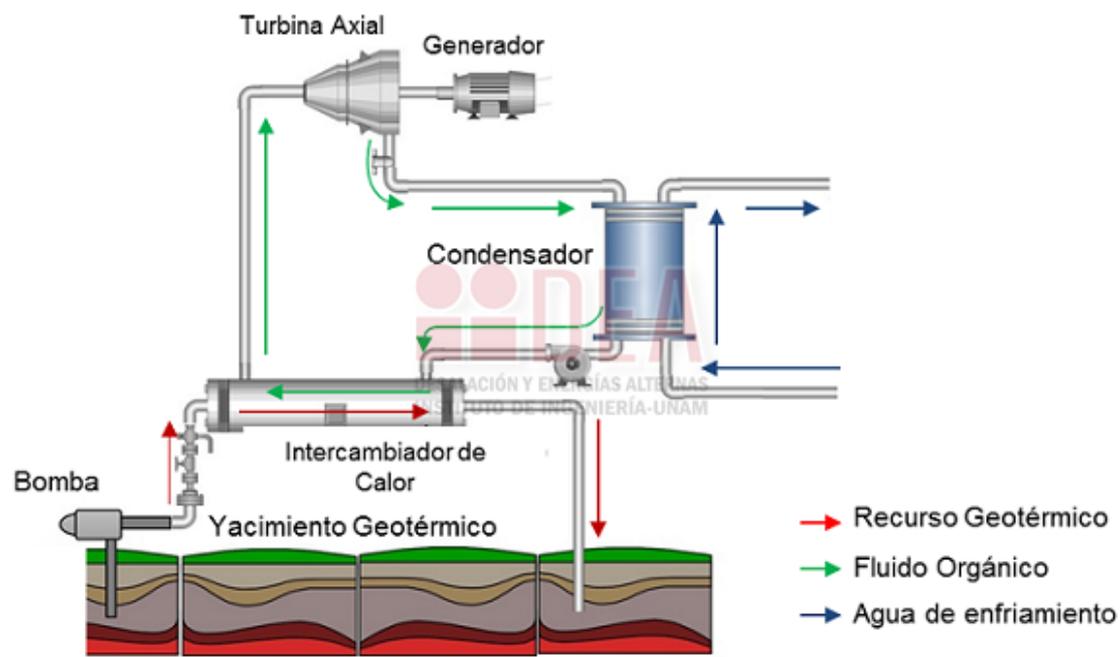


Figura 8 Esquema de una planta de ciclo binario. Fuente: (iiDEA, 2014)

El uso directo de energía geotérmica consiste en únicamente acceder a las reservas de agua caliente del subsuelo de la tierra para ser usada directamente (servicios de agua caliente, intercambiadores, entre otros), después de su uso ser inyectada nuevamente al subsuelo para su recalentamiento.

En casi todas partes, el subsuelo poco profundo (3 m) mantiene una temperatura constante de entre 10 °C y 16 °C. Con *bombas geotérmicas de calor* podemos recolectar este calor que provee el subsuelo para calentar o enfriar edificios y casas.

En Invierno, la temperatura del subsuelo calienta el interior de las casas y en complemento con un sistema de calefacción puede llegar a reducir de manera notable la cantidad de demanda energética que tienen los sistemas de calentamientos. De la misma manera, en verano provee de una atmósfera fresca y cómoda.

### **1.3.3 Bioenergía**

Se ha utilizado la biomasa o bioenergía proveniente de la materia orgánica desde hace miles de años. Esto data desde que se comenzó la quema de leña para hacer una fogata haciendo uso de la bioenergía. Hoy en día a pesar de que seguimos utilizando la leña como nuestro principal recurso de biomasa, podemos usar otros componentes orgánicos para obtener energía tales como: residuos de la agricultura, plantas y componentes orgánicos de la industria de desechos de una ciudad o comunidad.

La biomasa tiene la ventaja que puede ser convertida directamente en combustibles líquidos llamados *biocombustibles*, los más comunes son el biodiesel y etanol. Este último lo obtenemos de la fermenta de cualquier biomasa rica en carbohidratos tales como : celulosa, almidón y azúcar. A través de un proceso similar al de elaborar cerveza. El etanol en su mayoría es usado como aditivo para reducir las emisiones de monóxido de carbono de un vehículo.

El *biodiesel* es obtenido de la combinación de alcoholes (generalmente metanol) con aceite vegetal , grasa animal o grasa reciclada producto de actividades culinarias. Es usado también como un aditivo que

puede llegar a reducir las emisiones por lo general en un 20%. En su forma pura puede ser un combustible alternativo para motores diesel .

Otros biocombustibles incluyen metanol y elementos de la gasolina reformulados. El metanol es producido a partir del gas natural , pero también puede ser producido a través de la biomasa. Existen formas para convertir biomasa en metanol pero la más común es la gasificación, en la cual se gasifica la biomasa a altas temperaturas removiendo impurezas y pasándolo a través de un reactor asistido por la catálisis que lo convierte en metanol.

La *Bioenergía* es usada para la generación de electricidad, ésta se clasifica en : fuego-directo, co-combustión, gasificación, digestión anaeróbica y pirólisis.

La mayor parte de las plantas usan fuego directo en sus sistemas, queman bioenergía directamente con el fin de producir vapor mismo que se usa para producir electricidad; existe la posibilidad que el vapor sea utilizado como elemento directo en un proceso y no como un servicio, por lo que se puede llegar a dividir el vapor generado parte usado para la generación de energía y parte reservado para el proceso como en la industria del papel.

Por otra parte, muchas plantas que generan su vapor a través de carbón pueden usar en conjunto biomasa como fuente auxiliar de energía en sus calderas con el fin de reducir sus emisiones a esto se le denomina co-combustión.

Los sistemas de gasificación usan temperaturas elevadas y ambientes escasos en oxígeno para convertir la biomasa en gas dando una mezcla de hidrógeno, monóxido de carbono y metano. El gas alimenta una turbina de gas, el cual activa un generador .

La descomposición de biomasa, como se muestra en la figura 9, produce gas metano que puede ser usado como fuente de energía, por ejemplo, en rellenos sanitarios se pueden utilizar taladros creando un escape para los gases de la biomasa en descomposición para después usar un sistema de colección y llevar a una central eléctrica. Se puede inducir esta descomposición usando una bacteria que anaerobiamente degrada la biomasa.

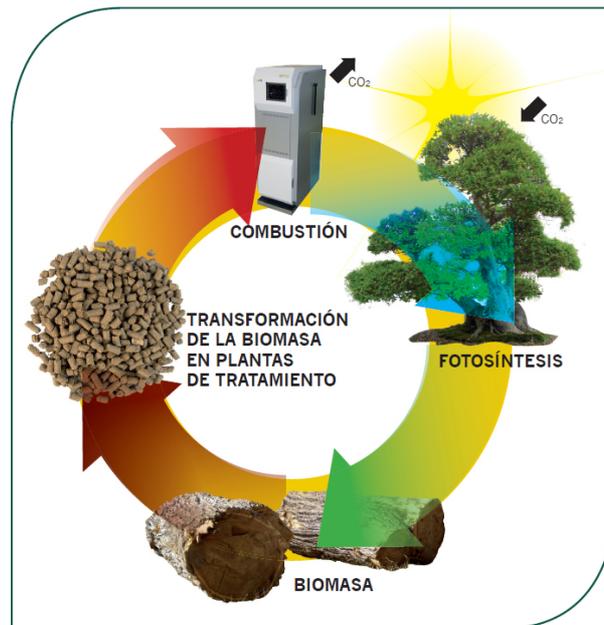


Figura 9 Ciclo de la Biomasa. Fuente: (Hernández, 2013)

Por último, también se utiliza la pirólisis para generar combustibles líquidos calentando la biomasa en ausencia de oxígeno la cual se transforma en aceite de pirólisis y puede ser quemado como combustible para generar electricidad.

### 1.3.4 Hidroeléctrica

El fluir del agua contiene energía que podemos capturar y convertir en electricidad, la forma más típica de una planta hidroeléctrica es la de una presa que se alimenta de un río para almacenar una gran cantidad de agua. Una vez llena la presa se abren cortinas que pasan a través de una turbina, que al girar activa un generador el cual produce energía eléctrica.

Una central hidroeléctrica clásica está dividida en 3 partes:

- Central eléctrica, donde se produce la electricidad.
- Presa, aquella que se abre y cierra para controlar el flujo del agua.
- Depósito, donde se almacena el agua.

El agua que es sostenida por la presa fluye a través de una entrada y ejerce una cierta presión sobre las palas de una turbina ocasionando el movimiento de la misma. La turbina hace girar a un generador para producir la electricidad. La energía hidroeléctrica sigue implementándose y creciendo

a un ritmo más lento que otro tipo de energías renovables como la solar o eólica (Banco Mundial, 2015).

### **1.3.5 Energía Marina**

El océano es capaz de proveer dos tipos de energía: térmica y mecánica, la última proveniente del oleaje marítimo.

Los océanos cubren un 70% de la superficie terrestre, haciéndolos los colectores de energía solar más grandes del mundo, el sol provee de energía a la superficie del océano solo una pequeña porción de ésta puede ser usada para proveer de energía al mundo. Existen 3 tipos de sistemas para poder convertir la energía térmica marítima en energía eléctrica:

- a) Ciclo cerrado.- Usando la superficie caliente del mar en conjunto con un fluido de trabajo de bajo punto de ebullición como sería el amonio, se busca la formación de vapor que al expandirse hace girar una turbina conectada a un generador.
- b) Ciclo abierto.- los sistemas abiertos buscan ebullicir el agua del mar usando sistemas de baja presión pasando a través de una turbina/generador.
- c) Híbrido.- Una combinación de sistemas cerrados y abiertos.

La energía mecánica del océano a pesar de que el sol afecta la actividad marítima, la luna es la responsable en gran parte del comportamiento de las mareas debido a la interacción gravitacional que existe entre la luna y el mar los vientos son responsables primordialmente del oleaje. Como resultado las olas y las mareas son un recurso intermitente a diferencia de la energía térmica marítima la cual se mantiene constante.

Un sistema de barreras es usado primordialmente para convertir la energía proveniente de la marea en energía eléctrica forzando el agua a través de turbinas las cuales activan un generador. Para la conversión de la energía proveniente de las olas hay 3 tipos de sistemas típicamente usados:

- a) Sistemas de canal.- Donde el agua se canaliza a una reserva, la cual hace función de una pequeña presa que

está conectada a un sistema de conversión de energía hidroeléctrica.

- b) Sistemas de boyas flotantes.- Un sistema de boyas interconectadas entre si por medio de sistemas mecánicos a una unidad central que almacena la energía producida por éstos conocidos también como sistemas “calamar” (ver figura 10) (Blain, 2014).

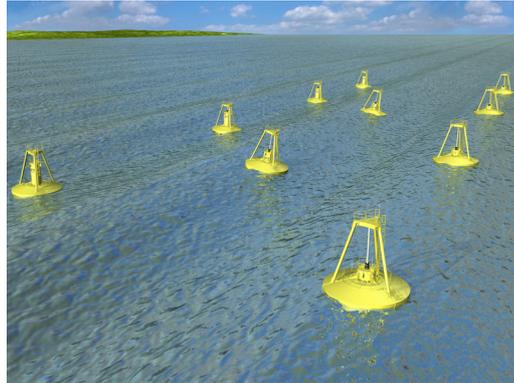


Figura 10 Sistema de boyas flotantes. Campo de prueba de IBERDROLA en España.

- c) Columnas de oscilación de agua.- Las olas comprimen dentro de columnas aire el trabajo mecánico del mismo activa un generador o transfiere la energía a un fluido de trabajo, el cual activa una turbina/generador.

### 1.3.6 Hidrógeno y Celdas

Siendo el elemento más simple, con tan solo un electrón y un protón, es el elemento más basto en el universo a pesar de su simpleza y abundancia el hidrógeno no se da de manera natural en la Tierra y siempre esta combinado con otros elementos, el ejemplo más simple es el agua  $H_2O$ .

El hidrógeno también esta presente en compuestos orgánicos, denotando a los hidrocarbomos mismos que conforman numerosos combustibles como son la gasolina, el gas natural , metanol y propano . La separación de hidrógeno de compuestos orgánicos se da a través de la

aplicación de calor (reformación) . La electrólisis también es un proceso usado para la obtención de hidrógeno a partir del agua .

El hidrógeno es alto en energía y un motor que quema hidrógeno produce una contaminación extremadamente baja. La NASA utiliza hidrógeno líquido como combustible en sus cohetes de propulsión produciendo como agua bio-producto de la quema del mismo.

Una celda de hidrógeno combina hidrógeno y oxígeno para producir electricidad, calor y agua. Las celdas de hidrógeno son a menudo comparadas con baterías ya que ambas convierten la energía proveniente de una reacción química en energía eléctrica utilizable. Con la diferencia que una celda de hidrógeno es capaz de suplir de energía al sistema tanto como hidrógeno sea suplementado al sistema (Renewable Energy World, 2014).

### **1.3.7 Eólica**

Por cientos de años se ha utilizado la energía del viento para actividades de desarrollo humano, como sería el uso de molinos para bombear agua o moler grano . Hoy en día, el equivalente a un molino de viento sería la turbina eólica, la cual usa la energía en el viento para producir energía eléctrica (Desjardins, 2016).

Las inversiones en el mercado global renovable en el 2014 excedieron los 310 billones de USD, el incremento de inversión en el sector energético fue del 11% con respecto a 2013, dando una inversión en 2014 de 99.5 billones de USD contra los 80.3 billones de USD del 2013 (Banco Mundial, 2015).

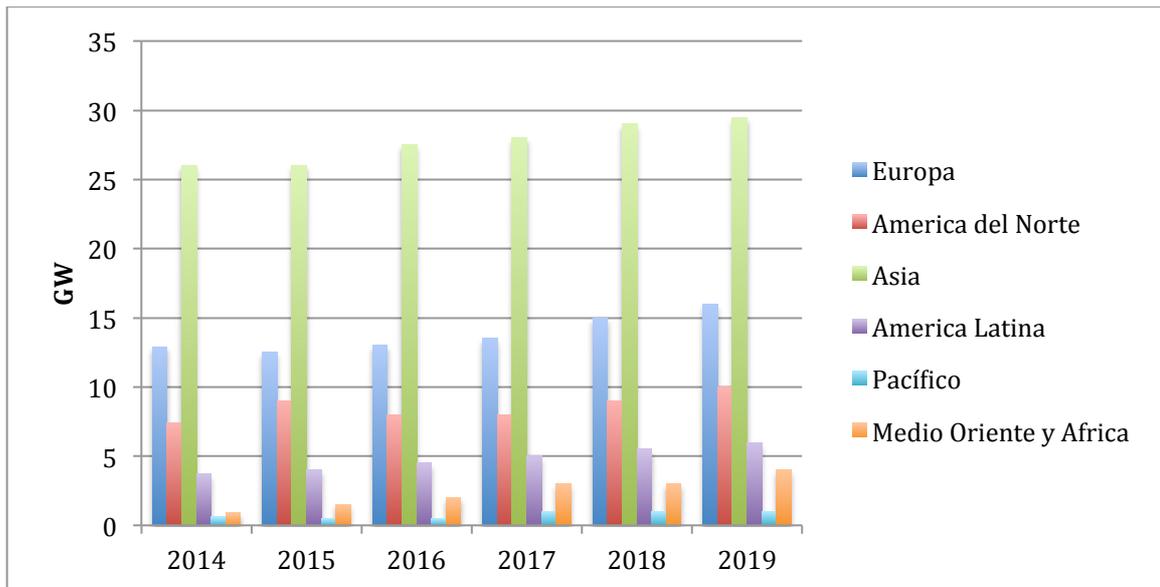
La inversión global cerró el 2014 con 369.6 GW dando un crecimiento acumulativo de 16% aunque por debajo del promedio de los últimos 10 años (23%). Lo anterior se debió a que no se conocía la futura participación de Estados Unidos y que Europa se encontraba en una importante desaceleración económica, ambos pudiendo representar 47 GW del mercado; por otro lado, no se esperaba el agresivo crecimiento del mercado Chino.

China es el mercado más grande de fuentes eólicas desde el 2009, ocupando el primer lugar en 2014 de generación. Las instalaciones en Asia lideran el mercado siendo Europa el segundo lugar y el norte del continente americano en el tercer lugar. La mayor parte de las instalaciones globales cayeron fuera de la OECD.

Para finales de 2014, un número de países tienen ya una capacidad instalada de más de 1,000 MW de los cuales, 16 se encuentran en Europa; 4 en Asia y Pacífico (China, India, Japón y Australia) 3 en Norte América (Canadá, México, US) y 1 en Sudamérica (Brasil). También al final del 2014 seis países tuvieron una capacidad instalada de más de 10,000 MW incluidos: China (114,604 MW), Estados Unidos (65,879 MW), Alemania (39,195MW), España (22,987MW), India (22,465 MW) y Reino Unido (12,440MW) (Banco Mundial, 2015).

La visión a futuro da un panorama complejo a través de varias regiones, es muy probable que 2015 sea buen año, ya que el plan de trabajo Europeo y los objetivos a alcanzar en 2020, aseguran estabilidad en esta región; Estados Unidos y Canadá también prevén un buen año y China se espera que siga creciendo de manera dominante. Los mercados emergentes también esperan un crecimiento.

Para el 2015 se esperan crecimientos fuertes de México, Brasil, Canadá y Estados Unidos como se puede apreciar en la gráfica 1. La instalación global será asistida por nuevos proyectos desarrollados en Japón, Australia, Pakistán, Kenia y Sudáfrica. Más de 934MW vinieron de África en 2014 (Global Wind Energy Council, 2015).



Gráfica 1 Estimación futura del mercado eólico global. Fuente: Elaboración propia

Ahora bien, a pesar de haber tenido un gran crecimiento en los últimos años, la energía eólica offshore está ganando terreno dentro de este tipo de energía renovable por su menor impacto y mejor calidad de vientos. Alrededor del 91% (8,045 MW para 2014) de energía eólica offshore está instalada en Europa (GWEC, 2014).

## 2 ESTUDIO DE ESQUEMAS REGULATORIOS DEL SECTOR EÓLICO OFFSHORE

### 2.1 Introducción

Para poder desarrollar un proyecto de un parque eólico mar adentro u offshore, se necesitan entender claramente ciertos puntos, tales como saber la calidad del suelo marino, dirección de los vientos, costo de la inversión, uso de aguas, entre otros. Las normas que legislan la instalación de este tipo de tecnologías marítimas, van a variar dependiendo del país y su desarrollo energético. Debido a que más de una decena de países cuentan con este tipo de legislaciones para generación energética renovable, el trabajo se delimitará a comparar a cuatro de los principales países generadores offshore (China, Dinamarca, Reino Unido y Suecia) y cómo esas legislaciones pueden ser aplicadas en las costas mexicanas.

## 2.2 Dinamarca

Dinamarca es un país líder en la creación de parques eólicos offshore contando con la mayor cantidad de energía generada hoy en día gracias a sus parques eólicos. Es el primer país que desarrolló la energía eólica mar adentro en 1991 y el cual ha ido evolucionando y mejorando la generación eléctrica con el paso de los años. Se tiene proyectado que la mitad del consumo energético total del país provenga solamente de molinos de viento (onshore y offshore) para 2020 (Ea Energy Analyses, 2007).

Como describe el gobierno danés (Nielsen, 2011), los parques eólicos offshore son regulados por un Acto que establece la cantidad de licencias que se necesitarán para un proyecto de este tipo, siendo 3, estas son otorgadas por la Agencia de Energía Danesa (AED), la cual sirve como reguladora y relaciona a quienes desarrollarán el proyecto con los futuros inversionistas. Las licencias son las siguientes:

- Licencia para investigaciones previas
- Licencia para establecer las turbinas de un parque eólico offshore (esta solo se da si las investigaciones preliminares demuestran que el proyecto es compatible con los intereses relevantes)
- Licencia para explotar la energía eólica por una cierta cantidad de años.

Si las 3 licencias son aceptadas, todo proyecto debe de tener un oficio de estudio de impacto ambiental (EIA) donde se detallarán los impactos directos e indirectos al ambiente. Este oficio esta regulado por una orden que incluye las regulaciones impuestas a los impactos ambiental europeos (EU EIA directive 97/11/1997). Una vez cubierto estos puntos, se debe seguir la regulación para establecer las turbinas de viento siguiendo dos posibles procesos: uno de licitación gubernamental dirigido por la AED; o un proceso a puertas abiertas. En ambos procesos se deben de obtener las 3 licencias.

La licitación dirigida es enfocada en presentar un proyecto de cierta magnitud establecida; por ejemplo la generación de 200 MW, abarcando una cierta región del mar. A continuación se realiza la invitación a la licitación a quienes estén interesados en invertir en el proyecto; la invitación variaría según la naturaleza del proyecto. Una vez hecho lo anterior, la AED invita a los participantes a dar una oferta de costos a los cuales están dispuestos a producir energía eléctrica calculado con una tasa fija de producción por cierta cantidad de energía establecida en número total de horas trabajadas. Los precios varían de proyecto a proyecto dependiendo de la localización, las condiciones ambientales, la situación de competitividad, etc. En todos los proyectos es importante recalcar que existe una organización danesa encargada de toda la infraestructura eléctrica del país y actúa de forma independiente; por lo que ésta será la encargada y será dueña de mantener la estación de transformación eléctrica y el cableado eléctrico submarino que el parque conlleve.

En el proceso a puertas abiertas, la persona que quiere desarrollar el proyecto proporcionará la información de la posible área y del posible tamaño del parque eólico. El trámite se lleva por medio de una solicitud para realizar una investigación previa para el proyecto. Esta solicitud debe contener una descripción del proyecto, una investigación preliminar, el tamaño y número de turbinas, y los límites demográficos del mismo. El desarrollador del proyecto será el encargado de pagar la transmisión de la energía eléctrica a tierra.

Antes de que sea procesada cualquier solicitud, AED se encarga de verificar que no haya algún impedimento que pueda llegar a bloquear el proyecto. En caso de que no haya ninguno, la AED otorgará un permiso para las investigaciones preliminares. Dinamarca cuenta ya con un programa de futuros parques eólicos a desarrollar. Un proyecto a puertas abiertas no podrá ser desarrollado si ya está programada la construcción de uno en alguna de las zonas registradas (Nielsen, 2011).

### **2.3 China**

China es un país en continuo crecimiento donde la mayoría de su energía proviene de recursos no renovables como el petróleo y el carbón. A la fecha, se ha dedicado a invertir en parques eólicos en tierra contando con una capacidad de 75 GW. El deseo de este país a seguir invirtiendo en un futuro sustentable y diversificar su uso energético, lo han llevado a querer tener un mayor crecimiento en parques eólicos offshore.

La política energética offshore en China es relativamente nueva basándose en el sistema inglés. No es de esperarse, que el mismo gobierno chino necesite tener más claro los costos de este tipo de proyectos como los pasos a desarrollarse. Gracias a esto, la legislación sobre energéticos offshore en China, ha tenido cierta evolución en los últimos años. En 2011 se estableció en principio, que todo parque eólico mar adentro debía estar localizado no menos de 10 km de la orilla y en aguas de no más de 10 m de profundidad si la distancia de orilla a mar adentro era menor a los 10 km (GWEC, 2012).

Para poder seguir desarrollando sus proyectos offshore, China ha establecido un sistema político básico para la energía eólica mar adentro. La Ley de Energía Renovables (REL por sus siglas en inglés), el sistema consiste en planear y desarrollar, incentivos económico-políticos, política relacionada a la conexión eléctrica y estándares técnicos para la generación de energía eléctrica por medio de parques offshore. Este sistema se espera siga evolucionando con el tiempo propiciando mejor soporte a la industria. En la figura 11 se presenta el proceso de desarrollo de un parque eólico mar adentro en China.



Figura 11 Proceso para otorgar permiso de desarrollo para un parque eólico offshore en China (Fuente: Innovación Noruega 2013).

Finalmente, el desarrollo de este tipo proyectos en China es mayormente monopolizado por 8 grandes empresas paraestatales. Algunas de estas empresas, están caracterizadas ya por contar con desarrollos de parques eólicos en tierra y obtención de petróleo. Además, no es de sorpresa que debido a los altos costos para el desarrollo de estos parques mar adentro, el mercado sea dominado por el mismo gobierno, el cual también se beneficia de la ayuda brindada por el Banco de Desarrollo Chino. Sin importar lo anterior, existen desarrolladores minoritarios intentando hacerse un lugar en el mercado offshore a pesar de encontrarse con la pesada y no tan desarrollada normatividad china. (Wyatt, Al-Karim, & Rhodri, 2014).

## **2.4 Suecia**

La forma de estructuración de empresas energéticas en Suecia ha cambiado en las últimas 2 décadas. A lo largo de la desregulación que tuvo el país, en 1991 había 8 grandes empresas y otras 256 independientes encargadas de la energía eléctrica del país. Para 2010, había solamente 3 grandes compañías comprendidas por, Vattenfall, E.ON y Fortum. Durante el mismo periodo, grandes industrias como, SCA (Empresa Sueca de Celulosa), Stora Enso, y ABB (Grupo ASEA, Brown, Boveri & Cie), vendieron sus plantas (Högselius & Kaijser, 2009).

El Consejo de Administración Sueco es el encargado de autorizar los proyectos de energía eólica offshore en el país, y es por eso que tiene un papel importante en la obtención de los permisos requeridos; aunque, la Corte del Medio ambiente sueca es aquella que tiene la decisión final de un permiso relacionado con el hábitat. Por el momento, el gobierno sueco está intentando optimizar el proceso de este tipo de proyectos estableciendo una Autoridad de Planeación Marítima (Havplanerings myndighet en sueco). Una vez establecida esta organización, se espera tenga un impacto en como son planeados y el tiempo de realización que tienen los proyectos de energía limpia mar adentro.

Los permisos requeridos para la planeación de un proyecto offshore se enlistan de la siguiente manera:

1. Permiso según el Código Sueco del Medio Ambiente
  - Obtener el permiso de acuerdo al propietario. En caso de ser el gobierno se obtendrá por medio de la Agencia de Servicios Administrativos, Financieros y Legales de Suecia. En caso de ser privado se podrá comprar esta propiedad. Este permiso solo podrá ser obtenido si la autoridad local ha aprobado el proyecto.
2. Documento detallado sobre la planeación del proyecto
  - Aquellos proyectos que ya hayan cumplido con el código anterior, no necesitarán este documento. La excepción aplicará solo si hay competencia por el área a explotar.
3. Permiso según la Ley de Electricidad y Uso del Derecho de Propiedad
  - Investigación sobre el lecho marino y como serán distribuidos los cables en las Aguas Territoriales de Suecia o en la Zona Económica Exclusiva de Suecia según los requerimientos acordados en la Ley de Plataforma Continental. Este permiso es otorgado por el Gobierno Sueco.
4. Permiso según la Ley de Electricidad y Uso del Derecho de Propiedad
  - Este permiso se necesitará para la instalación del uso de electricidad. Además, incluirá una Evaluación de Impacto Ambiental (EIA). Se obtendrá de acuerdo a la organización encargada de los mercados energéticos en Suecia. En caso de necesitar pasar por la propiedad de terceros para el cableado, se aplicará un permiso de acuerdo a la Ley de Uso de Derecho de Propiedad.
5. Investigación hidrográfica, de excavación y de infracción de áreas protegidas.

- Solo será requerido si se planea una investigación de este tipo. Una investigación hidrográfica requiere el permiso de la Fuerza Armada de Suecia según el Acto de protección de paisajes. La excavación requiere ya sea una notificación o un permiso de acuerdo a la ley sueca. Si se desea hacer un proyecto en algún área protegida, se necesitará un permiso especial otorgado por la junta administrativa de la zona.

#### 6. Permiso según el Acto de Herencia Cultural

- Permiso otorgado como el de infracción de áreas protegidas, a través de la junta administrativa de la zona.

#### 7. Permiso según el Acto de la Zona Económica Exclusiva de Suecia

- El permiso será requerido para la construcción y el uso comercial del área, como la generación de energía eléctrica por medio de turbinas eólicas offshore, dentro de la ZEE. Este permiso requiere una Evaluación de Impacto Ambiental.

Finalmente, Suecia es capaz de compartir este tipo de proyectos con inversionistas que así lo deseen. El país desde 2003, cuenta con: el apoyo de la Agencia de Energía Sueca para alentar este tipo de proyectos con un programa de inversión, con objetivo del desarrollo tecnológico a grande escala. Este tipo de soporte financiero solo es otorgado a proyectos que contribuyan con los objetivos programados. Se espera que el país genere alrededor del 50% de su consumo total energético a partir de energías renovables para 2020 (Swedish Institute, 2013).

## **2.5 Reino Unido**

La capacidad energética proveniente de fuentes renovables en el Reino Unido ha crecido de tal manera que ha sobrepasado, desde 2008, en generación por medio de energía eólica offshore a Dinamarca. Gran Bretaña ha logrado seguir en continuo crecimiento y desarrollo de obtención energética sustentable gracias a las regulaciones por las cuales es

distinguido el país. La construcción de los parques eólicos mar adentro ha tenido lugar gracias a cómo se ha planeado el desarrollo de los mismos. Hoy en día han sido 3 etapas las que han tenido lugar en el país para el desarrollo de nuevos parques eólicos.

Los proyectos de energía eólica se empezaron a llevar a cabo cuando la Asociación Británica de Energía Eólica junto con "The Crown Estate" (organización semi-independiente ligada al gobierno británico encargada de las costas del país entre otras cosas) decidieron colaborar para generar energía eólica a partir del viento en las costas del país. Una vez conformada esta alianza en 1998, se comenzaron a desarrollar los planes para futuros proyectos de energía limpia. La primera ronda de desarrollos tuvo lugar en el 2000 y fue el comienzo del desarrollo comercial offshore del país. En esta etapa se delimitó que los parques eólicos que se construirían tendrían un máximo de 10 km<sup>2</sup> de tamaño y un máximo de 30 turbinas. Las localizaciones de dichos proyectos fueron propuestas por los inversionistas a través de la entrega de diferentes permisos y aplicaciones. En total hay 12 parques eólicos offshore ronda 1 que hoy en día funcionan en el país.

Siendo la primera ronda de donde se aprendió para mejorar estos proyectos como la dificultad para obtener los permisos adecuados, se llevó a cabo una segunda ronda de proyectos donde se amplió el tamaño otorgado para la construcción de los parques eólicos. Los resultados fueron anunciados en 2003 con un total de 15 proyectos con una capacidad de generación eléctrica de 7.2 GW, 6 veces mayor a la primera ronda que tuvo una capacidad total de 1.2 GW. En 2010, The Crown Estate otorgó un permiso de ampliación para 7 parques eólicos de las rondas 1 y 2 (Shankleman, 2015).

El organismo gubernamental del Reino Unido encargado de valorar la energía offshore en el país (SEA por sus siglas en inglés), publicó en Enero de 2009 las que serían posibles localizaciones para el desarrollo de futuros parques eólicos en el país con un potencial de generar juntos 33 GW. Esto dio comienzo a la ronda 3 de programas de parques eólicos que se esperan comiencen la construcción a mediados de esta década. Debido a que es el

gobierno quien presenta la locación a explotar, se espera que estos tengan una alta aceptación una vez hechos los estudios pertenecientes; estos serán los siguientes (BVG Associates).

- Estudio del Medio Ambiente.- Este tipo de estudio espera mostrar la distribución, densidad, diversidad y el número de las diferentes especies en el lugar. Presentarán el impacto que tendrá el parque eólico al medio ambiente.
- Estudio de la Costa Marina.- Este estudio examinará el impacto del parque eólico respecto a la sedimentación y erosión de la línea costera.
- Estudio de Estación Meteorológica.- Se llevarán a cabo estudios del clima donde se espera se construya el parque eólico. Se estudiarán los aspecto meteorológicos y oceanográficos del sitio.
- Estudio de Lecho Marino.- Se analizará el lecho marino para asegurarse de sus condiciones y características.
- Estudio de Diseño e Ingeniería.- FEED por sus siglas en inglés, serán estudios realizados para medir los parámetros como lo es el tamaño de la turbina, conexión eléctrica, optimización del espacio, entre otros.
- Estudio de Impactos a Humanos.- Se buscará ver que tipo de impacto tendrá el parque eólico a alguna comunidad que viva cerca del área. Esto incluye impacto visual y de ruido, así como infraestructura (puertos).

El Reino Unido es un país que aún tiene mucho por crecer en materia de energéticos renovables debido a su compromiso con la Unión Europea. A comienzos de 2015, se reportó que el país estaba por debajo de sus objetivos establecidos de generar 15% del total de su consumo energético a partir de energías renovables para 2020 (Evans, 2015).

## **2.6 México**

México es un país ambicioso en el sector energético y se destaca por ser un país en el que se espera un gran crecimiento de generación eléctrica por medio de fuentes no fósiles o verdes. El sector energético ha tenido cambios

en el último par de años debido a la modernización y creación de reformas que lo favorecerán a pesar que no estén estrictamente enfocadas a energías renovables. El país generó para 2012 alrededor de 14.9% de energía eléctrica a partir de fuentes renovables y hasta junio de 2014 ya superaba el 20% de consumo energético eléctrico limpio (Costanzo, 2015).

Definir los parámetros de las legislaciones mexicanas sobre los parques eólicos offshore no es algo claro debido a la carencia de las mismas. Para poder entender que se requiere realizar (hipotéticamente hablando) para la construcción de un parque eólico mar adentro, se necesitaría tener un preámbulo de cómo lo son las normatividades para el uso de aguas nacionales y por ejemplo para plataformas de extracción de petróleo.

En México, el uso de las aguas nacionales puede tener realmente un uso económico debido a lo establecido en el Reglamento de Trabajos Petroleros expedido en 1958. En él se observan dos puntos bastante generales en el artículo 1º y 4º sobre el uso de la plataforma continental y a quién se deberán de dirigir los permisos, por lo que se puede partir de que,

- El Artículo 1º habla sobre las obras o trabajos que requerirán permisos establecidos en el presente reglamento incluyendo aquellos realizados [...] *en la plataforma continental o en los zócalos submarinos de las islas, que sean utilizadas directa o indirectamente en la explotación petrolera [...]*. Este primer artículo hace referencia también a que [...] *plantas de almacenamiento y distribución de productos [...]* necesitarán de un permiso previo de la Secretaría del Patrimonio Nacional.
- El Artículo 4º aborda el tema de a quién se deberá solicitar este tipo de permisos, dejando como establecido que [...] *deberán presentarse a la Secretaría del Patrimonio Nacional, a través de sus Dependencias encargas de recibir y estudiar esas solicitudes [...]*

Viendo que hay un preámbulo legislativo de la zona marítima nacional, se puede analizar cómo funciona el uso, explotación y exploración de las aguas nacionales.

La Ley de Aguas Nacionales (LAN), publicada en 1992 y reformada por última vez en 2014 en el DOF, deja una idea más clara de cómo se podrían utilizar las aguas nacionales para uso y a qué organismos (algunos de ellos), se tendría que dirigir un proyecto de este tipo. Cabe mencionar que esta ley hace referencia a las “aguas marinas” como a “las aguas en zonas marinas” no a la zona marítima como tal.

Grosso modo, esta ley deja en claro que cualquier proyecto que tenga como fin el uso, explotación o exploración de un cuerpo de agua, ya sea lago, río, mar, etc; se tendrá que reportar a la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) lo correspondiente y de ser necesario, está contactará al competente del Ejecutivo Federal por medio de la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), para proyectos de ley, reglamentos, decretos y acuerdos que le sean relativos al sector.

CONAGUA es un organismo desconcentrado de la SEMARNAT encargado del cuidado y administración de las aguas de la nación. Este organismo tiene un papel muy importante debido a que es el que se encarga de los impactos que se tienen en las aguas nacionales. Si se analiza la LAN, se puede observar cómo está, de entre varias cosas, se encarga de:

- *Administrar y custodiar las aguas nacionales [...]*
- *Analizar y resolver con el concurso de las partes que correspondan, los problemas y conflictos derivado de la explotación, uso, aprovechamiento o conservación de las aguas nacionales [...]*
- *Proponer al Titular del Poder Ejecutivo Federal la expedición de Decretos para el establecimiento, modificación o extinción de Zonas de Veda y de Zonas Reglamentadas para la Extracción y Distribución de Aguas Nacionales y para su explotación, uso o aprovechamiento [...]*

- Otorgar concesiones y asignaciones dejando establecido que por [...] *la explotación, uso o aprovechamiento de las aguas nacionales se realizará mediante concesión o asignación otorgada por el Ejecutivo Federal a través de la CONAGUA [...]*

Por otra parte, se tiene el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) que es una unidad autónoma adscrita directamente a la CONAGUA y de suma importancia para el desarrollo de cualquier parque eólico ya sea en tierra o en el mar, el SMN será el encargado de:

- [...] *interpretar y difundir la información meteorológica, su análisis y pronóstico, que se consideran de interés público y estratégico [...]*

No solo se tiene a la CONAGUA formando parte de la normatividad de las aguas nacionales en la LAN, sino que se pueden encontrar en otras leyes de la nación diferentes organismos gubernamentales con jurisdicción en el uso de las zonas marítimas de la nación, generación de energía, modificación de la legislación, como lo son (Páez, 2009):

- Comisión Federal de Electricidad (CFE) encargada de *organizar y dirigir un sistema nacional de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica, basado en principios técnicos y económicos, sin propósitos de lucro y con la finalidad de obtener con un costo mínimo, el mayor rendimiento posible en beneficio de los intereses generales,* (CFE, 2014).
- Comisión Reguladora de Energía (CRE) encargada de *manera autónoma, transparente y eficiente orientar los intereses de los usuarios y sujetos regulados al desarrollo de un mercado energético competitivo y sostenible, en beneficio de la sociedad,* (CRE, 2015).
- Secretaría de Energía (SENER) encargada de *conducir la política energética del país, dentro del marco constitucional vigente, para garantizar el suministro competitivo, suficiente, de alta calidad, económicamente viable y ambientalmente*

*sustentable de energéticos que requiere el desarrollo de la vida nacional, (SENER, 2014).*

- Secretaría de la Marina (SEMAR) encargada de *emplear el poder naval de la Federación para la defensa exterior y coadyuvar en la seguridad interior del país; en los términos que establece la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, las leyes que de ella derivan y los tratados internacionales, (SEMAR, 2012).*
- Secretaría de Gobernación (SEGOB) encargada de *contribuir a la gobernabilidad democrática y el desarrollo político de México a través de una buena relación del Gobierno Federal con los Poderes de la Unión y los demás niveles de gobierno para garantizar la seguridad nacional, la convivencia y el bienestar de los mexicanos en un Estado de Derecho, (SEGOB, 2015).*

Sin duda alguna, todas estas secretarías antes expuestas, estarían involucradas en cualquier proyecto de parque eólico offshore. Ahora bien, se debe ir a algo más particular para poder entender cómo funciona la legislación de energías renovables en el país; eso se explica en la “Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética” o bien LAERFTE por sus siglas. Esta ley fue publicada en el Diario Oficial a finales de 2008.

Esta ley fue un gran avance para las energías renovables en México, aunque tardó en comparación a países desarrollados, debido a que en ella se regula el aprovechamiento de fuentes de energía renovable y tecnologías limpias para generar electricidad; cabe destacar que en ella no se menciona específicamente la energía eólica obtenida por turbinas en el mar, pero sí cómo se regula la energía eólica onshore y qué organismos le son más competentes a su desarrollo.

Para propósitos de este proyecto se consideraron 4 puntos de interés que tiene esta Ley y su posible aplicación en un parque eólico mar adentro los cuales son:

- En el capítulo II, artículo 6º, apartado VI, corresponde a la Secretaría de Energía *Establecer y actualizar el Inventario Nacional de las Energías Renovables, con programas a corto plazo y planes y perspectivas a mediano y largo plazo [...]*
- En el capítulo II, artículo 7º, apartado I, V y VI respectivamente, la Comisión Reguladora de Energía tendrá las atribuciones siguientes:
  - *Expedir las normas, directivas, metodologías y demás disposiciones de carácter administrativo que regulen la generación de electricidad a partir de energías renovables [...]*
  - *Expedir las metodologías para determinar la aportación de capacidad de generación de las tecnologías de energías renovables al Sistema Eléctrico Nacional.*
  - *Expedir las reglas generales de interconexión al Sistema Eléctrico Nacional que le deberán proponer los Suministradores.*
- Capítulo III, artículo 21, establece que *Los proyectos de generación de electricidad a partir de energías renovables con una capacidad mayor de 2.5 MW, procurarán:*
  - *Asegurar la participación de las comunidades locales y regionales [...]*
  - *[...] pagar arrendamiento a los propietarios de los predios o terrenos ocupados por el proyecto de energía renovable [...]*
- Capítulo IV, artículo 31, establece que *El Ejecutivo Federal diseñará e instrumentará las políticas y medidas para facilitar el flujo de recursos derivados de los mecanismos internacionales de financiamiento relacionados con la mitigación del cambio climático.*

La legislación mexicana correspondiente no parece sencilla a tratar, esto se debe a la falta de desarrollo sustentable del país y a no apostar por un país más independiente de energías fósiles; es por eso, que a pesar de no ser una reforma enfocada en energías renovables, la nueva Reforma Energética puede tener un impacto positivo en ellas.

Si se analiza esta Reforma y qué puntos se deben considerar de ella en la futura creación de parques eólicos mar adentro, los siguientes pueden ser de gran ayuda para impulsar este tipo de proyectos que no solo favorecen al ambiente, sino a la economía del país,

- La reforma al Sector Eléctrico donde ahora el artículo 27 permite la participación de particulares en la generación de electricidad agrandando la oferta eléctrica.
- El estado mantendrá, en exclusividad, el control del Sistema Eléctrico Nacional, así como todo servicio público de las redes de transmisión y distribución.
- La Reforma favorecerá a la inversión y el crecimiento en energéticos limpios y su desarrollo tecnológico, así mismo como la adopción de fuentes de energía renovable y menos contaminantes como la solar, eólica, etc.

Como se entiende, no hay una sola ley u organización gubernamental encargada de explicar cómo se podría desarrollar un parque eólico offshore en el país. México necesita de inversión en el sector energético y aun más en el desarrollo de energías y tecnologías sustentables, ya que el uso indiscriminado de energías fósiles lo han vuelto altamente dependiente de las mismas, sumando que su extracción y obtención es cada vez más costosa.

Ahora bien, si se sintetiza un poco lo anteriormente dicho, se puede ver que el siguiente cargo e instituciones gubernamentales son de gran importancia para establecer los parámetros de un parque eólico mar adentro,

- Titular del Ejecutivo Federal
- CRE
- CFE
- SEGOB
- SENER
- SEMAR
- SEMARNAT

- CONAGUA
  - SMN

Si se busca información en alguna ley, reforma, reglamento o decreto sobre el uso de aguas nacionales, obtención de energía, impactos ambientales, entre otras, sería importante tomar en cuenta las siguientes de entre algunas otras:

- Ley de Aguas Nacionales.
- Ley Para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transacción Energética.
- Ley Federal del Mar.
- Reforma Energética.
- Reglamento de Trabajos Petroleros.

## **2.7 Diferencias Regulatorias Entre los Países**

Teniendo un preámbulo de lo que sucede en países altamente desarrollados no solo económicamente, sino energéticamente, es posible aportar un breve análisis, como el mostrado en la tabla 1, sobre aquellos puntos que se deben de considerar importantes en este tipo de regulaciones offshore. México es un país que cuenta ya con estudios de impacto gracias a su desarrollo petróleo costa adentro; sin embargo, no se cuenta con el desarrollo necesario para impulsar un proyecto de esta magnitud.

Tabla 1 Comparación de los países y el desarrollo de sus proyectos.

País/Rubro	China	Dinamarca	Reino Unido	Suecia	México
<b>Cuenta con un organismo encargado de los trámites para proyectos eólicos.</b>	<b>X</b>	✓	✓	<b>X *</b>	<b>X</b>
<b>Realiza estudios de impactos ambientales en proyectos de parques eólicos.</b>	✓	✓	✓	✓	✓
<b>Cuenta actualmente con proyectos offshore futuros planeados.</b>	✓	✓	✓	✓	<b>X</b>
<b>Pueden invertir empresas no gubernamentales en proyectos de energía eólica.</b>	<b>X **</b>	✓	✓	✓	✓

\*Está en vías de desarrollo la futura organización

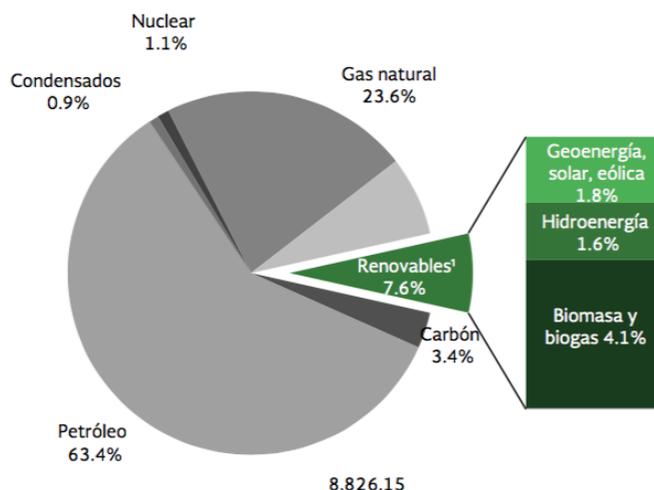
\*\*Se considera que no debido a que el gobierno tiene un control estricto sobre inversión de fuera.

### 3 PANORAMA DE LA INDUSTRIA EOLICA EN MÉXICO

#### 3.1 Introducción

El sector energético mexicano ha ido cambiando con el paso de los años y con el crecimiento poblacional. En los últimos años se ha tenido una disminución en la producción energética del país y un aumento en su consumo; más aún, que para 2013 la producción y el consumo lograron alcanzar un punto de equilibrio. Para 2014, el consumo per cápita logró disminuir un 4.6% menos que en 2013.

México es un país de energías fósiles, tan así que, de la producción total de energías (8,826.15 PJ), poco más del 90% proviene de recursos no renovables siendo el petróleo acreedor del 63.4%. En general, la producción de energía primaria en el país terminó con un 2.1% menos respecto a 2013. Solamente el 7.6% provino de energías renovables y esto se ve explicado de manera gráfica en la figura 12. (Secretaría de Energía, 2015).



Fuente: Sistema de Información Energética, Sener.

¹Incluye grandes hidroeléctricas

Nota: Todos los porcentajes son respecto al total de la producción de energía primaria.

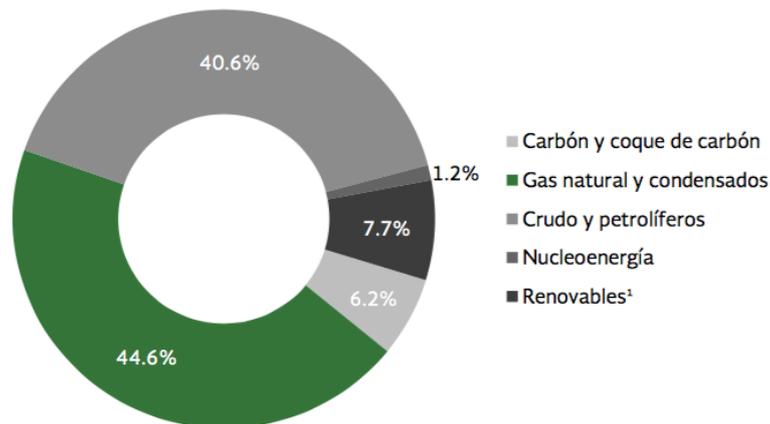
El biogás representó 0.02%.

La suma de los parciales puede no coincidir debido al redondeo de cifras.

Figura 12 Estructura de la producción de energía primaria 2014 (Petajoules). Fuente: (Secretaría de Energía, 2015).

La oferta interna bruta de energía secundaria decreció un 3.6% con respecto al año 2013. Respecto a la oferta interna bruta de energías renovables, está creció un 4.9% con los valores observados en 2013 representando un total de 7.7% (665.78 PJ) del total de energía secundaria del país como se observa en la figura 13. En 2014, según el Balance Nacional de Energía, los incrementos respecto al año anterior en energías renovable fueron mostrados,

- Energía Eólica 53.6%
- Energía Hidroeléctrica 38.9%
- Energía Solar 15.0%



Fuente: Sistema de Información Energética, con cálculos propios.  
<sup>1</sup>Incluye grandes hidroeléctricas

Figura 13 Oferta interna bruta por tipo de energético, 2014 (Petajoules). Fuente: (Secretaría de Energía, 2015).

Para 2026, la Secretaría de Economía estima que se alcanzará una capacidad total instalada superior a los 30,000 MW para la generación de electricidad a partir de energías renovables, donde la energía eólica e hidráulica tengan una participación de 59 y 28% del total respectivamente (Secretaría de Energía, 2015).

### 3.2 Recurso Eólico de México

El primer parque eólico, debido a su lugar clave por los vientos generados, fue en “La Venta” – Oaxaca. Este parque eólico comenzó su operación comercial en 1994 bajo el esquema de “Obra Pública Financiada” (OPF) por licitaciones de la CFE. Desde ese entonces, Oaxaca se ha convertido en un importante lugar por sus condiciones geográficas para la operación y desarrollo de parques eólicos. Hoy en día México cuenta con 1,570 aerogeneradores en territorio nacional costando alrededor de 5.1 billones de dólares en inversiones desde 2004.

Durante el 2014 México añadió 633.7 MW de energía eólica a la red nacional, elevando la capacidad total a 2,551MW distribuida en 31 parques eólicos y 1200 turbinas ubicadas en: Oaxaca, Baja California, Chiapas, Jalisco, Tamaulipas, San Luis Potosí y Nuevo León. El crecimiento elevado es debido en su mayor parte al arranque de los parques en Oaxaca así como en otros estados.

La Industria eólica mexicana espera instalar 9,500 MW para 2018; lo que podría representar el 8% de la aportación energética nacional. México espera lograr esto con inversiones del extranjero donde destacan empresas españolas como, Iberdrola, Gamesa y Acciona. Estas empresas han anunciado su intención de continuar su expansión en países en vías de desarrollo a pesar de haber nuevos jugadores americanos en este mercado (Global Wind Energy Council, 2014).

El país cuenta con poco más de 40,000 MW de potencial eólico en tierra, donde solo se aprovecha alrededor del 3% de dicha capacidad. Las regiones con mayor capacidad de generación de energía eólica son:

- Istmo de Tehuantepec (Oaxaca), donde se encuentran ubicados la mayoría de los parques eólicos nacionales.
- La Rumurosa (Baja California), donde se tiene un potencia del más de 5,000 MW.
- La costa del Golfo de México (Tamaulipas y Veracruz).

Los recursos en materia de energía eólica offshore del país no han sido documentados de manera formal debido a su poco desarrollo y conocimiento, aunque se sabe que el país es basto en costas, se necesita hacer un análisis más profundo sobre la viabilidad y posible aprovechamiento de la energía eólica offshore que México y sus costas pueden ofrecer.

### **3.3 Impacto de la Reforma Energética en México**

La reforma energética que tuvo acontecimiento en el país en 2013, se realizó con el objetivo de buscar implementar una innovación y mejora al sector petrolero, gasífero y de electricidad. Esta reforma fue una transformación del marco regulatorio de este sector con varios motivos como la eficiencia económica, la protección al consumidor, medio ambiente, desarrollo renovable, entre otras.

El gobierno federal aprobó en 2013 el fin del monopolio de PEMEX en el sector petrolero y gasífero, abriéndolo a la inversión extranjera. Asimismo, se abre la inversión privada en el sector eléctrico, por lo que las empresas

estarán en posibilidades de generar y suministrar este tipo de energía y competir con la CFE (Rincón, 2015).

México es un país con una economía emergente, por lo que debe de tomar decisiones difíciles para alcanzar las metas económicas, sociales y ambientales que se proponga. El país mantiene una posición positiva respecto al uso de energías renovables y así disminuir los problemas que son causados al medio ambiente. Por otro lado, se ha fortalecido en políticas de tema ambiental y ha aumentado la inversión en la mejora de las mismas.

La apertura del mercado energético permite aumentar la inversión y fomentar el crecimiento económico del país. Así mismo, las operaciones realizadas por un organismo de tan grande magnitud como lo es PEMEX, se vuelven más transparentes y eficientes. Y no solo las operaciones, también al llegar inversión extranjera se pueden remodelar plantas viejas y crear nuevas plantas en el país.

La reforma energética al tener puntos positivos, también tiene puntos que dejan un interrogante en ciertos temas de interés. Por ejemplo, las áreas naturales protegidas corren riesgo, debido a que aquellos proyectos que se traslapen y no cuenten con un correspondiente plan de manejo, podrían dar camino a exploración y explotación del territorio. Es por eso, que es importante que organismos como la SEMARNAT y sus órganos desconcentrados, definan claramente sus responsabilidades y garanticen la funcionalidad de su organismo (Rincón, 2015).

Finalmente, es importante aclarar que la reforma al estar centrada en la explotación de hidrocarburos y tomar pocos puntos de acción respecto a energías renovables, reduce el campo de trabajo de las anteriormente dichas. México es un país comprometido a luchar contra el aumento de los gases de tipo invernadero; es por eso, que debido a su posición geográfica clave y diversidad del ecosistema, es una región con muchos recursos renovables a explotar y disminuir este tipo de gases como su meta lo dice, que para 2050, las emisiones deberán de ser reducidas un 50% que las

emitidas en el año 2000. Esta reforma abre retos, amenazas y oportunidades a las cuales se deben de estar preparados.

## **4 DESARROLLO**

### **4.1 Introducción**

Para que un parque eólico sea desarrollado hay varias consideraciones y características que deben ser tomadas en cuenta. En los últimos años varias empresas se han interesado en desarrollar este tipo de tecnologías tanto onshore como offshore. Es por eso, que México debe de estar informado y ser capaz de brindar información necesaria para aquellas entidades que busquen una inversión en el país. Actualmente, el sector energético como se ha mencionado, ha sufrido altas y bajas con los precios del petróleo y su escases en un futuro; es por eso, que el desarrollo de nuevas tecnologías renovables, harían a México, además de un país comprometido con el medio ambiente, un lugar en donde depositar inversiones en este tipo de proyectos.

### **4.2 Objetivos**

Esta investigación busca fomentar la inversión a las nuevas tecnologías de obtención energética renovable. El análisis del pasado y la situación del presente dejan claro a los países (petroleros sobre todo) que tienen que cambiar la base de su economía y no solo depender de un recurso no renovable como los son los hidrocarburos.

El proyecto titulado *Energía Eólica Offshore como un recurso energético sustentable: Propuesta de instalación en México* tiene como objetivo principal incitar a la investigación del mismo para su posible aplicación en territorio nacional. Asimismo busca:

- Recabar información nacional e internacional sobre energías renovables, enfatizando en la energía eólica offshore.
- Informar sobre el uso, impactos e importancia de energías eólicas para la economía del país.
- Analizar las características principales tomadas en cuenta para el análisis, planeación y desarrollo de un parque eólico offshore.

- Proponer un proyecto con probabilidad de ser adaptado en México con base en las medidas de implementación de países desarrollados en el tema de energía eólica offshore.
- Analizar el comienzo de una estrategia para el posible desarrollo de un parque eólico offshore en territorio nacional.

### **4.3 Energía Eólica y su Medio Ambiente**

La forma en como se desarrolla un parque eólico ya sea offshore u onshore, tiene aspectos que deben ser considerados para su óptimo funcionamiento. En ambos tipos de energía eólica es importante considerar el medio ambiente en donde se estará implementando este tipo de tecnología, ya que hay que considerar los aspectos tanto positivos como negativos para el ambiente que lo rodea.

Las turbinas eólicas se basan en el movimiento del rotor provocado por el viento para hacer girar el generador y así producir energía. Todos los componentes del aerogenerador generarán en algún momento algún tipo de ruido y este causará contaminación auditiva a cierto perímetro. El sonido generado por esta tecnología (alrededor de 25-45 dB a 350m de distancia) no se le compara a un avión (105 dB a 250m de distancia) por ejemplo, pero si para tomarse en consideración a la hora de su construcción. Un parque eólico offshore estaría fuera del alcance auditivo de alguna comunidad como lo estaría uno localizado onshore, por lo que si se llegará a escuchar algo, sería un sonido realmente muy bajo.

Un problema que se les ha atribuido constantemente a las turbinas eólicas onshore y offshore, es la matanza de aves. Las personas encargadas en la conservación de la fauna y más específico de las aves, han visto este tipo de maquinaria como causantes de la muerte de varias aves al año, además de causar la migración de aves que solían habitar a los alrededores de estas máquinas. Un estudio en Estados Unidos demostró que al hacer una comparación con otras causas de muertes, las turbinas eólicas muestran la menor cantidad de muertes estimadas (North American Bird Conservation Initiative, 2014):

- 234 mil por aerogeneradores

- 6.6 millones por torres de comunicación
- 200 millones por automóviles
- 599 millones por ventanas de edificios

Por otra parte, otro de los temas más discutidos y que ha sido desacreditado por el paso de los años debido a la necesidad de generación eléctrica limpia, es el impacto visual. Estudios realizados han demostrado que las personas que viven cerca de un parque eólico encuentran más intrusivo a la vista el momento de construcción del parque eólico, que cuando ya se tienen las turbinas instaladas. Así mismo, otros estudios realizados en Escocia, han mostrado que las turbinas eólicas no han impactado de ninguna manera al turismo de la localidad, siendo esto algo de gran importancia para un parque eólico offshore (Al-Shemmeri, 2010).

#### **4.4 Tipo de Aerogeneradores**

Las turbinas eólicas han ido evolucionando con el paso de los años y con aquellas necesidades a las cuales el ser humano se ha ido enfrentando para obtener energía. Es de entenderse, que las primeras turbinas de generación eléctrica fueran implementadas en tierra y no en agua; sin embargo, hoy en día las turbinas “offshore” se han desarrollado a una rapidez mayor desde 1990 debido a su superioridad en generación eléctrica, menor impacto ambiental, y a la intensidad y continuidad de los vientos en el mar.

Las turbinas eólicas offshore utilizan prácticamente la misma maquinaria para un parque eólico onshore solo con la adaptabilidad de encontrarse en el agua. Todas las turbinas eólicas onshore, se encuentran montadas en una torre para maximizar su interacción con el viento a una altura de 30 m o más. Los tipos de turbinas se dividen de 2 tipos, turbinas eólicas de eje horizontal (HAWT por sus siglas en inglés) con un rotor localizado en el mismo eje y con su generador localizado en la parte superior de la turbina y las de eje vertical (VAWT) con el rotor y el generador en la parte inferior de la turbina (ver figura 14). Las más utilizadas en el mercado con las HAWT debido a las características citadas en la tabla 2.

Tabla 2 Características de Turbinas HAWT vs VAWT

Característica		
<b>Tipo de Turbina</b>	HAWT	VAWT
<b># de Palas</b>	3	1
<b>Tipo de Vientos</b>	Unidireccional	Multidireccional
<b>Principal zona de instalación</b>	Áreas Amplias	Zona Urbana

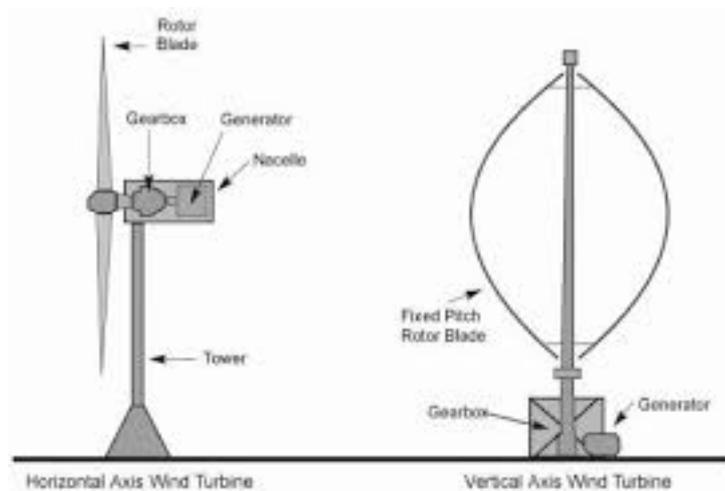


Figura 14 Turbina tipo HAWT (izq.) vs. Turbina tipo VAWT (der.).

Los aerogeneradores que fueron analizados con propósito de esta investigación, son los de eje horizontal. Este tipo de maquinaria cuenta con 3 principales partes y subdivisiones (The Crown Estate, 2010):

1. Góndola, aquella que soporta el rotor e ilustrada en la figura 15. Contiene los componentes clave del aerogenerador, como el multiplicador y el generador eléctrico.
  - a. Soporte de Góndola o Bancada, contiene la carga del tren de potencia y transfiere peso del rotor a la torre.
  - b. Generador, encargado de convertir la energía mecánica en energía eléctrica.
  - c. Anemómetro, utilizado para determinar la fuerza del viento y dejar girar las palas o detenerlas en caso de ser demasiado fuerte.

- d. Veleta, encargada de medir la dirección del viento.
- e. Freno, equipado con un freno de disco encargado de accionarse en falla del freno aerodinámico (en palas) o durante mantenimiento.
- f. Sistema de Orientación, encargado de orientar la góndola en dirección del viento durante operación a través de un controlador electrónico, la veleta y el anemómetro.
- g. Sistema de Control, monitorea el funcionamiento de la turbina, la potencia y la carga para así obtener la mayor vida útil. Se controla desde el exterior.
- h. Multiplicador, permite que el generador gire a una velocidad mayor que la turbina (normalmente entre los 750 y 1500 rpm).
- i. Sistema de Ventilación, mantiene frescos los sistemas de operación dentro de la góndola.

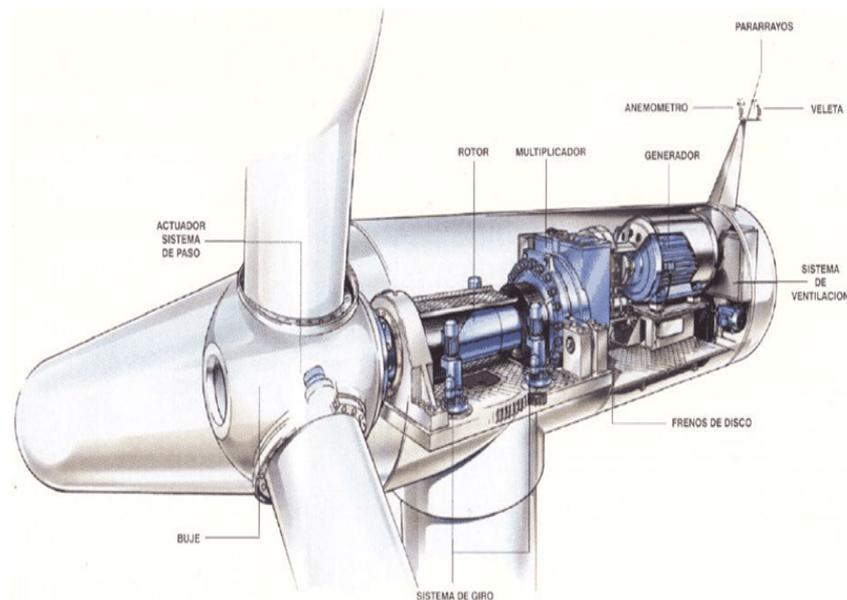


Figura 15 Componentes de la Góndola.

2. Rotor, encargado de extraer la energía cinética del aire y transformarla en energía mecánica para hacer girar las palas del tren de potencia (Ver figura 16).
  - a. Palas, elementos que se encargan de captar la energía cinética del viento. Actualmente existen nuevos métodos de manufactura como la infusión al vacío en donde se inyecta la

resina a usar a molde de doble capa y con un sistema de vacío se asegura la eliminación de defectos físicos de la pieza a manufacturar. (Serrano, 2013).

- a. Buje, elemento que une las palas con el sistema de rotación.
- b. Cono o nariz, es la cubierta metálica encargada de desviar el viento hacia el tren motor.
- c. Freno aerodinámico, localizado ya se en el extremo final de las palas o en la totalidad de la pala, consiste en girar 90 grados la pala o el extremo alrededor del eje longitudinal.



Figura 16 Rotor de un aerogenerador.

3. Torre, es típicamente una estructura de acero que soporta la góndola; así mismo, permite el acceso a ésta y contiene el control eléctrico del aerogenerador (Ver Figura 17).
  - a. Acceso a Personal, cuenta con un espacio hueco en su interior para llegar a la góndola y poder hacer los trabajos de mantenimiento.
  - b. Sistema Eléctrico, la mayoría de las torres cuentan con este tipo de sistema donde desde la base se puede obtener acceso a los controles del aerogenerador.

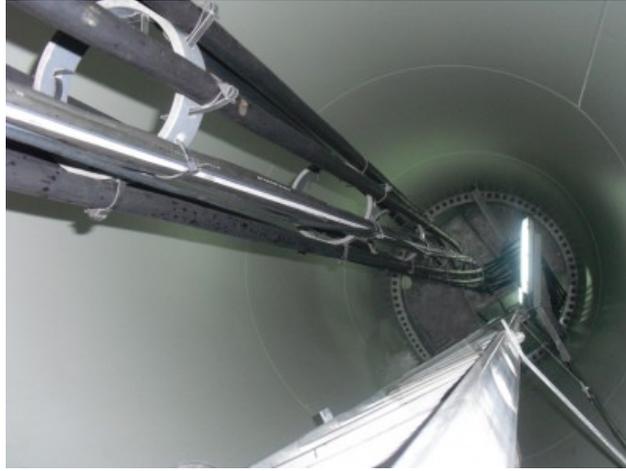


Figura 17 Interior de la torre de un aerogenerador.

Los aerogeneradores cuentan con una cimentación especial debido a las condiciones a las que se les está exponiendo. La cimentación es seleccionada con base a diferentes factores como la carga total de la turbina, la profundidad del agua, la geología del lugar, y el potencial del impacto ambiental. Actualmente hay 4 principales tipos de cimentaciones utilizadas en el mercado dependiendo del tipo de turbina eólica y características del parque eólico como se observa en la figura 18 (European Wind Energy Association, 2013):

- A. Por Gravedad, conocida por sus siglas en inglés GBS (Gravity Based Structures), fueron utilizadas para los primeros parques eólicos offshore ya que mantenían la estabilidad ante cualquier condición gracias al solo peso de la estructura. Ante condiciones modestas climatológicas son recomendables, son utilizadas para profundidades de 0-10 m y su base tiene un diámetro de 12 a 40 m. La desventaja es el costo, ya que es proporcional a la profundidad de donde se quiera instalar, por ello a mayores profundidades es más cara.
- B. Monopilote, cimentaciones profundas e individuales, que penetran en el terreno. Son utilizadas para aerogeneradores de pequeño y mediano tamaño, su instalación es sencilla y son estructuras metálicas con un espesor aproximado de 50 mm y de 3 a 8 m de diámetro. Por lo general, son colocadas de 10 a 30 m de la costa con profundidades de 0 a 20 m y son las más utilizadas.

- C. Tripoide, formadas por tubos de entre 1 y 2 m de diámetro, que transmiten los esfuerzos de la torre a los 3 pilotes que se clavan en el lecho marino con una profundidad de 20 a 50 m.
- D. Jacket, estructuras formadas por tubos de entre 1 y 2 m, cuya característica principal es que en las columnas principales se coloquen los pilotes encargados de fijar la estructura al lecho marino y pueden introducirse de 30 a 60m profundidad.

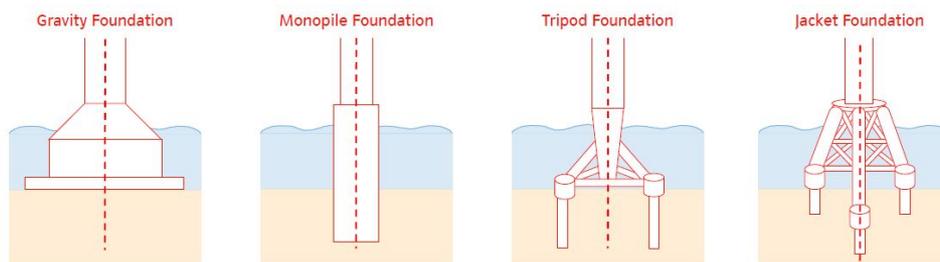


Figura 18 Descripción gráfica de cimentaciones respectivamente.

Por otro lado, actualmente se están llevando a cabo estudios para plataformas flotantes para los aerogeneradores offshore que se deseen llevar a mayores profundidades. Este tipo de estudios promete revolucionar el mercado energético eólico mar adentro, y así brindar más opciones al mercado. Así mismo, lo que permiten este tipo de turbinas offshore es aprovechar el mayor potencial eólico que se tiene en el mar, se pueden implementar turbinas con mayor capacidad de generación ( $>3$  MW) y crear parques eólicos más grandes que los que se encuentran onshore.

Actualmente existen varios modelos de aerogeneradores offshore de diversas empresas, las cuales se han estado encargando en los últimos años de seguir innovando para conseguir una mayor capacidad de generación. Hoy en día existen prototipos de turbinas de hasta 10 MW y que se está buscando la inversión para implementarlos en algún parque eólico. Las 5 mayores turbinas con capacidad de potencia nominal son las citadas en la Tabla 3 (Power-Technology, 2014).

Tabla 3 Turbinas eólicas offshore con mayor capacidad en el mundo. Fuente: Elaboración propia.

Posición	Nombre	Capacidad	Diámetro de Rotor	Estado
1	SeaTitan 10 MW	10 MW	190 m	Negociación
2	Sway ST10	10 MW	164 m	Negociación
3	Areva 8 MW	8 MW	180 m	Instalada
4	Vestas V164-8 MW	8 MW	164 m	Instalada
5	Enercon E-126/7.5 MW	7.5 MW	127 m	Instalada

Hoy en día, el tamaño promedio de una turbina eólica offshore es de 4.2 MW, por lo que oscilan en turbinas de generación de 3.5 a 5 MW. Así mismo, el 97% de la cimentación es por monopolite, las tres compañías que dominan el mercado de producción son Siemens, Adwen y Vestas, y el tamaño promedio de un parque eólico es de 338 MW (European Wind Energy Association, 2013).

Finalmente, es importante entender que la característica que rige a este tipo de máquinas, es la velocidad de viento con la cual trabajan. Esta cantidad delimita el funcionamiento de la turbina por los componentes de la misma. Un aerogenerador se basa en la figura 19 para saber cuando comenzar a funcionar y cuando detenerse con la finalidad de evitar un daño mecánico (Gipe, 2004).

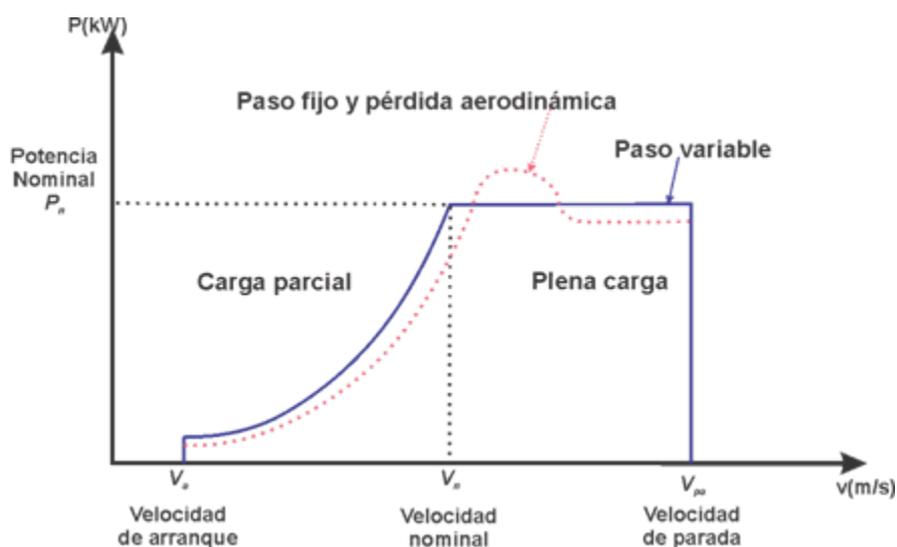


Figura 19 Curva de potencia de un aerogenerador. Fuente: (Gipe, 2004)

Esta curva nos permite ver la potencia eléctrica disponible como función del tiempo. La mayoría de las turbinas sin importar su potencia trabaja con los siguientes rangos (The Crown Estate, 2010).

- Velocidad de arranque de 3 – 4 m/s.
- Velocidad nominal de 10 – 11 m/s.
- Velocidad de parada de 20 – 25 m/s. Las turbinas desarrolladas en los últimos años como la SeaTitan 10 MW cuentan con una velocidad de parada de 10 m/s.

Se podría llegar a pensar en por qué no ampliar el rango de velocidad de parada y así cuando haya vientos más fuertes la turbina no se detuviera, pero las turbinas eólicas están diseñadas para velocidades de vientos promedios por lo que diseñar este tipo de rotores con mayor resistencia implicaría un rediseño de muchos de los equipos y materiales que un aerogenerador utiliza.

#### **4.5 Estimación de Costos**

Para la estimación de costos, la metodología fue a través del desarrollo de un *estudio de Factibilidad* que cubre los siguientes puntos:

- ❖ **Análisis de Mercado** .- Se realizó hacer un estudio de los factores que involucra el mercado solar tales como:
  - Consumidor
  - Tasa de demanda
  - Competencia
  - Producto
- ❖ **Análisis Técnico**
  - Definir la capacidad de la planta
  - Estudio de Costos
    - Costos Totales (sin tomar en cuenta costos de mantenimiento y operación):

- Costo de aerogeneradores
- Costo de conexión a la red
- Costos de construcción
- Otros costos de capital

Se plantean 4 casos los cuales se muestran en la figura 20.

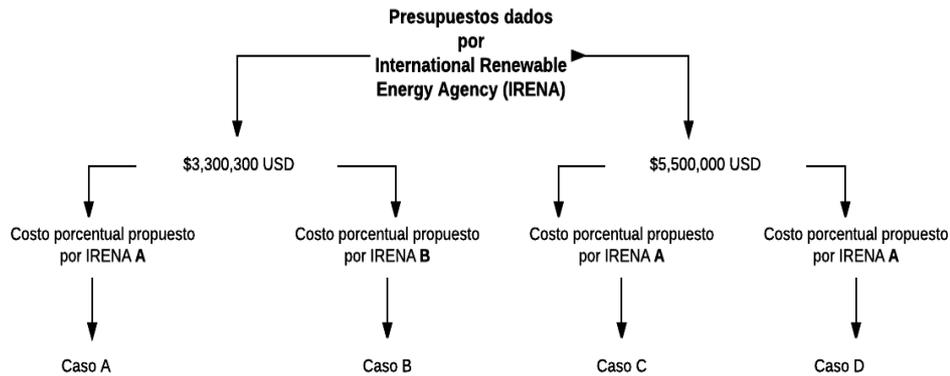


Figura 20 Planteamiento para el desarrollo de distintos escenarios en un parque eólico offshore

Una vez analizado los costos de cada caso se obtiene un caso **final promedio** y los casos donde se considera la desviación estándar superior e inferior para desarrollar el resto del “Estudio de Costos”.

- Desglose de Aerogenerador ( **usando caso promedio**)
  - Selección Justificada de Aerogenerador
  - Características Técnicas
  - Costo desglosado del Aerogenerador usando valores porcentuales sobre el costo total propuestos por la Asociación Europea de Energía Eólica (EWEA)
- Costo de Construcción
  - Tipo Cimentación
  - Transporte e Instalación
- Conexión a la Red
  - Acondicionamiento y Cableado
  - Puntos de Interconexión en tierra

- Puntos de Interconexión a red Urbana (acondicionamiento de energía )

#### ❖ **Capacidad Utilizada**

- Estudio de perfiles de viento en la zona
- Definir curva de potencia de la turbina seleccionada (Usando el perfil de potencia general para toda turbina y comparándola con el perfil de una turbina estándar de 5 MW se define la curva de operación)
- Combinando los perfiles de viento con los valores de la curva de operación de la turbina se determina la producción esperada por turbina y por granja en un valor de 6 meses
- Determinación de la Potencia Nominal

#### ❖ **Análisis Financiero**

- Operación y Mantenimiento
- Plan de Ventas
  - Precio de Venta
  - Costo de Porteo
  - Programa de Producción
  - Interés Inflaciones e Impuestos
  - Plan de Ventas (Caso Promedio , Caso A , Caso D)
  - TIR (Calculada usando excel junto con los flujos de Caja esperados)
  - Cálculo del Retorno de Inversión (ROI)

### **4.6 Consideraciones Parque Eólico Offshore**

Existen diferentes componentes que conforman un parque eólico, los típicos incluyen varios aerogeneradores localizados en el agua, conectados por una serie de cables hacía un transformador localizado en el mar. A su vez, este transformador estará conectado por un cableado por debajo de la tierra a un transformador en tierra conectado a una red de energía. Lo que se busca en la construcción de un parque eólico, es minimizar el uso de cableado y

aumentar la generación de energía mientras se optimizan los costos con base a las características establecidas.

Por otra parte, los parques eólicos además de depender de un estudio de sitio, necesitan saber las condiciones externas a las cuales estarán expuestas los aerogeneradores, por ejemplo las cargas, la velocidad de viento, la altura del oleaje, corrientes y riesgos geológicos asociados.

El diseño de cargas (fuerzas aplicadas a una estructura) es importante en cualquier proyecto que incluya una construcción; en el caso de los parques eólicos incluyen el siguiente tipo de cargas,

- Cargas Permanentes, estas incluyen la masa de la estructura en el aire, el equipo que se va a encontrar en la estructura, y las fuerza hidrostáticas por debajo de la línea de flotación (ver tabla 4).

Tabla 4 Cargas promedio permanentes de turbinas eólicas. Fuente: Elaboración propia.

	Turbina 3.0 MW 80m A.B	Turbina 3.6 MW 80m A.B	Turbina 5.0 MW 90m A.B	Turbina 7.5 MW 100m A.B
<b>Torre</b>	156 ton	178 ton	347 ton	≈ 550 ton
<b>Góndola</b>	68 ton	70 ton	240 ton	≈ 300 ton
<b>Rotor</b>	40 ton	40 ton	110 ton	≈ 180 ton

\*A.B es altura de buje

- Cargas Variables, aquellas que pueden variar en magnitud, posición, y dirección durante el periodo de consideración. Estas incluyen personal, grúas, buque de servicio, plataformas, etc. Las cargas de acción son aquellas cargas variables que impactan debido a la operación de la turbina, por ejemplo las cargas generadas al momento del frenado, las cargas gravitacionales en las palas, y las fuerzas de coriolis y centrífuga.
- Cargas ambientales, este tipo de cargas dependen del sitio; dentro de estas cargas se encuentran las cargas del viento, de las olas, hielo, corrientes, y terremotos.

En general, el diseño de una turbina eólica offshore esta regida por 3 cargas importantes: por los vientos extremos, por la del oleaje y por la de las corrientes marinas. A pesar de que la expectativa de vida útil de una turbina eólica es de 20 años, es de suma importancia considerar esto y así poder establecer los periodos de retorno que sean aplicables. Europa por ejemplo, tiene establecidos periodos de retorno de 50 años, donde las turbinas deben de ser capaces de resistir condiciones extremas ambientales (Malhotra, 2011).

El viento es un factor que tiene un gran peso en las consideraciones de cualquier parque eólico, ya que con él se estiman costos, capacidades, tamaño de turbinas, localización, etc. Es por eso, que es importante analizar las corrientes y vientos que pasarán por un parque eólico. Se debe tomar en cuenta que el rendimiento de un aerogenerador nunca va a ser del 100% debido al límite de Betz calculado a principios del siglo XX, donde el físico alemán Albert Betz estipula que solo se puede aprovechar un 59% de la potencia eólica disponible. En la práctica este número desciende alrededor de 46% debido a que Betz no tomó en cuenta el rendimiento de la hélice, multiplicador, alternador y transformador (Archambault, 2014). Así mismo, como se especificó anteriormente, un aerogenerador es capaz de soportar hasta un límite de velocidad del viento, por lo que la velocidad promedio de la zona debe ser considerada.

El viento actualmente está catalogado en distintas clases para su fácil identificación y caracterización en la zona donde se desea construir un parque eólico. La Tabla 5 muestra la clasificación de los vientos a dos alturas determinadas (10 y 80 m).

Tabla 5 Clases y Velocidades de viento. Fuente: (Soares, 2015)

Clase de Viento	Velocidad (m/s) @ 10 m de Altura	Velocidad (m/s) @ 80 m de Altura	Calidad de Viento
1	< 4.4	< 5.9	Pobre
2	4.4 – 5.1	5.9 – 6.9	Suficiente
3	5.1 – 5.6	6.9 – 7.5	Bueno
4	5.6 – 6.0	7.5 – 8.1	Muy Bueno

5	6.0 – 6.4	8.1 – 8.6	Excelente
6	6.4 – 7.0	8.6 – 9.4	Excepcional
7	> 7.0	> 9.4	Magnífico

Es un hecho que el aumento en los gases de efecto invernadero esta impactando de forma directa al clima del planeta. Este cambio hace que la predicción de eventos climatológicos extremos se vuelva más complicada y que además, sucedan con mayor frecuencia. El clima es un factor clave en el diseño de un parque eólico, ya que con él se harán las bases para el mantenimiento de las turbinas, configuración geométrica del parque, entre otras cosas. Este factor va a variar según el sitio en el que se desee colocar el parque eólico y será uno de los primeros que se deberá tomar en cuenta al inicio del proyecto ya que impacta de forma directa en corrientes, oleaje, etc.

Finalmente, las turbinas necesitan ser posicionadas de tal manera que los efectos causados por un aerogenerador en la distorsión del viento, no afecten a las turbinas a su alrededor. Estas distorsiones crean turbulencias que pueden afectar a otras turbinas cerca y a veces lejos. Estudios recientes muestran que el modelo comúnmente utilizado para acomodar turbinas de 5 MW a 7 veces aproximadamente la distancia de diámetro de rotor, está subestimado. Charles Meneveau, experto de mecánica de fluidos y turbulencia en la Universidad Johns Hopkins, sugiere que para el mejor aprovechamiento del viento y la mejor relación costo/eficiencia, se encuentran a 15 veces de distancia el tamaño de diámetro del rotor (The Johns Hopkins University, 2011). Si bien hoy en día se utilizan distancias alrededor de 3-7 veces el diámetro del rotor, este estudio podría llegar a hacer más eficiente la obtención de energía.

#### **4.7 Parque Eólico Offshore en México**

##### **4.7.1 Selección de Sitio y Características**

Para poder obtener el mejor lugar de explotación de energía eólica offshore, se deben tomar en cuenta diferentes factores. Además de las condiciones de viento, la visibilidad, la distancia a la costa y la proximidad a zonas con exigencias de energía, entre otras.

México es un país en su mayoría rodeado de costas del cual se podría pensar que, tiene un recurso eólico offshore realmente extenso. El problema surge al analizar profundidades, climas, velocidades de viento, zonas protegidas, entre otras cosas, donde se reduce este posible inmenso recurso. En el pre-análisis de recurso eólico en México, se da por entendido que Oaxaca es una zona rica en vientos de alta calidad para los aerogeneradores, pero una vez que se complementa esta información con la velocidad de vientos en el mar, hacen de un parque eólico offshore un poco menos viable. Esto se debe a que este estado tiene mayor cantidad de picos donde la velocidad sobrepasa la permitida para el funcionamiento de un aerogenerador y tendría que hacerlo parar. Pero este no es el mayor problema, sino que la plataforma continental en el Golfo de Tehuantepec no tiene la profundidad apta para el desarrollo de un parque eólico, siendo esta alrededor de 200 m (Lavín, 2005).

El análisis de las profundidades de las plataformas marinas mexicanas y su distancia a partir de la costa, permitió encontrar una posible localización donde no solo podría estar un parque eólico, sino que también ya se cuenta con preámbulos de construcciones de plataformas petroleras, las cuales suponen harían más fácil la investigación de impactos ambientales, geología del lugar, estudios climatológicos, entre otras. Es por esto que el proyecto se decidió realizar en la Sonda de Campeche.

Campeche en un estado que cuenta con una extensa plataforma continental donde actualmente PEMEX tiene más de 100 plataformas petroleras de donde extrae recursos no renovables. Esta plataforma es realmente extensa ocupando poco más de los 100,000 km<sup>2</sup> siendo dividida en interna y externa. La interna tiene poco más de 78,000 km<sup>2</sup> y profundidades de hasta 50 m y pendientes de 0 a 1°, lo cual la hace apta en cuanto a profundidades máximas para la construcción de una turbina eólica. En la figura 21 se puede observar las profundidades con una escala de 1:4,000,000 del Golfo de Campeche.

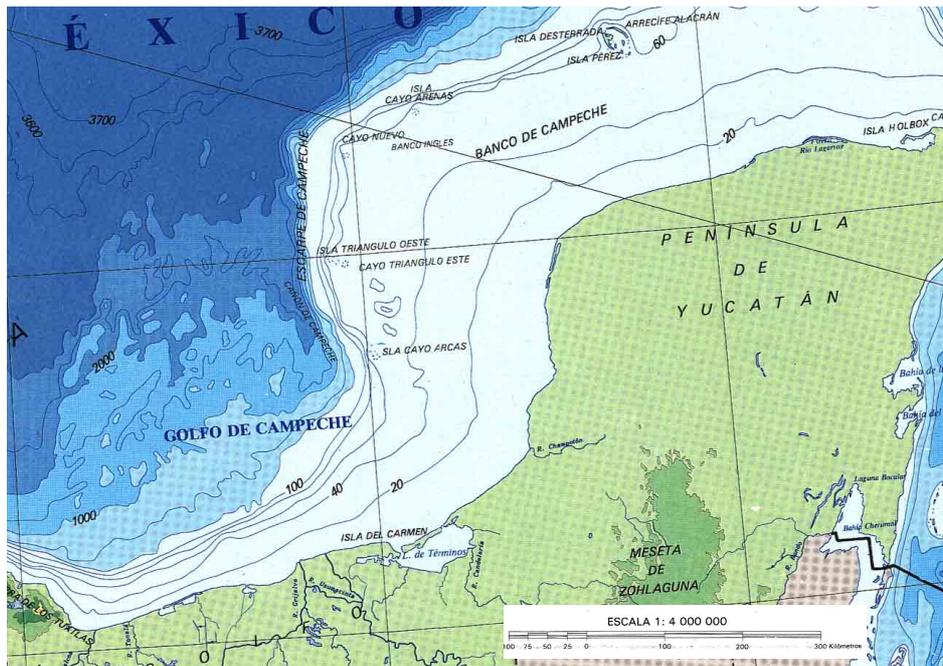


Figura 21 Profundidad de la Plataforma Marina del Golfo de Campeche.  
Fuente: (Gío-Argaéz, 2006)

Por otra parte, la biodiversidad marina como arrecifes o zonas protegidas, hacen de extrema importancia el estudio de impacto ambiental y subsuelo para el futuro establecimiento de un parque eólico offshore. Actualmente, los arrecifes marinos son altamente protegidos debido a toda la biodiversidad marina que en ellos habita y la dificultad que tienen para desarrollarse una vez afectados. En la figura 22 se puede apreciar los arrecifes coralinos de Campeche, los cuales tienen que ser tomados en consideración en el desarrollo del proyecto. Se muestra que hay una zona realmente amplia en la cual, con los estudios correspondientes y exclusiones ya sea por no ser adecuado, por haber plataforma petrolera, etc., se podría realizar un proyecto de este tipo (Villalobos-Zapata & Mendoza Vega, 2010).



Figura 22 Arrecifes Coralinos de Campeche (Villalobos-Zapata & Mendoza Vega, 2010).

Así mismo, hay áreas de total exclusión como aquellas que son protegidas por el gobierno e instituciones como la SEMARNAT para asegurar la conservación de las especies. Entre ellas se encuentran las siguientes:

- Área de Protección de Flora y Fauna Laguna de Términos (en rojo)
- Reserva de la Biósfera Los Petenes (en café)
- Reserva de la Biósfera Ría Celestún (en azul)

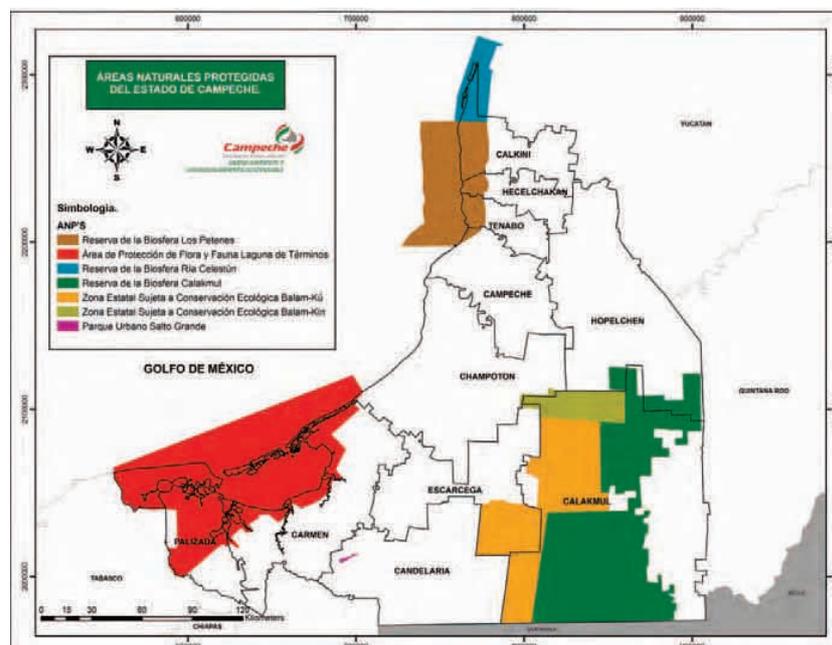


Figura 23 Reservas del Estado de Campeche (Villalobos-Zapata & Mendoza Vega, 2010).

Para la óptima localización de un proyecto de este tipo, se debe considerar el clima ya que este impactará de manera directa en la viabilidad del parque eólico, el mantenimiento de las turbinas y, por supuesto, la calidad de la generación eléctrica. Los vientos que soplan sobre el Estado procedentes del noroeste se presentan fundamentalmente en los meses de noviembre a marzo. Para los meses de septiembre y octubre el viento que viene del norte tiende a alinearse en dirección este-oeste, durante los meses de junio a agosto los vientos proceden del sureste; en mayo y abril estos vientos tienden poco a poco a orientarse en dirección sur-norte (Gío-Argaéz, 2006).

El Estado de Campeche presenta un clima cálido a muy cálido en verano. Cuenta con precipitaciones pluviales en verano y tiene una temperatura media de 26 a 27 °C. Un fenómeno climático que afecta a la Península: los huracanes. Casi cada año uno o más huracanes de diferente intensidad, que se forman en el Caribe y baten las costas del Golfo de México, atraviesan la península de Yucatán (Villalobos-Zapata & Mendoza Vega, 2010). Este fenómeno meteorológico forzaría a detener la producción de energía debido a las altas velocidades del viento (> 30 m/s). A pesar de esto, Campeche es uno de los estados desde 1970 con menores impactos de ciclones tropicales como lo son los huracanes como se aprecia en los datos de la figura 24.

De 1970 a 2014, los estados con más impactos de ciclones tropicales fueron:

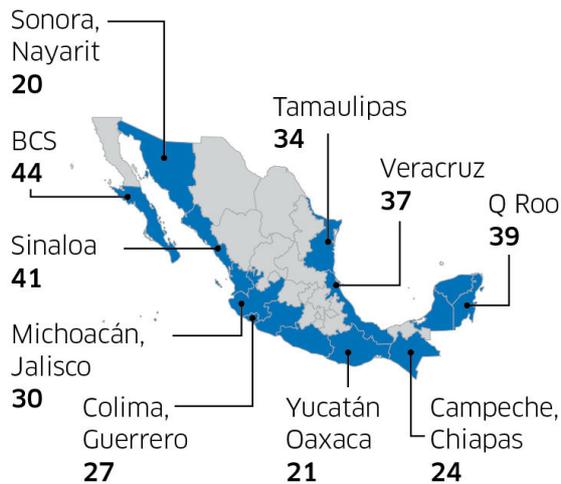


Figura 24 Número de ciclones que han impactado las costas mexicanas. Fuente: (Suárez, 2015).

Campeche es un estado realmente poco impactado en comparación con otros de la República por este tipo de ciclones tropicales. En la figura 25 se puede ver que depresiones tropicales (en azul) o tormentas tropicales (en verde) las cuales provocan vientos moderados y lluvias a su paso, son las que más ocurrencias han tenido a lo largo de los años. Los datos registrados demuestran pocos huracanes de categoría mayor a 3 (en naranja) que hayan pasado por el estado de Campeche. Las turbinas eólicas al estar sujetas a vientos de mayor magnitud de su velocidad de paro, son capaces de detenerse y en algunos casos de girar hacia el viento para así disminuir los riesgos de daño al equipo. Cuando la góndola esta de lado al viento es cuando mayor probabilidad tiene la turbina de sufrir daño alguno debido al desbalance de cargas (Stephen Rose, 2012).

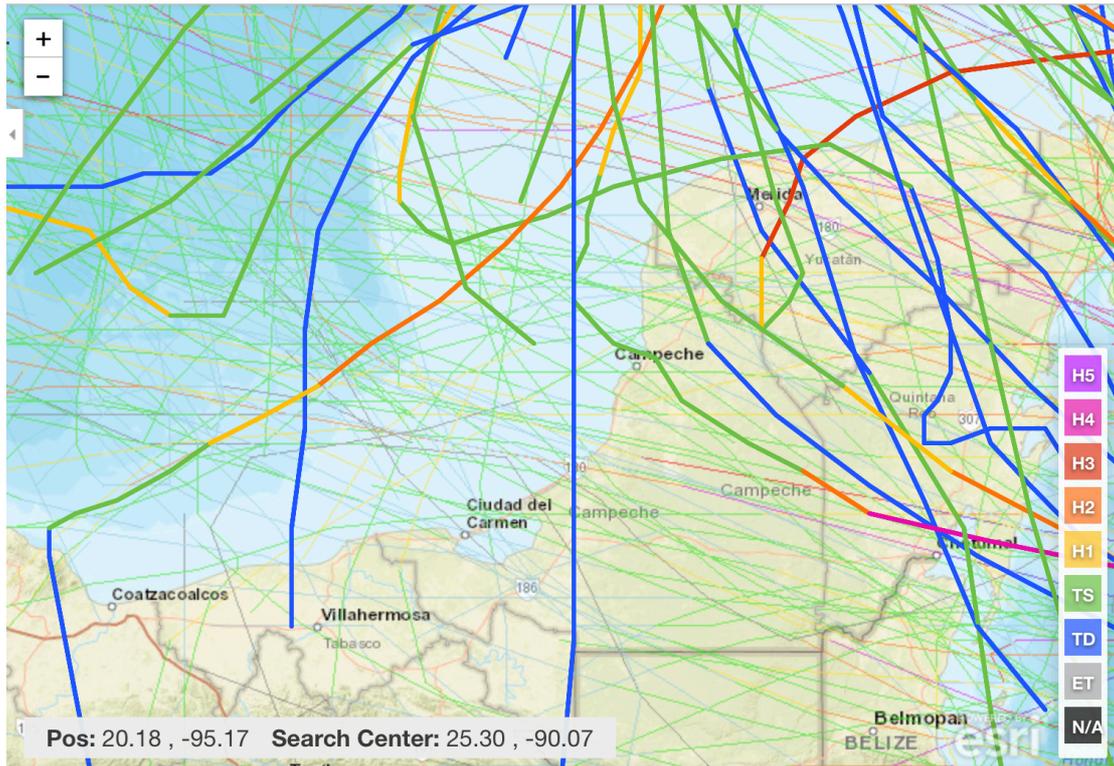


Figura 25 Trayectorias de huracanes desde 1865. Fuente: (Programa NOAA).

Ahora bien, si se analiza la velocidad promedio de la Sonda de Campeche en la tabla 6, se puede ver la viabilidad del proyecto debido a la clase en la que el viento se encuentra si se analiza con lo descrito en la tabla 5 de clasificaciones de viento. Los datos mostrados en la tabla 6 dejan claro que esta parte del Golfo de México cuenta con las características necesarias para el desarrollo de un parque eólico offshore.

Tabla 6 Datos Estadísticos de la Sonda de Campeche y el Litoral de Tabasco. Fuente: (Lavín, 2005)

Año	Velocidad Media Anual (m/s) @ 80 m	Intensidad de Turbulencia (%) @ 15 m
2006	8.16	10.52
2007	8.20	10.52
2008	8.32	10.52
2009	8.90	10.52
2010	8.09	10.52
<b>Promedio</b>	<b>8.34</b>	<b>10.52</b>

Finalmente, tomando en cuenta las características de profundidad, ambiental, clima y calidad de viento, es posible sustentar que este proyecto puede tener una investigación más profunda en esta zona para su posible explotación en materia de recurso eólico offshore. En resumen, en esta sección del capítulo se obtienen los resultados necesarios para analizar un modelo de turbina eólica y a grandes rasgos, los costos que el proyecto podría tener. Así que, la Sonda de Campeche cumple con las siguientes características,

- Profundidad de aguas, extensa área donde, a pesar de haber zonas de exclusión, presenta una gran superficie capaz de ser aprovechada para el recurso eólico por su no tan grande profundidad.
- Clima, aunque el Golfo de México tenga una alta probabilidad de sufrir ciclones tropicales, la categoría de estos presenta una probabilidad baja en impactos de huracanes mayores a categoría 3.
- Vientos, su velocidad promedio anual está catalogada como excelente (5), a pesar de que se pudiera llegar a tener una categoría inferior, está sería aún muy buena (4) para el desarrollo de este proyecto.

#### **4.7.2 Análisis de Costos**

La inversión en proyectos de este tipo va a variar según el número de turbinas que se vayan a instalar, la clase de viento de la zona elegida, marca de la turbina, capacidad de la turbina para generar energía, entre otras. Es por eso, que es importante considerar cada una de las características que detallan a un parque eólico offshore.

El costo en un proyecto eólico offshore varía en uno onshore en varias cosas, como por ejemplo, en la conexión a tierra, la calidad del aire que generará la energía, la probabilidad de algún suceso meteorológico extremo y, por supuesto, el mantenimiento del parque eólico; es por eso, que hay que entender a grandes rasgos lo que una inversión envolvería.

1. **El consumidor:** El consumidor final puede ser ubicado en cualquier parte de la república ya que la nueva reforma energética se estipula que corresponde a la Nación el servicio público de transmisión y distribución de energía eléctrica; en estas actividades no se otorgarán

concesiones (Art 25, 27 y 28). CFE actúa como un intermediario entre la granja eólica y el usuario final en donde se fija un costo de transmisión de energía.

2. **Tasa de demanda:** La tasa de demanda actual propuesta por CFE es del 4.6% anual a lo que el World Energy Council México (WECMX) desacredita y propone una tasa anual de crecimiento del 1.7% como se puede observar en la tabla 7. Podemos asumir que el crecimiento anual real estará entre estos dos valores tendiendo más al valor propuesto por WECMX. “La nueva capacidad de generación deberá incrementar en más de 55,000 MW (65% del total) para satisfacer la demanda eléctrica de los próximos 15 años. Esto supone un importante requerimiento de inversión, a través de una amplia matriz de tecnologías” (Acevedo, 2009).

Tabla 7 Escenarios de demanda eléctrica WEC vs. CFE.

Año	Escenario de Crecimiento WEC incluyendo crecimiento Poblacional (TWh)	Escenario CFE (TWh)
<b>2025</b>	242.6	372.7
<b>2050</b>	349.8	1147.3

4. **La competencia:** Actualmente no existe una empresa en México que se dedique a actividades eólicas offshore; así mismo, el valor del mercado offshore no se encuentra aún valuado aunque se sabe que en México se planea un crecimiento de 2 GW anual instalado para el mercado eólico en tierra lo cual representan inversiones de 14 billones de USD para el 2018 (GWEC, 2014). Si bien el valor y crecimiento del mercado offshore aun es desconocido se puede ver una clara tendencia al crecimiento y desarrollo en el mercado eólico.
5. **El Producto:** Las energías renovables en México muestran un crecimiento en demanda debido a la estabilidad en precio y a la inflación controlada de éstas; los contratos de venta de energía de los parques eólicos se pueden fijar a periodos largos fijando un precio fijo

anual de venta lo que da la comodidad a los clientes de saber parte de sus costos fijos anuales para la duración del contrato.

6. **Comercialización:** La Reforma Energética estipula que La CFE dejará de ser la única empresa comercializadora de la energía eléctrica, incentivando la competencia para capturar clientes finales. Una empresa que busque satisfacer sus necesidades de consumo podrá comparar las tarifas ofrecidas por la CFE frente a la de otros generadores privados (Banco Mundial, 2015).

## **A. Análisis Técnico**

1. **Capacidad de la Planta:** La capacidad del parque eólico offshore propuesta es de 20 MW instalados con opción de escalamiento en un 80%. Debido a que aún no se tienen antecedentes se desarrolló una estrategia similar que se está siguiendo actualmente en *Rhode Island -EUA Block Island Wind Farm* donde se planean instalar 30 MW como primera fase con una expansión de 110MW en su segunda fase.

### **a. Costos Totales.-**

Usando Datos de la Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA por sus siglas en inglés), se hizo un estimado de costos donde se consideran dos precios para MW instalado offshore (USD \$3,300,000 - USD \$5,000,000). La IRENA proporciona valores porcentuales de desglose para las 4 áreas principales del proyecto mostrados en la tabla 8.

Tabla 8 Porcentaje de costos aproximado de un parque eólico offshore.

Costos	%
<b>Turbina<sup>1</sup></b>	30-50
<b>Conexión a la Red<sup>2</sup></b>	15-30
<b>Construcción<sup>3</sup></b>	15-25
<b>Otros Costos de Capital<sup>4</sup></b>	8-30

<sup>1</sup> Los costos de turbina incluyen: procura, transporte a sitio e instalación

<sup>2</sup> La conexión a la red incluye: cableado, subestaciones y edificios

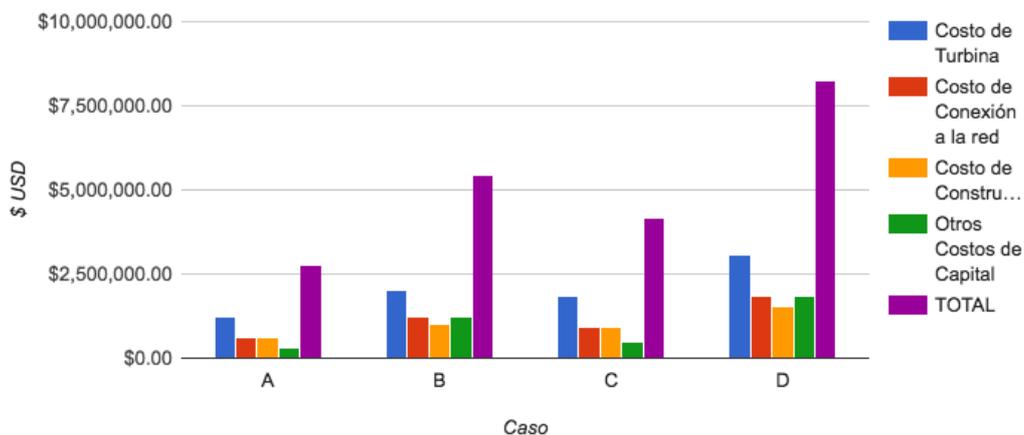
<sup>3</sup> Los costos de construcción incluyen transportación e instalación de torre de turbina y turbina así como la construcción de cimientos así como carreteras y otras infraestructuras involucradas.

<sup>4</sup> En otros costos de capital se incluyen: costos de ingeniería, licencias legales, consultoría y permisos, SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) y sistemas de monitoreo

Tomando estos valores porcentuales y el valor de libro para USD/MW-instalado se desglosan 4 casos (A-D)

- Caso A (Optimista):
  - USD/MW: \$3,300,000
  - Costo de Turbina : 30%
  - Costo de Conexión a la red 15%
  - Costo de Construcción : 15%
  - Otros Costos de Capital :8%

Una vez desarrollados los 4 casos se obtiene un valor promedio junto con una desviación y sobre este valor se desarrolla el caso final como se muestra en la gráfica 2.



Gráfica 2 Casos de inversión 2016 para un parque eólico offshore en México. Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 9 se muestra el desglose de costos de cada área para cada caso considerando 20MW instalados.

Tabla 9 Desglose de costos en USD para cada caso propuesto. Fuente: Elaboración propia.

	A	B	C	D
<b>Costo de Turbina</b>	\$24,212,925.00	\$40,354,875.00	\$36,686,250.00	\$61,143,750.00
<b>Costo de Conexión a la red</b>	\$12,106,462.50	\$24,212,925.00	\$18,343,125.00	\$36,686,250.00
<b>Costo de Construcción</b>	\$12,106,462.50	\$20,177,437.50	\$18,343,125.00	\$30,571,875.00
<b>Otros Costos de Capital</b>	\$6,456,780.00	\$24,212,925.00	\$9,783,000.00	\$36,686,250.00
<b>TOTAL</b>	\$54,882,630.00	\$108,958,162.50	\$83,155,500.00	\$165,088,125.00

Una vez obtenido los cuatro casos se estima un promedio considerando la desviación y se trabaja sobre éste con el fin de suponer un caso intermedio a las 4 propuestas, siempre se considera el factor de distribución dentro de los costos. En la tabla 10 se muestra el cálculo de los valores promedios con su desviación.

Tabla 10 Promedio de los 4 casos, su desviación y % de desviación. Elaboración propia.

Caso	Promedio	Desviación	% de desviación
<b>Costo de Turbina</b>	\$40,599,450.00	\$15,340,137.06	37.78%
<b>Costo de Conexión a la red</b>	\$22,837,190.63	\$10,472,730.34	45.86%
<b>Costo de Construcción</b>	\$20,299,725.00	\$7,670,068.53	37.78%
<b>Otros Costos de Capital</b>	\$19,284,738.75	\$13,927,660.47	72.22%
<b>TOTAL</b>	\$103,021,104.38	\$46,902,447.20	45.53%

#### b. Costo Desglosado de Turbina

- *La turbina seleccionada es la General Electric 4.1MW1-13 por numerosas razones:*
  - Disponibilidad de manufactura(USA)
  - Servicio de Mantenimiento

- Soporte para transporte e instalación
  - Disponibilidad de refacciones
  - Manejo de 6 Sigmas dentro de sus productos
- *Las Características de la turbina son las siguientes*
    - Capacidad energética: 4.1MW
    - Velocidad de arranque: 3.5m/s
    - Velocidad de corte: 25m/s
    - Velocidad nominal: 14m/s
    - IEC-1B (promedio anual de operación hasta 10m/s, ráfagas de 70m/s)
    - Diámetro de Rotor: 113m
    - Altura de Torre : 80m
    - Factor de Capacidad: 35.3%

En la Tabla 11 se enlistan los costos obtenidos para la turbina offshore considerando todas sus características.

Tabla 11 Valores porcentuales para turbina offshore de 5MW. Fuente: (EWEA, 2007)

Costo de Una Turbina(USD)	%	\$10,149,862.50	Desviación de 37%
<b>Torre</b>	26.3	\$2,669,413.84	\$987,683.12
<b>Navajas</b>	22.2	\$2,253,269.48	\$833,709.71
<b>Rotor</b>	1.37	\$139,053.12	\$51,449.65
<b>Engranajes de Rotor</b>	1.22	\$123,828.32	\$45,816.48
<b>Eje Principal</b>	1.91	\$193,862.37	\$71,729.08
<b>Base de Góndola</b>	2.8	\$284,196.15	\$105,152.58
<b>Caja de Velocidades</b>	12.91	\$1,310,347.25	\$484,828.48
<b>Generador</b>	3.44	\$349,155.27	\$129,187.45
<b>Mecanismo de Orientación</b>	1.25	\$126,873.28	\$46,943.11
<b>Mecanismo de Control de Ángulo</b>	2.66	\$269,986.34	\$99,894.95
<b>Convertidor de Energía</b>	5.01	\$508,508.11	\$188,148.00
<b>Transformador</b>	3.59	\$364,380.06	\$134,820.62
<b>Sistema de frenado</b>	1.32	\$133,978.19	\$49,571.93
<b>Góndola</b>	1.35	\$137,023.14	\$50,698.56
<b>Cables</b>	0.96	\$97,438.68	\$36,052.31
<b>Tornillos</b>	1.04	\$105,558.57	\$39,056.67

### c. Construcción

- Los costos de la estructura se han visto elevados en los últimos años debido a la inflación del acero, principal componente de la

estructura de cimentación los costos de transporte e instalación no se han visto modificados de manera notable en los últimos años por lo que los costos de construcción aún se mantienen entre el 15% y 25% del valor total del proyecto (ver Tabla 12).

Tabla 12 Costo de construcción de turbina. Fuente: Elaboración Propia.

Costos de Construcción por Turbina		\$5,074,931.25	Desviación (37.7%)
<b>Cimentación (Tripode-Jaket )</b>	50%	\$2,537,465.63	\$956,624.54
<b>Transporte Tierra a Mar, Construcción e Instalación</b>	50%	\$2,537,465.63	\$956,624.54

#### d. Conexión a la Red

- La conexión a la red toma en cuenta instalación de cableado submarino conexiones a subestaciones eléctricas las cuales condicionan la electricidad a las especificaciones de la red a la que se va a conectar el tipo de transmisión que se planea utilizar siendo de Corriente Alterna de Alto Voltaje (HVAC) aunque si se exceden los 50 km de conexión se puede considerar una conexión de Alto Voltaje de Corriente Directa.
- Hay numerosos factores que pueden hacer variar este costo como puede ser: acondicionamiento de punto de interconexión, distancia del parque a punto de conexión, precio del cobre entre otros.
- De momento se considera un valor promedio de entre el 15-30 % del valor total del proyecto como sugiere la IRENA con una desviación del 45% del valor estimado promedio.

### B. Capacidad Utilizada

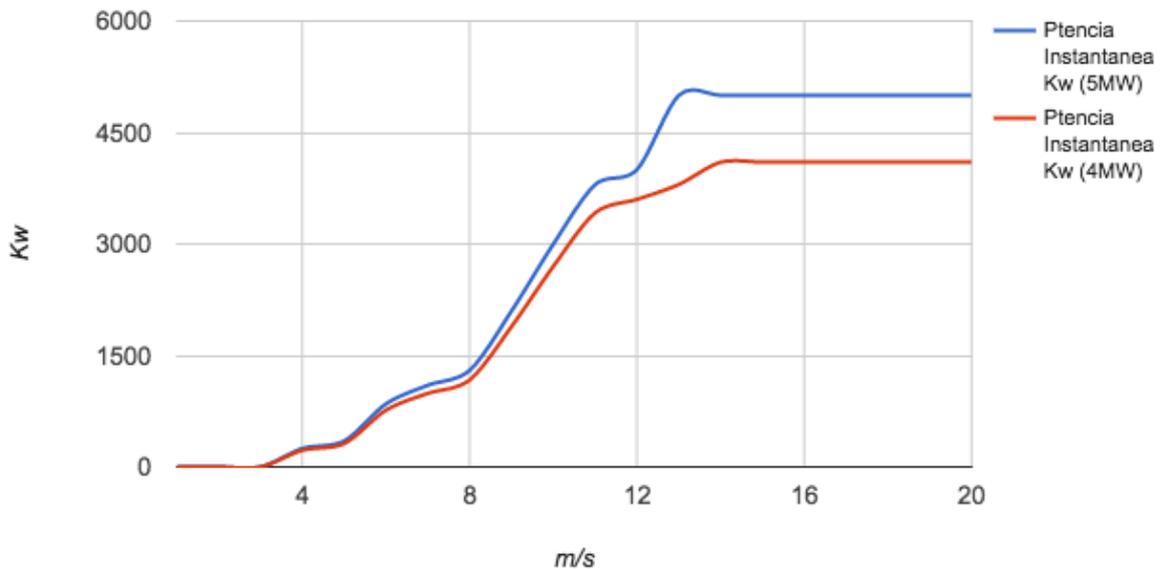
#### a. Horas de Viento

- Utilizando la información de la tabla 11 dentro de un periodo de 181 días tomadas directamente de la Sonda de Campeche @10 m de altura se obtiene la distribución del viento en la tabla 13.

Tabla 13 Distribución de viento en la Sonda de Campeche. Fuente: (Soto, 2011)

Intervalo (m/s)	181 días (4340h)
0-1	8
1--2	26
2--3	56
3..4	212
4--5	195
5--6	221
6--7	402
7--8	414
8--9	880
9--10	654
10--11	570
11--12	482
12--13	127
13--14	51
14--15	27
15--16	7
16--17	5
17--18	1
18--19	1
19--20	1

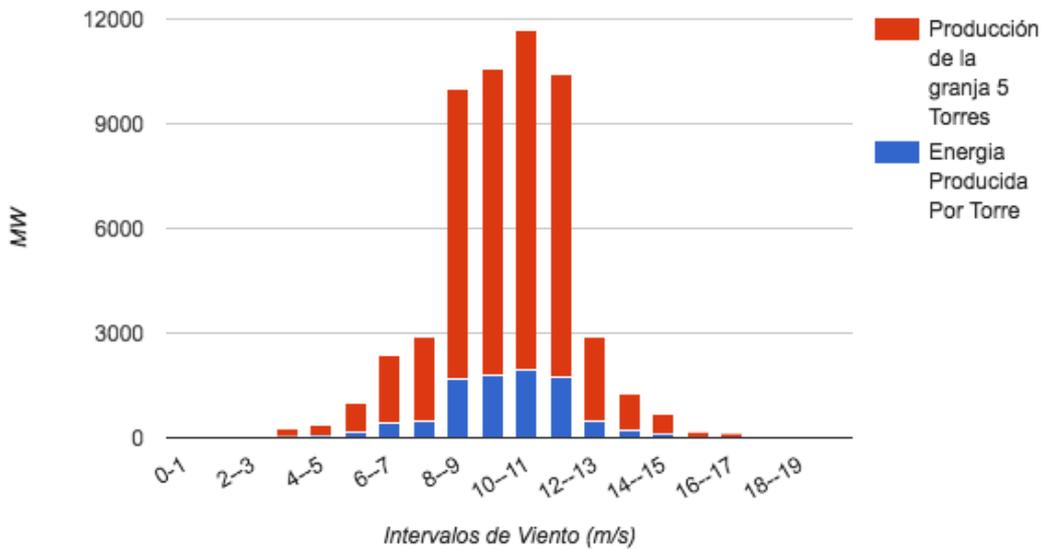
- Con apoyo de una curva de potencia estándar para una turbina de 5MW se determinan valores aproximados para una turbina de 4MW como se muestra en la gráfica 3 .



Gráfica 3 Curva de potencia para 5 MW y 4.1 MW. Fuente: Elaboración propia.

- En conjunto el estudio de vientos y la curva de potencia de turbina se combinan para dar producción semestral y anual por:

1. turbina



Gráfica 4 Producción Semestral de energía eléctrica. Fuente: Elaboración propia.

La gráfica 4 relaciona la tabla 13 con la curva de potencia de una turbina eólica, donde la velocidad de viento es equivalente a una potencia de turbina, el número de días a una altura en m/s correspondiente a cada potencia, y eso es multiplicado para obtener generaciones esperadas de **Turbina** y **Parque**.

Tabla 14 Producción Anual por Turbina y por Parque.

	Energía Producida Por Torre	Producción de la granja
<b>Producción anual (Mw/h)</b>	18257.5	91380.5

Combinando esta producción con el factor de capacidad:

$$35.3\% = 91380.5 \text{ MW} / X$$

$$X = 258868.272 \text{ MW}$$

## C. Análisis Financiero

### a) Operación y Mantenimiento

- Para la Operación y mantenimiento se toma el valor de mantenimiento variable de 0.01USD/Kw/h producido (IRENA,2010) se calcula una inflación promedio de 4% anual de este costo variable ( 0.012USD/Kwh producido). Se calcula para un periodo de 25 años con la misma inflación promedio y se obtiene la tabla total de costos de Operación y Mantenimiento (ver tabla 15)

Tabla 15 Costos de Operación y Mantenimiento. Fuente: Elaboración Propia

<b>Año</b>	<b>Costos O&amp;M USD</b>
1	\$924,062.48
2	\$961,024.98
3	\$999,465.98
4	\$1,039,444.62
5	\$1,081,022.40
6	\$1,124,263.30
7	\$1,169,233.83
8	\$1,216,003.18
9	\$1,264,643.31
10	\$1,315,229.04
11	\$1,367,838.20
12	\$1,422,551.73
13	\$1,479,453.80
14	\$1,538,631.95
15	\$1,600,177.23
16	\$1,664,184.32
17	\$1,730,751.69
18	\$1,799,981.76
19	\$1,871,981.03
20	\$1,946,860.27
21	\$2,024,734.68
22	\$2,105,724.07
23	\$2,189,953.03
24	\$2,277,551.16
25	\$2,368,653.20

## II. Plan de Ventas

a) **Precio de Venta** .- Se encuentra que en 2012 el precio de Kw/h vendido a los municipios por CFE es de al menos 2.06 Kw/h (CFE, 2014) este precio se estima con la inflación energética promedio de 8% anual y se lleva a 2016 con un valor de venta final de **\$2.57 MXN/Kw/h-\$0.14USD/Kwh.**

b) **Costo de Porteo** .- El costo de porteo de energía el cual es el precio por usar la red de CFE como medio de entrega, en 2012 se registra a 0.02USD/Kwh=\$0.357

c) **Programa de Producción.**- La alta demanda energética del país se asume una venta del 100% de la producción.

### d) **Intereses, Inflaciones e Impuestos :**

- Para valores a VPN (tasa de interés anual 5%)
- Tasa de impuesto 30% sobre ventas brutas
- Se considera Inflación del 4% anual para las áreas de Operación y Mantenimiento
- La tasa de cambio se fija en \$17MXN-\$1USD
- No se toman en cuenta estímulos fiscales
- Se asume que el capital es de un fondo de inversión y no hay préstamos incluidos

### e) **Plan de Ventas**

Analizando la Tabla 16 y tomando en cuenta la *desviación de proyecto* (45%)

- El resaltado **Naranja** muestra el año donde se recuperaría la inversión en el mejor escenario (**5 años**)
- El resaltado **Verde** muestra el año donde se recuperaría la inversión en el escenario promedio (**10 años**).
- El resaltado **Azul** muestra el año donde se recuperaría la inversión en el peor escenario (**13 años**)
- La TIR calculada del Proyecto es de **10%**

Tabla 16 Plan de ventas propuesta de acuerdo a los cálculos realizados. Fuente: Elaboración Propia.

Año	Precio de Venta de KWH (+4% anual)	Ventas USD BRUTAS	Costos O&M USD	Ganancias	Impuestos (30%)	Amortización (60% de valor de Turbina )	Utilidades	Utilidades - Inversión Inicial	Utilidades Netas en Valor presente	Resumen Anual	VPNI (R=0.05)
0		-\$103,021,104.3									
1	2.58	\$11,622,589	\$924,062	\$10,698,526	\$3,486,777	\$2,435,967	\$9,647,717	-\$93,373,388	\$9,188,302	-\$93,832,803	0.952
2	2.70	\$12,225,933	\$961,025	\$11,264,908	\$3,667,780	\$2,435,967	\$10,033,095	-\$83,340,292	\$9,100,313	-\$84,732,490	0.907
3	2.84	\$12,860,333	\$999,466	\$11,860,867	\$3,858,100	\$2,435,967	\$10,438,734	-\$72,901,558	\$9,017,371	-\$75,715,119	0.864
4	2.98	\$13,527,377	\$1,039,445	\$12,487,932	\$4,058,213	\$2,435,967	\$10,865,686	-\$62,035,872	\$8,939,227	-\$66,775,892	0.823
5	3.13	\$14,228,734	\$1,081,022	\$13,147,712	\$4,268,620	\$2,435,967	\$11,315,059	-\$50,720,813	\$8,865,645	-\$57,910,247	0.784
6	3.29	\$14,966,159	\$1,124,263	\$13,841,896	\$4,489,848	\$2,435,967	\$11,788,015	-\$38,932,798	\$8,796,398	-\$49,113,849	0.746
7	3.45	\$15,741,495	\$1,169,234	\$14,572,261	\$4,722,448	\$2,435,967	\$12,285,780	-\$26,647,018	\$8,731,274	-\$40,382,574	0.711
8	3.62	\$16,556,678	\$1,216,003	\$15,340,675	\$4,967,003	\$2,435,967	\$12,809,639	-\$13,837,380	\$8,670,068	-\$31,712,507	0.677
9	3.81	\$17,413,745	\$1,264,643	\$16,149,102	\$5,224,124	\$2,435,967	\$13,360,945	-\$476,434	\$8,612,585	-\$23,099,922	0.645
10	4.00	\$18,314,835	\$1,315,229	\$16,999,606	\$5,494,450	\$2,435,967	\$13,941,122	\$13,464,688	\$8,558,640	-\$14,541,282	0.614
11	4.20	\$19,262,195	\$1,367,838	\$17,894,357	\$5,778,659		\$12,115,698	\$25,580,386	\$7,083,798	-\$7,457,484	0.585
12	4.40	\$20,258,188	\$1,422,552	\$18,835,636	\$6,077,456		\$12,758,180	\$38,338,566	\$7,104,232	-\$353,253	0.557
13	4.63	\$21,305,296	\$1,479,454	\$19,825,842	\$6,391,589		\$13,434,253	\$51,772,820	\$7,124,471	\$6,771,219	0.530
14	4.86	\$22,406,127	\$1,538,632	\$20,867,495	\$6,721,838		\$14,145,657	\$65,918,477	\$7,144,518	\$13,915,737	0.505
15	5.10	\$23,563,423	\$1,600,177	\$21,963,246	\$7,069,027		\$14,894,219	\$80,812,695	\$7,164,374	\$21,080,111	0.481
16	5.35	\$24,780,063	\$1,664,184	\$23,115,878	\$7,434,019		\$15,681,859	\$96,494,555	\$7,184,041	\$28,264,151	0.458
17	5.62	\$26,059,073	\$1,730,752	\$24,328,321	\$7,817,722		\$16,510,600	\$113,005,154	\$7,203,520	\$35,467,671	0.436
18	5.90	\$27,403,635	\$1,799,982	\$25,603,653	\$8,221,090		\$17,382,562	\$130,387,717	\$7,222,814	\$42,690,485	0.416
19	6.20	\$28,817,088	\$1,871,981	\$26,945,107	\$8,645,127		\$18,299,981	\$148,687,698	\$7,241,924	\$49,932,409	0.396
20	6.51	\$30,302,946	\$1,946,860	\$28,356,085	\$9,090,884		\$19,265,202	\$167,952,899	\$7,260,852	\$57,193,261	0.377
21	6.83	\$31,864,896	\$2,024,735	\$29,840,161	\$9,559,469		\$20,280,693	\$188,233,592	\$7,279,600	\$64,472,860	0.359
22	7.18	\$33,506,816	\$2,105,724	\$31,401,092	\$10,052,045		\$21,349,047	\$209,582,639	\$7,298,169	\$71,771,029	0.342
23	7.53	\$35,232,779	\$2,189,953	\$33,042,826	\$10,569,834		\$22,472,992	\$232,055,631	\$7,316,561	\$79,087,591	0.326
24	7.91	\$37,047,065	\$2,277,551	\$34,769,514	\$11,114,120		\$23,655,394	\$255,711,026	\$7,334,779	\$86,422,370	0.310
25	8.31	\$38,954,171	\$2,368,653	\$36,585,518	\$11,686,251		\$24,899,267	\$280,610,292	\$7,352,822	\$93,775,192	0.295

## f) Datos Financieros Obtenidos

Tabla 17 Datos Financieros obtenidos. Fuente: Elaboración Propia.

<b>Tasa Verdadera de Retorno Anual</b>	Utilidades Netas en Valor presente / Inversión Total) * 1 / Duración del Proyecto	<b>7.64%</b>
<b>Valor Presente de Kw/h vendido</b>	Utilidades Netas en Valor Presente / (Producción Total Kw/h * Duración de Proyecto )	<b>0.086 USD/Kwh</b>
<b>ROI</b>	(10 años) ROI = (Ganancia de Inversión – Costo de Inversión) / Costo de Inversión	<b>13.07%</b>

## 5 Análisis

Los datos obtenidos en este trabajo muestran la viabilidad de un parque eólico offshore en costas mexicanas. Los resultados están sustentados en información obtenida de fuentes gubernamentales y organizaciones encargadas de hacer análisis en tecnología sustentable. En la tabla 18 se presenta un resumen de los datos obtenidos que permitirían la construcción de un prototipo de parque eólico offshore en la Sonda de Campeche.

Tabla 18 Análisis de la propuesta de un parque eólico offshore en la Sonda de Campeche. Fuente: Elaboración Propia

Característica	Dato	Comentarios
<b>Velocidad de Vientos promedio en la Sonda de Campeche</b>	8.34 m/s	La velocidad promedio obtenida es catalogada como excelente en cuanto a velocidades de viento. Esto hace viable (en cuanto a velocidad de arranque de turbina) la instalación de un parque eólico offshore.
<b>Profundidad de la Sonda de Campeche</b>	Área > 70,000 km <sup>2</sup> con profundidades menores o iguales a 50 mbnm	El área donde se podría desarrollar este prototipo de parque eólico offshore es lo suficientemente grande para llevar acabo el proyecto; además, las profundidades hacen viable esto.
<b>Riesgo de Evento Natural Turbina Eólica elegida</b>	Moderado	Un proyecto de este tipo siempre tendrá un riesgo asociado, es por eso que es catalogado moderado. Al estar localizado en el caribe, está expuesta a el paso de alguna tormenta tropical o huracán.
<b>Turbina Eólica</b>	General Electric 4.1 MW1-13	Esta turbina cumple con las características mencionadas en esta propuesta (ver análisis técnico 1-b).

## **6 Conclusiones y Recomendaciones**

A lo largo de este trabajo se ha informado sobre los retos que los seres humanos en materia de recursos energéticos enfrentan hoy en día, así como una posible de varias soluciones. La baja en las reservas globales de combustibles fósiles, el precio volátil del barril de petróleo, el desarrollo de tecnologías alternas para la obtención de energía, la preocupación por el medio ambiente, entre otras, han llevado al desarrollo de nuevas propuestas de soluciones a los problemas que se enfrenta la sociedad hoy en día.

Al analizar el deterioro ambiental que ha tenido el planeta Tierra debido al consumo indiscriminado de ciertas fuentes de energía, se hace evidente que el planteamiento y desarrollo de soluciones que puedan contribuir a la mitigación de estos problemas ocasionados es necesario. La propuesta de un parque eólico offshore es un proyecto que puede ser llevado a cabo no solo en la Sonda de Campeche, sino también en alguna otra costa donde se hagan los estudios característicos pertinentes.

Las observaciones realizadas en la Sonda de Campeche dejan claro que al ser una zona con bajas profundidades, la construcción de un parque eólico offshore es posible; además, el área con el cual ese Estado de la República cuenta, es realmente extensa. Así mismo, al analizar los vientos de la zona se pudo determinar que eran de muy buena calidad para el correcto funcionamiento de una turbina eólica.

El clima es un factor que aumenta el riesgo de la inversión de este proyecto. Esto se debe al cambio climático ocasionado por los gases de efecto invernadero que hacen cada vez las tormentas más fuertes o menos predecibles; sin embargo, la Sonda de Campeche sigue mostrando ser un lugar favorecido debido a las pocas ocurrencias de un Huracán categoría 3 o mayor que haya pasado por la zona.

Por otro lado, una vez analizadas y comprobadas las características de la zona en comparación con las especificaciones internacionales de estos proyectos, se estimaron los costos. Los resultados demuestran que al ser una tecnología nueva para el país y no estar concretamente regulada, puede ser costosa para un país en desarrollo como lo es México; no obstante, se puede pensar que el

proyecto es rentable y que al ser expandido en la instalación de mayor cantidad de MW, este pudiera llegar a disminuir sus costos.

Ahora bien, la propuesta realizada en este trabajo muestra la factibilidad a partir de una ingeniería conceptual y que si se quisiese seguir el desarrollo del proyecto, se tendrían que verificar los datos expuestos con estudios como los que se llevan a cabo en otros países. De igual manera, se debería implementar una institución que se encargará de este tipo de propuestas y su seguimiento para agilizar el tiempo en estudios, documentos e implementaciones, y por otro lado, en la disminución de costos.

## 7 Bibliografía

Acevedo, A. M. (2009). *Predicción de la Demanda Futura de Energía Eléctrica en México*. CINVESTAV - IPN, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Mexico.

Al-Shemmeri, T. (2010). *Wind Turbines*. Ventus Publishing ApS.

Archambault, P. (2014). *Physique PC-PC\**. Paris, Isla de Francia, Francia: Pearson France.

Banco Mundial. (2015, 12 15). *Banco Mundial*. Recuperado 05 28, 2016, de Voices: <http://blogs.worldbank.org/voices/es/nuevos-datos-sobre-participacion-privada-en-infraestructura-en-economias-emergentes>

Banco Mundial. (2015). *Producción de electricidad a partir de fuentes hidroeléctricas*. Recuperado 04 10, 2016, de El Banco Mundial:

<http://datos.bancomundial.org/indicador/EG.ELC.HYRO.ZS>

Blain, L. (2014, November). *Wave Net - The Floating , Flexible Wave Energy Generator*. Recuperado de Gizmag: <http://www.gizmag.com/albatern-wavenet-squid-floating-wave-energy/34942/>

BVG Associates. *A Guide to an Offshore Wind Farm*. The Crown Estate.

CFE. (2014, 11 10). *CFE y la electricidad en México*. Recuperado 02 26, 2016, de CFE Comisión Federal de Electricidad:

[http://www.cfe.gob.mx/ConoceCFE/1\\_AcercadeCFE/CFE\\_y\\_la\\_electricidad\\_en\\_Mexico/Paginas/CFEylaelectricidadMexico.aspx](http://www.cfe.gob.mx/ConoceCFE/1_AcercadeCFE/CFE_y_la_electricidad_en_Mexico/Paginas/CFEylaelectricidadMexico.aspx)

CFE. (2014). *Informe Anual 2014*. Comisión Federal de Electricidad, Mexico.

Costanzo, C. D. (2015, 01 22). *Excelsior*. Recuperado 11 11, 2015, de <http://www.excelsior.com.mx/global/2015/01/22/1004035>

CRE. (2015, 01 26). *Misión y Visión*. Recuperado 01 27, 2016, de Comisión Reguladora de Electricidad: <http://www.cre.gob.mx/articulo.aspx?id=11>

Danish Wind Energy Association . (2003, Junio 8). *Glosario de energía eólica* . Recuperado 3 2016, Marzo, de Windpower.org:

[http://www.motiva.fi/myllarin\\_tuulivoima/windpower%20web/es/glossary.htm#e](http://www.motiva.fi/myllarin_tuulivoima/windpower%20web/es/glossary.htm#e)

Desjardins, J. (2016, Marzo 27). *How Wind Turbines Work* . Recuperado Abril 3, 2016, de Visual Capitalist : <http://www.visualcapitalist.com/animation-how-wind-turbines-work/>

Ea Energy Analyses. (2007). *50% Wind Power in Denmark in 2025 -English Summary*. Copenhagen.

European Wind Energy Association. (2013). *Deep Water: The next step for offshore wind energy*.

Evans, S. (2015, 01 25). *Renewables*. Recuperado 11 10, 2015, de CarbonBrief: <http://www.carbonbrief.org/uk-meets-interim-renewable-energy-target-says-decc-report>

Gío-Argaéz, F. (2006). Campeche y sus recursos naturales. *Revista Mexicana de Historia Natural, A.C.* , 247.

Gipe, P. (2004). *Wind Power: Renewable Energy for Home, Farm, and Business*. USA: Chelsea Green Publishing.

GWEC. (2012). *China Wind Energy Outlook 2012*.

GWEC. (2014). *Global Offshore*. Recuperado 04 10, 2016, de GWEC Global Wind Energy Council: <http://www.gwec.net/global-figures/global-offshore/>

Hernández, C. (2013, 08 13). *Energías Alternativas*. Recuperado 05 29, 2016, de Energía de Biomasa: <http://orgcarml-nekoponejo-cv00.blogspot.mx/2013/08/energia-de-biomasa.html>

Högselius, P., & Kaijser, A. (2009). The internationalization of electricity. *Utilities Policy* , 258-266.

iiDEA. (2014). *Universidad Nacional Autónoma de México*. Recuperado 05 28, 2016, de Instituto de Ingeniería UNAM: <http://proyectos2.iingen.unam.mx/IIDEA/3LineasDeInvestigacion/PWG.htm>

Innovation Norway. (2013). *Transition to green energy in China, Japan, and Korea*.

Lavín, M. (2005). Oceanografía y Meteorología del Golfo de Tehuantepec. *GEOS* , 25 (1).

Malhotra, S. (2011). *Selection, Design and Construction of Offshore Wind Turbine Foundations*. USA: Parsons Brinckerhoff, Inc.

Nielsen, L. (2011). *Danish Energy Agency*. Recuperado 09 14, 2015, de <http://www.ens.dk/en/supply/renewable-energy/wind-power/offshore-wind-power/procedures-permits-offshore-wind-parks>

North American Bird Conservation Initiative. (2014). *The State of Birds*. U.S Department of Interior, Washington.

Páez, D. P. (2009). Política e integración sectorial para la sustentabilidad en costas. *5º Encuentro Nacional de Playas Limpias* (p. 4). Nvo. Vallarta: SEMARNAT.

Power-Technology. (2014, 01 02). Recuperado 03 24, 2015, de Power-technology.com: <http://www.power-technology.com/features/featurethe-worlds-biggest-wind-turbines-4154395/>

Ren21. (2015). *Renewable 2015 Global Status Report*. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century and Institute for Sustainable Energy Policies, Paris.

Rincón, V. R. (2015). Los pros y los contras de la Reforma Energética de acuerdo el paradigma del desarrollo sustentable. *Revista Digital Universitaria* , 16 (1).

Secretaría de Energía. (2015). *Balance Nacional de Energía 2014*. SENER. México: SENER.

SEGOB. (2015). *Misión*. Recuperado 11 15, 2015, de SEGOB: [http://www.segob.gob.mx/es\\_mx/SEGOB/Mision](http://www.segob.gob.mx/es_mx/SEGOB/Mision)

SEMAR. (2012). *Misión y Visión*. Recuperado 11 15, 2015, de SEMAR Secretaría de Marina: <http://www.semar.gob.mx/s/organizacion/mision-vision.html>

SENER. (2014). *Misión y Visión*. Recuperado 11 15, 2015, de SENER Secretaría de Energía: <http://www.energia.gob.mx/portal/Default.aspx?id=2624>

Serrano, J. C. (2013). *Composite Materials for Wind Blades*. Recuperado Marzo 5, 2016, de Wind Systems: <http://www.windsystemsmag.com/article/detail/149/composite-materials-for-wind-blades>

Shankleman, J. (2015, 08 07). Recuperado 10 25, 2015, de businessGreen: <http://www.businessgreen.com/bg/news/2421108/crown-estate-upbeat-on-uk-offshore-wind-prospects-despite-scaling-back-of-giant-dogger-bank-project>

Soares, G. G. (2015). *Renewable Energies Offshore*. Leiden, Holanda: CRC Press.

Soto, R. H. (2011). *El uso de aeroventiladores para la generación de electricidad en plataformas petroleras*. IPN, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Plantel Ticoman, Mexico.

Stephen Rose, P. J. (2012). Quantifying the hurricane risk to offshore wind turbines. *Prosc Natl Acad Sci* , 109 (9).

Suárez, Á. C. (2015, 05 15). Prevén llegada de 26 ciclones a México. *24 Horas* .

Swedish Institute. (2013, 08). *Facts About Sweden*. Recuperado 11 11, 2015, de Sweden.se: <https://sweden.se/wp-content/uploads/2013/11/Energy-Low-Res.pdf>

The Crown Estate. (2010). *A Guide to an Offshore Wind Farm*. UK: The Crown Estate.

The Johns Hopkins University. (2011, 01 18). *The JHU Gazette* .

U.S Department of Energy. (2004). *ENERGY.GOV*. Recuperado 05 28, 2016, de Electricity Generation: <http://energy.gov/eere/geothermal/electricity-generation>

Villalobos-Zapata, G. J., & Mendoza Vega, J. (2010). *La Biodiversidad en Campeche: Estudio de Estado*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Gobierno del Estado de Campeche. Campeche: Universidad Autónoma de Campeche.

Wyatt, S., Al-Karim, G., & Rhodri , J. (2014). *Detailed appraisal of the offshore wind industry in China*. Carbon Trust. London: The Carbon Trust.