



Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Estudios de Postgrado

Maestría en Gestión de Mercados Eléctricos Regulados

**IMPACTO EN LA IMPLEMENTACIÓN DE MEDIDAS PARA EVALUAR LA GENERACIÓN
EÓLICA *OFFSHORE* EN LA MATRIZ ENERGÉTICA DE GUATEMALA**

Ing. Edgar Danilo Morales De León

Asesorado por el MSc. Ing. Luis Arturo Cerna Rich

Guatemala, mayo de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**IMPACTO EN LA IMPLEMENTACIÓN DE MEDIDAS PARA EVALUAR LA GENERACIÓN
EÓLICA *OFFSHORE* EN LA MATRIZ ENERGÉTICA DE GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ING. EDGAR DANILLO MORALES DE LEÓN
ASESORADO POR EL M.SC. ING. LUIS ARTURO CERNA RICH

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
MAESTRO EN GESTIÓN DE MERCADOS ELÉCTRICOS REGULADOS

GUATEMALA, MAYO 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Armando Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Edgar Darío Alvarez Cotí
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Benedicto Estuardo Martínez Guerra
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

IMPACTO EN LA IMPLEMENTACIÓN DE MEDIDAS PARA EVALUAR LA GENERACIÓN EÓLICA *OFFSHORE* EN LA MATRIZ ENERGÉTICA DE GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado con fecha 12 de noviembre de 2020.

Ing. Edgar Danilo Morales De León

LNG.DECANATO.OI.414.2022

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Posgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **IMPACTO EN LA IMPLEMENTACIÓN DE MEDIDAS PARA EVALUAR LA GENERACIÓN EÓLICA OFFSHORE EN LA MATRIZ ENERGÉTICA DE GUATEMALA**, presentado por: **Edgar Danilo Morales De León**, que pertenece al programa de Maestría en artes en Gestión de mercados eléctricos regulados después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



ingra. Aurelia Anabela Cordova Estrada

Decana

Guatemala, mayo de 2022

AACE/gaoc



Guatemala, mayo de 2022

LNG.EEP.OI.414.2022

En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del asesor, verificar la aprobación del Coordinador de Maestría y la aprobación del Área de Lingüística al trabajo de graduación titulado:

“IMPACTO EN LA IMPLEMENTACIÓN DE MEDIDAS PARA EVALUAR LA GENERACIÓN EÓLICA OFFSHORE EN LA MATRIZ ENERGÉTICA DE GUATEMALA”

presentado por **Edgar Danilo Morales De León** correspondiente al programa de **Maestría en artes en Gestión de mercados eléctricos regulados** ; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”

Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Colí
Director

Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería





Guatemala, 20 de agosto de 2021.

M.Sc. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Presente

M.Sc. Ingeniero Álvarez Cotí:

Por este medio informo que he revisado y aprobado el **INFORME FINAL** del trabajo de graduación titulado: **“IMPACTO EN LA IMPLEMENTACIÓN DE MEDIDAS PARA EVALUAR LA GENERACIÓN EÓLICA OFFSHORE EN LA MATRIZ ENERGÉTICA DE GUATEMALA”** del estudiante **Edgar Danilo Morales De León** quien se identifica con número de carné **201504060** del programa de **Maestría en Gestión de Mercados Eléctricos Regulados**.

Con base en la evaluación realizada hago constar que he evaluado la calidad, validez, pertinencia y coherencia de los resultados obtenidos en el trabajo presentado y según lo establecido en el **Normativo de Tesis y Trabajos de Graduación aprobado por Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería Punto Sexto inciso 6.10 del Acta 04-2014 de sesión celebrada el 04 de febrero de 2014**. Por lo cual el trabajo evaluado cuenta con mi aprobación.

Agradeciendo su atención y deseándole éxitos en sus actividades profesionales me suscribo.

Atentamente,

M.Sc. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Coordinador
Área de Desarrollo Socio Ambiental y Energético
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería USAC



Guatemala, 07 agosto 2021.

**Ingeniero M.Sc.
Edgar Álvarez Cotí
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería USAC
Ciudad Universitaria, Zona 12**

Distinguido Ingeniero Álvarez:

Atentamente me dirijo a usted para hacer de su conocimiento que como asesor de trabajo de graduación del estudiante Edgar Danilo Morales De León, Carné número 201504060, cuyo título es **"IMPACTO EN LA IMPLEMENTACIÓN DE MEDIDAS PARA EVALUAR LA GENERACIÓN EÓLICA OFFSHORE EN LA MATRIZ ENERGÉTICA DE GUATEMALA"**, para optar al grado académico de Maestro en Gestión de Mercados Eléctricos Regulados, he procedido a la revisión del mismo.

En tal sentido, en calidad de asesor doy mi anuencia y aprobación para que el estudiante Edgar Danilo Morales De León, continúe con los trámites correspondientes.

Sin otro particular, me es grato suscribirme de usted.

Atentamente,



Ing. Luis Arturo Cerna Rich
M.Sc. Negocios y Estrategia
Asesor

Luis Arturo Cerna Rich
Ing. Mecánico Electricista
Colegiado 6247

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por darme la oportunidad de la vida y seguir adelante con mis sueños.
- Mis padres** Edgar Danilo Morales Gil y Zandra Rosalinda De León Rivadeneira de Morales, por su incondicional apoyo, guía y amor a lo largo de toda mi vida.
- Mis hermanas** Dulce Valeria y Dana Mariana del Rocío, por su apoyo incondicional.
- Mis familiares y amigos** Por cada grato detalle que guardo en mi corazón y el gran apoyo en todo momento.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por darme la oportunidad de superación por medio de la educación.
Facultad de Ingeniería	Por darme los conocimientos necesarios para desenvolverme como un profesional correcto y capaz.
Mi asesor	MSc. Ing. Luis Arturo Cerna Rich, por tan valioso apoyo.
Mis compañeros de estudio	Por su apoyo, tiempo y guía cuando lo necesitaba.
Mis catedráticos	Por compartir sus conocimientos para desarrollar mi formación académica.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XIII
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XV
OBJETIVOS.....	XIX
RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO	XXI
INTRODUCCIÓN	XXIII
1. MARCO REFERENCIAL.....	1
1.1. Estudios previos	1
1.2. Antecedentes.....	2
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Energía eólica.....	5
2.1.1. Energía eólica como tecnología sostenible	6
2.1.2. Cuánta energía contiene el viento	7
2.1.3. Incidencia de la energía eólica en aerogeneradores	7
2.2. El viento.....	8
2.2.1. Viento en Guatemala	9
2.2.2. Comportamiento del viento en Guatemala	10
2.3. Aplicación de la energía eólica	11
2.4. Parques conectados a la red	13
2.5. Generación eólica <i>offshore</i>	16

2.6.	Costos de la energía eólica <i>offshore</i>	18
2.7.	Perspectiva global de la generación eólica <i>offshore</i>	19
2.8.	Metodologías utilizadas en la implantación de generación eólica <i>offshore</i>	21
2.8.1.	Metodologías desarrolladas y aplicadas	22
2.9.	Metodología aplicada en el país de Guatemala	24
2.9.1.	Detalle del proceso de licitación en Guatemala.....	26
2.9.2.	Descripción del proceso de licitación	29
2.9.2.1.	Etapa de consulta.....	29
2.9.2.2.	Etapa de presentación de las ofertas ...	30
2.9.2.3.	Etapa de evaluación técnica.....	30
2.9.2.4.	Etapa de ingreso de la oferta económica inicial, evaluación económica y adjudicación	31
2.9.2.5.	Etapa de suscripción del contrato	32
2.10.	Normativa y regulación en Guatemala	32
2.10.1.	Norma de Coordinación Comercial No.1	32
2.10.2.	Norma de Coordinación Operativa No.5	34
3.	DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN	37
3.1.	Características del estudio	37
3.1.1.	Diseño	37
3.1.2.	Enfoque.....	38
3.1.3.	Alcance.....	38
3.1.4.	Unidad de análisis	38
3.2.	Variables	39
3.3.	Fases del desarrollo de la investigación.....	40
3.3.1.	Fase 1	41
3.3.2.	Fase 2	41

3.3.3.	Fase 3.....	41
3.3.4.	Fase 4.....	41
3.3.5.	Fase 5.....	42
3.4.	Técnicas de análisis de la información	42
3.4.1.	Recopilación de datos	42
3.4.2.	Proyecciones	42
3.4.3.	Gráficas y descripción estadística	43
3.4.3.1.	Análisis univariado.....	43
3.4.3.2.	Análisis bivariado.....	44
3.4.3.3.	Tendencia	44
4.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	45
4.1.	Escenarios analizados.....	45
4.2.	Memoria de cálculo	51
5.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	55
5.1.	¿Cuáles son las características diferenciadas de las plantas de generación eólica <i>offshore</i> frente a las instalaciones en tierra?	55
5.2.	¿Cómo se evaluarán los costos asociados de las plantas de generación eólica <i>offshore</i> ?.....	57
5.3.	¿Cuáles fueron los mecanismos de inserción de los proyectos de generación eólica <i>offshore</i> en los mercados eléctricos de los países más desarrollados en tecnología?.....	58
5.4.	¿Qué agregados o consideraciones deberán de incluirse dentro de la normativa de Guatemala al considerar una planta de generación eólica <i>offshore</i> ?	61

5.5. ¿Cómo se desarrollará el estudio de impacto en la implementación de medidas para evaluar la generación eólica <i>offshore</i> en la matriz energética de Guatemala?	62
CONCLUSIONES.....	65
RECOMENDACIONES	67
REFERENCIAS	69
ANEXOS.....	75

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Árbol del problema	XVI
2.	Capacidad eólica <i>offshore</i> para el año 2030 en el Reino Unido.....	20
3.	Capacidad instalada de fuentes de energía renovable en el mundo....	45
4.	Capacidad instalada por medio de fuentes de energía renovable en Centroamérica y El Caribe	46
5.	Capacidad instalada por medio de fuentes de energía renovable en Guatemala.....	46
6.	Capacidad instalada de generación eólica en el mundo	47
7.	Capacidad instalada de generación eólica <i>offshore</i> en el mundo	47
8.	Proyección exponencial de capacidad instalada de generación renovable en Guatemala	48
9.	Proyección lineal de capacidad instalada de generación renovable en Guatemala.....	48
10.	Proyección lineal de capacidad instalada de generación eólica <i>offshore</i> en el mundo.....	49
11.	Reducción de los costos en generación de energía eólica	50

TABLAS

I.	Componentes del viento en Guatemala	10
II.	Enfoque de licitación por países de la región.....	23
III.	Requerimientos para una central eólica.....	34

IV. ¿Cuáles son las características diferenciadas de las plantas de generación eólica *offshore* frente a las instalaciones en tierra?39

V. ¿Cómo se evaluarán los costos asociados de las plantas de generación eólica *offshore*?39

VI. ¿Cuáles fueron los mecanismos de inserción de los proyectos de generación eólica *offshore* en los mercados eléctricos de los países más desarrollados en tecnología?40

VII. ¿Qué agregados o consideraciones deberán de incluirse dentro de la normativa de Guatemala al considerar una planta de generación eólica *offshore*?.....40

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
\$	Dólar estadounidense
GW	Gigavatio
kg/m³	Kilogramo sobre metro cúbico
kVA	Kilovoltio amperio
kW	Kilovatio
kWh	Kilovatio hora
m	Metro
m/s	Metro sobre segundo
MW	Megavatio
MWh	Megavatio hora
%	Porcentaje

GLOSARIO

AMM	Administrador del Mercado Mayorista, es el ente operador del sistema y operador del mercado mayorista.
Anemómetro	Instrumento para medir la velocidad del viento.
Apalancamiento	Es emplear cierto grado de endeudamiento para financiar una inversión.
CNEE	Comisión Nacional de Energía Eléctrica, es el ente regulador del subsector eléctrico en Guatemala. Indistintamente se le mencionará como Comisión.
Densidad	Es la densidad del aire, que se presenta como la relación entre la masa y el volumen del aire, sus dimensionales son kg/m^3 .
ERNC	Energías renovables no convencionales, estas energías no tienen agotamiento del recurso o fuente de energía primaria.
GDP	<i>Gross domestic product</i> , es una magnitud macroeconómica y es una medida del valor de la actividad económica de un país.

LCOE	<i>Levelized cost of energy</i> o costo nivelado de la energía (traducido al español).
Licitación	Proceso regulado por medio del cual las distribuidoras en Guatemala contratan energía y potencia.
MEM	Ministerio de Energía y Minas, es el ente rector del subsector eléctrico en Guatemala.
NCC	Normas de Coordinación Comercial, emitidas por el Administrador del Mercado Mayorista y aprobadas por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica.
NCO	Normas de Coordinación Operativa, emitidas por el Administrador del Mercado Mayorista y aprobadas por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica.
NTC	Norma Técnica de Conexión, emitida por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica en resolución CNEE-256-2014.
NTCSTS	Normas Técnicas de Calidad del Servicio de Transporte y Sanciones.
Offshore	Hace mención al tipo de generación eólico <i>offshore</i> ; alejado de la costa o mar adentro.
Onshore	Hace mención al tipo de generación eólica <i>onshore</i> ; en tierra.

SNI	Sistema Nacional Interconectado; porción del sistema eléctrico nacional que se encuentra interconectado.
TDR	Términos de Referencia, elaborados por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica en los procesos de licitación de suministro de potencia y energía.

RESUMEN

El estudio del impacto en la implementación de medidas para evaluar la generación eólica offshore está centrado en tres puntos referenciales: la comparativa de las características de la tecnología eólica *offshore* contra la eólica *onshore*; desde una perspectiva evaluativa no técnica, la disminución de costos a través del tiempo; directamente ligado con la capacidad instalada de generación y, los procesos de implementación de la tecnología en los mercados eléctricos.

Siendo las medidas de implementación o inserción en los mercados el punto fundamental a tratar, ya que los aspectos de previa mención son enfocados a lo que se debe de considerar cuando un país aplica los mecanismos adecuados para la inserción de nueva generación.

Los mecanismos de inserción definidos por excelencia en la práctica y la teoría son las licitaciones, por ende, las medidas para adecuar un nuevo tipo de generación están enfocados a las etapas del proceso. Dentro del estudio se consideran las etapas de las licitaciones con énfasis presuntoso en evaluaciones técnicas y evaluaciones económicas, directamente relacionado con los requerimientos conjeturales de un nuevo tipo de generación, siendo este caso la generación eólica *offshore*.

Los mecanismos de inserción manifestados en el estudio se complementan con la normativa vigente del país, evaluando los apartados que podrían afectar un correcto desarrollo y, a consecuencia de esto, exponer dichos puntos haciendo las salvedades correspondientes.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

- Contexto general

Guatemala ha adoptado diferentes obligaciones internacionales referente al incremento de la participación de energía renovable y compromisos ambientales que, a pesar de ser un impulso para crear desarrollo sostenible, es también un amplio panorama con distintos factores de estudio de nuevas tecnologías o tecnologías comunes, pero en distintas áreas de aplicación.

Evaluar la generación eólica en mar adentro es considerar cómo se ha incorporado dentro de los mercados eléctricos de los países que la han implementado e implantado, es estudiar los parámetros técnicos y costos asociados a la tecnología.

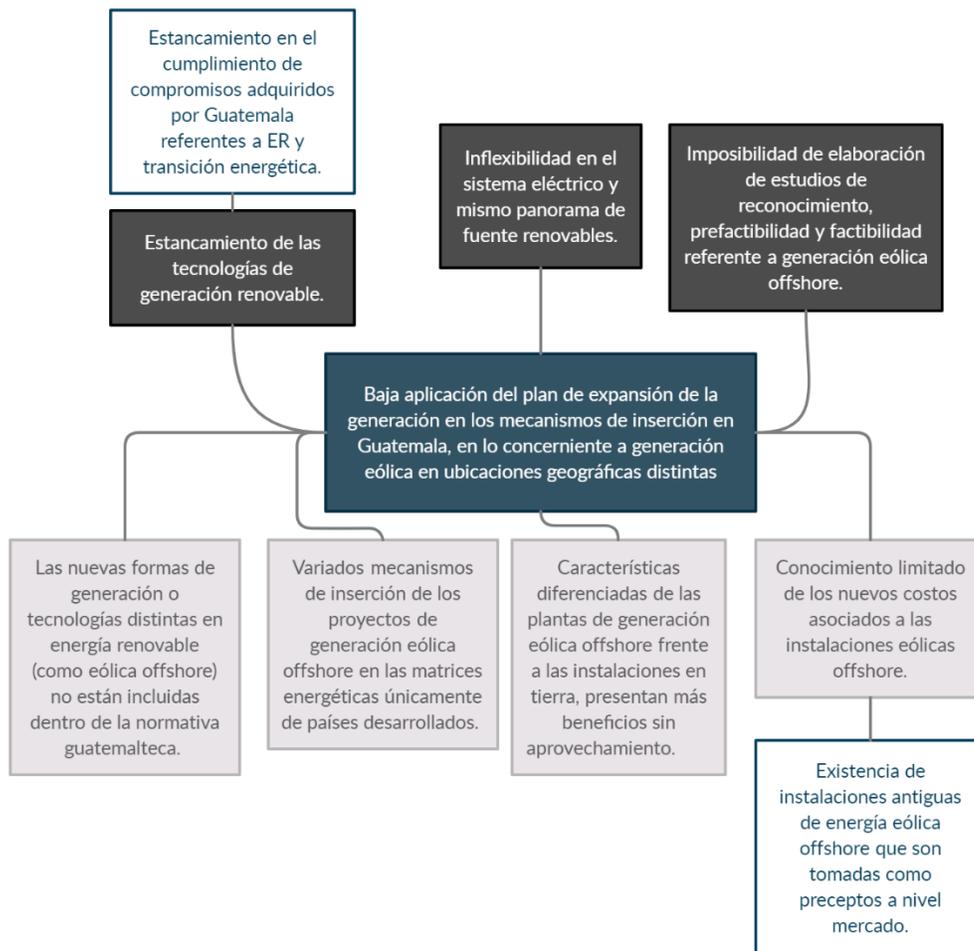
El panorama de evaluación para el estudio de impacto en implementación de medidas para evaluar la generación eólica en mar adentro es esencial dado los preceptos de instalación de las primeras plantas alrededor del mundo y dado que tampoco es una tecnología comúnmente instalada en mar adentro.

La perspectiva del planteamiento también se sitúa en la aplicación de la evaluación de nuevas tecnologías de generación, por lo que la regulación y normativa deberán de ser pertinentes para estas nuevas disposiciones.

- Descripción del problema

La formulación del estudio de impacto de implementación de medidas y métodos para evaluar generación eólica *offshore* no ha sido desarrollada en el país, pauta principal para que no se evalúe el desarrollo de estudios de reconocimiento, prefactibilidad y factibilidad en el tema.

Figura 1. **Árbol del problema**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

- Formulación del problema

Lo anteriormente descrito dio como resultado una interrogante principal, la cual se complementa por medio de sus preguntas auxiliares:

- Pregunta principal

¿Cómo se desarrollará el estudio de impacto en la implementación de medidas para evaluar la generación eólica *offshore* en la matriz energética de Guatemala?

- Preguntas auxiliares

- ¿Cuáles son las características diferenciadas de las plantas de generación eólica *offshore* frente a las instalaciones en tierra?
- ¿Cómo se evaluarán los costos asociados de las plantas de generación eólica *offshore*?
- ¿Cuáles fueron los mecanismos de inserción de los proyectos de generación eólica *offshore* en los mercados eléctricos de los países más desarrollados en tecnología?
- ¿Qué agregados o consideraciones deberán de incluirse dentro de la normativa de Guatemala al introducir una planta de generación eólica *offshore*?

- Delimitación del problema

El estudio de impacto en la implementación de medidas para evaluar la generación eólica *offshore* está limitado a la matriz energética y al mercado eléctrico regulado de Guatemala, evaluando únicamente tres países que hayan implementado e implantado esta tecnología, utilizándolos como base comparativa en su legislación del sub sector energético y matriz energética.

OBJETIVOS

General

Estimar el impacto en la implementación de medidas para evaluar la generación eólica *offshore* en la matriz energética de Guatemala.

Específicos

- Establecer las diferencias en características entre la generación eólica *offshore* sobre la generación eólica onshore.
- Evaluar los costos asociados a la generación eólica offshore.
- Describir los mecanismos regulatorios de inserción de los proyectos de generación eólica offshore en los mercados eléctricos de los países más desarrollados en tecnología.
- Proponer incluir el apartado de generación eólica offshore dentro de la normativa guatemalteca.

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

- **Diseño:** el estudio adoptó un diseño no experimental, dado que se limitó a utilizar información relacionada a la integración de la matriz energética de otros países, relacionada con los costos asociados a la generación eólica *offshore* en un panorama global. Además, se tomó en consideración la regulación y normativa en Guatemala con posibles propuestas.
- **Enfoque:** el enfoque de la investigación es mixto, basándose en la prioridad del análisis cuantitativo de indicar características relacionadas a costos y en el análisis cualitativo relacionando capacidad instalada, diseño de las matrices energéticas, normas y regulaciones.
- **Alcance:** el alcance de la investigación es descriptivo, puesto que la información estuvo detallada de acuerdo a relaciones entre algunas variables con algún impacto estadístico significativo. Dicho desarrollo está desglosado en la sección “técnicas de análisis de la información”.
- **Unidad de análisis:** la población de estudio fue la matriz energética de Guatemala, en donde se analizó la incorporación de nuevas tecnologías en generación, tomando en consideración los costos, producción, mecanismos de inserción, regulación y normativa.
- **Variables principales:** las variables que se analizaron principalmente fueron capacidad instalada y proyectada, generación, costos totales de instalación y normativa.

A continuación, se presentan las fases del estudio y las técnicas de análisis de información para el desarrollo del presente trabajo.

- Fase 1. Revisión de literatura: se consultaron libros, informes, artículos científicos, políticas existentes y leyes.
- Fase 2. Gestión de la información: se recopiló la información de las variables en la fase previa; determinando las observaciones de éstas y la periodicidad de estudio.
- Fase 3. Análisis de información: se tomó como premisa el análisis de las características (incluyendo todos los costos asociados) de generación eólica en tierra y mar.
- Fase 4. Evaluación comparativa: se tomó como base las políticas, métodos para contratos y leyes propuestas en otros países.
- Fase 5. Interpretación de inclusión de información: se expusieron los comentarios pertinentes sobre la normativa guatemalteca y métodos de inserción relacionados al subsector eléctrico, haciendo las salvedades correspondientes respecto a la generación eólica *offshore*.
- Técnicas de análisis de información: el desarrollo de las técnicas estadísticas descriptivas se basó en variables metodológicas, utilizando análisis univariado y bivariado únicamente para los costos asociados.

INTRODUCCIÓN

El impacto en la implementación de medidas para una nueva forma de generación de energía en un país en vías de desarrollo es considerado oportuno realizarlo, ya que estos estudios pueden ser pauta para evaluar o concretar un análisis de reconocimiento, prefactibilidad y factibilidad, previniendo resultados fortuitos.

El impacto en considerar la implementación de métodos y medidas para evaluar la generación eólica *offshore* en Guatemala se basa en todas las premisas que han adoptado en la última década los países que cuentan con este tipo de tecnología implementada, implantada y con un continuo desarrollo tecnológico del mismo; vislumbrando el panorama adoptado en la generación en los respectivos tipos de mercados y su inserción al comienzo en los mismos.

El estudio de impacto se fundamenta en la premisa de que la región posee gran fuerza del viento mar adentro y, además la segunda premisa se estipula como el desaprovechamiento del mismo recurso. En contraposición a estas premisas hay muchos factores más a replantear para la implementación de medidas y métodos para considerar la generación eólica *offshore* como una subdivisión de generación eólica en la matriz energética del país.

El estudio de impacto se basa en la implementación de medidas representando comparativas de metodologías, con el estudio de mecanismos de asociatividad de los proyectos implementados y el estudio de los mercados eléctricos en los que se han establecido estos proyectos.

En el estudio será correcto desarrollar una subdivisión de la generación eólica, debido a que las instalaciones de generación en tierra y en mar poseen diversos factores de evaluación, distinto recurso del viento o cantidad del recurso, distintos costos totales de instalación, distintos costos variables, entre otros. Con lo cual no se puede mezclar el reconocimiento de la generación eólica cuando se encuentre en distintas disposiciones de terreno, ya que esto provee distintos datos de evaluación; por lo cual la normativa deberá de ser considerada integrando las nuevas tecnologías y creando la subdivisión en las mismas.

El impacto en la implementación de medidas se plasma como un referente más ante algunos objetivos específicos de la transición energética renovable dentro de la política energética de Guatemala y, ante los tratados y compromisos firmados referentes a ERNC y ambiente.

1. MARCO REFERENCIAL

El objetivo principal del presente marco referencial fue recopilar los antecedentes que se utilizaron en este estudio de impacto en la implementación de medidas para evaluar la generación eólica offshore, lo cual resultó ser muy útil para el investigador por el hecho de que se lograron identificar vacíos e interrogantes por explotar para la debida justificación del estudio realizado.

1.1. Estudios previos

En cuanto a estudios previos relacionados con energía eólica en Guatemala, cabe mencionar que se han desarrollado y se encuentran los siguientes: *Diseño de la investigación de la metodología para el cálculo y modelado del perfil de velocidades de viento como parte del estudio de prefactibilidad de la generación eléctrica en Guatemala* elaborado por Pérez (2009), *Sistema de información geográfica aplicado al desarrollo de energía eólica en Guatemala* elaborado por Gutiérrez (2015), *Aprovechamiento de la energía eólica combinada con otras fuentes de energía renovable en San José Pinula municipio de Guatemala, Guatemala* elaborado por Velásquez (2011), entre otros.

Haciendo énfasis en que todos los estudios en Guatemala han sido de carácter técnico ingenieril, con enfoque a comunidades específicas, con enfoque a generación a pequeña escala constituyéndose en algunos casos como GDRs y con enfoque únicamente a generación eólica *onshore*.

Sin embargo, no se cuenta con estudios previos en relación a generación eólica offshore con enfoque en las medidas de inserción en el mercado eléctrico, siendo específico: ningún estudio que vea por los criterios a adoptar en las licitaciones para la incorporación de nueva generación o generación renovable común, pero con disposición distinta en ubicación.

Ante la premisa de estudios en el país, es importante presentar antecedentes asociados a la conceptualización de la temática tratada, lo cual tiene como fin dar a conocer la necesidad de realizar un estudio de impacto en las medidas para la implementación de generación eólica *offshore*, para evaluar los distintos escenarios, actividad de suma importancia, que no ha sido estudiada.

1.2. Antecedentes

De acuerdo a las estadísticas de Capacidad Renovable 2019 elaboradas por International Renewable Energy Agency (2019), en América Central se alcanzó a tener una capacidad de energía eólica terrestre de 1,932 MW en el año 2019, sin poseer capacidad instalada en mar adentro.

En la actualidad el país de Guatemala presenta una capacidad instalada total en conjunto de 106,5 MW referente a generación eólica en tierra, con una producción de energía en el año 2019 de 330 GWh, representando un 2,47 % del total de la generación en ese año (Argueta, 2020).

Derivado de la capacidad instalada y el cronograma de adición de las plantas de generación eólicas (estimada en 640 MW en tierra), se aprecia el esfuerzo por un crecimiento en la diversidad de la matriz energética en el país, para crear la brecha proporcional de energía renovable y no renovable.

Adoptando consecuentemente que la generación de energía renovable prevista a corto y largo plazo se ha estipulado en tecnología que se conoce dentro del país. Sin incurrir en riesgos o la superación de limitantes por el análisis o estudios de impacto (prefactibilidad) de otros panoramas referentes a nuevas formas de generación u otras localidades en donde se pueda aprovechar mejor un recurso para generar energía, es el caso de la generación eólica *offshore*.

La energía eólica es una de las tecnologías renovables de mayor crecimiento en el mundo. Esto se debe principalmente a que los costos de instalación se han reducido significativamente en el último quinquenio, de acuerdo con la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA). En concordancia con los costos, se menciona que la instalación en tierra está constituida principalmente por los parámetros de orografía y transporte, mientras que la instalación en mar está fuertemente constituida por la orografía, lo que actualmente permite a las instalaciones en mar estar divididas en cimentación fija y sobre plataforma flotante. Todas las formas de instalación se diferencian técnica y económicamente.

Existen variedad de localizaciones con alto porcentaje del recurso del viento, pero en donde más se aprovecha es mar adentro; por lo cual muchas matrices han optado por adoptar al recurso eólico *offshore* como su mayor aliado. “El recurso eólico existente en el mar es superior y más constante que en tierra firme, con lo que aumenta la generación eléctrica de los aerogeneradores con las mismas dimensiones” (Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía, s.f, párr. 4).

Incluso existen otros factores en la superficie marina que permiten la instalación de diferentes turbinas eólicas con mayor capacidad en comparación con una instalación eólica *onshore*.

Señalando los proyectos y metodologías adoptados a nivel global, se puede mencionar que a comienzos del año 2009 existían tan solo unos 1,500 MW eólicos instalados en mar en España, la mayor parte fue más que proyectos experimentales; confirmando lo incipiente del aprovechamiento de la energía del viento en el mar (Pérez, 2009).

Haciendo mención de que las instalaciones en mar son lideradas por países desarrollados o países de primer mundo (alto GDP, consecuentemente alto desarrollo tecnológico).

La situación presente o panorama general de esta forma de generación, los compromisos adquiridos por el país referente a la diversidad en la matriz energética, inclusión o mayor participación de energías renovables con el cumplimiento de otros objetivos son los que podrían permitir aventurar un prometedor futuro para las plantas eólicas *offshore*. No obstante, el estudio de impacto para la implementación de medidas para estas instalaciones debe ser pauta para establecer o no un análisis de reconocimiento, prefactibilidad y factibilidad, para llegar a establecer una estrategia de implementación e implantación para este tipo de proyectos.

La previa mención es inherente a los preceptos que se han adoptado referente a la instalación y costos de los primeros proyectos eólicos en mar. Estos panoramas son de estudio para prever incurrir en riesgos como pioneros implantando tecnologías en localidades poco usuales.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Energía eólica

La energía eólica es la energía cinética del viento, es decir, la originada por el efecto de corrientes de aire.

La energía eólica a través del tiempo ha tenido grandes usos, su aplicación a través de las máquinas creadas para la transformación de la energía eólica a energía mecánica de rotación fue y sigue siendo la gran ventaja para desarrollar trabajo; los procesos de manufactura, transporte y la producción o generación de energía eléctrica. El último en mención siendo posible mediante aerogeneradores (el conjunto de aerogeneradores denominado parque eólico) que, a través del desarrollo continuo tecnológico con la implicación de distintas ramas de ingeniería, continúan mejorando, obteniendo un panorama más amplio en el mercado, lo que conlleva a distintos niveles de generación y costos.

La energía eólica es empleada actualmente mayoritariamente para la generación, que cae en la categoría de energía renovable, limpia y segura. La generación eólica corresponde al tipo energías renovables no convencionales (ERNC) o también denominadas energías alternativas, las cuales se plantean como una parte de la solución al cambio climático en el planeta y como pilar para la transición de las matrices energéticas de los países para el cumplimiento de los objetivos referentes a la disminución de las emisiones de efecto invernadero, entre otros. Por ejemplo, en 2019 la energía eólica evitó 198 millones de toneladas métricas de emisiones de CO₂ (IEEE, 2020).

2.1.1. Energía eólica como tecnología sostenible

Las turbinas eólicas son sostenibles debido al proceso de conversión de energía; al aprovechar el viento, el proceso es más limpio que tener que extraer o quemar material que crea cantidades masivas de emisiones como resultado. La energía eólica es una solución para reducir esas emisiones de carbono, eliminar otras formas de contaminación en el aire y, finalmente, alejarse de los métodos tradicionales que tienen el efecto contrario en nuestro planeta. Otro beneficio de la energía eólica es que esta fuente de energía es gratuita y abundante. A menudo se afirma que una turbina eólica es un dispositivo que convierte la energía cinética del viento en dinero. El hecho de que se genere energía eléctrica está inmerso y a la vez es incidente (Miller, 2020).

Pero como principal referencia podemos adoptar a la energía eólica y otras formas de ERNC como la solución ante la problemática del agotamiento futuro de las materias primas más usadas en la industria, dadas que son finitas y tal como se mencionaba previamente, representan un sector más de la contaminación para el planeta. Estos problemas son los que están guiando a la mayoría de países hacia otras fuentes de energía, por lo cual se les denomina alternativas.

Dentro de las ERNC que se posicionan cada vez más con un amplio campo o incluso empezando a incursionar dentro de las matrices energéticas en los países, se encuentran la solar y eólica. Estas incorporaciones o incrementos en inversiones referente a estos dos tipos de tecnología, es debido a la disminución de los costos de producción y costos totales de instalación; año con año han ido en disminución llegando a costos realmente competitivos que dejan encaminar la producción en masas, así mismo, se plasma como impulso hacia todos los países para su adquisición.

Pero todo esto no se relaciona solo a costos, porque también las eficiencias, potencia, características técnicas en general han ido mejorando con el paso de los años, debido principalmente a la implantación de las tecnologías en determinados países que han sido base para estudio y continuo desarrollo tecnológico.

2.1.2. Cuánta energía contiene el viento

Menos del 1 % de la energía solar que llega a la Tierra se convierte en energía eólica. En contraposición con lo expuesto, el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía [IDAE], dependencia del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio de España, menciona que aproximadamente el 2 % de la energía que llega del sol se transforma en energía cinética de los vientos atmosféricos. El 35 % de esta energía se disipa en la capa atmosférica a tan solo un kilómetro por encima del suelo. Del resto se estima que por su aleatoriedad y dispersión sólo podría ser utilizada 1/13 parte.

2.1.3. Incidencia de la energía eólica en aerogeneradores

La masa de aire, haciendo referencia a las corrientes de viento equivalentes a energía cinética, inciden sobre las palas o aspas de una turbina eólica (aerogenerador) produciendo un trabajo mecánico de rotación y tal como la palabra lo indica, por medio del generador se encarga de la producción o generación de energía eléctrica. Pero la masa de aire incidente no se puede tomar como un ente completo, ya que el rotor del aerogenerador en el cual se encuentran acopladas las palas es dependiente de tres parámetros en los cuales se encuentra subdividida esa masa de aire y son los siguientes:

- La velocidad del viento incidente

- La densidad del aire
- El área barrida por el rotor

2.2. El viento

“Es el resultado del flujo de aire entre zonas con presiones de aire distintas, que se calientan debido a la incidencia de radiación solar, así, la energía eólica es energía solar convertida en energía eólica” (Agencia Andaluza de la Energía, 2011, p.2).

Pero en esto se presentan nuevos inconvenientes dado que el viento se vuelve difícil de predecir (es decir posee parámetros como la velocidad, turbulencia, dirección, entre otros), esto es debido principalmente a los factores que lo afectan tanto en su localización como los que se desarrollan de forma global. Por ejemplo: la rotación terrestre, posición lunar, bajadas y subidas de temperatura (diferencia), orografía del terreno, obstáculos, rugosidad de la superficie, entre otros (Agencia Andaluza de la Energía, 2011).

Dado los factores previamente mencionados en la predicción del viento, se han decantado estudios y observaciones, software avanzado basado en modelos matemáticos y modelos estadísticos para la predicción del recurso, no a precisión y exactitud, pero a valores factibles que puedan trazar modelos de comportamiento. Además, lo principal en todos estos modelos se encuentra la toma de medición por medio de torres de medición eólica, registrando datos que ayudan a desarrollar los modelos antes mencionados, principalmente basados en estadística. Estas torres (sistemas completos) recolectan datos sobre el comportamiento del viento, en periodos de 10 min, y los registran.

Además, en el tratamiento de los datos de viento se estudian básicamente dos aspectos: distribuciones temporales y distribuciones de frecuencia. De forma paralela, se estudia la variación del viento con la altura y la cuantificación de la energía existente en el viento.

Las torres (sistema completo) poseen básicamente los siguientes componentes: anemómetros, veletas, sensor de temperatura, sensor de radiación, *data logger*, pararrayo y varillas de tierra, baliza y estructura (Ministerio de Energía y Minas, 2017).

2.2.1. Viento en Guatemala

Guatemala al igual que los demás países necesita datos y pronósticos de viento para estimar generación referente a tal recurso, en principio la obtención de estos datos fue posible debido a la ayuda del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) en el desarrollo del proyecto *Solar and Wind Energy Resource Assessment* (SWERA) que tenía y tiene como propósito “minimizar las barreras causadas por la falta de información y promover la utilización de la energía eólica y solar” (MEM, 2017, p.3).

El proyecto SWERA se posicionó como un pilar para nuevas formas de pensamiento en la matriz energética, ya que genera mapas de velocidad del viento, densidad de potencia del viento, entre otros; se plantea como una herramienta geoespacial que obtiene además de lo mencionado, información geográfica y de infraestructura dentro de lo más relevante a gran escala.

Además del proyecto SWERA, Guatemala cuenta con sitios de medición de viento por medio de torres de medición eólica cuyos datos comenzaron a ser recabados alrededor del año 2006, según datos del MEM (2017) se encuentran

16 puntos de medición en todo el territorio nacional. Estableciendo las localizaciones siguientes: Estanzuela, San Marcos, Santa Catarina Ixtahuacán, Alotenango, Chiquimulilla, Mataquescuintla, Morales, Villa Canales, Nentón, Guanagazapa, Moyuta, Quesada y Jutiapa.

Además, las entidades privadas han participado principalmente en la medición del recurso identificando el potencial del mismo para el desarrollo netamente de parques de generación (Polanco, 2012).

Además de los sitios previamente mencionados, también se encuentran Comapa, El Progreso, Amatitlán y San Vicente Pacaya.

2.2.2. Comportamiento del viento en Guatemala

A continuación, se presenta los componentes del viento según su período.

Tabla I. **Componentes del viento en Guatemala**

Periodo	Componente del viento	Descripción
Octubre a febrero	Componente del Norte	Estas corrientes de aire ingresan desde el territorio del Golfo de México por el departamento de Izabal y se encañonan entre las Sierras del Merendón y Las Minas, de esta forma estos vientos se aceleran y logran velocidades un poco más altas en el oriente del país, luego pasan a la zona central y se dirigen a la parte noroeste del país disminuyendo considerablemente su velocidad, cubriendo el área que está comprendida entre la Sierra de los Cuchumatanes y el Pie del Monte de la Costa Sur.

Continuación tabla I.

Marzo a junio	Componente Sur	Se mantiene la componente por la presencia de sistemas de baja presión, ubicados a lo largo del O.P. que son responsables de gobernar el flujo del viento. Cuando estos sistemas de presión son lo suficientemente grandes, hacen que el viento logre rebasar los macizos montañosos del Pie de Monte y de la Sierra de los Cuchumatanes, llegando hasta Alta Verapaz, Huehuetenango y El Quiché.
Julio a septiembre	Componente del Norte	El viento conserva su componente debido a la presencia del anticiclón semipermanente del Atlántico que mantiene un flujo a través de Izabal, excepto cuando aparecen situaciones que provocan el cambio de flujo complemente (situaciones transitorias).

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

2.3. Aplicación de la energía eólica

Actualmente el planeta ha tomado un cauce que solicita la implementación de fuentes renovables para generación, es así como la aplicación típica de la energía eólica es aprovechada en generación de energía eléctrica. Cabe recalcar que en una escala desproporcionada a lo que se prevé para generación, también se encuentran aplicaciones que siguen empleándose: Relativamente pequeñas máquinas eólicas para el bombeo de agua.

Tomando la direccional de generación, se pueden clasificar en dos grupos las instalaciones eólicas: aerogeneradores conectados a la red y aislados. Como se hace la mención previa, hay que tomar en consideración que en esta generación se habla demasiado de parques o granjas eólicas (*wind farms*), estas

corresponden únicamente a extensiones territoriales con un número mayor a uno de aerogeneradores.

Los aerogeneradores o parques eólicos conectados a la red se pueden constituir como el grupo más numeroso, teniendo la subclasificación siguiente: “aerogeneradores que inyectan toda la energía generada en la red y aerogeneradores que utilizan la energía para consumos particulares y que utilizan la red para inyectar el exceso de producción y para tomar energía en los períodos de bajo viento” (Carta *et. al.*, 2009, p. 393).

Y con un número no tan representativo actualmente se presentan las instalaciones aisladas, que están tomando auge principalmente en países desarrollados como Alemania e Inglaterra, ¿Por qué? Porque los gobiernos impulsan estas tecnologías dentro de sus políticas y nuevas regulaciones, no siendo siempre las más acertadas ante la facilidad en la implementación y los proyectos que poseen dentro de su matriz. ¿A qué se refieren las instalaciones aisladas? Las instalaciones que se suelen destinar a la electrificación de viviendas, estas suelen aplicarse dentro de algunas cooperativas entre vecinos, en comunas o municipios de los países previamente mencionados.

Como menciona Carta *et. al.* (2009):

También se utilizan los aerogeneradores para constituir sistemas híbridos con fotovoltaica o con grupos diésel para proporcionar energía a comunidades aisladas. Normalmente estas instalaciones se dimensionan para satisfacer un determinado consumo y se ubican en la proximidad del lugar de consumo. En la isla de Fuerteventura (Islas Canarias) se ha instalado un sistema híbrido eólico-diésel con el objetivo de suministrar electricidad y agua potable a un poblado de pescadores. El sistema cuenta

con un aerogenerador asíncrono de 225 kW y dos grupos diésel de 60 kVA cada uno.

La regulación del sistema se lleva a cabo mediante dos volantes de inercia y cargas de volcado resistivas. En la isla de El Hierro (Islas Canarias) en el año 2010 se terminó la instalación de un sistema híbrido eólico-diésel-hidrobombeo que cubre la demanda eléctrica de la isla. (p.393)

2.4. Parques conectados a la red

Los parques o granjas eólicas requieren para ser dotados como tal, contar con una preinversión referente a la elaboración de estudios para la obtención de permisos para la construcción del proyecto. Por ejemplo: ambientales, viento, topografía, suelo, entre otros.

La segunda etapa que se plantea en un parque eólico es la ejecución, correspondiente en tres aspectos principales: infraestructura civil, eléctrica y de control. Brevemente desglosado se puede mencionar que en la ejecución se da el transporte de infraestructura, construcción de caminos e instalación de equipos (aerogeneradores, subestaciones, centros de control, líneas de transmisión, entre otros).

La última etapa del proyecto es la operación, en la cual el parque empieza con el proceso de producción (económicamente) o generación de energía eléctrica. Las obras de construcción han cesado en esta etapa y se dan principalmente actuaciones referentes a mantenimiento o sustitución de equipos con imperfectos, antiguos o desactualizados.

Recopilando información de las etapas, se puede mencionar que en la primera etapa (preinversión) los estudios más importantes que se mencionan está: ambientales; los cuales son presididos por el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales siendo ellos el único ente encargado de ejecutar y proveer la aprobación de los estudios de viento; como se mencionaba en los apartados anteriores hacen referencia a los modelos adoptados por medio de recopilación de datos en un periodo mínimo de 5 años para observar las vertientes del viento, entre otros.

En la segunda etapa de inversión (ejecución) se inicia con el proceso de construcción correspondiente a la construcción de caminos internos; accesos para la etapa de tránsito, correspondiente desde el momento en que la maquinaria a utilizar será obtenida en los puertos de desembarque hasta las localizaciones lejanas (generalmente) o difíciles de acceder de forma ordinaria e incluso aún más para maquinaria con gran volumen y condiciones técnicas que se deban cumplir en transporte adecuado manteniendo la garantía de los equipos. Por ejemplo, en una instalación *onshore* e incluso en instalaciones *offshore* un proceso de construcción de caminos implica cumplir con señalamientos, personal de seguridad, aplanadoras, camiones para acarreo de materiales, entre otros.

En sí, la etapa de infraestructura civil abarca un porcentaje muy bajo referente a la distribución de los costos de explotación de un parque eólico pero que constituye la base de la obra, porque se ve construcción de caminos, construcción de cimentación; excavación (zanjas necesarias para el tendido de redes eléctricas), armado y fundición (*onshore* y *offshore*, en *offshore* también se observa estructuras flotantes), y sobre todo la instalación de aerogeneradores (instalación de torres, el motor, aspas con el apoyo de grúas, camiones para el traslado de partes, entre otros).

En la instalación de aerogeneradores, se deberá de tener en cuenta aspectos como las características del viento (velocidad, dirección, turbulencia, entre otros), la tipología del terreno (llano, ondulado o accidentado), disposición del terreno y la distancia entre las turbinas, ya que puede crear reducción en el potencial eólico si no se consideran tales aspectos.

Al finalizar brevemente de referir algunos aspectos en la etapa de ejecución referida a la infraestructura civil, es adecuado centrarse brevemente en la infraestructura eléctrica. Está referida como la subestación eléctrica (cuarto de control y equipos eléctricos principales para transportar la energía generada por el parque a la red), líneas de transmisión (líneas de alta tensión que van desde la S/E del parque eólico hasta la S/E de interconexión, incluyendo los cables que llevan la energía al SEN) y equipos de protecciones (pararrayos, disyuntores, entre otros).

Para Carta *et. al.* (2009) en el desarrollo de centrales de energías renovables en parques eólicos normalmente “se suelen conectar varios aerogeneradores a un transformador de baja-media tensión. Las líneas de media tensión se extienden desde los grupos de trafos hasta una S/E transformadora de media-alta tensión” (p. 395).

Y como última instancia se tiene la infraestructura de control, la cual en un parque eólico es automática. “Esta infraestructura tiene como misión realizar la conexión-desconexión del parque a la red y registrar los datos de explotación del mismo y los parámetros de funcionamiento de cada máquina” (Carta *et. al.*, 2009, p. 397).

Hay que tomar en consideración que todos los aspectos antes mencionados como viento (todas sus implicaciones), infraestructura (civil, eléctrica y control),

disposición y operabilidad son literalmente la forma en la cual se determinará la energía generada, como en cualquier otro proyecto de generación.

2.5. Generación eólica *offshore*

Hace referencia a la generación que se produce en las costas marinas o en mar adentro, representada como una forma de generación con mayor potencial dado que “el recurso eólico existente en el mar es superior y más constante que en tierra firme, con lo que aumenta la generación eléctrica de los generadores con las mismas dimensiones” (Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía, s.f, párr. 4).

Otro de los factores que se consideran en la generación eólica *offshore* es nuevamente el valor medioambiental y por añadidura un valor económico-social. Lo cual lleva a posicionarla como otra energía alternativa que desde comienzos del año 2010 ha estado deslumbrando con mayor énfasis en las matrices energéticas de los países más desarrollados, como era de esperarse al comienzo de las formas aplicativas de generación eólica *offshore* se presentaron ciertas características fundamentales que fueron hincapié para concretar un panorama mundial referente a costos en esta tecnología, se hace referencia en *offshore* un incremento aproximado del 20 % del total de costos sobre los costos normales asociados a una instalación eólica *onshore*.

A los comienzos se crea la idea de la inaccesibilidad en muchas matrices, pero a la vez crea la idea de elaborar estudios por parte de las empresas desarrolladoras de la tecnología; introduciendo estudios de comportamiento, impacto ambiental, nuevas formas de instalación, desarrollo en capacidad de turbinas, entre otros.

Es adecuado resaltar las formas de instalación que se fueron desarrollando, ya que están cambiando la perspectiva inicial que se poseía, dado que los costos totales de instalación de una plataforma flotante de aerogenerador (tecnología relativamente nueva) se reducen un 29 % en comparativa con una plataforma sumergible con cimentación (tecnología relativamente antigua), panorama que está impulsando en países desarrollados a planear parques eólicos de gran tamaño en mar adentro, perspectiva que no era posible hace 10 años.

Además de este factor tan importante, el desarrollo de aerogeneradores para generación *offshore* disminuye en altura con posibilidades de colocar palas más grandes para un mejor aprovechamiento del recurso. Por ejemplo, se encuentran aerogeneradores tan potentes como la *Haliade – X 12 MW* de *General Electric* que impulsa la eficiencia y la disminución de costo de la generación eólica *offshore*, ésta y otras pueden llegar a generar un 45 % más de lo que generan los otros aerogeneradores en el mercado (*General Electric*, s.f). Sucesivamente irá creciendo el mercado, creando gran competitividad con gran desarrollo continuo tecnológico tal como está sucediendo con el mercado de la energía solar fotovoltaica.

Es preciso conocer el panorama de instalación que se presenta en el mar para crear una dimensión de lo que está percibiendo el mercado en innovación, principalmente con mayor tasa de parques instalados debido a su antigüedad se encuentran los aerogeneradores marinos con cimentación fija, los cuales son clasificados en función de su cimentación para construcción: Monopilote, de apoyo por gravedad y trípode. Además, se encuentran los aerogeneradores sobre plataforma flotante, subdivididos de acuerdo a su anclaje en el fondo marino: Monopilar flotante, semisumergible (con bloques de hormigón) y plataforma de apoyo en tensión.

2.6. Costos de la energía eólica *offshore*

Los costos totales de instalación de los parques eólicos marinos disminuyeron en un 18 % entre 2010 y 2019 (IRENA, 2020).

Dado que algunos años vieron un mercado relativamente escaso para la eólica *offshore*, sin embargo, con el despliegue siendo dominado en diferentes años por mercados en diferentes etapas de vencimiento, existe un grado significativo de volatilidad interanual en los costos totales de instalación de parques eólicos marinos.

Los costos de instalación promedio ponderado global para la energía eólica marina se redujo de USD 4,650 kW a USD 3,800 kW entre 2010 y 2019 (Daley, 2020).

Una variedad de factores está detrás de esto, en concordancia con la evolución general de los costos de instalación impulsada mediante esfuerzos para reducir el costo total de la generación en un proyecto; hay algunos factores que elevan los componentes de costos individuales, mientras que al mismo tiempo otros los reducen.

Consecuentemente, la continua innovación en tecnología de turbinas, elaboración de turbinas más grandes y mayor experiencia con el desarrollo de proyectos, se observó que los factores de capacidad promedio aumentan de un 37 % en 2010 a 44 % en 2019.

En 2019, en comparación con 2018, hubo una ligera disminución (-1 %) en el LCOE promedio ponderado global de proyectos eólicos marinos. Esto provocó

la disminución del LCOE de la energía eólica marina entre 2010 y 2019 al 29 %, desde USD 0.162 kWh hasta USD 0.115 kWh.

2.7. Perspectiva global de la generación eólica *offshore*

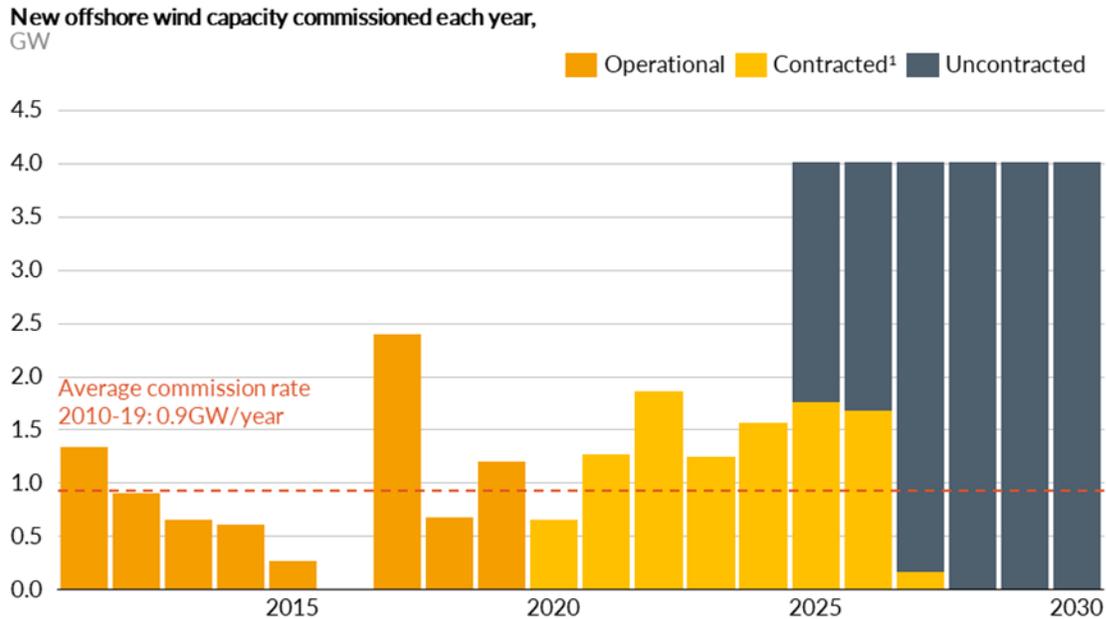
Diferentes países se han sumado o han incursionado en generación eólica, en donde China es el país que mayor capacidad instalada tiene referente a esta fuente. Pero el país que cuenta con mayor *offshore* es Alemania y de acuerdo con Chaidez (2020) se menciona que:

Alemania es el primer país europeo en la lista, su capacidad en la materia proviene principalmente de la energía eólica marina, es decir, la fuerza producida por el viento en alta mar. Su capacidad ronda los 59,3 GW. Sus parques eólicos marinos más grandes son los *Gode Wind farms* (fase 1 y 2), que tienen una capacidad combinada de 582 MW. También alberga el parque eólico marino *Nordsee One*, que tiene una capacidad de 382 MW y proporciona energía para 400.000 hogares. (párr. 10)

La perspectiva en Europa es muy clara, dado que Boris Johnson (primer ministro de Reino Unido) anunció el proyecto de inversión masiva en centrales *offshore*, estableciendo como principal objetivo que todos los hogares obtengan su energía de esas centrales eólicas en 2030 (Pastor, 2020).

Perspectiva que cambió de un año a otro, dado que para el año 2019 se había establecido 30 GW instalados para el año 2030, panorama cambiante en el presente año, agregando 10 GW más de capacidad instalada para el 2030, cifra traducida en instalación de 260 aerogeneradores por año.

Figura 2. Capacidad eólica *offshore* para el año 2030 en el Reino Unido



Fuente: Aurora Energy Research (2020). *Reaching the UK Government's target of 40GW of offshore wind by 2030 will require almost £50bn in investment.*

Capacidad instalada voluminosa, en donde se presentarán nuevas tecnologías flotantes. Todo esto se plantea como inversiones que promueven el cumplimiento de tratados internacionales entre países para el cumplimiento de neutralidad de emisiones, en donde no es únicamente la instalación de más capacidad, sino promover regulaciones y vetos en el mismo sub sector eléctrico.

2.8. Metodologías utilizadas en la implantación de generación eólica *offshore*

La metodología más utilizada en la región en los procesos de contratación de energía y potencia son los diseños de subastas, teóricamente el diseño de subastas posee tres elementos en su desarrollo: diseño y precalificación, licitación y contratación.

La metodología previamente mencionada se presenta en el país siguiendo las etapas de desarrollo de: los términos de referencia, las bases de licitación (con el manual de evaluación) y consecuentemente la evaluación económica a través de los procesos de rondas sucesivas (de acuerdo a los elementos previamente desarrollados) para el contrato de suministro de potencia y energía en contratos a largo plazo no mayor a quince años.

El diseño de licitaciones en la región posee características que las llevan al mismo fin, pero presentan aspectos muy importantes a destacar que diferencian las metodologías, por ejemplo, los contratos se llegan a suscribir haciendo diferencia entre potencia, energía o una combinación de ambos; o la duración de los contratos que se encuentra influenciada directamente por el enfoque de la licitación, por ejemplo, al tener un tecnología específica, un grupo de tecnologías o tecnología neutra, en conclusión el enfoque mencionado se ve influenciado por el tipo de tecnología.

Algunos países de la región que poseen matrices energéticas diversificadas con porcentajes importantes de energías renovables han establecido (en los procesos de subastas) darle una mayor importancia a este tipo de fuentes de energías, brindándoles un mayor tiempo en la duración de los contratos con el

correspondiente tiempo de entrega de los proyectos proporcional a la tecnología que están ofertando.

Al brindar las pautas anteriores en el tema de licitaciones, se puede notar que al tener un proceso robusto que llegue a cubrir gran cantidad de factores con un enfoque específico, se podrán suscribir contratos que sirvan como un medio para garantizar a las partes involucradas un beneficio proporcional de acuerdo a los objetivos que se hayan establecido en las licitaciones.

2.8.1. Metodologías desarrolladas y aplicadas

Al mencionar la metodología empleada para la inclusión de dichos proyectos es conveniente resaltar a los países que han aplicado licitaciones para adquirir generación, esto de forma concerniente a la dependencia de las condiciones del mercado, por ejemplo: si los mercados exclusivamente de energía permitirán a los participantes cubrir todos los costos fijos y variables de los proyectos de generación y, a su vez, incentivar nuevas inversiones en generación, entre otros (Correia, Tomasquim y Hallack, 2020).

Al tener referencia de la aplicación se menciona según Correia, Tomasquim y Hallack (2020) que:

México licita tanto capacidad como generación, mientras que Argentina solo adquiere capacidad y Perú, Brasil y Chile solo adquieren generación. En Chile, sin embargo, la generación se adjudica dentro de bloques de tiempo intradiarios y estacionales, lo que hace que las tecnologías renovables intermitentes y estacionales sean más competitivas, pero puede desalentar la participación de otras tecnologías. (p.14)

Bajo lo expuesto en la metodología empleada y la subdivisión del enfoque de licitaciones aplicadas, se presenta a continuación el criterio específico histórico de algunos países de la región:

Tabla II. **Enfoque de licitación por países de la región**

Países	Enfoque
Argentina	Grupo de tecnologías
Brasil	Tecnologías específicas
Chile	Tecnología neutra
Colombia	Grupo de tecnologías
México	Tecnología neutra
Panamá	Tecnologías específicas
Perú	Tecnologías específicas
Países	Participantes
Argentina	Nuevos proyectos y ampliación y reacondicionamiento de centrales existentes
Brasil	Nuevos proyectos y ampliación de centrales existentes
Chile	Centrales existentes y nuevos proyectos
Colombia	Centrales existentes y nuevos proyectos
México	Centrales existentes y nuevos proyectos
Panamá	Centrales existentes y nuevos proyectos
Perú	Centrales existentes y nuevos proyectos

Fuente: Correia, Tomasquim y Hallack (2020). *Guía para el diseño de contratos de energías renovables adquiridos mediante subastas.*

2.9. Metodología aplicada en el país de Guatemala

Describiendo la metodología de licitación expuesta, la aplicación de la misma en el país se presenta a través de lo estipulado en el RLGE, que establece que el distribuidor final deberá realizar una licitación abierta para contratar el suministro que garantice sus requerimientos de potencia y energía eléctrica, por un período máximo de quince (15) años Tomando en cuenta las necesidades de los Distribuidores y el Plan de Expansión Indicativo de Generación establecido en el artículo 15 Bis del RAMM, la comisión elaborará los términos de referencia que definan los criterios que los distribuidores finales deberán cumplir para elaborar las bases de licitación abierta para llevar a cabo los procesos de adquisición de potencia y energía.

Por lo anterior, de conformidad con lo establecido en el artículo 62 de la Ley General de Electricidad y el referido artículo, los términos de referencia deben definir los criterios a cumplir para elaborar las bases, criterios que incluyen el procedimiento y condiciones de adjudicación y los mecanismos en caso de desacuerdo con respecto de la adjudicación.

Dentro del subsector eléctrico de Guatemala las licitaciones se llegan a complementar en base al marco normativo y políticas energéticas, tal como las directrices que formula el ente rector del Subsector eléctrico indicando a través de acuerdos ministeriales el tener actualizado y vigente el Plan de Expansión Indicativo del Sistema de Generación 2020-2050.

Dicho plan tiene como objetivo promover las inversiones en fuentes de generación de energía eléctrica renovables, priorizando tecnologías con capacidad de entregar potencia y energía firme al sistema; promover la potencia; promover la generación de energía eléctrica con tecnología eólica y solar que

cuenten con reserva de potencia; promover la instalación de plantas de generación en ubicaciones geográficas en donde actualmente no existe, hay alta demanda de energía, o se prevé la instalación de nuevas inversiones que incrementarán la demanda, con el objetivo de facilitar las inversiones, generar mejores condiciones económicas que promuevan la creación de empleos, priorizando la optimización del sistema eléctrico nacional; entre otros objetivos.

Es conciso hacer énfasis que las licitaciones apoyadas por los planes antes mencionados, no llegan a mencionar proyectos nuevos de generación de energía eólica *offshore*, pero no están exentos de quedar fuera tras una actualización del plan y llegar a formar parte de una próxima licitación en donde se vean factores económicos que favorezcan al país y generadores; para poder participar obteniendo los beneficios deseados.

Los puntos tratados son los considerandos que fueron empleados en los Términos de Referencia plasmados en la Resolución CNEE-68-2021 para la elaboración de las Bases de la Licitación Abierta para la contratación del suministro que garantizara los requerimientos de potencia y energía, para cubrir la necesidad de las tres distribuidoras del país; esta resolución se revocó por medio de la Resolución CNEE-81-2021, dejando sin efecto los Términos de Referencia.

Cabe mencionar que la primera resolución citada se utiliza de base referencial para plasmar la metodología empleada en el país, las circunstancias ocasionadas por la pandemia que aqueja a la población mundial de la cual no es ajena el país, no se considera viable de momento convocar a dicho Proceso de Licitación en virtud que no se obtendrían los resultados deseados pues se limita la participación de oferentes internacionales en perjuicio de la libre competencia,

toda vez que no se podían llevar a cabo eventos para la efectiva promoción a nivel nacional e internacional de dicho proceso de licitación.

2.9.1. Detalle del proceso de licitación en Guatemala

A continuación, se detalla el proceso a brevedad, además se resaltan los puntos más importantes para establecer una comparativa con la metodología que otros países aplican y la implicación que un nuevo tipo de generación tendría.

- Proceso
 - La Comisión aprobará los términos de referencia, para que las distribuidoras de forma conjunta elaboren las bases de la licitación abierta para la contratación del suministro que garantice los requerimientos de potencia y energía, para cubrir las necesidades de las mismas.
 - La comisión podrá modificar, por iniciativa propia, los TDR cuando así lo considere necesario.
 - Las bases de licitación deberán ser elaboradas en estricto apego y cumplimiento a los TDR emitidos en la resolución respectiva.
 - Las distribuidoras deberán integrar una junta de licitación para la licitación abierta, la cual estará conformada por seis miembros.
 - Las distribuidoras, a través de la junta de licitación, a partir de la notificación de dicha resolución y hasta que se suscriban los respectivos contratos de abastecimiento en el contexto de la

licitación abierta, son mancomunadamente y solidariamente responsables de todos los actos de la licitación; para el efecto deberán elaborar un reglamento interno que norme el actuar de la junta de licitación. El referido reglamento deberá considerar y contener los elementos éticos, de transparencia, imparcialidad, publicidad, responsabilidad, idoneidad, objetividad, entre otros.

- Previo a la convocatoria de la licitación abierta y durante el proceso, las bases de licitación, los manuales y las adendas serán evaluadas y aprobadas por la comisión, pudiendo ordenar las modificaciones que considere necesarias para que dichos documentos cumplan con lo establecido en la Ley General de Electricidad, su Reglamento y los TDR emitidos mediante dicha resolución.
- La convocatoria de la licitación abierta deberá realizarse mediante la publicación del anuncio correspondiente en uno de los diarios de mayor circulación en la República de Guatemala, adicionalmente, las distribuidoras deberán darle la mayor divulgación posible a la referida publicación tanto nacional como internacionalmente.
- Las distribuidoras, junto con la presentación de las bases de licitación elaboradas, deberán remitir a la comisión: copia del acta del nombramiento de integración de la junta de licitación relacionada en el punto cuatro del proceso; y copia del reglamento interno que deberá regir el actuar de la junta de licitación.
- Las distribuidoras deberán publicar y mantener actualizada, durante el período que dure el proceso de la licitación abierta, en los portales de internet habilitados o incluso redes sociales, las bases de

licitación, las adendas, las respuestas a las solicitudes de aclaración planteadas por los interesados y toda aquella información que se genere en el contexto del proceso de la licitación. Además, deberán realizar todas las acciones y publicaciones que estimen pertinentes para la divulgación y publicidad del proceso de licitación abierta de manera nacional e internacional.

- Los montos que resulten de la aplicación de cualquier ejecución de garantía o penalización por parte de las distribuidoras, por incumplimientos de los generadores adjudicados, establecidos en las bases de licitación o en el o los contratos de abastecimiento suscritos con los adjudicados, serán trasladados a la tarifa a favor de los usuarios.
- Las distribuidoras, como resultado del proceso de licitación deberán entregar a la Comisión, una vez suscritos los contratos de abastecimiento respectivos, dentro del plazo de diez días, copia impresa y digital de las ofertas técnicas y económicas presentadas, copia de las preguntas y respuestas dadas en el proceso de licitación y copia legalizada del o los contratos de abastecimiento suscritos.
- En caso de que exista duda, conflicto o discrepancia entre lo que establecen las bases de licitación y los términos de referencia, prevalecerá lo descrito en los términos de referencia.

2.9.2. Descripción del proceso de licitación

Las bases de licitación elaboradas regularán el desarrollo del proceso de licitación abierta desde la publicación de la convocatoria hasta la suscripción de los contratos de abastecimiento por cada oferente adjudicado con las distribuidoras, para lo cual en las bases de licitación se deberán establecer, las siguientes etapas.

2.9.2.1. Etapa de consulta

Inicia desde la publicación de la convocatoria a la licitación abierta, habiendo sido aprobado por parte de la CNEE las bases de licitación, es el período de tiempo en el cual quienes hayan retirado las bases de licitación y tengan la calidad de interesados tienen derecho a:

- Realizar solicitudes de aclaración, observaciones y solicitudes de modificación a dichas bases y manual, hasta una fecha máxima que se establezca en el cronograma de eventos de la licitación.
- Participar en las reuniones de información programadas y convocadas por la junta de licitación.
- Elaborar las ofertas cumpliendo los requisitos establecidos en las bases.

También, es el período de tiempo en el cual la junta de licitación:

- Puede emitir adendas a las bases de licitación y manual de evaluación previa aprobación de la CNEE.

- Tiene la obligación de dar respuestas, hasta una fecha máxima que se establezca en el cronograma de eventos de la licitación, a las solicitudes de aclaración, observaciones y solicitudes de modificación a las bases de licitación y el manual.

2.9.2.2. Etapa de presentación de las ofertas

Se desarrolla en la fecha establecida en las bases de licitación para la presentación de las ofertas a la junta de licitación, en esta etapa pueden participar quienes hayan retirado las bases de licitación.

2.9.2.3. Etapa de evaluación técnica

Inicia desde la fecha de presentación de las ofertas y es el período en el cual la junta de licitación evalúa si las ofertas técnicas presentadas cumplen con los requisitos establecidos en las bases de licitación, debiendo para el efecto la junta de licitación realizar una calificación de las ofertas técnicas como técnicamente solventes o técnicamente no solventes según corresponda. En la calificación como técnicamente no solventes deberán constar los motivos por los cuales se realizó dicha calificación por parte de la junta de licitación.

Esta etapa deberá prever que a las ofertas que sean presentadas se les realizará una calificación de las centrales como nueva o en operación. Las bases de licitación deberán contener la definición y consideraciones para que las centrales ofertadas sean calificadas como nueva o en operación, conforme los criterios establecidos en los términos de referencia.

2.9.2.4. Etapa de ingreso de la oferta económica inicial, evaluación económica y adjudicación

Inicia en la fecha establecida en las bases de licitación y es el período de tiempo en el cual la junta de licitación:

- Aplica la metodología de evaluación económica, a través de un proceso de rondas sucesivas, conforme a las consideraciones indicadas en los términos de referencia, las bases de licitación y el Manual de Evaluación correspondiente.
- Remite a la CNEE, una vez que la junta de licitación haya resuelto todos los desacuerdos planteados por quienes presentaron ofertas respecto de la aplicación del procedimiento establecido en las bases y el manual, el informe técnico que contiene la evaluación económica y la adjudicación que la junta de licitación ha realizado, para que la cnee indique si tiene objeción o no, en cuanto a la adjudicación que ha realizado la junta de licitación, para los efectos del reconocimiento en la tarifa.

Durante la evaluación económica de las ofertas, bajo ninguna circunstancia, los oferentes podrán comunicarse de manera individual con algún miembro de la junta de licitación; por lo que, se debe establecer el canal de comunicación oficial y procedimiento a través del cual se estará proporcionando el soporte y atención técnica relacionado con la operación del sistema empleado para la evaluación económica y la forma de informar desacuerdos respecto de la aplicación del procedimiento de evaluación económica establecida en las bases y el manual.

Esta etapa finaliza en el momento que la junta de licitación, una vez recibido el pronunciamiento de la CNEE, notifica la adjudicación o no de cada una de las ofertas a cada uno de los oferentes.

2.9.2.5. Etapa de suscripción del contrato

Inicia en la fecha máxima en la cual se notifica la adjudicación de las ofertas y finaliza con la suscripción del contrato de abastecimiento. Cumplida esta etapa, se debe remitir a la CNEE copia de todos los contratos que sean suscritos como resultado de la licitación, así como de las consultas realizadas durante la etapa de evaluación y sus respectivas respuestas.

2.10. Normativa y regulación en Guatemala

En el desarrollo del presente estudio se hace necesario la mención de la normativa que podría influir directamente sobre la forma de generación eólica *offshore* en Guatemala. Por ende, se presentan los apartados relacionados de forma detallada.

2.10.1. Norma de Coordinación Comercial No.1

En el artículo 1 correspondiente a coordinación del despacho de carga se menciona lo concerniente a programación de largo plazo; información a suministrar por los participantes del MM.

A más tardar el quince de enero de cada año, el AMM deberá contar con la declaración de cada uno de los Participantes del MM que contenga la siguiente información relativa al año estacional siguiente (concerniente a los generadores).

- Para centrales generadoras basadas en recursos renovables no hidráulicos, sus respectivos costos de operación y mantenimiento y la metodología para el cálculo del costo variable de generación.
- Para las centrales eólicas, los datos históricos de la velocidad del viento, medidas a la altura de las aspas del generador de por lo menos 5 años anteriores, los rangos de velocidad del viento con los que puede generar cada unidad de la central generadora, toda la información de las características técnicas de los equipos para compensación de potencia reactiva que utilicen.

En el apartado de programación semanal en información a suministrar por los participantes del MM se tiene lo siguiente:

Antes de la hora 14:00 del día miércoles el AMM deberá contar con la siguiente información de cada uno de los participantes del MM relativa a la semana siguiente:

- Generadores en general: disponibilidad de potencia.
- Centrales eólicas, los datos semanales de la velocidad del viento, medidas a la altura de las aspas del generador, toda la información necesaria para la estimación de su energía semanal y la compensación de potencia reactiva semanal disponible.

En el apartado de despacho diario en información a suministrar por los participantes del MM se tiene lo siguiente:

Antes de las 08:30 horas de cada día, los participantes del MM deberán declarar al AMM la información indicada a continuación, relativa al día siguiente (concerniente a generadores): cualquier modificación en la información con la cual se haya elaborado la programación semanal o en las características operativas registradas.

Tabla III. **Requerimientos para una central eólica**

Período	Requerimiento
Anual	1. Costos de operación y mantenimiento (O&M) 2. Metodología para el cálculo del CVG 3. Datos históricos de la velocidad del viento en m/s en intervalos de 10 minutos, por lo menos 5 años anteriores 4. Rangos de velocidad con los que puede generar cada unidad 5. Características técnicas de los equipos para compensación de Q
Semanal	1. Proyección de potencia para cada una de las 168 horas de la siguiente semana en MW 2. Velocidad del viento en m/s en intervalos de 10 minutos 3. Densidad del aire en kg/m ³ 4. Costos de operación y mantenimiento (O&M)
Diario	Potencia promedio en MW por hora del día siguiente

Fuente: elaboración propia, con datos de Resolución No. 157-01 (2000). *Norma de Coordinación Comercial No. 1.*

2.10.2. Norma de Coordinación Operativa No.5

En esta norma se ven las auditorías realizadas a las instalaciones, se visualiza el acceso a las instalaciones, estableciendo que el AMM podrá en cualquier momento decidir la inspección de los equipos de un participante cuyas instalaciones estén conectadas al SNI con alguno de los siguientes objetivos:

- Verificar el cumplimiento de las disposiciones de las Normas de Coordinación.
- Investigar cualquier amenaza pasada o potencial a la seguridad del SIN.
- Verificar el cumplimiento de rutinas periódicas asociadas a los requisitos operativos de los equipos.

Ningún participante podrá negar el ingreso a sus instalaciones de los representantes del AMM o de otro Participante con instalaciones conectadas a las suyas para llevar a cabo una inspección.

El AMM deberá asegurarse que la inspección se desarrollará dentro de las siguientes pautas:

- No se causarán daños a los equipos del participante.
- El estacionamiento o almacenamiento de equipos, vehículos o materiales necesarios tendrá carácter temporario.
- Sólo se producirán las interferencias imprescindibles y aceptadas por el participante con la operación de los equipos de éste, quien no deberá negar ni demorar tal aceptación.
- Se cumplirán todos los requisitos razonables del participante en materia de seguridad, salud y normas laborales.

- Se cumplirán todas las normas del participante relativas a permisos de trabajo y disponibilidad de los equipos, siempre que no sean utilizadas para demorar el acceso.

En el apartado de Control de unidades generadoras y equipos de transmisión, el AMM podrá controlar en cualquier momento, mediante el sistema de control supervisor, el comportamiento de unidades generadoras y equipos de transmisión, comparando su potencia o respuesta real con los valores registrados (Resolución No. 157-16, 2000).

Si el AMM detectara el incumplimiento de alguna característica registrada, notificará esta situación al participante correspondiente, adjuntando los registros obtenidos.

Recibida la notificación anterior, el Participante deberá entregar al AMM en un plazo no mayor de 5 días hábiles:

- Una explicación del problema.
- Valores corregidos de la característica operativa que proponga registrar.
- Propuesta para solucionar el inconveniente.

El AMM y el participante deberán tratar de alcanzar un acuerdo sobre las propuestas de éste y los nuevos valores de la característica operativa. Si el acuerdo no se obtuviera dentro de tres días hábiles, el AMM efectuará nuevas verificaciones y las partes deberán someterse a los nuevos resultados que se obtengan (Resolución No. 157-16, 2000).

3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

El desarrollo de la investigación se llevó a cabo con base en la metodología planteada para el desarrollo del presente estudio de impacto en la implementación de medidas para evaluar la generación eólica *offshore*.

3.1. Características del estudio

El estudio de impacto fue basado en un diseño, enfoque y alcance que se siguió para poder direccionar la investigación y alcanzar los objetivos establecidos.

3.1.1. Diseño

El estudio adoptó un diseño no experimental, dado que se limitó a utilizar información relacionada a la integración de la matriz energética de otros países, relacionada con los costos asociados a la generación eólica *offshore* en un panorama de forma global. Además, se tomó en consideración la regulación y normativa en Guatemala con consideraciones propuestas.

En la etapa de diseño, en la subdivisión de la integración y generación de la matriz energética en otros países, se visualizó un estudio longitudinal, con evolución de variables a lo largo del tiempo (corto, mediano y largo plazo). Se tomó como base a países con desarrollo en la materia, tales como Alemania, Reino Unido y España. Además se visualizó la perspectiva a largo plazo de países latinoamericanos, tales como México y Chile.

En la subdivisión de costos asociados a la generación eólica *offshore*, se analizó la evolución de la variable (costos [USD, USD/MWh]) a lo largo de un período determinado para países de referencia de acuerdo a estadísticas plasmadas por organismos internacionales.

En la subdivisión de regulación y normativa se tuvo un análisis de las incorporaciones que se deberían de establecer al considerar la generación eólica *offshore*. Se consideró una subdivisión entre la generación eólica *onshore* y *offshore* en la normativa, dado los distintos parámetros de costos asociados.

3.1.2. Enfoque

El enfoque de la investigación es mixto, basándose en la prioridad del análisis cuantitativo de indicar características relacionadas a costos y en el análisis cualitativo relacionando capacidad instalada, diseño de las matrices energéticas, normas y regulaciones.

3.1.3. Alcance

El alcance de la investigación es descriptivo, puesto que la información estuvo detallada de acuerdo a relaciones entre algunas variables con algún impacto estadístico significativo. Dicho desarrollo está desglosado en la sección técnicas de análisis de la información.

3.1.4. Unidad de análisis

La población de estudio fue la matriz energética de Guatemala, en donde se analizó la incorporación de nuevas tecnologías para generación, tomando en consideración los costos, producción, regulación y normativa. La muestra fue una

recopilación de datos históricos y proyecciones referente al uso de generación eólica *offshore* de forma nacional, regional y global, tomando en consideración los parámetros con previa mención.

3.2. Variables

Las variables en estudio se desglosan implícitamente de las preguntas de investigación y, se describen a continuación.

Tabla IV. **¿Cuáles son las características diferenciadas de las plantas de generación eólica *offshore* frente a las instalaciones en tierra?**

Criterio Variable	Numérica		Manipulable	Observable	Nivel de medición
	Discreta	Continua			
Capacidad instalada y proyectada (MW)		X	X		Razón
Generación (MWh)		X		X	Razón

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla V. **¿Cómo se evaluarán los costos asociados de las plantas de generación eólica *offshore*?**

Criterio Variable	Numérica		Manipulable	Observable	Nivel de medición
	Discreta	Continua			
Costos totales de instalación (USD)		X	X		Razón
Costos de generación (USD/MWh)		X		X	Razón

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla VI. **¿Cuáles fueron los mecanismos de inserción de los proyectos de generación eólica *offshore* en los mercados eléctricos de los países más desarrollados en tecnología?**

Criterio / Variable	Numérica		Manipulable	Observable	Nivel de medición
	Discreta	Continua			
Inversión (USD)		X	X		Razón
Integración en la matriz energética (%)		X	X		Razón

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla VII. **¿Qué agregados o consideraciones deberán de incluirse dentro de la normativa de Guatemala al considerar una planta de generación eólica *offshore*?**

Criterio / Variable	Categoría		Manipulable	Observable	Nivel de medición
	Interviniente o mediadora	Policotómica			
Regulación	X		X		Razón
Normativa		X	X		Razón

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

3.3. Fases del desarrollo de la investigación

El proceso para alcanzar los objetivos propuestos dentro del alcance de la investigación, en función al diseño del mismo, fueron los siguientes.

3.3.1. Fase 1

Revisión de literatura, se consultaron libros, informes, artículos científicos, políticas existentes y leyes.

3.3.2. Fase 2

Gestión de la información, se recopiló la información de las variables; realizando las observaciones pertinentes y su periodicidad de estudio. Se describieron las características de todas las variables en estudio (incluyendo el análisis mediante estadística descriptiva de algunas variables como tendencia, media, moda, entre otros).

3.3.3. Fase 3

Análisis de información, se tomó como premisa el análisis de las características (incluyendo todos los costos asociados) de la generación eólica en tierra y mar; mediante las técnicas descritas en el apartado técnicas de análisis de la información.

3.3.4. Fase 4

Evaluación comparativa, se tomó como base las políticas, métodos para contratos y leyes propuestas en otros países con el desarrollo de la tecnología y que tuvieron una evolución continua.

3.3.5. Fase 5

Interpretación de inclusión de información, se expusieron los comentarios pertinentes sobre la normativa guatemalteca y métodos de inserción relacionados al subsector eléctrico, haciendo las salvedades correspondientes respecto a la generación eólica *offshore*.

3.4. Técnicas de análisis de la información

El desarrollo de las técnicas estadísticas descriptivas se basó en las variables metodológicas (capacidad instalada, capacidad proyectada, costos asociados, mecanismos de inserción), utilizando análisis univariado y bivariado únicamente para los costos asociados.

3.4.1. Recopilación de datos

Se obtuvieron los datos de las diferentes fuentes públicas con información, priorizando los planes de expansión de generación y las estadísticas de generación por IRENA (2020).

3.4.2. Proyecciones

Se previó que la información recopilada presente datos a futuro, estableciendo el límite máximo como la capacidad proyectada y planes de expansión hasta el año 2035.

3.4.3. Gráficas y descripción estadística

Se desarrollarán los métodos estadísticos utilizados para el desarrollo de la investigación.

3.4.3.1. Análisis univariado

- Moda para el análisis de la variable capacidad proyectada y capacidad instalada en los países alrededor del mundo.
- Histograma para la representación de la capacidad instalada en generación eólica *offshore* hasta el año presente alrededor del mundo, observación de un posible sesgo o histograma de peineta.
- Histograma para la representación de la capacidad proyectada en generación eólica *offshore* hasta el año 2035 alrededor del mundo.
- Análisis de tendencia central en capacidad proyectada para distintos países.
- Aplicación del coeficiente de determinación para establecer la mejor función de comportamiento (entre una función exponencial o una función lineal proyectada) de crecimiento en generación por energía renovable, generación eólica y eólica *offshore*.

3.4.3.2. Análisis bivariado

Evaluación de los costos asociados en generación eólica *onshore* y *offshore*, estableciendo la referencia de datos históricos y la proyección de los mismos.

3.4.3.3. Tendencia

Evaluación en capacidad proyectada para el año 2035 con las previas variables mencionadas dentro de los análisis univariado y bivariado.

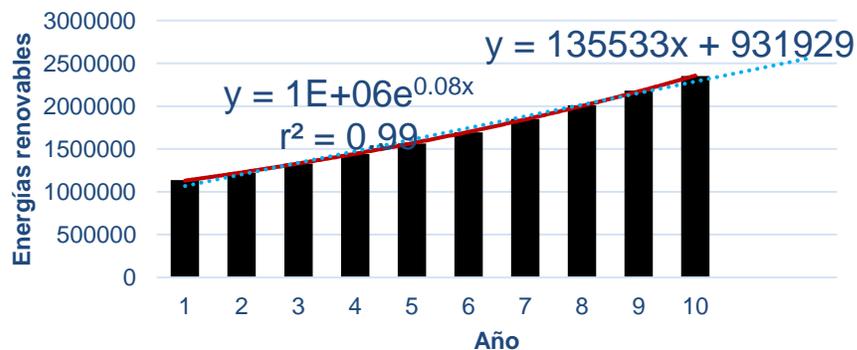
4. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados que se obtuvieron del estudio de impacto en la implementación de medidas para evaluar la generación eólica *offshore* en la matriz energética de Guatemala.

4.1. Escenarios analizados

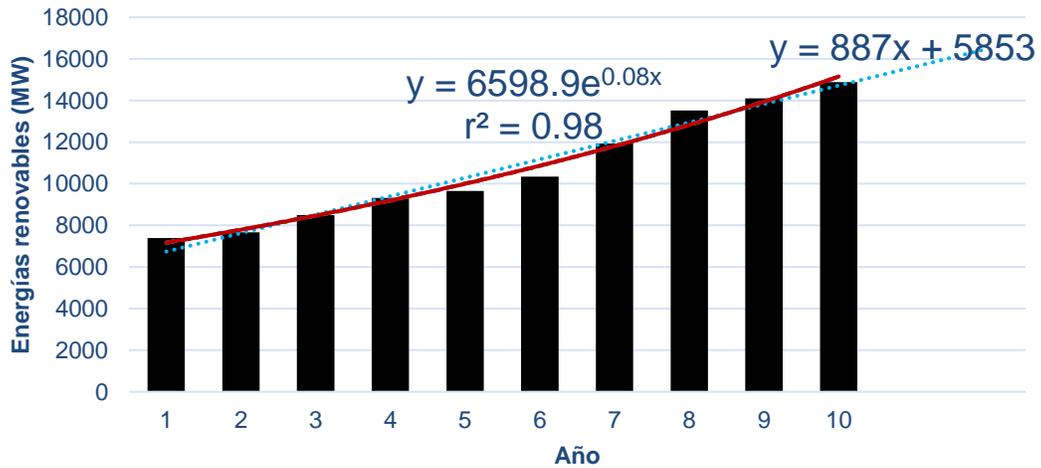
De acuerdo con la metodología planteada previamente, se establecen los distintos escenarios para analizar la capacidad instalada en el mundo, la región y el país, por medio de gráficas de tendencia y las debidas funciones de proyección: Exponencial y lineal proyectada con los debidos coeficientes de determinación que expresan en mayor o menor grado la función ideal del comportamiento.

Figura 3. **Capacidad instalada de fuentes de energía renovable en el mundo**



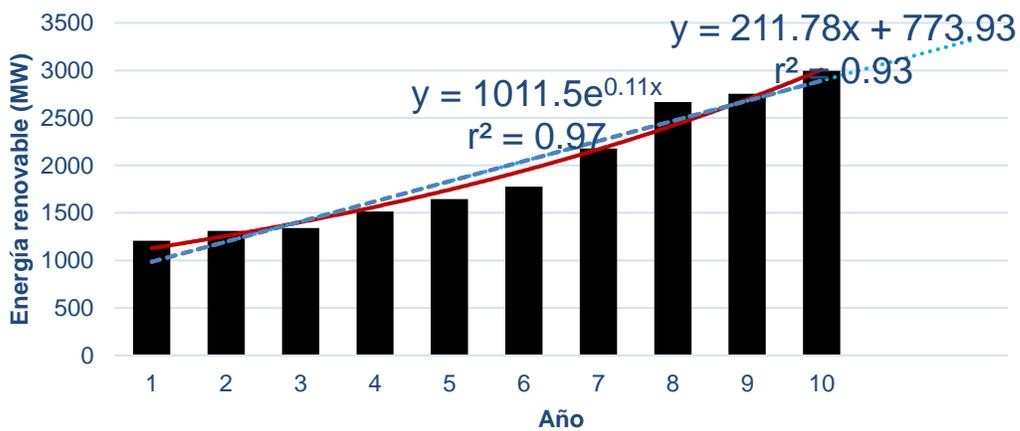
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 4. **Capacidad instalada por medio de fuentes de energía renovable en Centroamérica y El Caribe**



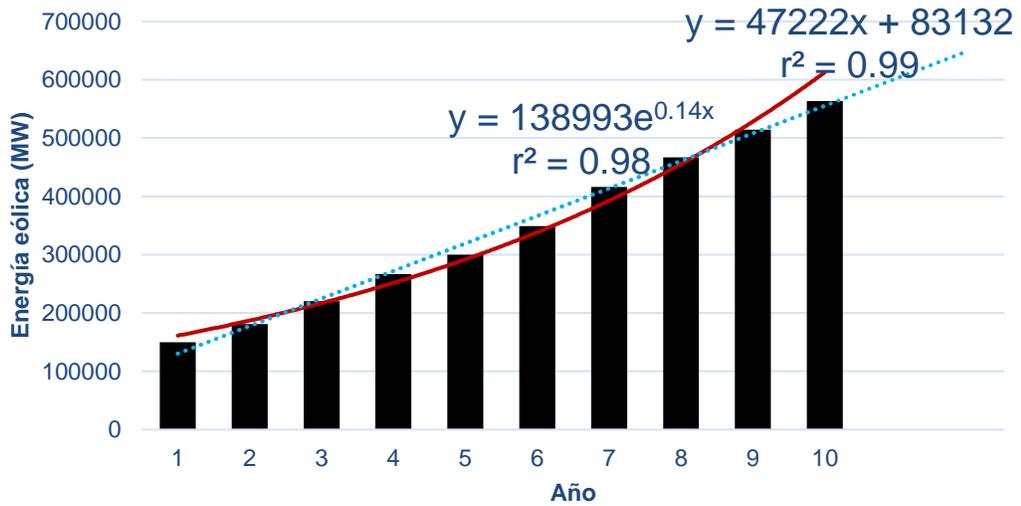
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 5. **Capacidad instalada por medio de fuentes de energía renovable en Guatemala**



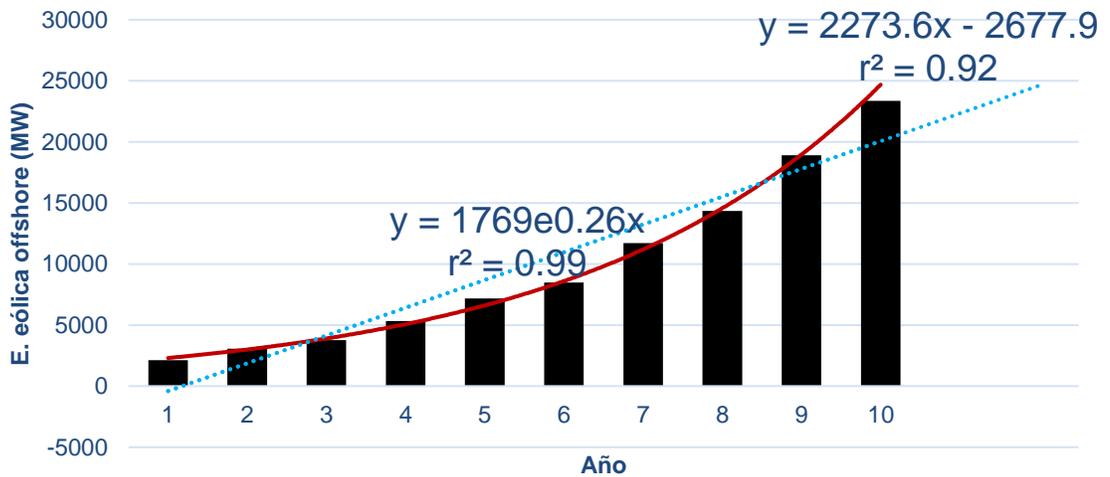
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 6. **Capacidad instalada de generación eólica en el mundo**



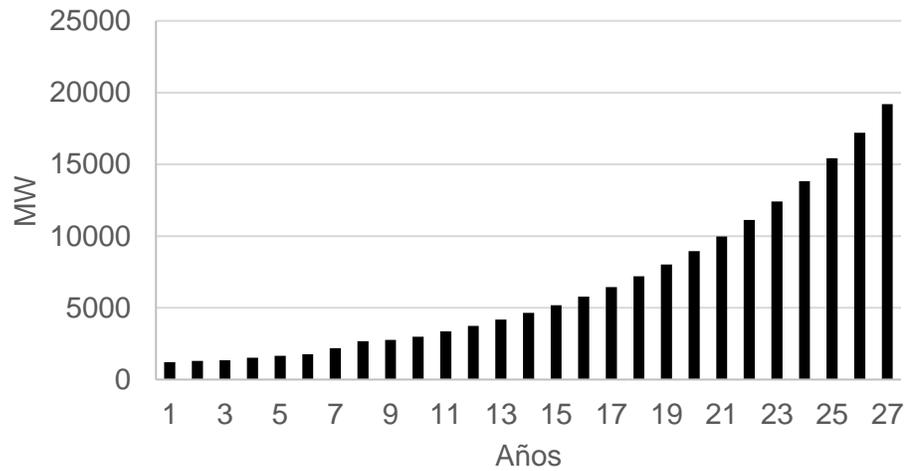
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 7. **Capacidad instalada de generación eólica *offshore* en el mundo**



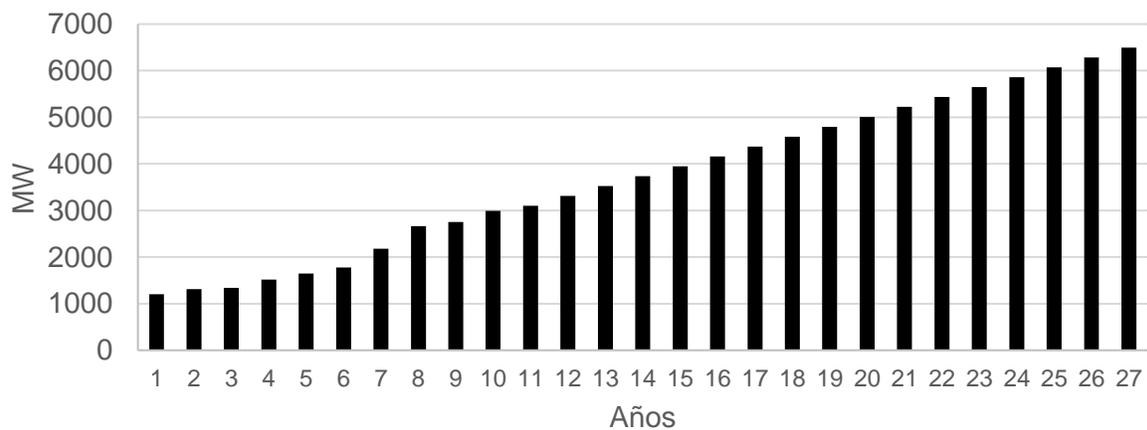
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 8. **Proyección exponencial de capacidad instalada de generación renovable en Guatemala**



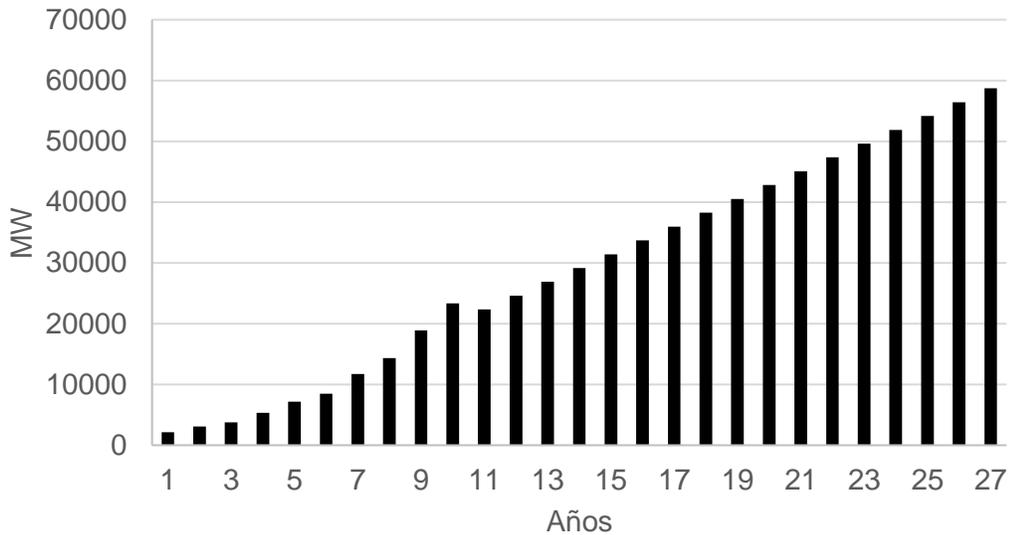
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 9. **Proyección lineal de capacidad instalada de generación renovable en Guatemala**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 10. **Proyección lineal de capacidad instalada de generación eólica *offshore* en el mundo**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

En los resultados anteriores se representó la generación renovable, eólica (en general) y eólica *offshore*, creando la salvedad de correlación entre la variable tiempo (que data del año 2008 hasta el año 2018) y capacidad instalada. En las figuras 8, 9 y 10 se presenta la proyección (hasta el año 2035) hipotética en base a los modelos iniciales, creando panoramas que en la siguiente sección se discutirán.

Figura 11. Reducción de los costos en generación de energía eólica



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

La proyección de reducción de costos (en general) de la generación eólica *offshore* y *onshore* se presenta en la actualidad con una tendencia decreciente, en correspondencia con la tendencia en aumento de la instalación de este tipo de generación. Además, estas dos tecnologías no son las únicas que poseen las mismas tendencias mencionadas, también se presenta la generación solar por concentración con una caída de 47 % en costos y la solar fotovoltaica con una caída del 82 % (estos datos referenciados a costos involucran los costos iniciales de inversión). Los costos variables para estos tipos de generación: eólico y solar, se mantienen bajos respecto a la matriz energética de generación.

Cabe mencionar que la proyección de capacidad instalada y la reducción de costos son fundamento para las futuras incorporaciones del determinado tipo de generación dentro de los procesos de inserción en el mercado y su posterior inserción en la matriz energética de generación de un país.

4.2. Memoria de cálculo

Las gráficas 3 a 7 se modelan por medio de una función exponencial natural, utilizando las siguientes variables y ecuaciones:

$$y = \textit{Capacidad instalada (MW)}$$

$$x = \textit{Tiempo (años)}$$

$$k = \textit{Constante de crecimiento}$$

En el modelamiento de la capacidad instalada de fuentes de energía renovable en el mundo, representada por medio de la figura 3, se tienen las siguientes variables y ecuaciones:

$$y(0) = 1 * 10^6 \quad (\text{Ec. 1})$$

$$k = 0.08 \quad (\text{Ec. 2})$$

$$y(x) = y(0) * e^{kx} \quad (\text{Ec. 3})$$

$$y(x) = 1 * 10^6 * e^{0.08x} \quad (\text{Ec. 4})$$

En el modelamiento de la capacidad instalada por medio de fuentes de energía renovable en Centroamérica y El Caribe, representada por medio de la figura 4, se tienen las siguientes variables y ecuaciones:

$$y(0) = 6589.9 \quad (\text{Ec. 5})$$

$$k = 0.08 \quad (\text{Ec. 6})$$

$$y(x) = y(0) * e^{kx} \quad (\text{Ec. 7})$$

$$y(x) = 6589.9 * e^{0.08x} \quad (\text{Ec. 8})$$

En el modelamiento de la capacidad instalada por medio de fuentes de energía renovable en Guatemala, representada por medio de la figura 5, se tienen las siguientes variables y ecuaciones:

$$y(0) = 1011.5 \quad (\text{Ec. 9})$$

$$k = 0.11 \quad y(0) = 1011.5 \quad (\text{Ec. 10})$$

$$y(x) = y(0) * e^{kx} \quad y(0) = 1011.5 \quad (\text{Ec. 11})$$

$$y(x) = 1011.5 * e^{0.11x} \quad (\text{Ec. 12})$$

En el modelamiento de la capacidad instalada de generación eólica en el mundo, representada por medio de la figura 6, se tienen las siguientes variables y ecuaciones:

$$y(0) = 138993 \quad (\text{Ec. 13})$$

$$k = 0.14 \quad (\text{Ec. 14})$$

$$y(x) = y(0) * e^{kx} \quad (\text{Ec. 15})$$

$$y(x) = 138993 * e^{0.14x} \quad (\text{Ec. 16})$$

En el modelamiento de la capacidad instalada de generación eólica *offshore* en el mundo, representada por medio de la figura 7, se tienen las siguientes variables y ecuaciones:

$$y(0) = 1769 \quad (\text{Ec. 17})$$

$$k = 0.26 \quad (\text{Ec. 18})$$

$$y(x) = y(0) * e^{kx} \quad (\text{Ec. 19})$$

$$y(x) = 1769 * e^{0.26x} \quad (\text{Ec. 20})$$

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Antes de iniciar la discusión de los resultados obtenidos en el presente estudio de impacto en la implementación de medidas para evaluar la generación eólica *offshore*, es importante hacer énfasis en que el estudio se ha enfocado en los mecanismos de inserción de la tecnología dentro de un mercado eléctrico y posterior incorporación en la matriz energética de generación. Por lo mencionado previamente, cabe indicar que la base técnica expuesta en el estudio es para guía en los caracteres especiales que se requieren conocer dentro de los mecanismos empleados para la inserción en los mercados, conociendo ventajas y desventajas de la tecnología; estudiando a priori tales aspectos para posterior escudriñamiento en los procesos.

5.1. ¿Cuáles son las características diferenciadas de las plantas de generación eólica *offshore* frente a las instalaciones en tierra?

La principal diferencia que se visualiza en la figura 11 son los costos, la generación eólica *offshore* se ve con una tendencia decreciente de un 29 % hacia el año 2022 y la generación eólica *onshore* se ve con una tendencia decreciente de un 39 % hacia el año 2022. La premisa que se tiene de la generación eólica *offshore* sobre los costos altos de inversión se desvanece a medida que la capacidad instalada de esta generación aumenta.

La siguiente diferencia de suma importancia es el recurso del viento, ya que el recurso en tierra por lo general tiende a presentarse con mayor énfasis en épocas de noviembre a enero y cuando se presenta la temporada de lluvia este recurso tiende a disminuir considerablemente. Además, el recurso del viento en

tierra tiende a ser variable, por lo cual a este tipo de generación en tierra se le denomina no gestionable.

En contraposición el recurso del viento en mar tiende a producirse sin variaciones tan pronunciadas como en tierra y los períodos de mayor recurso se presentan en épocas más prolongadas, es decir adicionando aproximadamente dos meses previos a la época de inicio del recurso en tierra y un mes posterior al periodo de finalización. La denominación no gestionable que se ha adoptado en el mercado para este tipo de generación no desaparecerá hasta que se consideren tecnologías de almacenamiento.

Y desde la perspectiva de evaluación en mecanismos de inserción en el mercado, tales como subastas, las diferencias que se presentan entre generación eólica *offshore* y *onshore* son los resultados obtenidos en las evaluaciones técnicas y evaluaciones económicas. Desde la perspectiva técnica se considerará el nodo en donde se entregará el suministro (infraestructura de transporte y las subestaciones); punto que puede influir directamente en un proyecto *offshore*, en el segundo punto podrían influir las especificaciones del proyecto dentro de los TDRs y que no haya sido estipulado con la debida capacidad requerida; esto podría incurrir en un gran apalancamiento para el proyecto *offshore* en todo caso se lleve a cabo (inviabile).

Ante la perspectiva anterior se podría plantear idealmente como ejemplo, un megaproyecto de generación eólica *offshore* con plataformas flotantes en el cual, la evaluación económica será aceptada, ya que corresponde a la aplicación de economía de escala y los costos de inversión favorecen la tecnología.

5.2. ¿Cómo se evaluarán los costos asociados de las plantas de generación eólica *offshore*?

En principio los costos de las plantas de generación eólica *offshore* están asociados a la proyección de la capacidad instalada, ya que al tener mayor demanda en la incorporación de la tecnología los costos de la misma irán en decremento.

Por ende, se presentan las proyecciones de la capacidad instalada y su influencia directa de costos. La figura 3, 4 y 5 presentan comportamientos de tendencia positiva en relación a la capacidad instalada de generación con fuentes de energía renovable, por lo que, en el mundo, Centroamérica, El Caribe y Guatemala se inclinarán a ocupar matrices energéticas de generación con energías renovables, lo cual impulsa al desarrollo tecnológico de las mismas y mayor competencia en el mercado por suministrar la misma tecnología.

De igual forma la generación eólica y eólica *offshore* presentan un crecimiento exponencial en un período de estudio comprendido a una década, concerniente a la reducción de costos que se presenta en la figura 11 y adoptando el mismo criterio del párrafo anterior, es decir, a mayor demanda de la tecnología los costos irán en decremento por la competencia del mercado.

Adicionalmente se menciona que, la proyección exponencial no es aplicable para la generación renovable en Guatemala debido a la sustracción o sustitución de tecnología obsoleta en el país, correspondiente al modelo adoptado en el mercado eléctrico, el cual se plantea como un modelo funcional. Este modelo ha sido capaz de desplazar a la tecnología menos eficiente como las barcazas de PQP y ha beneficiado en la adición de la tecnología eficiente, con fuentes de

recursos de energía renovable y que cumplan los planes de expansión y política energética del país.

Para evaluar los costos de generación eólica *offshore* en nuevos procesos de inserción (licitaciones), se deberá considerar que Guatemala incluya la sección de eólica *offshore* en los TDRs y aplicar los criterios de economía de escala, tal y como se desarrolló con San Antonio El Sitio, Viento Blanco y Las Cumbres; los cuales fueron proyectos paralelos de la misma empresa. En tal caso dentro de los procesos se podría solicitar la misma cantidad de capacidad instalada en los proyectos mencionados o incluso el doble para aplicar el criterio económico antes mencionado por ser proyectos más onerosos.

Para evaluar los costos variables en generación eólica *offshore* se tiene como premisa el criterio adoptado por el Administrador del Mercado Mayorista en la evaluación a centrales eólicas en la actualidad (*onshore*).

5.3. ¿Cuáles fueron los mecanismos de inserción de los proyectos de generación eólica *offshore* en los mercados eléctricos de los países más desarrollados en tecnología?

Las licitaciones son los mecanismos de inserción por regla para cualquier proyecto de generación renovable, esto aplica en todo el mundo. Por ejemplo, en Latinoamérica y El Caribe se cumplen con los siguientes elementos de diseño en las subastas: Diseño y Precalificación, Licitación y Contratación. En Guatemala el proceso de licitación es básicamente el mismo, pero se distinguen las siguientes etapas dentro de las bases de licitación: Etapas de consulta, Etapas de presentación de ofertas, Etapa de evaluación técnica, Etapa de ingreso de la oferta económica inicial, evaluación económica y adjudicación y Etapa de suscripción del contrato.

Pero para llegar a promover e implementar la generación eólica en ubicaciones geográficas en donde actualmente no existe (en el caso presente se denomina *offshore* porque se piensa en instalaciones en mar), es conveniente tomar aspectos relevantes que fueron presentados en la Resolución CNEE-68-2021 (derogada por la Resolución CNEE-81-2021) tales como desarrollar licitaciones con enfoque a tecnologías específicas o grupos de tecnologías y evitar un enfoque de tecnología neutra en el cual se deje de promover la energía renovable.

Además, otro aspecto de suma importancia que ejemplifica la inserción de generación eólica *offshore* dentro de la resolución CNEE-68-2021, es el apartado (se debe de tomar como guía) en relación a las consideraciones técnicas para el proceso de licitación cuando se hace referencia al caso de geotermia, este tipo de generación se presenta como un caso excepcional en donde las bases de licitación deben dejar previsto y desarrollar para el oferente puntos importantes como:

- Presentar con su oferta técnica una lista de otros proyectos de geotermia que han asumido y desarrollado a nivel nacional e internacional. En esta descripción de proyectos, deben incluir la capacidad de los proyectos (MW), la inversión de capital total, ubicación del proyecto, el calendario para el desarrollo del proyecto y especificar qué tareas y responsabilidades se asumieron directamente.
- Los megavatios (MW) de geotermia desarrollados por el oferente, que estén instalados operando, los cuales deben ser como mínimo.

- Debe presentar un plan de ejecución de los trabajos previstos y tareas generales a desarrollar junto con una propuesta de calendario de actividades.
- Proporcionar sus últimos tres años de estados financieros y estado de pérdidas y ganancias auditadas, dentro de los cuales no serán tomadas en cuenta aportaciones futuras.
- Evidenciar que tiene viabilidad financiera para desarrollar los proyectos de geotermia que ofrece. Se debe evidenciar que tiene acceso al capital para explotación y perforación de la etapa comercial del desarrollo del proyecto de geotermia que ofrece. Una carta de compromiso financiero de los inversores o pueden mostrar su compromiso financiero con su hoja de balance.

Los puntos previamente descritos claramente pueden ser ajustados a proyectos de generación eólica *offshore*, estableciendo cambios como: haber desarrollado proyectos de generación eólica *onshore* a nivel nacional (se puede omitir el primer requisito) y *offshore* a nivel internacional, para no limitar a los oferentes.

Como bien se sabe, no hay generación eólica *offshore* instalada en el país ni en la región, por ende, dentro de las licitaciones, este apartado se tomaría como plantas de generación nueva y sería necesaria la calificación de la central como tal, cumpliendo los siguientes criterios:

- Todos los elementos y componentes de la central deben ser totalmente nuevos.

- Todas las instalaciones, elementos y equipamiento para efectuar la conexión de la central al sistema nacional interconectado forman parte de la oferta y están incluidos en el precio de potencia ofertado.
- Las plantas de generación incluyan dentro de la oferta las inversiones necesarias para disponer de espacio para incorporar transformación en la subestación del generador para conectar, de manera segura y conforme la normativa vigente, consumo de las distribuidoras.

En el segundo requisito mencionado se podría adicionar como caso especial, lo relativo al transporte de energía eléctrica desde las instalaciones *offshore* ya que es uno de los factores más influyentes en la oferta para este tipo de centrales.

Cabe recalcar como punto final que dentro de las licitaciones se presentan discrepancias aplicativas en la metodología de evaluación económica, es decir en las rondas sucesivas, ya que a veces el enfoque no se elabora de manera adecuada y los bloques quedan desiertos.

5.4. ¿Qué agregados o consideraciones deberán de incluirse dentro de la normativa de Guatemala al considerar una planta de generación eólica *offshore*?

Se deberá de considerar en la norma de Coordinación Comercial No.1 en los requerimientos de información para centrales eólicas *offshore*, posiblemente los mismos requerimientos empleados para centrales eólicas actuales (*onshore*) en lo declarado para la programación de largo plazo, programación semanal y despacho diario. No se propone ningún agregado porque no se considera alguna

tecnología de almacenamiento y por ende se llegan a obviar términos como vertimiento eólico, entre otros.

Sin embargo, se deberá considerar la Norma de Coordinación Operativa No. 5 en requerimientos de auditorías a instalaciones. En donde se deberá de agregar un apartado en donde se facilite el transporte a los auditores a las instalaciones de una central eólica *offshore* desde el punto más cercano en tierra firme a la instalación marítima.

5.5. ¿Cómo se desarrollará el estudio de impacto en la implementación de medidas para evaluar la generación eólica *offshore* en la matriz energética de Guatemala?

El estudio de impacto en la implementación de medidas para evaluar la generación eólica *offshore* se evaluó de acuerdo a los aspectos técnicos presentados en el apartado teórico del presente estudio y aspectos económicos presentados en el apartado de resultados. La integración de ambos aspectos es principal en el estudio de implementación de medidas para evaluar la generación eólica *offshore* ya que son la clave dentro de los mecanismos de inserción (licitaciones) para que los nuevos generadores puedan ser convocados.

El apartado de evaluación técnica y económica dentro de licitaciones en el país, es el pilar para el desarrollo del estudio de impacto, ya que esto diferencia la viabilidad de un tipo de generación de otro; por ejemplo: la constitución de una tecnología posicionada de forma factible como economía de escala, no será viable por el momento para Guatemala, o un tipo de generación que esté desalineado de la política energética de Guatemala en relación al tema de renovable, tampoco debería de aprobar una evaluación técnica ya que vendría a impactar negativamente a la matriz energética de generación en Guatemala.

Entonces la evaluación técnica y económica, con los requisitos o limitaciones que imponga la Junta de Licitación dentro del mismo proceso, serán la forma en la cual se podrán desarrollar estos estudios y, el impacto en la matriz energética de generación estará basado en la capacidad instalada proyectada para nuevas licitaciones; esperando evitar contratiempos en la convocatoria de los procesos y a la vez esperando evitar arbitrariedades a la legislación del subsector eléctrico.

CONCLUSIONES

1. Las principales diferencias entre la generación eólica *offshore* y *onshore* dentro de un proceso de licitación serán su evaluación técnica y económica, obteniendo un sesgo positivo en ambas evaluaciones por parte de la generación eólica *onshore* en la actualidad.
2. Se presenta una proyección decreciente en relación a los costos asociados de la generación eólica *offshore*, lo cual llegará a ser competitivo dentro de las evaluaciones económicas de futuras licitaciones.
3. Los mecanismos de inserción acordes a generación renovable, incluyendo específicamente a la eólica *offshore* son las licitaciones. Para la inserción de proyectos de tecnologías específicas en las licitaciones se deberá de crear el apartado dentro de ellas.
4. En la Normativa de Coordinación Operativa No. 5 del Administrador del Mercado Mayorista deberán de agregarse apartados específicos al introducir la generación eólica *offshore*, en materia de auditoría a instalaciones.
5. Se estimó que el impacto de la generación eólica *offshore* dentro de la matriz energética estará determinado por futuras licitaciones y su evaluación se basará en lo técnico y económico; impactando directamente en el mercado.

RECOMENDACIONES

1. Considerar en el proceso de elaboración de Términos de Referencia para futuras licitaciones un apartado específico para la generación eólica *offshore*, tal y como se propuso para la generación geotérmica en la Resolución CNEE-68-2021. Además, es preciso mencionar que en procesos de licitación previos ha suscitado un sesgo parcial por parte de la Comisión en licitaciones con tecnología neutra, por lo que se recomienda adoptar criterios referenciados a tecnologías específicas.
2. Elaborar términos de referencia técnicos en futuras licitaciones para establecer criterios que no generen eventos desiertos.
3. Promover la vigencia del Plan de Expansión Indicativo del Sistema de Generación 2020-2050 en las futuras licitaciones, incentivando: las inversiones en fuentes de generación de energía eléctrica renovable, la generación de energía eléctrica con tecnología eólica y solar que cuenten con reserva de potencia y, la instalación de plantas de generación en ubicaciones geográficas en donde actualmente no existe.

REFERENCIAS

1. Acuerdo Gubernativo Número 256-97. Reglamento de la ley General de Electricidad. Diario de Centroamérica. Guatemala. 3 de abril de 1997.
2. Agencia Andaluza de la Energía. (2011). *Energía Eólica (guía técnica)*. España: Autor. Recuperado de <https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/es/biblioteca/guia-tecnica-de-energia-eolica>.
3. Aurora Energy Research. (6 de febrero, 2020). Reaching the UK Government's target of 40GW of offshore wind by 2030 will require almost £50bn in investment. AURORA ER. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://www.auroraer.com/insight/reaching-40gw-offshore-wind/>.
4. Badger, M., Sathe, A., Ejnar, P., Fedorov, V. y Ram, B. (14 de enero, 2020). *Energía eólica*. [Mensaje en blog]. Recuperado de <https://www.coursera.org/learn/wind-energy>.
5. Bazilian, M. y Roques, F. (2008). *Analytical methods for energy diversity and security, portfolio optimization in the energy sector: A tribute to the work of Dr Shimon Awerbuch*. Amsterdam, Países bajos: Elsevier.

6. Carta, J., Pérez, R., Santos, A. y Castro, M. (2009). *Centrales de energías renovables: Generación eléctrica con energías renovables*. Madrid, España: Pearson Educación.
7. Chaidez, J. (12 de octubre, 2020). Estos son los países con mayor capacidad de energía eólica en el mundo. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://www.debate.com.mx/mundo/Estos-son-los-paises-con-mayor-capacidad-de-energia-eolica-en-el-mundo--20201012-0204.html>.
8. Correia, T., Tomasquim, M. y Hallack, M. (2020). *Guía para el diseño de contratos de energías renovables adquiridos mediante subastas*. Estados Unidos: Banco Interamericano de Desarrollo. Recuperado de <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Guia-para-el-diseno-de-contratos-de-energias-renovables-adquiridos-mediante-subastas.pdf>.
9. Daley, B. (20 de julio, 2020). Floating wind farms: how to make them the future of green electricity. [Mensaje en un blog]. Recuperado de https://theconversation.com/floating-wind-farms-how-to-make-them-the-future-of-green-electricity-142847?fbclid=IwAR1s6vuRG3OIs41BuGiVBdWpKW1h5qMQUTIIxY8G6JcSBy81VF3yW1eOz_4.
10. Decreto No. 93-96. Ley General de Electricidad. Diario de Centroamérica. Guatemala. 15 de noviembre de 1996.

11. Eólico San Antonio. (12 de octubre, 2016). Parque, descripción del proyecto. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://esagt.com/parque.php>.
12. Fulke, S. (14 de enero, 2016). Turbine installation completed at Gode Wind 1 + 2 Offshore Wind Farm. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://www.sunwindenergy.com/offshore-wind-energy/turbine-installation-completed-gode-wind-1-2-offshore-wind-farm>.
13. General Electric. (s.f). Haliade-X 12 MW offshore wind turbine platform, the world's most powerful offshore wind turbine. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://www.ge.com/renewableenergy/wind-energy/offshore-wind/haliade-x-offshore-turbine>.
14. Institute of Electrical and Electronics Engineers. (27 de agosto, 2020). Anatomy of a Wind Turbine: The Eco-Friendly Power Solution. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://transmitter.ieee.org/anatomy-of-a-wind-turbine-the-eco-friendly-power-solution/>.
15. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (s.f). Eólica Marina. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://www.idae.es/tecnologias/energias-renovables/uso-electrico/eolica/eolica-marina>.
16. International Renewable Energy Agency. (2020). *Renewable Power Generation Costs in 2019*. Abu Dabi, Emiratos Árabes Unidos: Autor. Recuperado de

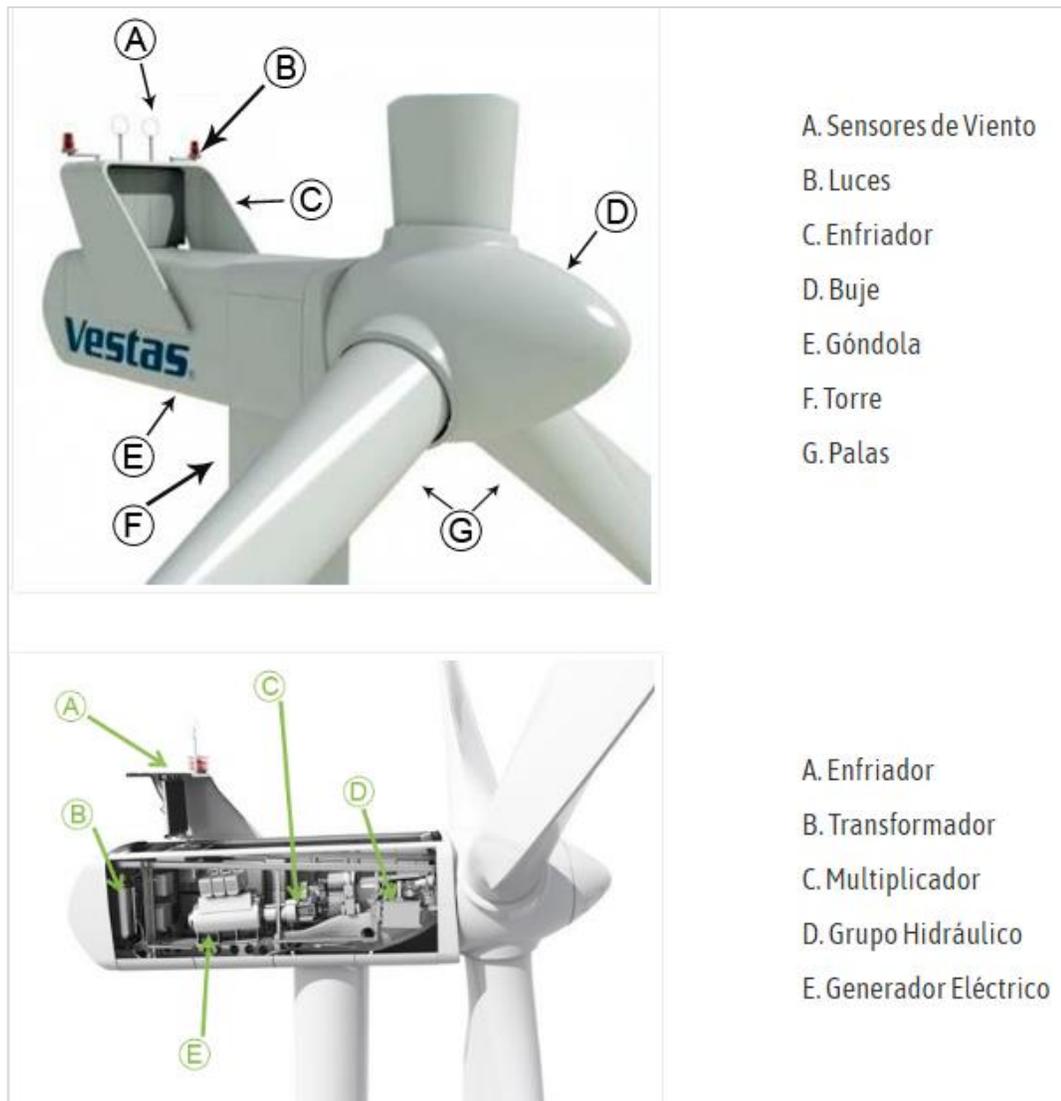
<https://www.irena.org/publications/2020/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2019>.

17. Ministerio de Energía y Minas. (2017). *Energía Eólica en Guatemala*. Guatemala: Autor. Recuperado de <https://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2015/06/Energ%C3%ADa-E%C3%B3lica-en-Guatemala.pdf>.
18. Ministerio de Energía y Minas (2020). *Plan de expansión indicativo del Sistema de generación 2020-2050*. Guatemala: Autor. Recuperado de <https://www.cnee.gob.gt/PlanesExpansion/2020-2050/PlanExpansionGeneracion2020-2050.pdf>.
19. Ministerio de Energía y Minas (2022). *Plan de expansión indicativo del Sistema de generación 2022-2052*. Recuperado de <https://mem.gob.gt/wp-content/uploads/2022/01/PEG-2022-2052.pdf>.
20. Pastor, J. (6 de octubre, 2020). La apuesta del Reino Unido por la energía eólica marina es brutal: todos los hogares británicos dependerán de ella en 2030. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://www.xataka.com/energia/apuesta-reino-unido-energia-eolica-marina-brutal-todos-hogares-britanicos-dependeran-ella-2030>.
21. Pérez, M. (2009). *Propuesta de una metodología para la implantación de parques eólicos offshore* (Tesis de doctorado). Universidad Politécnica de Madrid, España. Recuperado de <https://core.ac.uk/download/pdf/148653075.pdf>.

22. Polanco, P. (2012). *Lineamientos para el desarrollo de parques eólicos en Guatemala* (Tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Recuperado de http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3446_C.pdf.
23. Resolución CNEE-68-2021. Diario de Centroamérica. Guatemala. 16 de marzo de 2021.
24. Resolución CNEE-81-2021. Diario de Centroamérica. Guatemala. 25 de marzo de 2021.
25. Resolución No. 157-01. Norma de Coordinación Comercial No. 1. Diario de Centroamérica. Guatemala. 30 de octubre de 2000.
26. Resolución No. 157-16. Norma de Coordinación Operativa No. 5. Diario de Centroamérica. 30 de octubre de 2000.

ANEXOS

Anexo 1. Partes de un aerogenerador



Fuente: Eólico San Antonio (2016). *Parque, descripción del proyecto.*

Anexo 2. Parque eólico (onshore) San Antonio El Sitio



Fuente: Eólico San Antonio (2016). *Parque, descripción del proyecto.*

Anexo 3. Parque eólico (offshore) Gode Wind 1 y 2 en Alemania



Fuente: Fulke, S. (2016). *Turbine installation completed at Gode Wind 1 + 2 Offshore Wind Farm.*

Anexo 4. **Capacidad instalada de energía renovable en Centroamérica y El Caribe**

Año	CAP (MW)	Año	CAP (MW)
1	7384	6	10342
2	7671	7	11936
3	8488	8	13531
4	9319	9	14108
5	9648	10	14888

Fuente: IRENA (2020). *Renewable Power Generation Costs in 2019*.

Anexo 5. **Capacidad instalada de energía renovable en el mundo**

Año	CAP (MW)	Año	CAP (MW)
1	1136226	6	1693254
2	1224050	7	1848157
3	1329202	8	2007996
4	1441393	9	2179448
5	1563122	10	2350755

Fuente: IRENA (2020). *Renewable Power Generation Costs in 2019*.

Anexo 6. Capacidad instalada de energía renovable Guatemala

Año	CAP (MW)	Año	CAP (MW)
1	1206	6	1775
2	1311	7	2178
3	1341	8	2667
4	1515	9	2753
5	1646	10	2995

Fuente: IRENA (2020). *Renewable Power Generation Costs in 2019*.

Anexo 7. Capacidad instalada de energía eólica en el mundo

Año	CAP (MW)	Año	CAP (MW)
1	150096	6	349185
2	180854	7	416225
3	219984	8	467052
4	266866	9	514622
5	299941	10	563726

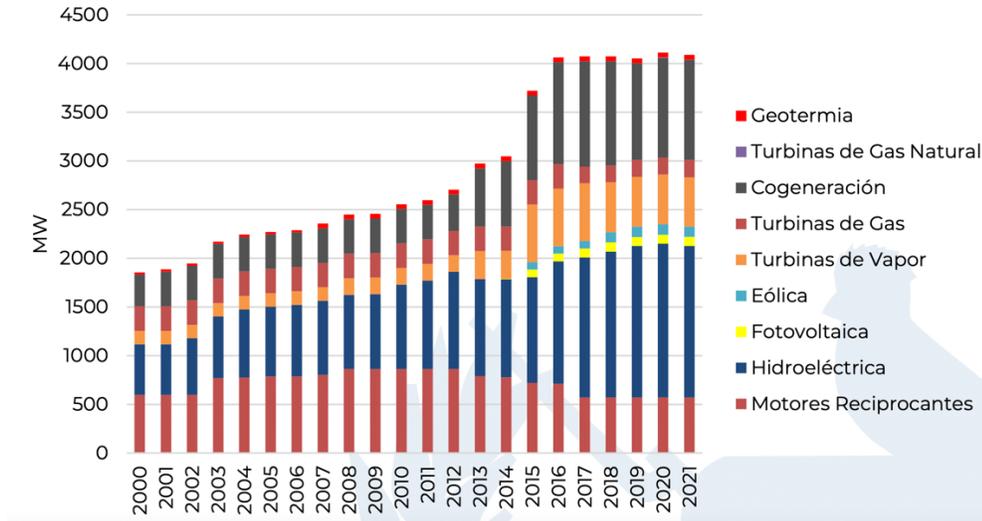
Fuente: IRENA (2020). *Renewable Power Generation Costs in 2019*.

Anexo 8. Capacidad instalada de energía eólica *offshore* en el mundo

Año	CAP (MW)	Año	CAP (MW)
1	2134	6	8492
2	3056	7	11717
3	3776	8	14342
4	5334	9	18891
5	7171	10	23356

Fuente: IRENA (2020). *Renewable Power Generation Costs in 2019*.

Anexo 9. Distribución de capacidad instalada en la matriz de generación en Guatemala



Fuente: MEM (2022). *Plan de expansión indicativo del Sistema de generación 2022-2052.*

