



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
ENERGÍA – SISTEMAS ENERGÉTICOS

ANÁLISIS DE LA PARTICIPACIÓN DE LA ENERGÍA EÓLICA EN MÉXICO

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRA EN INGENIERÍA

PRESENTA:
ANA KAREN ARREOLA GARCIA

TUTOR PRINCIPAL
DRA. CECILIA MARTÍN DEL CAMPO MÁRQUEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., DICIEMBRE 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Rodríguez Padilla Víctor
Secretario: M. en I. Rodiles Amaro Fabiola
1er. Vocal: Dra. Martín Del Campo Márquez Cecilia
2do. Vocal: M. en I. Clemente Reyes Abel
3er. Vocal: M. en C. Lezama Campos José Luis

Lugar donde se realizó la tesis: FACULTAD DE INGENIERÍA

TUTOR DE TESIS:

DRA. CECILIA MARTÍN DEL CAMPO MÁRQUEZ

FIRMA

Agradecimientos.

Agradezco a mi madre que siempre me apoya y me motiva a cumplir mis metas. A mis hermanos Luis, Enrique y Joseph, por su apoyo incondicional. También a mi abuela por su dedicación y consejos. A toda mi familia por procurar siempre mi bienestar.

Agradezco a mi tutora, la Dra. Cecilia Martín del Campo Márquez, por su ayuda en el desarrollo de la tesis, por compartir su conocimiento y proporcionarme herramientas para mi crecimiento profesional.

Agradezco a los profesores de la Maestría en Energía por sus enseñanzas y motivación.

A CONACYT por brindarme el apoyo económico en estos años que me permitió concluir el programa de maestría.

Finalmente, a Roxana, Claudia, María Luisa e Ingrid, por ser excelentes amigas, motivarme y apoyarme de manera incondicional.

Contenido.

Lista de Figuras	6
Lista de Tablas	8
Lista de unidades.....	9
Lista de Siglas	10
RESUMEN.....	11
ABSTRACT	12
INTRODUCCIÓN.....	13
CAPÍTULO 1. PERSPECTIVAS DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES Y LA ENERGÍA EÓLICA A NIVEL MUNDIAL	16
1.1 ENERGÍAS RENOVABLES	16
1.1.1 Las energías renovables como opciones de generación eléctrica	16
1.1.2 Contexto mundial de la energía eólica	20
1.2 Perspectivas de la energía eólica	21
1.2.1 La energía del viento	21
1.2.2 Características de evaluación del recurso eólico	25
1.2.3 Tecnologías de la energía eólica	28
CAPÍTULO 2. PERSPECTIVAS DEL SECTOR ELÉCTRICO Y LA ENERGÍA EÓLICA EN MÉXICO	40
2.1 Sector Eléctrico en México	40
2.1.1 Marco Regulatorio	40
2.1.2 Parque de generación y transmisión.....	46
2.1.3 Demanda de electricidad por regiones.....	50
2.2 Situación Actual de la Energía Eólica en México	52
2.2.1 Potencial de Energía Eólica	52
2.2.2 Potencial de generación eléctrica en diferentes regiones	54
2.2.3 Competencia con otras fuentes de Energía	58
2.3 Impacto social, económico, legislativo y ambiental en el desarrollo de la energía eólica en México	62
2.3.1 Impacto social.....	62
2.3.2 Impacto Económico	64
2.3.3 Impacto Ambiental.....	68
CAPÍTULO 3. MODELO PARA LA EVALUACIÓN DE PARQUES EÓLICOS	70
3.1 Descripción y Manejo de SAM	70

3.1.1	Descripción general del Modelo de rendimiento de Energía Eólica del SAM	71
3.1.2	Datos requeridos	75
3.2	Descripción de la metodología del modelo SAM	77
3.2.1	Recurso eólico	77
3.2.2	Indicadores Financieros	79
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE LA PARTICIPACIÓN DE LA ENERGÍA EÓLICA EN MÉXICO.		82
4.1	Análisis de Características Tecnológicas de Parques Eólicos	82
4.1.1	Selección de Emplazamiento	82
4.1.2	Análisis del aerogenerador óptimo	85
4.2	Análisis Económico	90
4.2.1	Determinación de NodoP	91
4.2.2	Costo Nivelado de Electricidad	92
4.2.3	Valor Presente Neto	94
4.3	Caso Particular de Estudio: Baja California Sur	95
4.3.1	Series de tiempo	95
4.3.2	Perfiles	98
4.3.3	Mapas de calor	100
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y PROPUESTAS		101
5.1	Conclusiones	101
5.2	Propuestas	103
BIBLIOGRAFÍA		105

Lista de Figuras.

Figura 1. Capacidad Instalada de energía renovable a nivel mundial en 2017.....	19
Figura 2. Capacidad instalada acumulada global de energía eólica de 2001 a 2017.	20
Figura 3. Capacidad instalada anual global de energía eólica.	20
Figura 4. Capacidad anual instalada por región desde 2009 a 2017.....	21
Figura 5. Circulación atmosférica global.	22
Figura 6. Efecto de la fuerza de Coriolis en la circulación atmosférica general.	23
Figura 7. Perfiles de velocidad de viento, en función de las características topográficas del terreno.	24
Figura 8. Potencia teórica, potencia máxima (Betz) y potencia generada por la turbina...	26
Figura 9. Ejemplo de Rosa de frecuencias de dirección.....	27
Figura 10. Rankin 10 principales fabricantes de aerogeneradores del mercado mundial y su adición de capacidad instalada durante 2017.....	30
Figura 11. Componentes de un Aerogenerador síncrono GAMESA.....	33
Figura 12. Componentes de un Aerogenerador Asíncrono ENERCON.....	34
Figura 13. Funciones de los actores del sector eléctrico mexicano con actividades dentro de la industria eléctrica.	42
Figura 14. Resultados de las Subastas del Mercado Eléctrico Mexicano (2015-2017).....	43
Figura 15. Participación de la energía fotovoltaica y energía eólica en relación con los resultados de las subastas de largo plazo 2015-2017.....	46
Figura 16. Regiones de Control del SEN.	47
Figura 17. Capacidad instalada por tipo de tecnología.....	48
Figura 18. Generación eléctrica por tipo de Tecnología (2017).....	49
Figura 19. Capacidad instalada y Generación bruta de Centrales Eólicas, 2006-2016. ...	49
Figura 20. Red troncal de Transmisión del SEN.	50
Figura 21. Participación de la Demanda máxima coincidente del SEN, 2017 (Baja California Sur incluye Mulegé).	52
Figura 22. Regiones con mayor potencial de recurso eólico en México	55
Figura 23. Participación por estado en el potencial identificado de capacidad instalable en México para proyectos eólicos.	57
Figura 24. Costo Nivelado de Electricidad por tecnologías (2016).	59
Figura 25. Tiempo de desarrollo por fases de la cadena de valor para cada tecnología. .	60

Figura 26. Emisiones de CO ₂ por tecnología de generación eléctrica.....	61
Figura 27. Interacción de la Energía Eólica con otros sectores de la economía en la generación de PIB (2015).	64
Figura 28. Impacto esperado en el PIB, capacidad instalada y números de empleos generados por energías limpias para el periodo 2015-2029.....	65
Figura 29. Impacto en el PIB (MUSD) y número de empleos en la instalación de 1 GW..	66
Figura 30. Número de Empresas Involucradas por Fase de la Cadena de Valor en México.	67
Figura 31. Consumo de agua por unidad de electricidad y calor producido (m ³ /TJ).	69
Figura 32. Interfaz de usuario del System Advisor Model.	70
Figura 33. Algoritmo del modelo de rendimiento de energía eólica en SAM.	72
Figura 34. Mapa de México con la ubicación de los sitios óptimos para instalación de parques eólicos para cada estado.	84
Figura 35. Curvas de potencia de los modelos de turbinas eólicas seleccionadas para el estudio.	87
Figura 36. Factores de Capacidad de acuerdo con el modelo de turbina eólica.....	88
Figura 37. Factores de Capacidad obtenidos con el modelo SG21.114.	89
Figura 38. Costos Nivelados de Electricidad obtenidos de la simulación con SAM	93
Figura 39. Factores de Capacidad a 80 m, 100 m y 115 m de altura de buje.....	93
Figura 40. Costos nivelados de electricidad a 80 m, 100 m y 115 m de altura de buje....	94
Figura 41. Variación horaria de Viento de Baja California Sur para 2016.....	96
Figura 42. Perfil horario de velocidad de viento para el mes de marzo del 2016 en Baja California Sur.....	96
Figura 43. Perfil de velocidad de viento para el día 5 de marzo del 2016 de Baja California Sur.....	97
Figura 44. Potencia del sistema generada para Baja California.	97
Figura 45. Perfil de velocidad de viento mensual.	98
Figura 46. Perfil anual diario promedio de velocidad de viento.	98
Figura 47. Perfil de Velocidad de viento (Gráfica Naranja) contra perfil de potencia de sistema generada (Gráfica Azul).....	99
Figura 48. Mapa de calor de Potencia del sistema generada (kWh).	100

Lista de Tablas.

Tabla 1. Principales aspectos técnicos en el estudio de viabilidad de un parque eólico ..	35
Tabla 2. Principales condiciones que debe cumplir la localización de un parque eólico...	35
Tabla 3. Resultados de la primera subasta de energía a largo plazo correspondientes a centrales Eólicas.....	43
Tabla 4. Resultados de la segunda subasta de energía a largo plazo correspondientes a centrales Eólicas.....	44
Tabla 5. Resultados de la tercera subasta de energía a largo plazo correspondientes a centrales Eólicas.....	45
Tabla 6. Demanda máxima integrada por región de control (MWh/h)	51
Tabla 7. Potencial Eólico aprovechable en México	54
Tabla 8. Tecnologías renovables que cuentan con un modelo de rendimiento en SAM... ..	71
Tabla 9. Datos de entrada requerido en cada módulo de SAM.	76
Tabla 10. Clase de rugosidad superficial.	83
Tabla 11. Rango de Velocidad de viento en los 32 estados de México.	85
Tabla 12. Modelos de Turbinas eólicas.....	86
Tabla 13. Calificación del funcionamiento de parques eólicos según el factor de capacidad.	88
Tabla 14. Parámetros iniciales para análisis económico	91
Tabla 15. NodosP seleccionados para cada estado con viabilidad técnica.	92
Tabla 16. Valores Presentes Netos obtenidos en el análisis.	95

Lista de unidades.

°C	Grado Celsius
\$/KW	pesos por kilowatt
ATM	Atmósfera
gco₂/KWh	gramos de dióxido de carbono por kilowatt hora
GW	Gigawatt
GWh	Gigawatt hora
GWh/a	Gigawatt hora por año
km	kilómetro
km/h	kilómetro por hora
Kv	Kilo Volt
m	metro
m/s	metro por segundo
m³/TJ	metro cúbico por Terajoule
MWh/h	Megawatt hora por hora
Pa	Pascal
W/m²	Watt por metro cuadrado
USD	Dólar estadounidense
USD/MWh	Dólar estadounidense por Megawatt hora
USD/KWh	Dólar estadounidense por Kilowatt hora

Lista de Siglas.

AMDEE	Asociación Mexicana de Energía Eólica
AZEL	Atlas de Zonas con alto potencial de Energías Limpias
CENACE	Centro Nacional de Control de Energía
CFE	Comisión Federal de Electricidad
CO₂	Dióxido de Carbono
CRE	Comisión Reguladora de Energía
FC	Factor de Capacidad
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GWEC	Global Wind Energy Council
IEA	International Energy Agency
INERE	Inventario Nacional de Energías Renovables
IRENA	International Renewable Energy Agency
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LGCC	Ley General de Cambio Climático
LCOE	Levelized Cost of Energy
MEM	Mercado Eléctrico Mayorista
NREL	National Renewable Energy Laboratory
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico
PRODESEN	Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional
PWC	PriceWaterhouse Coopers
RNT	Red Nacional de Transmisión
SAM	System Advisor Model
SEN	Sistema Eléctrico Nacional
SENER	Secretaría de Energía
SIN	Sistema Interconectado Nacional
RED-MÉXICO	Renewable Energy Data México
VPV	Valor Presente Neto
WBCSD	World Business Council for Sustainable Development
WRC	World Radiation Centre

RESUMEN.

En la conferencia sobre el cambio climático de París 2015, México asumió varios compromisos para el 2030 que se apegan a los objetivos y prioridades establecidas en su Ley General de Cambio Climático. El país asume el objetivo indicativo de reducir al año 2020 un treinta por ciento de emisiones con respecto al Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero de 2013; así como un cincuenta por ciento de reducción de emisiones al 2050 en relación con las emitidas en el año 2000. En consecuencia, se está dando un fuerte impulso al desarrollo de las energías renovables enfocadas a la generación eléctrica para disminuir la dependencia de los combustibles fósiles y contribuir al cumplimiento de los compromisos asumidos internacionalmente; entre los distintos tipos de fuentes renovables capaces de coadyuvar eficazmente en estos compromisos, se destaca la energía eólica. Aunado a esto, se han identificado zonas disponibles con alto potencial eólico en las diferentes regiones del país. Teniendo en cuenta lo anterior, es de suma relevancia evaluar los proyectos eólicos que se proponen para generación de energía eléctrica para lograr la selección de tecnología que maximice el aprovechamiento del recurso eólico para cada región del sistema eléctrico considerando los límites tecnológicos y los costos. Con el fin de alcanzar una mayor participación de la energía eólica en el cumplimiento de las metas de energía limpia a largo plazo y contar con información confiable de los perfiles de viento del recurso eólico, el objetivo general del trabajo consiste en investigar cuáles deben ser los costos y parámetros de referencia tecnológica de las plantas eólicas que se proponen como candidatas para la optimización simultánea de generación y transmisión, teniendo en cuenta el recurso eólico disponible en cada región, la demanda de electricidad de cada región y la infraestructura de generación y transmisión del sistema eléctrico nacional. Para desarrollar el análisis se efectuó una simulación de los rendimientos de proyectos eólicos mediante el programa System Advisor Model del National Renewable Energy Laboratory. Los resultados obtenidos en el análisis demostraron que existe una amplia diversidad de zonas en México con recurso eólico aprovechable, habiendo identificado a los estados de Baja California Sur y Nayarit como las zonas más viables para el desarrollo de proyectos eólicos alcanzando factores de capacidad mayores a 45%.

Palabras clave: Energía del viento en México; Tecnologías de aerogeneradores; Simulación de generación eólica horaria y anual.

ABSTRACT.

At the Conference on Climate Change in Paris 2015, Mexico assumed different commitments for 2030 that adhere to the objectives and priorities established in the General Law on Climate Change. The country assumes the indicative objective of reducing by the year 2020 thirty percent of emissions concerning the National Inventory of Emissions of Greenhouse Gases of 2013, as well as, a fifty percent emission reduction by 2050 about those issued in the year 2000. Consequently, a strong impetus to the development of renewable energies, focused on electricity generation, to reduce dependence on fossil fuels and contribute to the accomplishment the international assumed commitments has been implemented. Nevertheless, among the different renewable alternatives, Wind Energy became the more effective to be implemented. Thus, were identified areas with wind potential available in different regions of the country. Therefore, it became essential to evaluate the wind projects proposed for the generation of electric power to achieve the optimal selection of technology in each region of the electric system, considering the technological limits of the use of the wind resource and the costs. To reach optimal participation of wind energy while accomplishing of the long-term clean energy goals and reliable information profiles of wind resource. The general objective of this study is to assess what should be the costs and technological reference parameters of the wind power plants proposed as candidates for the simultaneous optimization of generation and transmission, considering the wind resource available in each region, the electricity demand of each region and the generation and transmission infrastructure of the electrical system national. The analysis consisted of a simulation of the performances of wind projects through the System Advisor Model program of the National Renewable Energy Laboratory. The results obtained in the analysis showed that there is a great diversity of areas in Mexico with exploitable wind resource, having identified the states of Baja California Sur and Nayarit as the most viable areas for the development of wind projects reaching capacity factors higher than 45 percent.

Key words: Wind energy in Mexico; Wind turbine technologies; Simulation of hourly and annual wind generation.

INTRODUCCIÓN.

Actualmente, México tiene un parque de generación de energía eléctrica poco diversificado, en el cual predomina la generación que proviene de ciclos combinados con una participación cercana al 50%, térmicas convencionales con el 13% y carboeléctricas con el 9%. Esta generación basada en combustibles fósiles, llamada generación convencional, ha propiciado impactos ambientales negativos como la contaminación de cuerpos de agua, suelo y atmósfera. (Valdés, 2011). Adicionalmente México enfrenta un incremento en la demanda energética y un claro declive de la producción de hidrocarburos. Consecuentemente, la producción de energía por los medios convencionales debería ir a la baja debido a la reducción de la producción de hidrocarburos por parte de Pemex; sin embargo, esto ha resultado en el incremento de las importaciones gas, combustóleo, carbón y gasolinas, con esto nos enfrentamos a una situación de emergencia en seguridad energética, lo que también afecta los indicadores nacionales que emite la SENER, como la dependencia energética, por ello es importante que la balanza energética del país sea equilibrada y que garantice un desarrollo ecológicamente sustentable, tanto en lo que afecta al medio ambiente nacional como en lo que concierne al medio global. Ante esto México en foros internacionales ha defendido la utilización de tecnologías limpias, ello implica obtener la energía eléctrica necesaria de fuentes limpias, respetuosas del medio ambiente local y global, es por ello que en la conferencia sobre el cambio climático de París 2015, asumió varios compromisos para el 2030, los cuales se apegan a los objetivos y prioridades establecidas en la Ley General de Cambio Climático, donde México asume el objetivo indicativo de reducir al año 2020 un treinta por ciento de emisiones con respecto al Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero de 2013; así como un cincuenta por ciento de reducción de emisiones al 2050 en relación con las emitidas en el año 2000. En consecuencia, se está dando un fuerte impulso al desarrollo de las energías renovables para disminuir la dependencia de combustibles fósiles y cumplir con los objetivos asumidos.

México, tanto por su extensión territorial, como por su localización geográfica y características orográficas, ofrece condiciones favorables para el desarrollo de proyectos de aprovechamiento de energía renovable que, en general, presentan una creciente viabilidad técnica y económica, siendo las fuentes energéticas más abundantes en el país el viento y la radiación solar; aunque también se cuenta con energía hidráulica, geotérmica y biomasa que ya son explotadas en la actualidad.

El territorio nacional ofrece varios estados con potencial eólico “excelente” y “muy bueno” para generar electricidad, como Baja California Sur con un rango de velocidades de 5.5 m/s a 7.5 m/s, las costas de Nayarit con velocidades de viento desde 5.7 m/s hasta 6.7 m/s, las costas de Tamaulipas, Oaxaca, Quintana Roo, Yucatán, Tabasco, todos con un rango de velocidades de 4 a 6.5 m/s. Sin embargo, aún no se cuenta con la suficiente información sobre potencial de recurso renovable para cada uno de los estados, de igual manera falta información de características del desempeño de la tecnología y costos que reflejen realmente la situación de México. Estos datos particulares son los que permiten que el modelo de planeación se ajuste realmente a las condiciones y características de las necesidades energéticas del país.

Parte fundamental del proceso de planeación de sistemas eléctricos es la caracterización de las diversas tecnologías energéticas donde se toman en cuenta parámetros del

desempeño de la tecnología y costos. Esta caracterización depende totalmente de la evaluación de recursos energéticos, ya que el desempeño de una tecnología está en función del potencial de recurso renovable, por lo que es de gran importancia contar con datos confiables que permitan la realización de una planeación óptima a largo plazo.

Por todas las razones antes mencionadas, es de suma relevancia evaluar los proyectos eólicos que se proponen para generación de energía eléctrica, para seleccionar la tecnología que aproveche las condiciones de recurso eólico de cada región del sistema eléctrico, considerando los límites tecnológicos y los costos.

El objetivo general del trabajo consiste en investigar cuáles deben ser los costos y parámetros de referencia tecnológica, de las plantas eólicas que se proponen como candidatas para la optimización simultánea de generación y transmisión, teniendo en cuenta en cada región, el recurso eólico disponible, así como la demanda de electricidad, la infraestructura de generación y transmisión del Sistema Eléctrico Nacional.

Teniendo como objetivos particulares de investigación:

- Desarrollar una base de datos de recurso eólico de las regiones del país con mayor potencial aprovechable en las 9 regiones de control del sistema eléctrico nacional.
- Desarrollar una base de datos de los principales parámetros de referencia tecnológica de las plantas eólica para la selección de la mejor tecnología por región.
- Determinar el costo de inversión asociado a las plantas eólicas que se proponen como candidatas para la optimización simultánea de generación y transmisión y el Costo Nivelado de Electricidad (LCOE).
- Determinar el emplazamiento óptimo en cada estado y el modelo de turbina eólica asociada a cada emplazamiento analizado.
- Determinar la viabilidad del uso del programa System Advisor Model (SAM de NREL) para evaluación de proyectos energéticos.
- Analizar la participación de la energía eólica en el cumplimiento de las metas de energía limpia a largo plazo.

Para el desarrollo de la investigación, se planteó la elección de una metodología de estudio orientada al análisis de proyectos energéticos dividida en dos etapas principales. Así mismo, respecto a la evaluación de parques eólicos, ésta se realizó con el programa System Advisor Model (SAM) desarrollado por el laboratorio nacional de energía renovable (NREL por sus siglas en inglés).

Etapa 1. Análisis de Características Tecnológicas de Parques Eólicos:

Selección de los posibles emplazamientos para la construcción de parques eólicos en cada estado, en función de los siguientes criterios: Localización de zonas de alta abundancia del recurso eólico, Descarte de zonas con Áreas naturales protegidas y con asentamientos sociales, descarte de zonas con exclusiones de riesgo de inundación, volcanes activos y alta incidencia de ciclones tropicales, Eliminación de las zonas inadecuadas por su orografía y Descarte de zonas lejanas a la RNT.

En relación con la selección del aerogenerador óptimo, se consideraron tres características principales: Curva de potencia, Factor de Planta y la velocidad de viento, las cuales están interrelacionados de manera importante.

Etapa 2. Análisis Económico

Durante el presente proyecto se analizaron los siguientes aspectos financieros: Costo nivelado de electricidad (LCOE) y el Valor Presente Neto (VPN). El objetivo fue tener una referencia comparativa que permita calificar la aceptación y factibilidad de los proyectos analizados.

La tesis, mediante una estructura de cinco capítulos, analiza la participación de la energía eólica en México.

En el capítulo 1 se presenta una breve descripción del panorama energético renovable mundial en un escenario actual, de manera específica se profundiza sobre la energía eólica desde su perspectiva mundial y algunos conceptos básicos tecnológicos de la energía eólica para complementar la información.

Mediante el capítulo 2 se hace referencia al papel de la energía eólica en México, se aborda de manera breve la estructura actual del sector eléctrico en México y de manera específica se aborda la perspectiva actual de la energía eólica y la relación con otras fuentes de energía renovable.

En tanto que en el capítulo 3 presenta la metodología empleada para la evaluación de parques eólicos aplicada en el programa System Advisor Model (SAM) desarrollado por el laboratorio nacional de energía renovable (NREL por sus siglas en inglés). Se abordarán, de manera breve, las bases matemáticas del programa, los datos requeridos y el manejo del programa.

El capítulo 4 muestra los resultados obtenidos mediante el procesamiento y análisis de los datos de recurso eólico de los 32 estados de México mediante el uso del programa SAM. Se parte del análisis de diversas tecnologías con el objetivo de determinar el tipo de turbina eólica, comportamiento de la tecnología para cada estado y en su caso, concluir si es viable introducir proyectos eólicos al sector eléctrico a partir del análisis técnico económico.

Finalmente, en el capítulo 5 se exponen las conclusiones de acuerdo con la investigación realizada y a los objetivos planteados, asimismo, se muestran las propuestas que se tienen para complementar el estudio realizado y futuros temas de investigación para proyectos eólicos enfocados a generación eléctrica en México.

CAPÍTULO 1. PERSPECTIVAS DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES Y LA ENERGÍA EÓLICA A NIVEL MUNDIAL.

Actualmente el uso de la energía es indispensable para la realización de todas las actividades humanas, desde sociales hasta económicas. Se ha llegado al grado de contar con una gran diversidad de fuentes de energía, sin embargo, el desarrollo forjó sus bases en el uso de energéticos fósiles tales como carbón, petróleo y gas natural. Si bien en un principio, dado su disponibilidad y bajo costo se utilizaron como fuentes de energía, pronto se descubrió que éstos son energéticos contaminantes que, como consecuencia de su uso, han traído afectaciones ambientales que ponen en peligro la vida en el planeta. También existe otro factor preocupante, que es el hecho de que son fuentes no renovables, esto quiere decir que, en algún momento, se agotarán. Ante esto se ha adoptado por echar un vistazo al pasado y nuevamente estamos apostando por el uso de la energía solar, hidráulica, geotermia, biomasa y eólica, llamadas ahora fuentes de energía renovables y son aquellas que han existido desde el inicio de los tiempos y que seguirán existiendo siempre pues se renuevan por procesos de la propia naturaleza.

A continuación, se muestra una breve descripción del panorama energético renovable mundial en un escenario actual; de manera específica y dada su relevancia, se profundiza sobre la energía eólica desde su perspectiva mundial y algunos conceptos básicos para complementar la información.

1.1 ENERGÍAS RENOVABLES.

1.1.1 Las energías renovables como opciones de generación eléctrica.

En los últimos años se ha vivido una confusión con el empleo de los términos energías renovables y energías limpias, aunque parecen lo mismo y muchas veces se usan casi como conceptos que son sinónimos, tienen diferente significado e interpretación.

De acuerdo con la Ley de la industria eléctrica¹:

Energías Limpias son aquellas fuentes de energía y procesos de generación de electricidad cuyas emisiones o residuos, cuando los haya, no rebasen los umbrales establecidos en las disposiciones reglamentarias que para tal efecto se expidan, para que la Secretaría de Energía y la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales determinen que sean

¹Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (11 de agosto de 2014). Ley de la Industria Eléctrica. En Capítulo 1, Art. 3 XXII (págs. 3-4). CDMX.

Energías Limpias, se basará en una tasa de emisiones no mayor a 100 kg/MWh. Entre las Energías Limpias se consideran las siguientes:

- a) El viento;*
- b) La radiación solar, en todas sus formas;*
- c) La energía oceánica en sus distintas formas: maremotriz, maremotérmica, de las olas, de las corrientes marinas y del gradiente de concentración de sal;*
- d) El calor de los yacimientos geotérmicos;*
- e) Los bioenergéticos que determine la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos;*
- f) La energía generada por el aprovechamiento del poder calorífico del metano y otros gases asociados en los sitios de disposición de residuos, granjas pecuarias y en las plantas de tratamiento de aguas residuales, entre otros;*
- g) La energía generada por el aprovechamiento del hidrógeno mediante su combustión o su uso en celdas de combustible, siempre y cuando se cumpla con la eficiencia mínima que establezca la CRE y los criterios de emisiones establecidos por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales en su ciclo de vida;*
- h) La energía proveniente de centrales hidroeléctricas;*
- i) La energía nucleoelectrica;*
- j) La energía generada con los productos del procesamiento de esquilmos agrícolas o residuos sólidos urbanos (como gasificación o plasma molecular), cuando dicho procesamiento no genere dioxinas y furanos u otras emisiones que puedan afectar a la salud o al medio ambiente y cumpla con las normas oficiales mexicanas que al efecto emita la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales;*
- k) La energía generada por centrales de cogeneración eficiente en términos de los criterios de eficiencia emitidos por la CRE y de emisiones establecidos por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales;*
- l) La energía generada por ingenios azucareros que cumplan con los criterios de eficiencia que establezca la CRE y de emisiones establecidos por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales;*
- m) La energía generada por centrales térmicas con procesos de captura y almacenamiento geológico o biosecuestro de bióxido de carbono que tengan una eficiencia igual o superior en términos de kWh-generado por tonelada de bióxido de carbono equivalente emitida a la atmósfera a la eficiencia mínima que establezca la CRE y los criterios de emisiones establecidos por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales;*
- n) Tecnologías consideradas de bajas emisiones de carbono conforme a estándares internacionales, y*
- o) Otras tecnologías que determinen la Secretaría y la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, con base en parámetros y normas de eficiencia energética e hídrica, emisiones a la atmósfera y generación de residuos, de manera directa, indirecta o en ciclo de vida.*

De acuerdo con la Ley de transición energética²:

² Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (24 de diciembre de 2015). Ley de Transición Energética. En Capítulo 1, Art. 3 XVI (págs. 2-3). CDMX.

” Energías Renovables son aquellas cuya fuente reside en fenómenos de la naturaleza, procesos o materiales susceptibles de ser transformados en energía aprovechable por el ser humano, que se regeneran naturalmente, por lo que se encuentran disponibles de forma continua o periódica, y que al ser generadas no liberan emisiones contaminantes³”.

“Energías fósiles son aquellas que provienen de la combustión de materiales y sustancias en estado sólido, líquido o gaseoso que contienen carbono y cuya formación ocurrió a través de procesos geológicos⁴”.

En contra de lo que se pensaba hasta hace unos años, se ha estado logrando un cambio del modelo energético mundial; la forma en que se produce y usa la energía actualmente no es sostenible y las principales fuentes de combustibles fósiles como son: el petróleo, el carbón y el gas, son recursos naturales finitos y, dada su demanda desmedida y descontrolada, se están agotando a un ritmo acelerado. Además, dichos combustibles, son los principales contribuyentes al cambio climático.

Adicionalmente, los suministros de gas y petróleo baratos y convencionales están disminuyendo, mientras que la demanda de energía sigue aumentando.

De acuerdo con una evaluación del consejo mundial de energía, el sector energético global es el mayor contribuyente de las emisiones globales de gases de efecto invernadero⁵. Adoptar energías limpias, junto con medidas de ahorro energético, son la mejor manera de lograr rápidas reducciones de emisiones que necesitamos.

Según el WBCSD (World Business Council for Sustainable Development), la energía es un motor fundamental del crecimiento económico y del progreso social, es esencial para sostener la industria, las infraestructuras, para conectar bienes, personas y servicios hacia mercados, y suministrar servicios básicos como la calefacción y la iluminación, por lo tanto es fundamental para prácticamente todos los aspectos del bienestar y desarrollo humano, como el acceso al agua, la productividad agrícola, la atención de la salud, la educación, la creación de empleo y la sostenibilidad ambiental.

Además, se espera que de aquí a 2050, la población mundial aumente, y según las estimaciones de Naciones Unidas, el 98% de ese crecimiento se producirá en el mundo en desarrollo y emergente, aunado a esto se tendrá un aumento en el consumo y uso de energía eléctrica, ante esto y dado los costos actuales de las energías convencionales, así como sus consecuencias al ambiente, el mundo está apostando por el uso de energías renovables para diversificar su canasta energética. Desde 2007, las energías renovables han protagonizado una verdadera revolución mundial, son más baratas y están creciendo rápidamente, alcanzando en muchos casos competitividad para desafiar a los combustibles fósiles.

Las cifras de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) entre 2015 y 2016 afirman que hubo una disminución en la producción de electricidad a partir de combustibles fósiles entre los países miembros de la misma, el cuarto año consecutivo de disminución de la generación de estos combustibles.

³ Esta definición no es estrictamente cierta porque no hay ninguna fuente de energía que tenga cero emisiones al ambiente cuando se valora mediante un análisis de ciclo de vida.

⁴ Procesos que son de muy largo plazo y en condiciones especiales.

⁵ European Climate Foundation. (2014). Cambio Climático: Implicaciones para el sector energético.

Los combustibles fósiles que permitieron esta disminución son el carbón con una disminución del 7.1% y el petróleo con una disminución del 7.0%⁶. También se observaron descensos en la generación de electricidad nuclear (-0.8%), ya que varias centrales nucleares de la OCDE fueron objeto de mantenimiento. Por su parte, la electricidad procedente del gas natural (+ 5.8%) y los procedentes de fuentes renovables como el eólico (+ 7.7%) y el solar (+ 19.2%) registraron un crecimiento. La hidroelectricidad se recuperó en 2016 (+ 1.9%), luego de las fuertes caídas de la generación observadas en 2015. 2016, fue un año trascendental para el desarrollo de las energías renovables a nivel mundial, en muchos países se ha dado un sustancial incremento de la capacidad instalada con fuentes renovables, derivado del aumento de la rentabilidad de las tecnologías renovables.

Según cifras de la International Renewable Energy Agency (IRENA, por sus siglas en ingles), a nivel mundial la capacidad instalada con energías renovables en 2017 fue 2179.428 GW. Las regiones con mayor participación de energías renovables son Asia con el 42.2 %, y Europa con 23.5% del total mundial, mientras que la región con menor participación es Centroamérica y el Caribe con 0.6%, siendo China el país con la mayor capacidad instalada con 618.8 GW. (véase Figura 1)

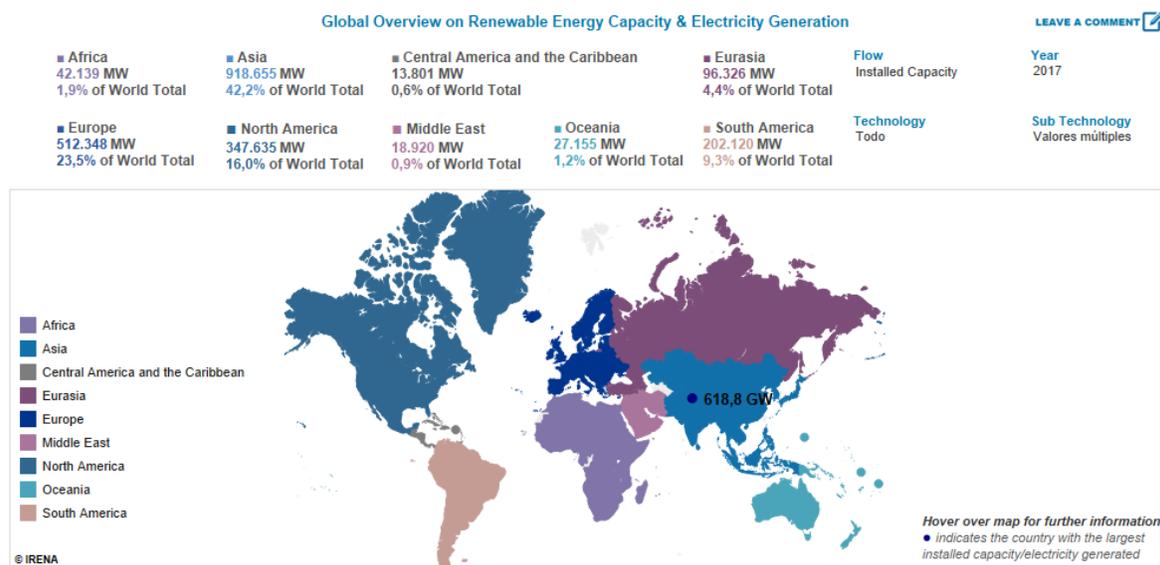


Figura 1. Capacidad Instalada de energía renovable a nivel mundial en 2017.

Fuente. Irena.org (2018)⁷

Por tipo de tecnología, la energía hidráulica concentro el 50.9% del total de capacidad instalada mundial, seguido de la energía eólica en tierra con 22.7 %, energía solar con 17.6%, biomasa solida con 4.1 % y el restante 0.6 % se atribuye a tecnologías con energía geotérmica y marina, según datos de IRENA⁸.

⁶ International Energy Agency. (2017). statistics Electricity information. Recuperado el 7 de septiembre de 2017, de IEA-International Energy Agency: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/ElectricityInformation2017Overview.pdf>

⁷ Recuperado de <http://resourceirena.irena.org/gateway/dashboard/?topic=4&subTopic=17>

⁸ Recuperado de <http://resourceirena.irena.org/gateway/dashboard/?topic=4&subTopic=19>

1.1.2 Contexto mundial de la energía eólica.

La energía eólica instalada en el mundo creció un 11% con respecto al total a finales del 2016, hasta situarse en 539.12 MW, según datos del Global Wind Energy Council (GWEC)¹⁰, en la Figura 2 se puede observar la potencia eólica instalada acumulada en el mundo desde 2001 al 2017. En general, la industria eólica mundial instaló 52.5 GW en 2017 como se observa en la Figura 3.

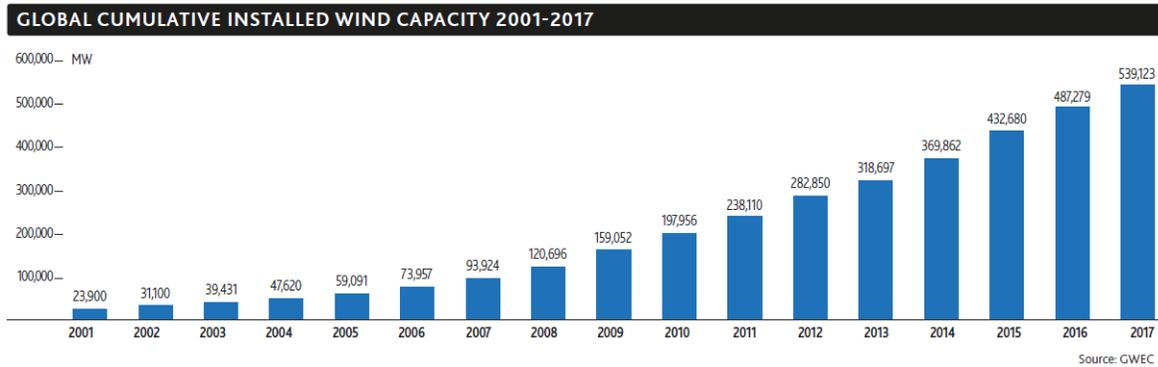


Figura 2. Capacidad instalada acumulada global de energía eólica de 2001 a 2017.

Fuente. Global Wind Energy Council (2018)

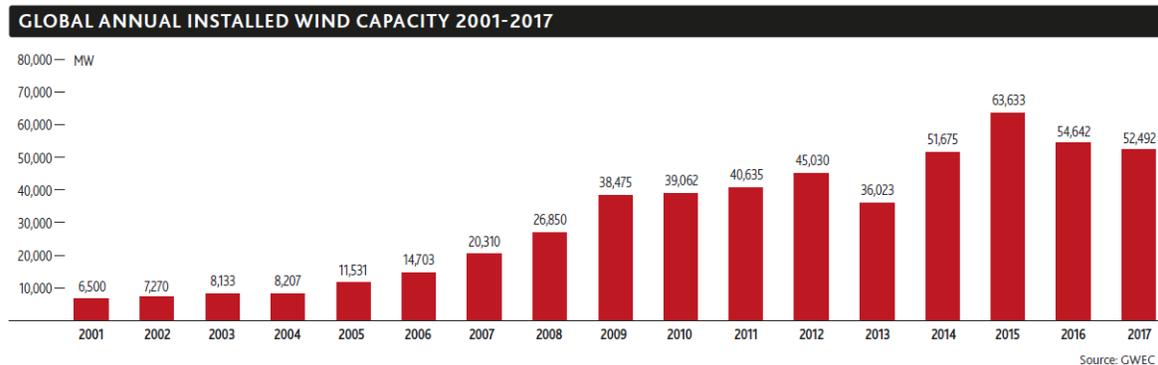


Figura 3. Capacidad instalada anual global de energía eólica.

Fuente. Global Wind Energy Council (2018)

A finales del 2017, 30 países contaban con más de 1,000 MW de capacidad instalada de los cuales 18 en Europa; 5 en Asia-Pacífico (China, India, Japón, Corea del Sur y Australia); 3 en América del Norte (Canadá, México, Estados Unidos), 3 en América Latina (Brasil, Chile y Uruguay) y 1 en África (Sudáfrica). Asimismo, los primeros productores mundiales son China (188.392 MW), Estados Unidos (89.077 MW), Alemania (56.132 MW), India

¹⁰ Global Wind Report 2017, Global Wind Energy Council, Abril 2018.

(32.848 MW), España (23.170 MW), Reino Unido (18.872 MW), Francia (13.759 MW), Brasil (12.763 MW) y Canadá (12.239 MW).

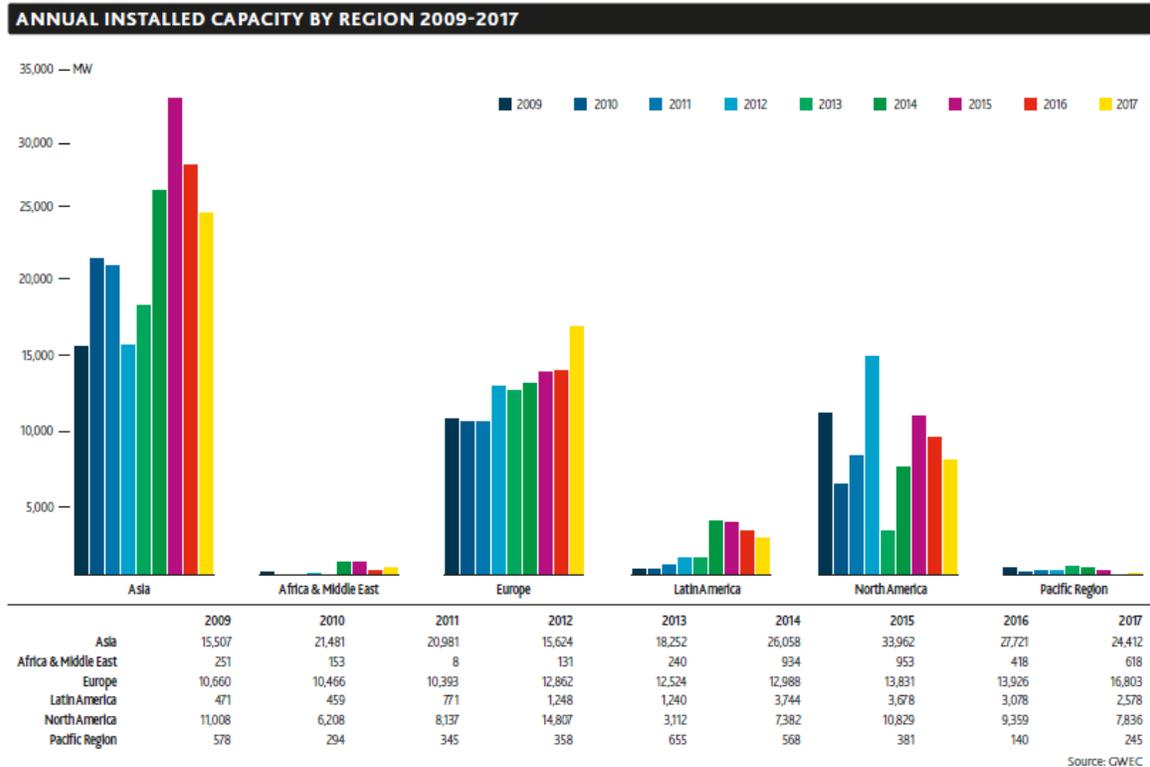


Figura 4. Capacidad anual instalada por región desde 2009 a 2017.

Fuente. Global Wind Energy Council (2018)

1.2 Perspectivas de la energía eólica.

1.2.1 La energía del viento.

El viento es la variable de estado de movimiento del aire. En meteorología se estudia el viento como aire en movimiento tanto horizontal como verticalmente. Los movimientos verticales del aire caracterizan los fenómenos atmosféricos locales, como la formación de nubes de tormenta.

El viento es una consecuencia de la radiación solar. Debido, fundamentalmente, a la redondez de la Tierra se originan diferencias de insolación entre distintos puntos del planeta. En los polos, los rayos solares inciden oblicuamente, por lo que calientan menos la superficie de la Tierra. Los rayos solares inciden perpendicularmente en el ecuador y calientan más la superficie de la Tierra, ya que se reparten sobre una superficie más pequeña que en los polos. Estas diferencias de insolación dan lugar a diferentes zonas térmicas que provocan diferencias de densidad en las masas de aire. En el ecuador, el aire

al calentarse se hace más ligero (menos denso) y asciende a las capas altas de la atmósfera dejando tras de sí una zona de baja presión; en los polos, dadas las bajas temperaturas que ahí prevalecen, el aire es más pesado por ser más denso, lo que lo hace descender aumentando la presión. El aire que envuelve a la Tierra, como cualquier gas, se mueve desde las zonas de mayor presión atmosférica (mayor densidad) a las de menor presión; es decir, desde los polos al ecuador por las capas bajas de la atmósfera y del ecuador a los polos por las capas altas siguiendo un ciclo de movimiento de aire en cada hemisferio (Figura 5).

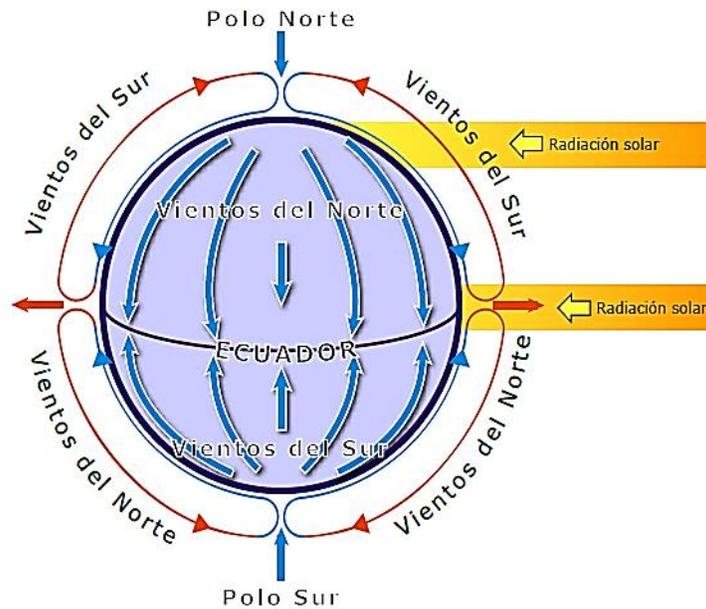


Figura 5. Circulación atmosférica global.

Fuente. Comunidad Eduambiental, curso energía eólica¹¹

La circulación global del aire sobre el planeta es mucho más compleja que la descrita, ya que en ella intervienen muchos y distintos factores, entre los cuales destacan la rotación y traslación de la tierra.

El movimiento de traslación de la Tierra en torno del Sol, hace que la intensidad de la radiación solar recibida por las diferentes zonas de la Tierra sea distinta según las estaciones del año, así como por las perturbaciones atmosféricas.

El movimiento de rotación de la Tierra da lugar a la aparición de las fuerzas de Coriolis, las cuales actúan sobre la masa de aire en movimiento, desviándola hacia la derecha en el hemisferio norte y hacia la izquierda en el hemisferio sur. Estas fuerzas originan los denominados vientos contralisios (del Oeste) y alisios (del Este).

¹¹ <http://comunidad.eduambiental.org/file.php/1/curso/contenidos/docpdf/capitulo20.pdf>

En la Figura 6, se muestra como el conjunto de factores que influyen sobre la masa de aire (sin tener en cuenta las estaciones y en ausencia de continentes), da lugar a que el ciclo de movimiento del aire en cada hemisferio, se descomponga a su vez, en tres ciclos independientes.

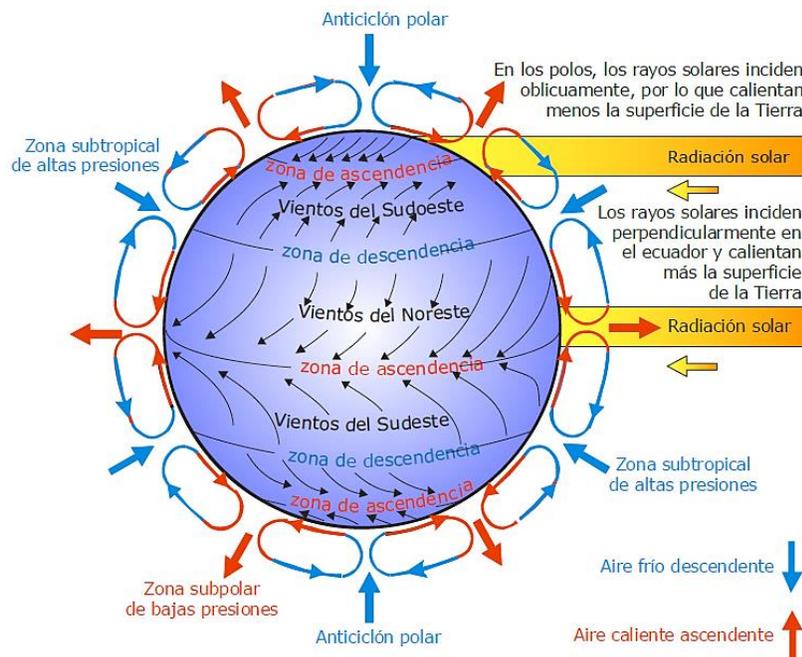


Figura 6. Efecto de la fuerza de Coriolis en la circulación atmosférica general.

Fuente. Comunidad Eduambiental, curso energía eólica¹²

1.2.1.1 Variación horizontal de la velocidad de viento.

Con base en los estudios del viento es sabido que, a gran altura de la superficie terrestre, ésta apenas ejerce influencia sobre el viento; sin embargo, también se sabe que, en las capas bajas, las velocidades de viento se modifican debido al efecto de fricción con la superficie, influenciado principalmente por las características del terreno, también llamada orografía del área.

1.2.1.2 Vientos geos tróficos (macro escala).

El flujo de viento originado por la circulación global se conoce como vientos de escala macro cuando las velocidades están en el rango de 100 a 10,000 km/h. La escala de movimiento de estos vientos va desde algunos cientos a miles de kilómetros por hora. El viento de escala macro no perturbado por características de la superficie terrestre excepto por cadenas de montañas, la fricción con el suelo no afecta y se puede considerar que el viento es el resultado del equilibrio entre las fuerzas de presión y la fuerza de Coriolis se encuentra en altitudes superiores a los 1,000 metros.

¹² <http://comunidad.eduambiental.org/file.php/1/curso/contenidos/docpdf/capitulo20.pdf>

El flujo de energía solar total absorbido por la tierra es del orden de $1,367 \text{ W/m}^2$ según la escala del World Radiation Centre (WRC). Una pequeña porción del flujo total solar se convierte en movimiento atmosférico o viento. En una escala global, las regiones alrededor del ecuador reciben una ganancia neta de energía, mientras que en las regiones polares hay una pérdida neta de energía por radiación. Esto produce un mecanismo por el cual la energía recibida en las regiones ecuatoriales es transportada a los polos.

1.2.1.3 Vientos locales (meso escala).

Las variaciones de la superficie terrestre entre los 100 y 1,000 metros de altura sobre el terreno tienen una influencia en el flujo de viento, provocando vientos de 10 a 200 km/h. Obviamente, la topografía es importante y los vientos tienden a fluir por encima y alrededor de montañas y colinas. Cualquier otro obstáculo o rugosidad sobre la superficie terrestre de gran tamaño desacelera el flujo de aire.

1.2.1.4 Vientos de circulación local (microescala).

En una escala micro ($< 10 \text{ km/h}$), los vientos de superficie (entre 60 y 100 metros sobre el terreno), dada su potencia y propiedades para el aprovechamiento, resulta que este tipo de vientos son los más interesantes para la aplicación directa de la conversión de la energía eólica, están influenciados por las condiciones locales de la superficie, como la rugosidad del terreno (vegetación, edificios) y obstáculos. que serán los tenidos en cuenta, junto a otros factores, para la elección apropiada del emplazamiento.

El perfil del viento (la velocidad de viento como una función de la altura sobre el terreno) puede ser expresado en una relación matemática sencilla. La forma de este perfil dependerá principalmente de la rugosidad del terreno. La Figura 7 muestra el comportamiento de perfil de velocidades del viento en función de las características topográficas del terreno.

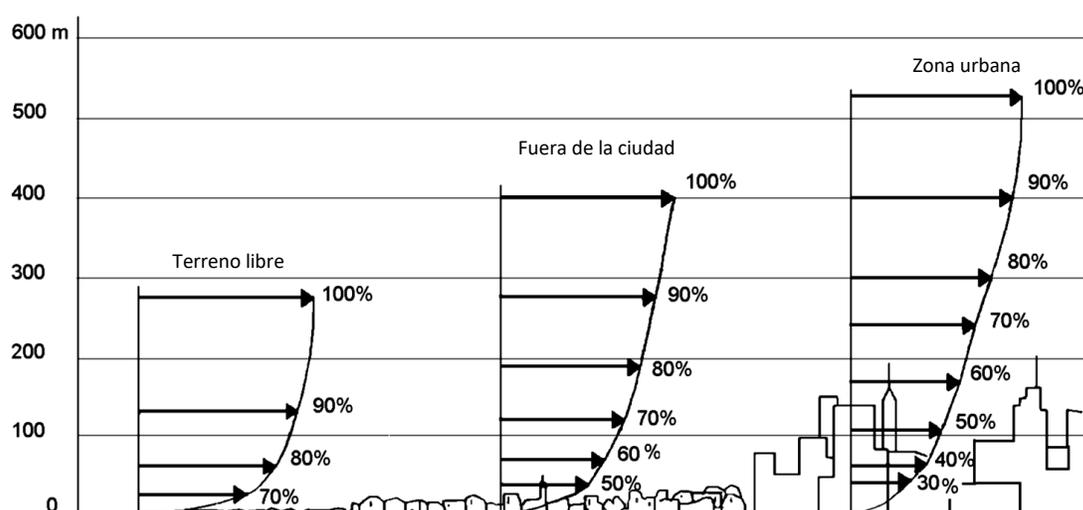


Figura 7. Perfiles de velocidad de viento, en función de las características topográficas del terreno.

Fuente. EADIT, Escuela técnica módulo 3. Energía eólica

1.2.2 Características de evaluación del recurso eólico.

Las características del viento en el sitio de instalación influyen sobre la cantidad de energía mecánica o eléctrica que puede generar una turbina eólica y, por lo mismo, la rentabilidad del proyecto depende directamente del recurso eólico local.

En esencia son tres los componentes del viento que determinan la potencia disponible de un sistema de conversión de energía eólica, mismos que se explicaran a continuación: (BUN-CA, 2002)

- a) Velocidad de viento: Es un parámetro crítico ya que la potencia obtenida de un aerogenerador varía según el cubo de la velocidad del viento. Las turbinas eólicas requieren una velocidad de viento mínima para comenzar a generar energía eléctrica, para pequeñas turbinas esta velocidad es aproximadamente 3.5 m/s.
- b) Características del viento (Turbulencia): Mientras que los modelos de viento globales ponen el aire en movimiento y determinan el recurso del viento en una región, rasgos topográficos locales, que incluyen formaciones geográficas, flora y estructuras artificiales, pueden mostrar la diferencia entre un recurso eólico utilizable y uno que no lo es.
- c) Densidad del aire: Las bajas temperaturas producen una densidad del aire más alta; consecuentemente, una mayor densidad del aire significa que se presenta una mayor fluidez de las moléculas sobre una pala de la turbina, produciendo un rendimiento más alto de la potencia para la velocidad de viento dada.

1.2.2.1 Distribución de la velocidad del viento.

Para poder caracterizar el comportamiento aleatorio del viento, se recurre a herramientas estadísticas, por ejemplo, la distribución de frecuencias por intervalos de velocidad.

En una distribución de frecuencias, se presentan histogramas de las frecuencias relativas de la velocidad de viento basadas en pequeños intervalos de velocidad de viento, denominado bin. La distribución de frecuencias por bin de velocidad (m/s) se ajusta a una distribución de probabilidad de Weibull.

La distribución estadística de las velocidades del viento varía de un lugar a otro del Globo, dependiendo de las condiciones climáticas locales, de rugosidad y de su superficie. Sabemos que el potencial de energía por segundo (la potencia teórica) varía proporcionalmente al cubo de la velocidad del viento y proporcionalmente a la densidad del aire (su masa por unidad de volumen). (Navales & Martínez, 2008)

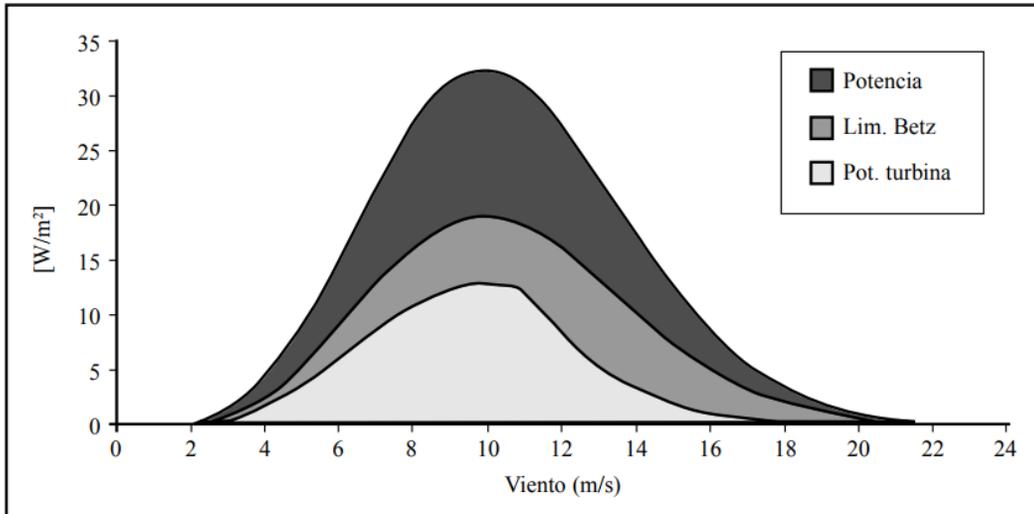


Figura 8. Potencia teórica, potencia máxima (Betz) y potencia generada por la turbina.

Fuente. Energía Eólica (*Navales & Martínez, 2008*)

El límite de Betz marca la fracción máxima (0.59) de potencia teórica del viento que cualquier máquina puede extraer. Ahora bien, un aerogenerador presenta una serie de limitaciones para tener en cuenta:

- No arranca para pequeñas velocidades del viento. Esta velocidad de arranque suele oscilar entre los 3 y 5 m/s.
- Para vientos de gran intensidad se suspende el funcionamiento de la máquina, con objeto de limitar los esfuerzos mecánicos. Además, la velocidad máxima también puede estar limitada por la necesidad de mantener constante la velocidad de giro del rotor.
- Si se intenta superar esta velocidad máxima, entran en funcionamiento mecanismos de regulación que lo impiden.

Estas limitaciones técnicas determinan las tres velocidades características de toda máquina eólica:

- Velocidad de arranque, U_a : velocidad del viento por encima de la cual inicia a generarse energía. Por debajo de esta velocidad toda la energía extraída del viento se consume en pérdidas y no hay generación de energía.
- Velocidad nominal, U_n : velocidad del viento en la que la máquina eólica alcanza su potencia nominal.
- Velocidad de corte, U_c : velocidad de desconexión, velocidad del viento por encima de la cual la máquina eólica deja de generar, desconectándose de la red a la que alimenta.

1.2.2.2 Aspectos relacionados con la dirección.

En adición a lo expuesto en los párrafos anteriores, las características direccionales del viento son de gran importancia, especialmente para la ubicación de los aerogeneradores. Éstas se manifiestan fundamentalmente a través de dos representaciones, la rosa de frecuencias y la rosa de velocidades. (Navales & Martínez, 2008)

Antes de comenzar con la descripción de las rosas, se definirán los siguientes conceptos:

Sector: es una porción del conjunto de 360° de direcciones. Generalmente, se establecen 12 sectores (de 30° cada uno) o bien 16 sectores (de 22.5° cada uno); Los sectores se empiezan a numerar comenzando por el correspondiente a 0° (dirección norte). Pueden estar centrados (si 0° indica el valor central del sector 1) o no centrados (si 0° indica el valor inicial del sector 1). En el caso de

Rosa: es una representación gráfica en forma circular donde se representa por sectores de una determinada variable, ya sea frecuencia, velocidad, energía, perfil vertical, intensidad de turbulencia.

Rosa de frecuencias.

Esta gráfica representa la frecuencia de aparición de cada sector. Es decir, representa el porcentaje de tiempo en el que el viento proviene de un determinado sector. La Figura 9 muestra el ejemplo para la región de Baja California Sur, en el cual se puede ver que el emplazamiento tiene dos direcciones predominantes ESE (Este Sureste) y SSO (Sur Suroeste), el sector predominante es en SSO con un porcentaje de aparición de 8%. Por otro lado, se puede ver cómo, en las direcciones NE (Noreste) y NO (Noroeste), la frecuencia de aparición es prácticamente nula.

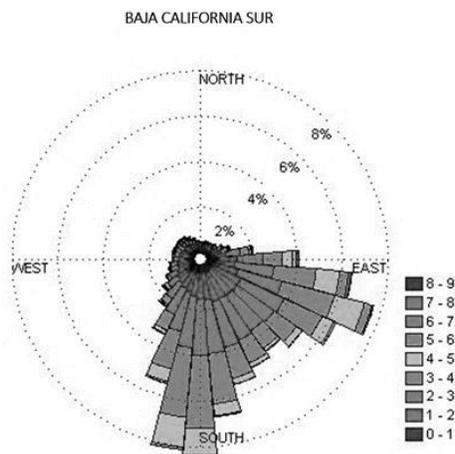


Figura 9. Ejemplo de Rosa de frecuencias de dirección.

Fuente. SIMISE, 2017

1.2.2.3 Representatividad a largo plazo.

Una de las principales características del viento, es su variabilidad anual, diaria y estacional. Esto significa que la velocidad media del viento puede oscilar de un año a otro y, por lo tanto, también variará el recurso eólico de un determinado emplazamiento. (Navales & Martínez, 2008)

Para evaluar con profundidad cuál es el recurso eólico de una zona sería necesario disponer de una serie de varios años de medidas del viento (del orden de 10 años). Sin embargo, en la mayoría de los casos tan solo se dispone de pocos años de medidas por lo que la metodología que se sigue es la de correlacionar los datos disponibles con los de una estación meteorológica que pudiera considerarse como representativa del régimen de vientos de la zona objeto de estudio y que, además, disponga de un amplio periodo de medida.

El objeto de un estudio de largo plazo (para un periodo de 20 a 40 años) es dar un valor de velocidad promedio a largo plazo, a partir de medidas recolectadas en el emplazamiento y en una estación de referencia, para la mayor cantidad de años que se pueda, para hacer una estimación adecuada de la producción de electricidad media anual del parque estudiado; sin embargo, para simular el proceso de despacho los promedios perturban mucho los perfiles de oferta que son altamente oscilantes, por lo que constantemente cambian los niveles de producción eólica, lo que implica que, para asegurar la oferta suficiente, se deben tener en consideración otros generadores que puedan variar su generación acorde a la diferencia de oferta y demanda energética.

Para ello, se utilizan técnicas MCP (medida - correlación - predicción), las cuales son métodos estadísticos que relacionan las medidas a corto plazo, realizadas en el emplazamiento del futuro parque eólico, con las velocidades de estaciones próximas con un mayor periodo de medidas con el mismo régimen de viento.

1.2.3 Tecnologías para el aprovechamiento del viento.

1.2.3.1 Aerogeneradores.

Un aerogenerador¹³ es un dispositivo que transforma la energía cinética del viento en energía mecánica y/o eléctrica.

El diseño y uso de los aerogeneradores es muy diverso, adaptándose a diferentes requerimientos; abarcan un rango muy amplio de dimensiones y tecnologías, pudiendo transformar la energía del viento en energía mecánica para uso directo, o transformándola posteriormente en energía eléctrica; o bien permite transformar directamente la energía cinética en eléctrica.

El funcionamiento básico de un aerogenerador consiste en que el viento mueve las palas, las palas mueven un eje a baja velocidad. mediante un mecanismo de sistema de

¹³ Navales, L. M. (2008). Aerogeneradores. En A. P. Talayero Navales, & E. Telmo Martínez, Energía Eólica (pág. 69). Zaragoza España.

engranajes de ruedas dentadas, se aumenta la velocidad y se mueve un eje llamado motriz. El eje motriz mueve el generador (normalmente es un alternador ya que produce corriente alterna) y la corriente producida por el generador se transporta mediante cables conductores.

1.2.3.2 Desarrollo Tecnológico Actual.

Hasta hace pocos años, la principal desventaja de la energía eólica radicaba en el aspecto económico, esto debido a que resultaba muy cara la inversión en estos sistemas. Sin embargo, con el fin de abaratar costos, en la última década se logró un gran desarrollo tecnológico tal que, hoy día, la energía eólica se ha vuelto económicamente competitiva con respecto a alternativas de combustibles fósiles en varias regiones del mundo. IRENA estimó que el costo nivelado de la electricidad (LCOE, por sus siglas en inglés) global para la energía eólica en tierra, era de 380 USD/MWh en 1983 y 70 USD/MWh en 2015 (en valores reales, 2015 USD)¹⁴. En las subastas 1, 2 y 3 realizadas en 2015, 2016 y 2017, respectivamente en México, los precios promedios van de 38.35 USD/MWh a 13.64 USD/MWh para energía eólica¹⁵, así mismo las innovaciones tecnológicas han dado paso a mejorar el rendimiento de los proyectos eólicos, en particular se han aumentado los factores de capacidad, por ejemplo, según datos del Wind Technologies Market Report, el factor de capacidad promedio de los proyectos construidos en EE. UU. entre 2014 y 2015 fue de 42.6%, en comparación con un promedio de 32.1% de los proyectos construidos de 2004 a 2011 y 25.4% de los proyectos construidos de 1998 a 2001¹⁶.

Durante 2017 a nivel mundial se vivió la mayor caída de los precios de la energía eólica en varias subastas en todo el mundo, principalmente debido a una serie de factores, incluida la innovación y escala de la tecnología, las expectativas de avances tecnológicos continuos, así como a una competencia feroz en la industria; así mismo los 10 principales fabricantes de turbinas del mundo, capturaron una parte creciente del mercado (casi un 80%, frente al 75% en 2016)¹⁷. Vestas (Dinamarca) apenas mantuvo su posición como el mayor proveedor de aerogeneradores gracias a la amplia presencia global de la compañía. Siemens Gamesa (Alemania-España) siguió de cerca, debido principalmente a la fusión de Siemens y Gamesa a principios de año y a la presencia de la compañía en 35 países en 2017. Goldwind (China) se mantuvo en el tercer lugar, con proyectos nacionales que representaron el 90% de las turbinas puestas en marcha. El fabricante estadounidense General Electric (GE), bajó dos escalones hasta el cuarto, seguido por el alemán Enercon, que tuvo un año récord gracias a un mercado interno fuerte. Las compañías chinas Goldwind y Envision crecieron gracias a una reducción de industrias del mercado interno.

¹⁴ World Energy Council, 2016

¹⁵ CENACE. *Fallo de las subastas de largo plazo (2015,2016 Y 2017)*.

¹⁶ U.S Department of Energy. (2016). *Wind Technologies Market Report*. Alexandria, Virginia.

¹⁷ Renewables 2018 Global Status Report, REN 21, 2018, pp.115.

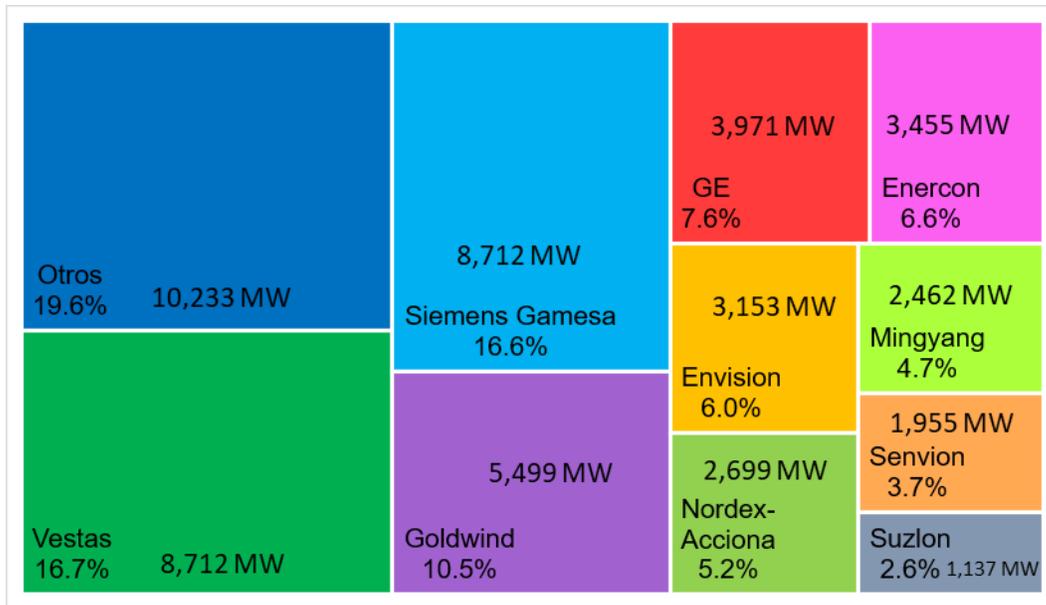


Figura 10. Rankin 10 principales fabricantes de aerogeneradores del mercado mundial y su adición de capacidad instalada durante 2017.

Fuente. Global Wind Market Update –Demand & Supply 2017 FTI Consulting.

Por lo anterior se debe considerar que no existe una clasificación única de los aerogeneradores, sino que éstos se pueden clasificar atendiendo a diversos criterios, como puede ser rangos de potencia, tamaños, tecnologías y características externas. Sin embargo, este estudio se enfocará en aquellos equipos que actualmente operan en el mundo entregando energía significativa y que son los más utilizados y representativos para la construcción de parques eólicos.

Hoy día, la mayoría de los proyectos eólicos manejan como principal componente dos conceptos de aerogeneradores: Aerogeneradores Asíncronos y Aerogeneradores Síncronos; ambos conceptos comparten características tales como el número de palas (tripala), sistemas de control y torre, pero difieren en el tipo de generador empleado, por ello a continuación se describen cada uno de los componentes, haciendo principal énfasis en el componente que los diferencia.

1.2.3.2.1 Componentes comunes de un Aerogenerador Actual.

1.2.3.2.1.1 Álabes o Palas.

Las palas capturan y convierten la energía del viento en energía cinética de rotación, el número de palas también influye en la estructura y la capacidad de las turbinas eólicas, las turbinas grandes típicas son turbinas de eje horizontal con tres palas de rotor.

Debido al mejor equilibrio de las fuerzas giroscópicas, la mayoría de las turbinas eólicas modernas utilizan tres palas de rotor; las hojas modernas están hechas típicamente de fibra de vidrio reforzada y tienen una forma aerodinámica, similar al perfil de las alas de los

aviones. Aunque el plástico reforzado con fibra de carbono es un material más resistente, el costo sigue siendo alto¹⁸.

Los nuevos perfiles aerodinámicos de los alabes, reducen el ruido y contribuyen a maximizar la producción gracias a la modificación de su geometría; ahora, también se utiliza la parte interna de la pala, lo cual aumenta considerablemente la producción energética; por ello, es menos susceptible a las turbulencias y ofrece un flujo uniforme a lo largo de todo su perfil. Algunas cuentan con un sistema integrado de protección contra rayos y un sistema de deshielo de palas de rotor, opcionalmente disponible para sitios de clima frío (ENERCON, 2017).

1.2.3.2.1.2 Sistema de Orientación.

Las unidades de orientación garantizan un control óptimo de la dirección de la góndola. Durante el funcionamiento del aerogenerador, la góndola se gira automáticamente al viento para capturar la potencia máxima. La cantidad de unidades de guiñada¹⁹ usadas varía según el tipo de turbina eólica, a través de sensores de vientos localizados en el exterior de la góndola el sistema informa si está orientado o no con el viento incidente y a partir de ello se activan los rodamientos del sistema de operación.

1.2.3.2.1.3 Casa de Máquinas.

Todos los componentes de la góndola de posición fija, como el eje principal, los módulos de ventilación y los componentes electrónicos de potencia, están alojados en la caseta de la máquina. Todo el tren de transmisión corre por cuenta del eje principal y está diseñado para resistir las tensiones dinámicas más altas.

1.2.3.2.1.4 Sistema de Control.

El componente principal del sistema de control, (unidad de procesamiento principal, por sus siglas en inglés MPU), está en constante comunicación con los elementos periféricos tales como el sistema de orientación y realiza la constante evaluación de las mediciones obtenidas con el sensor de viento; esta unidad también realiza el control activo del ángulo de paso obteniendo el mejor ángulo para la pala y así poder asegurar la máxima producción y la reducción de cargas; cuenta con el sistema de frenado, realiza un monitoreo de la torre y el generador por medio de sensores de vibración y aceleración que controla las oscilaciones de los mismos y, finalmente, cuenta con sensores de temperatura y entrehierro²⁰ entre el rotor y el estator.

1.2.3.2.1.5 Torre.

Soporta la estructura de la turbina puede ser: torre tubular de acero que se fabrica en varios tramos independientes y como técnica de unión se utilizan bridas especiales en forma de "L" o torres de hormigón donde las diversas secciones de la torre se unen firmemente a la cimentación por medio de tensores que, dentro de tubos envolventes, recorren la pared de torre de hormigón.

¹⁸ IEA-ETSAP and IRENA. (2016). *Wind Power: Technology Brief*.

¹⁹ Guiñada: Rotación del eje del rotor alrededor de su eje vertical (solo para máquinas de eje horizontal)

²⁰ Espacio de Aire existente en un circuito magnético.

1.2.3.2.1.6 Generador.

Generador Síncrono: la razón por la que se llama generador síncrono es que el imán del centro girará a una velocidad constante síncrona (girando exactamente como el ciclo) con la rotación del campo magnético, se empieza a forzar el imán para que gire (en lugar de dejar que la corriente de red lo mueva) y trabaje como generador, devolviendo corriente alterna a la red. Cuanta más fuerza le aplique, mayor electricidad producirá, aunque el generador seguirá girando a la misma velocidad, impuesta por la frecuencia de la red eléctrica, estos potentes imanes (fabricados a partir de tierras raras, como el neodimio) son bastante caros, a pesar de que los precios han disminuido últimamente; además, el generador requiere estar conectado a una multiplicadora de giros.

Multiplicadora: Es un mecanismo de ruedas dentadas que recibe potencia mecánica a baja velocidad de rotación y alto torque, entrega potencia mecánica a una mayor velocidad de rotación y menor torque, y conserva la mayor parte posible de la potencia original.

Generador Asíncrono: Cuando se conecte a la corriente, la máquina empezará a funcionar como motor, girando a una velocidad ligeramente inferior a la velocidad síncrona del campo magnético del estator; las barras del rotor tienen un campo magnético moviéndose respecto al rotor, esto induce una corriente muy elevada en las barras del rotor, que apenas ofrecen resistencia, pues están cortocircuitadas por los anillos finales; el rotor desarrolla entonces, sus propios polos magnéticos, que se ven, por turnos, arrastrados por el campo magnético giratorio del estator. Cuanto más rápidamente hagamos girar el rotor, mayor será la potencia transferida al estator en forma de fuerza electromagnética, y posteriormente convertida en electricidad suministrada a la red eléctrica; en este caso, no es necesario el uso de imanes permanentes fabricados a partir de neodimio altamente controvertido (metales de tierras raras).

A partir de lo anterior se afirma que la principal diferencia entre ambos conceptos radica en el uso de imanes, debido a que, en el generador asíncrono, no se emplean imanes, por ello su precio es más bajo y su sencillez hace que casi no requiera mantenimiento; además, en este tipo de aerogeneradores no requiere el uso de multiplicadora alguna, consecuentemente reduciendo los elementos de la góndola y, por ende, sus costos.

En la Figura 11, se observa un aerogenerador síncrono Gamesa, en donde el generador se encuentra en la parte trasera de la góndola, cuenta con un tren de potencia que consta de un eje principal semi integrado en una multiplicadora de dos etapas, se basa en un generador síncrono de imanes permanentes.

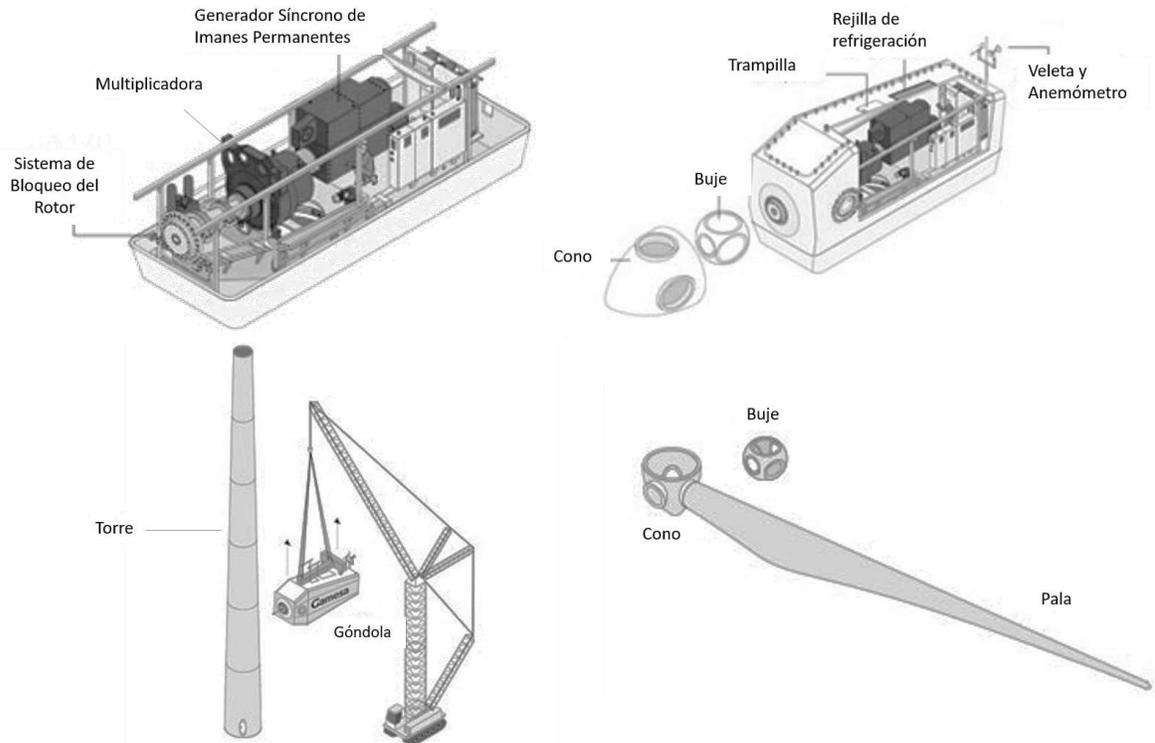


Figura 11. Componentes de un Aerogenerador síncrono GAMESA.

Fuente: Gamesa Corp, 2017²¹

En la figura 12, se observa un aerogenerador asíncrono, donde el generador se encuentra conectado al rotor muy cerca de las palas, este diseño es llamado generador en anilla sin multiplicadora localizado en la parte delantera de la góndola, en este tipo de aerogenerador el buje del rotor y el generador en anilla se acoplan directamente, gracias a los rodamientos, el rotor se asienta sobre un eje fijo, lo que se conoce como accionamiento directo, con esto se busca reducir el número de componentes rotatorios, minimizar cargas mecánicas, menos inversiones en el servicio de mantenimiento y un menor desgaste de piezas.

²¹ <http://www.gamesacorp.com/es/productos-servicios/aerogeneradores/diseno-y-fabricacion/proceso-fabricacion-montaje.html>



Figura 12. Componentes de un Aerogenerador Asíncrono ENERCON.

Fuente: ENERCON, 2017²²

1.2.3.3 Parque Eólico.

Recibe el nombre de parque eólico el conjunto de aerogeneradores, caminos, conductores de la electricidad, subestación transformadora y demás instalaciones que hacen posible la producción de energía eléctrica, aprovechando la acción del viento.

Los parques eólicos se pueden situar en tierra (onshore) o en el mar (offshore), siendo los primeros los más habituales, aunque los parques offshore han experimentado un crecimiento importante en los últimos años.

El número de aerogeneradores que componen un parque es variable, y depende fundamentalmente de la superficie disponible y de las características del viento en el emplazamiento. Antes de instalar un parque eólico se estudia el viento en el emplazamiento elegido durante un tiempo superior a un año. Se deben tomar en cuenta datos como la cercanía a la red eléctrica y a otras plantas que puedan servir de respaldo cuando el parque eólico no genera electricidad por falta de viento.

²² <https://www.enercon.de/en/technology/wec-components/>

Los parques eólicos proporcionan diferente cantidad de energía dependiendo de las variantes sobre diseño, situación de las turbinas, y por el hecho de que los antiguos diseños de turbinas eran menos eficiente y capaces de adaptarse a los cambios de dirección y velocidad del viento. (Nieves, 2011)

1.2.3.3.1 Aspectos del análisis de viabilidad técnica y económica.

Antes de iniciar la construcción de un parque eólico en primer lugar se realiza un estudio de viabilidad técnica seguido de un estudio económico. Ver Tabla 1.

Tabla 1. *Principales aspectos técnicos en el estudio de viabilidad de un parque eólico.* ²³

1.	Elección y estudio del emplazamiento mediante un estudio y modelización del régimen de vientos en velocidad, dirección, orografía y características física, accesibilidad y distancia a la línea de tensión a donde se exporta la energía eléctrica producida.
2.	Selección del tipo de aerogenerador según el régimen de vientos y los requisitos de integración a la red eléctrica considerando la estabilidad y el comportamiento de las variables nodales (tensión y frecuencia) en régimen estacionario y transitorio.
3.	Selección del número de aerogeneradores y su disposición para minimizar las pérdidas por interferencias (sombras eólicas y estelas).
4.	Selección y disposición de la red de media tensión entre los distintos aerogeneradores y las estaciones de transformadores de salida del parque.
5.	Evaluación de la energía anual neta exportable, teniendo presente las pérdidas internas (interferencias, transformación, transporte, mantenimiento, etc.)
6.	Evaluación de la potencia de entrega y su evolución. Condiciones y requisitos exigidos a la energía eléctrica que se inyecta a la red.

La localización en una zona determinada debe cumplir con ciertas condiciones. Ver Tabla 2.

Tabla 2. *Principales condiciones que debe cumplir la localización de un parque eólico.*

1.	Localizar las mejores zonas de viento. Esta selección será en función de las velocidades medias de los lugares en estudio de los cuales se tienen datos.
2.	Uso futuro y actual de la tierra en las zonas seleccionadas con base en el punto anterior.
3.	Eliminación de las zonas inadecuadas por su orografía y meteorología adversa.
4.	Reglamentación existente en dichos lugares y permisos legales necesarios.
5.	Proximidad de las vías de comunicación y las líneas de transporte eléctrico.
6.	Aceptación pública del proyecto.
7.	Impacto ambiental y social.

Nota. Recuperado de López, M. V. (2012). Capítulo 11: Aspectos económicos y ambientales. En M. V. López, Ingeniería de la Energía Eólica (págs. 250).

²³ López, M. V. (2012). Capítulo 11: Aspectos económicos y ambientales. En M. V. López, Ingeniería de la Energía Eólica (págs. 250).

Con el análisis de estos parámetros y en función del peso que se le dé a cada uno de ellos en la decisión final se elegirá una zona determinada.

1.2.3.3.1.1 Influencia del viento.

Cada emplazamiento tiene una distribución media anual de direcciones y velocidades; por tal motivo, la alineación de aerogeneradores deberá realizarse de forma que la energía captable al cabo del año sea máxima.

Siempre que el terreno lo permita, la alineación de las máquinas será tal para que los vientos que permitan la mayor generación eléctrica anual tengan esa dirección o direcciones predominantes que, además, sea(n) perpendicular(es) a la alineación de las máquinas.

Cuando el emplazamiento cuente con una gran dispersión de direcciones todas ellas con potencialidad semejante, se deberá cuidar especialmente el espaciamiento entre aerogeneradores, cuidando los aspectos de seguridad operativa e integridad de tales equipos.

1.2.3.3.1.2 Influencia del terreno.

En un proyecto real, los primeros estudios que se hacen, aún antes de la ingeniería conceptual, son los estudios geotécnicos o mecánica de suelos y el levantamiento topográfico del sitio del proyecto, estos estudios se hacen georreferenciados, lo que permite definir las características del sitio de emplazamiento del parque eólico.

La topografía del terreno en el que se pretenda instalar un parque eólico es determinante al momento de situar los aerogeneradores o para la realización de la infraestructura eléctrica y civil. Algunos aspectos para tener en cuenta son:

- El efecto de la rugosidad del terreno y los cambios de esta.
- El efecto de los obstáculos y del relieve.
- Las interferencias entre aerogeneradores combinada con la variación de la dirección del viento predominante.

Un terreno llano con rugosidad superficial uniforme es el tipo de terreno más simple para colocar las máquinas. En caso de no encontrarse obstáculos preponderantes en sitio tales como colinas, árboles, edificios y, en general cualquier otro tipo de accidente geográfico como edificios, estructuras, torres, chimeneas, etc.; se cumple que el terreno sea llano, entonces se considera que la velocidad del viento a una altura dada es aproximadamente la misma sobre toda el área.

Una consideración de diseño para incrementar la potencia disponible en terreno uniforme consiste en levantar la máquina a la mayor altura posible desde el nivel de suelo o nivel de piso terminado. (Agencia Insular de Energía de Tenerife)

1.2.3.3.1.3 Influencias de los aerogeneradores.

Los aerogeneradores que existen en el mercado son de muy variadas prestaciones y no todos se comportan de la misma manera ante las mismas condiciones de viento, por lo que habrá de realizarse una preselección groso modo que permita desechar aquellos que de forma evidente no se adapten a los requerimientos del viento en el parque bajo diseño.

La contribución de los aerogeneradores en la producción eléctrica del parque vendrá determinada por la velocidad de viento que llegue a cada aerogenerador, así como la altura de su torre y la distancia entre los aerogeneradores.

La energía del viento aprovechada en un aerogenerador va a depender de la curva de potencia de éste. Por ello se deberá elegir aquel cuya potencia máxima se consiga a una velocidad lo más cercana posible a la velocidad media del emplazamiento.

En general la utilización de rotores de mayor tamaño significa, para una misma velocidad de viento y potencia, capturar una mayor energía.

La altura de la torre, que vendrá condicionada por el tamaño del rotor, influirá notablemente en la producción energética.

Una cuestión de fundamental importancia es la distancia adecuada entre aerogeneradores, normalmente medida en diámetros del rotor, para evitar que se perturben unos a otros por la estela turbulenta que cada rotor forma en el flujo de aire que lo mueve. En los parques eólicos terrestres, las separaciones entre columnas de aerogeneradores oscilan entre 3 y 5 diámetros, en tanto que las separaciones entre filas de aerogeneradores oscilan entre 5 y 9 diámetros.

Los criterios básicos de selección del tipo de aerogeneradores se pueden resumir en los siguientes:

- Rango de potencias máximas
- Tipo de paso (fijo o variable)
- Tipo de generadores (síncronos o asíncronos)
- Velocidad nominal
- Confiabilidad de la máquina

Otros parámetros a tener en cuenta son:

- Posición del eje (vertical u horizontal)
- Diámetro del rotor.
- Altura al eje del rotor (altura de la torre).

1.2.3.3.1.4 Influencia de la red eléctrica.

La definición del punto de entrega de la energía y las características de la interconexión, la capacidad de la línea existente para transportar la nueva energía suministrada, la tensión de cortocircuito en el punto de entronque, etc., son datos de vital importancia que deben

conocerse antes de considerar la realización del proyecto, ya que en algunos casos pueden incluso condicionar la viabilidad y factibilidad de éste.

Cuando lo que se trata es conectar una gran instalación eólica, tipo parque eólico de gran dimensión (> 10 MW), se precisarán dos niveles de transformación. El primero elevará la tensión de salida de los aerogeneradores hasta la tensión de distribución interna de la instalación (media tensión), agrupando para cada transformador a varios aerogeneradores. El segundo nivel centralizará en una subestación cercana, las líneas de distribución internas de media tensión elevándolas de manera unificada en dicha subestación, de media a alta tensión. En México, la energía eléctrica generada por la instalación ya transformada a la tensión de transporte, será enviada a una subestación que controle y gestione la distribución de energía eléctrica.

1.2.3.3.2 Costos de un parque eólico.

Los costos de un parque eólico se pueden resumir en:

Costos de inversión²⁴, también llamados Costos capital (CAPEX) que comprenden el costo de los aerogeneradores, las torres, la obra civil y la instalación eléctrica tanto en red de media tensión interna como de las subestaciones transformadoras y la línea de alta tensión hasta el punto de conexión con la red. También incluye los costos de prospección energética, del proyecto y de algunos otros como dirección de obra, seguros, gastos jurídicos y administrativos. (López, 2012)

- Costos de los estudios de viabilidad, representan entre en 4% y el 10%²⁵ del costo capital de un proyecto, incluye el análisis de emplazamientos y régimen de vientos, potencial energético eólico, diseño preliminar, análisis de impacto ambiental, estimación de costos, estudio de rentabilidad, preparación de informe, gestión de proyectos.
- Costos del equipamiento eólico, representa entre el 65% y el 84%, incluye aerogeneradores, torres y equipos auxiliares, transporte e instalación de estos.
- Costos de instalaciones eléctricas, representan entre el 9% y 14% del costo capital, incluye subestaciones transformadoras, línea interior del parque de media tensión y de alta tensión de conexión con la red exterior.
- Costos de obra civil, representa entre el 4% y 16% del costo capital, incluye cimentaciones e infraestructuras.

Para parque eólicos marinos (offshore) los costos de inversión son mayores, debido al hecho de tener que construir una plataforma marina y la interconexión submarina con tierra.

²⁴ López, M. V. (2012). Capítulo 11: Aspectos económicos y ambientales. En M. V. López, Ingeniería de la Energía Eólica (págs. 253)

²⁵ IRENA. <http://www.irena.org/costs/Charts/Wind>

Costos variables²⁶: Son costos variables anuales asociados con la explotación del parque eólico, incluye conceptos como los costos de mantenimiento correctivo y preventivo, mano de obra, seguros.

- Costos de operación y mantenimiento (O&M): incluye los correspondientes al equipamiento e instalaciones eléctricas y a las infraestructuras.
- Costos de alquiler de terrenos, canon energético, tasas y seguros.
- Gestión. Seguimiento y subcontrata de servicios externos.

Costos de desmantelamiento del parque eólico: son los costos asociados al desmantelamiento del parque al final de su vida operativa.

Costo unitario de producción²⁷

El costo unitario de producción de la unidad de energía eléctrica se expresa en \$/MWh.

En general, el costo de producción en cualquier sistema de generación eléctrica está formado esencialmente por tres tipos de costos:

- Costos de capital: derivados de la inversión
- Costos de explotación: de operación y mantenimiento (O&M) fijos y variables.
- Costos de combustible (que para el caso de energía del viento estos costos son cero)

En el capítulo 2, se hace referencia a la competencia de la energía eólica con otras fuentes de Energía, en el apartado de costo nivelado de electricidad se presentará información sobre los costos de generación eléctrica de la energía del viento y sus parámetros para que sean utilizados en estudios de expansión del sector eléctrico (Generación y Transmisión) en los que esta tecnología compite con otras tecnologías (solar, geotermia, nuclear, hidro, bioenergía, etc.) para cubrir las demandas de energía horarias de todas las regiones del país al menor costo posible, cumpliendo las restricciones ambientales y de disponibilidad de los recursos energéticos de las diferentes regiones.

²⁶ Ibidem págs. 256

²⁷ Ibidem págs. 258

CAPÍTULO 2. PERSPECTIVAS DEL SECTOR ELÉCTRICO Y LA ENERGÍA EÓLICA EN MÉXICO.

La energía eléctrica actualmente es considerada como uno de los principales insumos primarios para la realización de las actividades productivas, de transformación y servicios en el país. El principal objetivo de la planeación del sector eléctrico es garantizar la eficiencia, calidad, confiabilidad, continuidad, seguridad y sustentabilidad del Sistema Eléctrico Nacional, asimismo, fomentar la diversificación de la matriz de generación de energía eléctrica.

En este capítulo se aborda de manera breve la estructura actual del sector eléctrico en México y de manera específica se aborda la perspectiva actual de la energía eólica y la relación con otras fuentes de energía renovable.

2.1 Sector Eléctrico en México.

2.1.1 Marco Regulatorio.

El 20 de diciembre de 2013, se publicó en el Diario Oficial de la Federación, el decreto presidencial por el que se reforman los artículos 25,27 y 28 de la constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, en materia de energía, incluyendo veinte artículos transitorios como directrices para las leyes secundarias.

La Reforma Energética tiene entre sus objetivos y premisas fundamentales²⁸ algunos que repercuten de manera directa o indirecta en la generación eoloeléctrica, los cuales se mencionan a continuación:

1. Modernizar y fortalecer, sin privatizar, a Petróleos Mexicanos (Pemex) y a la Comisión Federal de Electricidad (CFE) como Empresas Productivas del Estado, 100% públicas y 100% mexicanas.
2. Permitir que la Nación ejerza, de manera exclusiva, la planeación y control del Sistema Eléctrico Nacional, en beneficio de un sistema competitivo que permita reducir los precios de la energía eléctrica.
3. Atraer mayor inversión al sector energético mexicano para impulsar el desarrollo del país.
4. Contar con un mayor abasto de energéticos a mejores precios.
5. Impulsar el desarrollo, con responsabilidad social y ambiental.

Como parte del paquete de nueve nuevas leyes en materia energética y la reforma a doce ordenamientos existentes, una nueva Ley de la Industria Eléctrica entró en vigor el 12 de agosto de 2014.

²⁸ Gobierno de la República, 2014

La nueva Ley de la Industria Eléctrica permite al sector privado participar libremente en la generación y comercialización de electricidad, mientras que se mantiene el control y operación de la red eléctrica por parte de una empresa estatal.

La Ley crea un mercado eléctrico mayorista (MEM) que será operado por el Centro Nacional de Control de Energía (CENACE). El cual se transforma en el operador independiente de toda la red, también la Secretaría de Energía y la Comisión Reguladora de Energía (CRE) contarán con facultades regulatorias y de supervisión sobre el mercado eléctrico mayorista.

La Secretaría de Energía (SENER) será responsable de expedir las reglas del mercado iniciales y la CRE será responsable del otorgamiento de permisos para participar en el mercado eléctrico mayorista, ya sea como adquirentes o suministradores de electricidad, siendo también responsable de establecer las tarifas de transmisión, distribución y venta del servicio básico de electricidad, establecer las condiciones generales para los participantes del mercado, expedir los modelos de contratos de interconexión y de administrar los certificados de energías limpias. Asimismo, expedirá el modelo de contrato que el CENACE celebrará con los participantes del mercado eléctrico mayorista en su carácter de operador independiente de la red eléctrica.

El control operativo del sistema eléctrico nacional, así como la transmisión y distribución de energía eléctrica son, consideradas áreas estratégicas y, por lo tanto, permanecerán en las manos del Estado Mexicano a través de empresas estatales. Sin perjuicio de lo anterior, el sector privado podrá participar en la transmisión y distribución de electricidad mediante contratos y asociaciones con las empresas estatales.

Bajo la nueva ley, la CFE se convertirá en una entidad completamente competitiva bajo el régimen de “empresa productiva del estado”, la cual podrá participar en las distintas actividades del mercado a través de empresas subsidiarias y filiales, continuará siendo el suministrador del servicio básico de electricidad para usuarios residenciales, y se regirá bajo las tarifas finales de suministro básico que aplicarán a todas las personas físicas o morales que no sean Usuarios Calificados.

La nueva Ley de la Industria Eléctrica prohíbe que una sola empresa participe en más de una de las siguientes actividades: generación, transmisión, distribución, comercialización y proveeduría de insumos primarios para la industria eléctrica. Sin embargo, una empresa controladora puede participar en todas estas actividades siempre y cuando lo haga a través de subsidiarias independientes. La “comercialización” de electricidad consiste principalmente en actividades relacionadas con la adquisición y venta de electricidad, así como certificados de energías limpias.

La ley divide a los participantes en el mercado eléctrico mayorista en diversas categorías: generadores, suministradores, comercializadores, usuarios de suministro básico, usuarios calificados, transportistas y distribuidores. Los generadores, suministradores y usuarios calificados podrán convertirse en participantes directos en el mercado eléctrica mayorista mediante la celebración de los contratos correspondientes con el CENACE y el posterior otorgamiento de una fianza a favor de éste.

En la Figura 13, se observa un resumen de las funciones de cada una de las instituciones del sector energético mexicano con actividades dentro de la industria eléctrica según la Reforma Energética vigente.

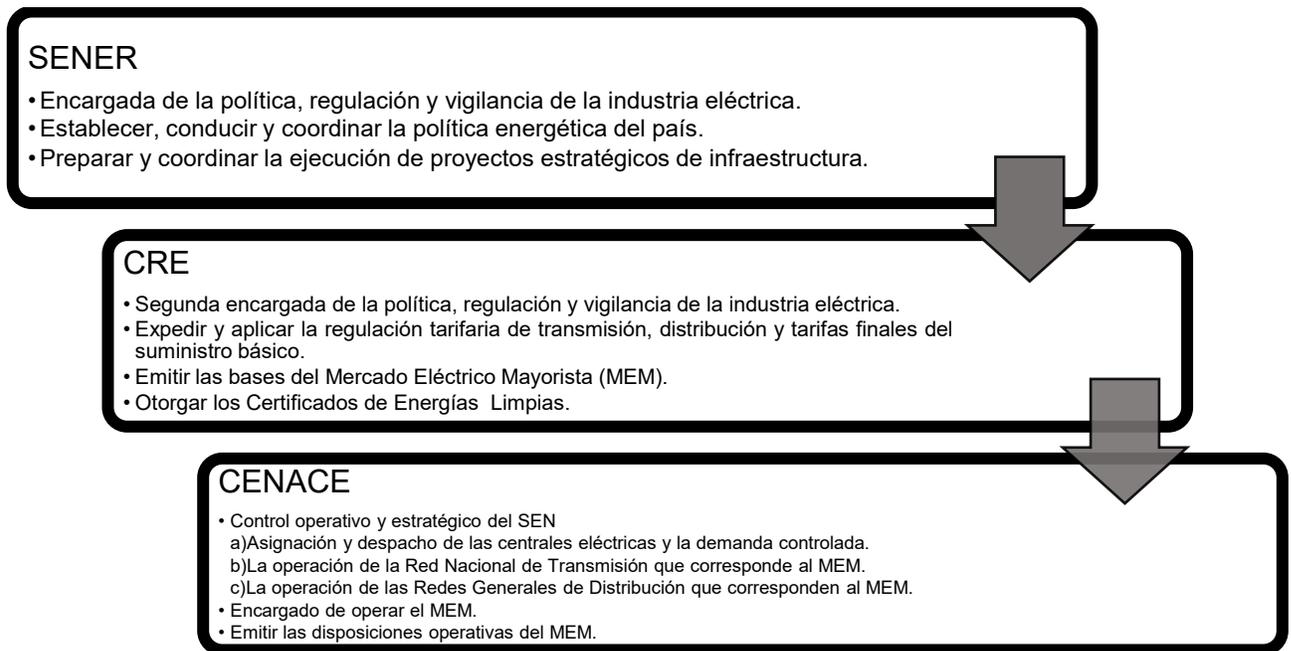


Figura 13. Funciones de los actores del sector eléctrico mexicano con actividades dentro de la industria eléctrica.

Fuente. Elaboración propia con datos de La ley de la industria eléctrica, 2018.

2.1.1.1 Subastas de Energía a largo plazo.

Aunado a la Reforma energética y a la consecuente implementación del Mercado Eléctrico Mayorista (MEM) se tiene la ley general de cambio climático, cuya principal característica es el establecimiento de un conjunto de metas con el fin de orientar el desempeño de México hacia una economía baja en carbono. Respecto a emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero (GEI), en el Artículo Segundo Transitorio de la Ley General de Cambio Climático (LGCC) se asume una meta aspiracional de reducir las al 2020 un 30% con respecto a la línea base; así como un 50% de reducción de emisiones al 2050, en relación con las emitidas en el año 2000. Mientras que el Artículo Tercero Transitorio de la LGCC, establece el objetivo de lograr por lo menos 35% de generación de energía eléctrica a base de energías limpias para el año 2024, de 37.7% al 2030 y 50% de la generación eléctrica total al 2050, así como las metas de eficiencia energética, con una meta de reducción de la intensidad energética por consumo final para el periodo del 2016 al 2030 del 1.9%; y del 3.7% para el periodo de 2031 a 2050, con un promedio de 2.9%. (Secretaría de Energía, 2016)

En cumplimiento del MEM se han llevado a cabo tres subastas a largo plazo convocadas por el CENACE y la publicación de la convocatoria de la cuarta subasta a largo plazo, las cuales están dirigidas a interesados en participar en la asignación de contratos de largo

plazo de cobertura eléctrica para la compraventa de potencia, energía eléctrica acumulable y certificados de energías limpias, como resultado de las tres subastas de energía se adicionarán 2289.22 MW de capacidad instalada en los estados de Coahuila, Nuevo León, Tamaulipas, Oaxaca y Yucatán. (Figura 14)

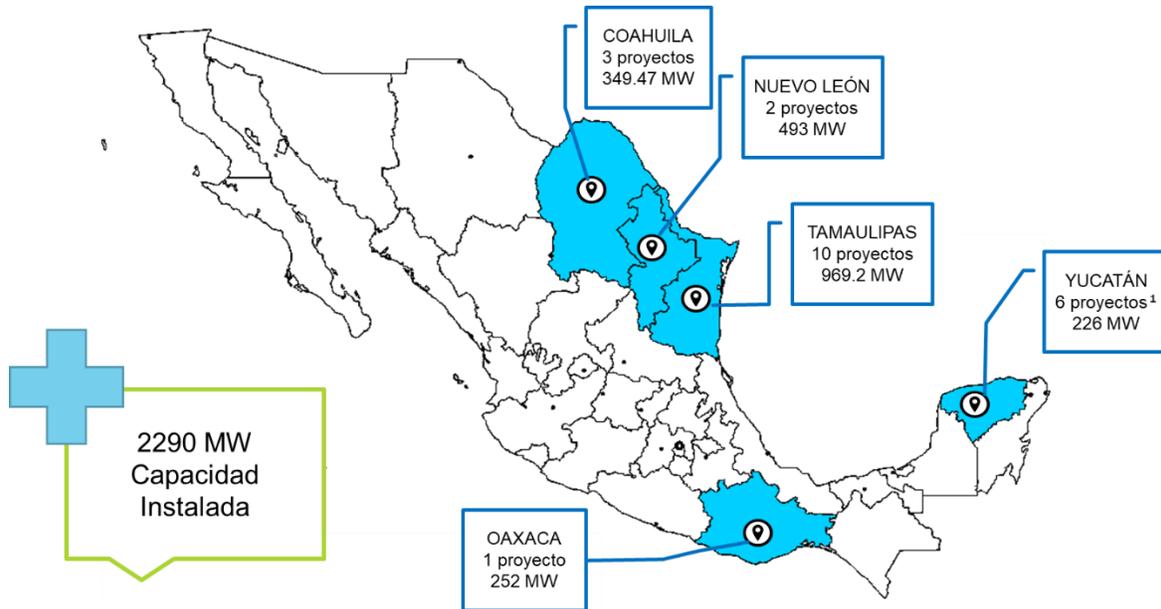


Figura 14. Resultados de las Subastas del Mercado Eléctrico Mexicano (2015-2017).

Fuente. Elaboración propia con datos del Centro Nacional de Control de Energía (CENACE).

Nota: 1) Se excluyen la capacidad de centrales que entregan únicamente potencia.

La Primera Subasta Eléctrica de Largo Plazo dio como resultado 11 empresas ganadoras, donde siete de éstas, corresponden a energía solar fotovoltaica y cuatro a energía eólica; las cuales entrarán en operación durante 2018. Como se observa en la Tabla 3, con la primera subasta se planea una adición de 394 MW eólicos con un factor de planta promedio de 40 % y un precio de energía promedio de 38.35 USD/MWh, los estados donde se ubicarán las centrales son: Tamaulipas y Yucatán.

Tabla 3. Resultados de la primera subasta de energía a largo plazo correspondientes a centrales Eólicas.

Central Eólica	Estado	Capacidad [MW]	Precio [USD/MWh]	Energía [MWh/año]	FP [%]
Energía Renovable de la Península S.A.P.I. de C.V.	Yucatán	90	44.07	275,502	35%
Parque Eólico Chacabal	Yucatán	30	39.94	113,199	43%
Parque Eólico Chacabal II	Yucatán	30	39.94	117,689	45%

PE El Cortijo	Tamaulipas	168	23.06	585,731	40%
Parque Eólico Tizimín	Yucatán	76	44.75	291,900	44%
TOTAL		394	38.35	1,384,021	40%

Nota. Recuperado de Fallo de las subastas de largo plazo (2015-2017) del Centro Nacional de Control de Energía (CENACE).

La Segunda Subasta Eléctrica de Largo Plazo dio como resultado 56 proyectos ganadores, de los cuales 36 corresponden a energía solar fotovoltaica, 7 a energía eólica, 1 a energía geotérmica, 6 de ciclo combinado y 6 Hidroeléctricas.

Como se observa en la Tabla 4, con la segunda subasta se planea una adición de 1038.5 MW eólicos con un factor de planta promedio de 43 % y un precio de energía promedio de 23.01 USD/MWh, los estados donde se ubicarán las centrales son: Tamaulipas, Nuevo León, Oaxaca y Yucatán.

Tabla 4. Resultados de la segunda subasta de energía a largo plazo correspondientes a centrales Eólicas.

Central Eléctrica	Estado	Capacidad [MW]	Precio [USD/MWh]	Energía [MWh/año]	FP [%]
Salitrillos	Tamaulipas	100.05	22.98	399,129.9	46%
Gunaa Sicarú	Oaxaca	252	26.24	818,264.5	37%
Parque Eólico Reynosa I	Tamaulipas	60			
Parque Eólico Reynosa V	Tamaulipas	157.5			
Parque Eólico Reynosa IV	Tamaulipas	55	18.84	1,613,416.8	48%
Parque Eólico Reynosa III	Tamaulipas	55			
Parque Eólico Reynosa II	Tamaulipas	60			
Parque Eólico El Mezquite, S.A.P.I. de C.V.	Nuevo León	249	22.82	820,635.8	38%
Energía Renovable de la Península, S.A.P.I. de C.V.	Yucatán	90			
Tres Mesas 3	Tamaulipas	49.5	24.15	223,010.8	51%
TOTAL		1038.05	23.01	3,874,457.8	43%

Nota. Recuperado de Fallo de las subastas de largo plazo (2015-2017) del Centro Nacional de Control de Energía (CENACE), Se excluye del total la capacidad de la central Energía Renovable de la Península S.A.P.I. de C.V que entregan únicamente potencia.

La Tercera Subasta Eléctrica de Largo Plazo dio como resultado 16 proyectos ganadores, donde 9 de estos proyectos corresponden a energía solar fotovoltaica, 6 a energía eólica y 1 central turbogás.

Como se observa en la Tabla 5, con la tercera subasta se planea una adición de 857.17 MW eólicos con un factor de planta promedio de 33 % y un precio de energía promedio de 13.64 USD/MWh, los estados donde se ubicarán las centrales son: Tamaulipas, Coahuila y Nuevo León.

Tabla 5. Resultados de la tercera subasta de energía a largo plazo correspondientes a centrales Eólicas.

Central Eléctrica	Estado	Capacidad [MW]	Precio [USD/MWh]	Energía [MWh/año]	FP [%]
TM4V150 4.0 105 V1	Tamaulipas	95.7	14.40	362,935.0	43%
Energía Limpia de Amistad II	Coahuila	100.48	13.09	373,016.5	42%
Energía Limpia de Amistad III	Coahuila	100	13.31	357,031.9	41%
Energía Limpia de Amistad IV	Coahuila	148.99	13.10	510,680.1	39%
Dolores	Nuevo León	244	14.30	848,883.2	40%
Parque Eólico El Cortijo	Tamaulipas	168			
TOTAL		857.17	13.64	2,452,546.7	33%

Nota. Recuperado de Fallo de las subastas de largo plazo (2015-2017) del Centro Nacional de Control de Energía (CENACE), Se excluye del total la capacidad del Parque Eólico El Cortijo que entregan únicamente potencia.

La CRE y el Centro Nacional de Control de Energía (CENACE) publicaron el día 15 de marzo del 2018 la convocatoria de la Cuarta Subasta Eléctrica de Largo Plazo, siendo la primera subasta que lleva a cabo la CRE. Según la prospectiva de Energías Renovables 2016-2030 publicada por SENER, la capacidad por adicionar de tecnología eólica se concentra en dos períodos. Entre 2016-2020, se adicionará 6,633.1 MW y entre 2024-2027, el restante 5,366.9 MW. Así, con la adición de 12,000 MW, se espera que al final del período de planeación haya 15,101.1 MW de capacidad instalada.

2.1.1.2 Participación de la energía fotovoltaica y energía eólica en las subastas de largo plazo.

En la Figura 15, se observan los resultados de las tres subastas de largo plazo realizadas por CENACE y, como se desprende de revisar la Figura 15, los proyectos de energía fotovoltaica tienen una mayor participación que los proyectos de energía eólica; como resultado de ese esfuerzo se tiene una adición de 2,289.22 MW eólicos contra 5,368.27 MW fotovoltaicos, a pesar de esto con esta adición la capacidad instalada de energía eólica ascendería a 6,488.44 MW y la capacidad instalada de energía fotovoltaica ascendería a 5,582.27 MW, lo que refleja una mayor participación de energía eólica con el inicio de operación de los proyectos ganadores de las subastas.

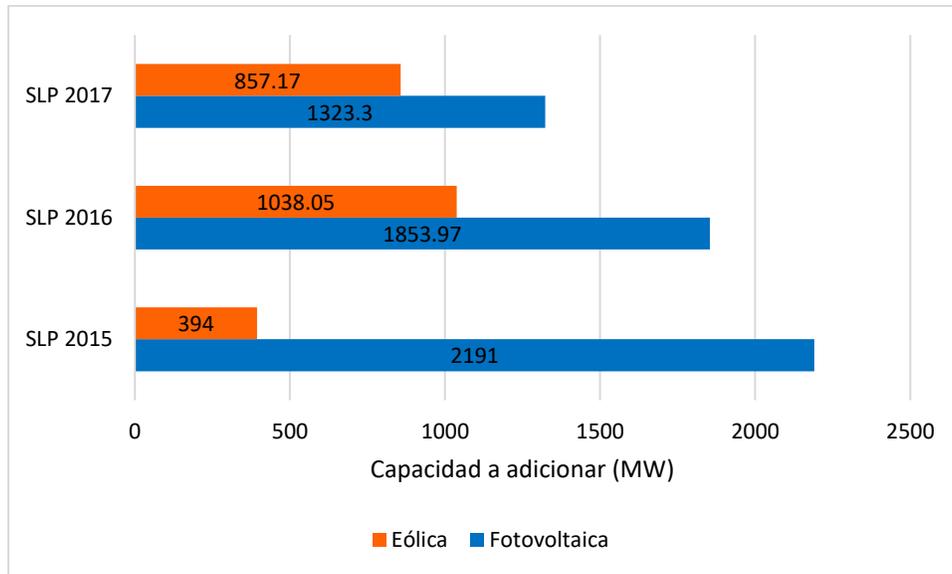


Figura 15. Participación de la energía fotovoltaica y energía eólica en relación con los resultados de las subastas de largo plazo 2015-2017.

Fuente: Elaboración propia. Datos obtenidos de: Fallo de las subastas de largo plazo, 2017

2.1.2 Parque de generación y transmisión.

Según datos del PRODESEN²⁹, en México la segunda fuente de energía de mayor consumo es la electricidad, con una participación de 17.6% del consumo energético nacional, sólo superada por el consumo de petrolíferos que cuenta con una participación del 58.4%. En cuanto al consumo final de energía por sector la electricidad representa el 22.6% del consumo del sector agropecuario, el 33.4% del consumo de energía de la industria y el 34.4% del consumo final de energía de los sectores residencial, comercial y público en conjunto, por ello es de vital importancia conocer la estructura del sector eléctrico en México.

De acuerdo con la Ley de la Industria Eléctrica³⁰:

“El sector eléctrico comprende a la industria eléctrica y la proveeduría de insumos primarios para dicha industria y la industria eléctrica en México comprende las actividades de generación, transmisión, distribución y comercialización de la energía eléctrica, la planeación y control del Sistema Eléctrico Nacional, así como la operación del mercado eléctrico mayorista.”

Asimismo, dice que el Sistema Eléctrico Nacional (SEN) está integrado por:

²⁹ SENER. (2018). Programa de desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2018-2032. Ciudad de México. (pág. 18)

³⁰ Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (2014). Capítulo 1, Art. 3. En Ley de la Industria Eléctrica. Ciudad de México

- a) *La Red Nacional de Transmisión.*
- b) *Las Redes Generales de Distribución.*
- c) *Las Centrales Eléctricas que entregan energía eléctrica a la Red Nacional de Transmisión o las Redes Generales de Distribución.*
- d) *Los equipos e instalaciones del CENACE utilizados para llevar a cabo el control operativo del Sistema Eléctrico Nacional.*

El SEN está integrado por 10 regiones de control, de las cuales 7 se encuentran interconectadas conformando el Sistema Interconectado Nacional (SIN), en estas regiones de control se concentra el mayor consumo de energía eléctrica (véase Figura 16), las 3 regiones de control, Baja California, Baja California Sur y Mulegé están eléctricamente aisladas del resto de la red eléctrica (sistemas aislados) y se espera que se interconecten al SEN a partir de 2020.

El SEN se encuentra conformado por una Red Nacional de Transmisión (RNT) la cual se agrupa en 53 regiones de transmisión, cuyos enlaces se representan mediante líneas y subestaciones de red troncal en 400 y 230 Kv. (Secretaría de Energía, 2017).

La RNT es el sistema integrado por el conjunto de las Redes Eléctricas que transporta energía eléctrica a las Redes Generales de Distribución (RGB) y al público en general, así como las interconexiones a los sistemas eléctricos extranjeros que determinen la SENER. La RNT se integra por las tensiones mayores o iguales a 69 Kv.



Figura 16. Regiones de Control del SEN.

Fuente. PRODESEN 2018-2032

2.1.2.1 Capacidad Instalada.

De acuerdo con el PRODESEN 2018-2032 la capacidad instalada del SEN en 2017 fue de 75,685 MW, del cual el 70.5% corresponde a centrales eléctricas convencionales las cuales presentaron un incremento de 1,027 MW respecto a 2016, principalmente por la expansión

en capacidad de centrales de ciclo combinado y de combustión interna, el 29.5% corresponde a centrales eléctricas con tecnologías limpias, con un incremento de 1,148 MW debido a la instalación de nuevas centrales eólicas y de cogeneración eficiente con respecto a 2016. La capacidad instalada se incrementó 3% respecto a la capacidad registrada al cierre del 2016.

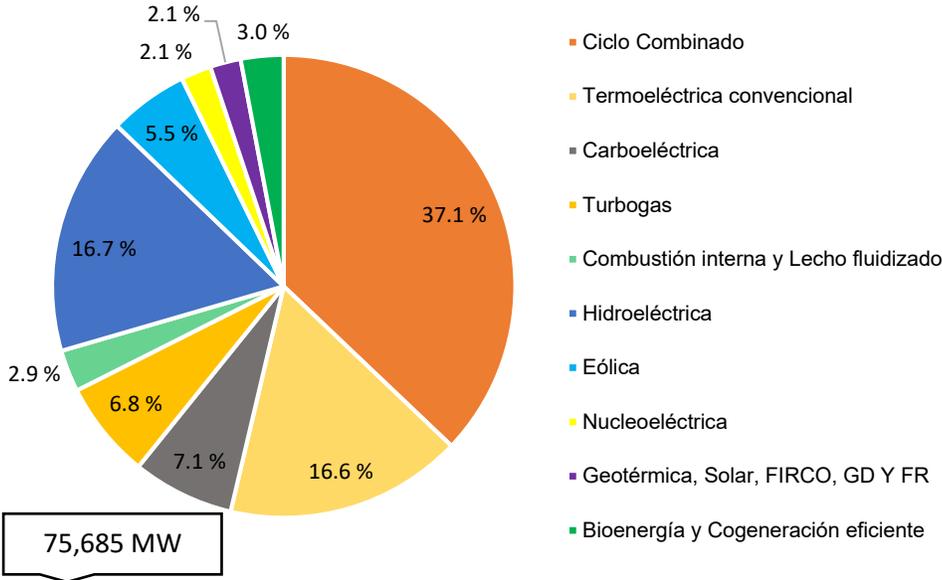


Figura 17. Capacidad instalada por tipo de tecnología.

Fuente. Elaboración propia. Datos obtenidos de: PRODESEN 2018-2032³¹

2.1.2.2 Generación de energía eléctrica.

Según el PRODESEN (2018-2032) en 2017 se generaron 329,162 GWh de energía eléctrica de los cuales 259,766 GWh proviene de tecnologías convencionales, lo que representa el 78.9% del total y el 21.1% restantes de tecnologías limpias con una participación de 69,397 GWh. Cabe mencionar que el PRODESEN hace uso explícito del término “tecnologías limpias” con el fin de evitar la confusión con el termino de tecnologías de energías renovables, que se explicó en el capítulo 1.

En la figura 18 se observa la generación eléctrica por tipo de tecnología, en donde el 50% de la generación proviene de ciclos combinados (165,245 GWh), el 13% de termoeléctrica convencional (42,780 GWh), el 9% de carboeléctricas (30,557 GWh) y el 10% de hidroeléctricas (31,848 GWh), el 4% de Turbogás, el 3% de Eólica, el 3% de Nucleoeléctrica, el 2% de Geotérmica, solar, FIRCO, GD y FR y 2% de Bioenergía y cogeneración eficiente, es claro que la generación eléctrica en México está basada

³¹ FIRCO (Fideicomiso de Riesgo Compartido), GD (Generación Distribuida), FR (Frenos Regenerativos)

principalmente en centrales convencionales de combustible fósiles y que el mayor aporte de generación de energía limpia es la energía Hidroeléctrica.

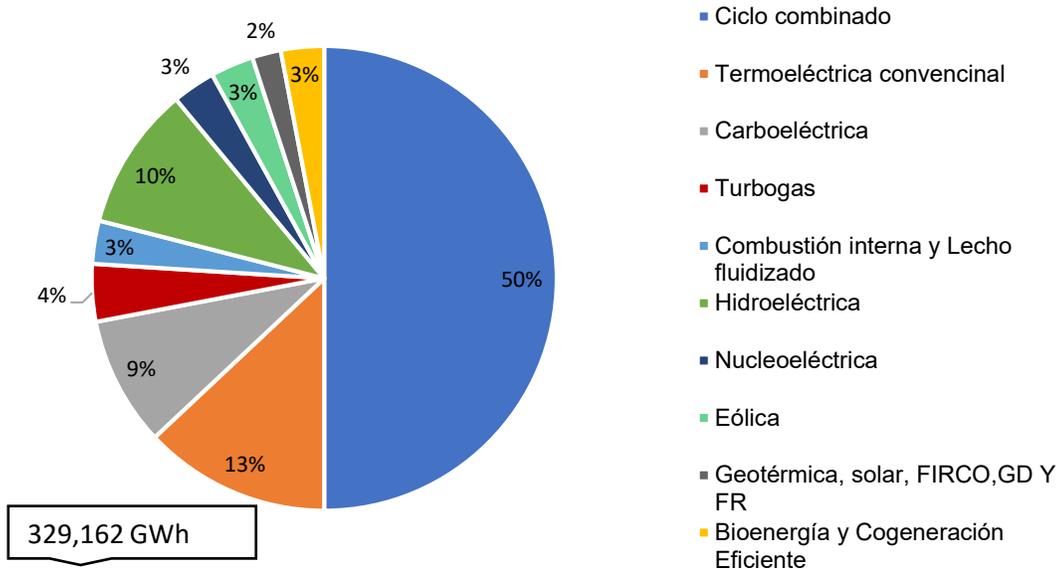


Figura 18. Generación eléctrica por tipo de Tecnología (2017).

Fuente. Elaboración propia. Datos obtenidos de: PRODESEN 2018-2032

2.1.2.2.1 Generación Eléctrica con Energía Eólica.

Según el PRODESEN la capacidad Instalada de Energía Eólica en México 2017 fue de 4,199 MW provenientes de 45 centrales eólicas, y según la SENER entre 2005 y 2015, la energía eólica presentó la mayor expansión en capacidad instalada con el 104.7% anual, asimismo en 2017, la generación bruta eólica fue de 10,620 GWh. En la Figura 19 se aprecia claramente el incremento acelerado en los últimos años. (Secretaría de Energía, 2017)

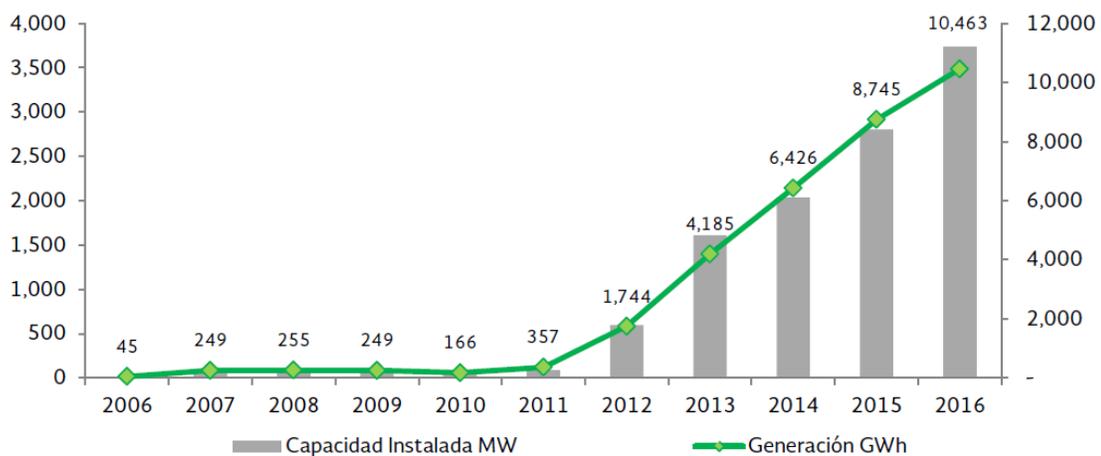


Figura 19. Capacidad instalada y Generación bruta de Centrales Eólicas, 2006-2016.

Fuente. Prospectivas de Energías Renovables 2017 (SENER)

2.1.2.3 Capacidad de Transmisión.

La Red Nacional de Transmisión (RNT) se agrupa en 53 regiones de transmisión, de las cuales 45 están interconectadas entre sí por lo que conforman un total de 63 enlaces en el SIN; los 6 restantes pertenecen a los sistemas aislados de la Península de Baja California, 7 están interconectadas entre sí y conforman 6 enlaces en total, la longitud de las líneas de transmisión con tensión de 203 y 400 Kv fue de 53,842 kilómetros al cierre del 2017 (ver Figura 20).



Figura 20. Red troncal de Transmisión del SEN.

Fuente. PRODESEN 2017-2031

2.1.3 Demanda de electricidad por regiones.

En México, el consumo bruto de energía eléctrica del SEN fue de 309,727 GWh al cierre del 2017, en el SIN se concentró el 94.6% del consumo bruto de energía eléctrica del país y tan solo 5 regiones de control concentran el 74.4% del consumo bruto del SEN, donde la región occidental es la que mayor consumo representa con un 21.5 %, seguida de la región central con un aporte de 19.6%, la región Noroeste concentra el 17.6% y la región oriental concentra el 15.7% del consumo bruto, el patrón común es que durante los meses de verano se registran los niveles más altos de la demanda máxima en 9 regiones de control, debido principalmente al aumento de la demanda por el uso de equipos de aire

acondicionado durante la época de mayor temperatura ambiente que suele ser entre los meses de mayo y septiembre.

En la región central, la demanda máxima se observa en la temporada invernal, debido principalmente a un mayor uso de sistemas de iluminación para fines decorativos en zonas residenciales y comerciales, empleo de sistemas de calefacción y mayor tiempo de iluminación residencial por la noche.

2.1.3.1 Demanda máxima coincidente.

De acuerdo con datos del PRODESEN en 2017, la demanda máxima coincidente del SIN se registró a las 17:00 horas del día 23 de junio, con un valor de 43,319 MWh/h, considerando las demandas integradas de los sistemas de Baja California, Baja California Sur y Mulegé, coincidentes con la demanda máxima del SIN, la demanda máxima coincidente del SEN sería de 46,025 MWh/h, en la Figura 21 se puede observar la participación porcentual por regiones de control donde las áreas Occidental, Noreste y Central concentran el 56%, el restante está distribuido en las áreas Oriental, Noroeste, Norte y Peninsular. Finalmente, las áreas Baja California y Baja California Sur participan con el 7% (véase Tabla 6).

Tabla 6. *Demanda máxima integrada por región de control (MWh/h)*

Región de Control	Demanda máxima 2016
Central	8,705
Oriental	7,299
Occidental	9,842
Noroeste	4,582
Norte	4,608
Noreste	8,846
Peninsular	1,955
SIN	43,319
Baja California	2,699
Baja California Sur	484
Mulegé	29
SEN	46,025

Fuente. Elaboración propia. Datos obtenidos de: PRODESEN 2018-2032

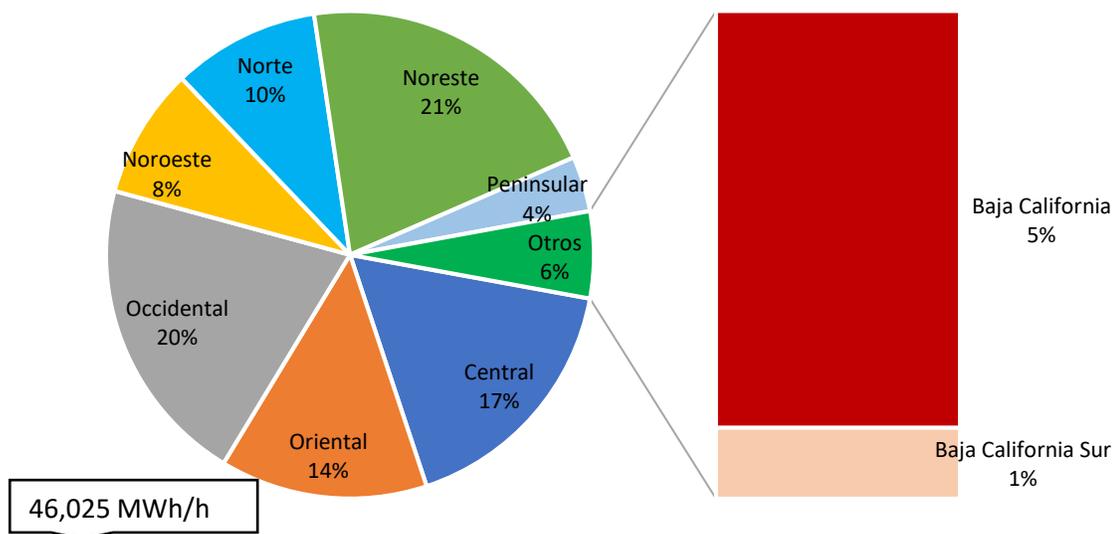


Figura 21. Participación de la Demanda máxima coincidente del SEN, 2017 (Baja California Sur incluye Mulegé).

Fuente. Elaboración propia. Datos obtenidos de: PRODESEN 2018-2032

2.2 Situación Actual de la Energía Eólica en México.

2.2.1 Potencial de Energía Eólica.

En los últimos años uno de los energéticos que mayor auge ha tenido es la energía del viento (Eólica), a través de diversas metodologías de evaluación³² se ha cuantificado el potencial eólico y se ha llegado a afirmar que el recurso eólico mexicano es competitivo; aunado a esto, la regulación en México establece como meta de participación de energías limpias el 35% en la generación de energía eléctrica para el año 2024, esto ha permitido un crecimiento en el interés por determinar la capacidad del recurso eólico con el que cuenta el país.

Para fines prácticos la metodología analizada en el presente trabajo es la utilizada en el Inventario Nacional de Energías Renovables (INERE) y el Atlas de Zonas con Alto Potencial de Energías Limpias (AZEL).

Según INERE, se propuso una clasificación primaria de recurso donde se identifican dos divisiones. En primer lugar se propuso estimar la cantidad teórica del recurso en una región geográfica, dicha cantidad teórica no considera restricción alguna desde las perspectivas técnica, económica, social ni ambiental, se subdivide a su vez en potencial posible, probable

³² Metodologías del Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias, de Vestas, del Centro de Energías Limpias de España (CENER), Acciona y SENER

y probado de acuerdo con al nivel de estudios específicos para el cálculo de potencial, incluyendo además de las restricciones técnicas propias de la tecnología, las limitaciones topográficas y de uso de suelo y de la infraestructura del Sistema Eléctrico Nacional.

Potencial Posible: Potencial teórico de capacidad instalable y generación de acuerdo con estudios indirectos, utilizando supuestos, sin estudios de campo que permitan comprobar su factibilidad técnica y económica; emplea valores y variables teóricas simples para obtener aproximaciones en términos eléctricos, sin discriminar con detalle la viabilidad técnica de su aprovechamiento; bajo esta aproximación, todas las fuentes de energía renovable suelen tener potenciales de gran magnitud.

Potencial Probado: Este potencial indica que se cuenta con suficientes estudios técnicos y económicos que comprueban su factibilidad eléctrica; considera la competitividad de las fuentes de energía renovable respecto de las otras fuentes de suministro, en función del grado de madurez tecnológica y de su impacto en los costos de inversión y operación; también considera la disponibilidad de interconexión a la red, la evolución de los precios de la energía, y su proyección en el tiempo, en el Inventario Nacional de Energías Renovables (INERE). Con base en sus atributos y criterios, la Secretaría de Energía (SENER), considera como Potencial Probado a todas las centrales en construcción, y a todos aquellos sitios que cuentan con los permisos de la Comisión Reguladora de Energía (CRE) para producir energía eléctrica, aunque éstos no cuenten con suficientes estudios técnicos y económicos, que comprueben la factibilidad para generación eléctrica.

En esta evaluación, se propusieron cuatro escenarios con el objeto de obtener diferentes apreciaciones del potencial. Estos escenarios consideran diferencias en la cercanía a la Red Nacional de Transmisión (RNT), el área mínima requerida (solar y eólica) o el volumen del recurso mínimo requerido (geotérmico o biomasa) en relación con la discriminación de zonas o sitios con capacidad instalable pequeña.

Escenario 1. Enfocado en identificar zonas o sitios con alto potencial para el desarrollo de proyectos para la generación de energía eléctrica con base en energías limpias, sin considerar la cercanía a las RNT.

Escenario 2. Con orientación a identificar zonas o sitios con alto potencial para el desarrollo de proyectos de generación eléctrica interconectados con base en energías limpias, medianamente cercanos de la RNT.

Escenario 3. Enfocado en identificar zonas o sitios con alto potencial para el desarrollo de proyectos de generación eléctrica interconectados con base en energías limpias cercanos a la RNT (tensión ≥ 69 kV).

Escenario 4. Enfocado en identificar zonas o sitios con alto potencial para el desarrollo de proyectos de generación eléctrica lejanos (> 20 km) a la RNT.

El escenario 1 permite identificar las zonas o sitios del país con mayor potencial sin contemplar la distancia a la RNT. Los escenarios 2 y 3, pretenden identificar las zonas o sitios más viables para el desarrollo de proyectos con base en energías limpias en perspectivas para el mediano y corto plazos. El escenario 4 servirá de insumo para la planeación de la nueva infraestructura de la RNT, debido a que dicho escenario contempla proyectos de generación eléctrica lejanos a la RNT.

De acuerdo con el Estudio sobre el potencial eólico en México, llevado a cabo por PwC en colaboración con la Asociación Mexicana de Energía Eólica (AMDEE), cuyos datos se encuentran en INERE, México cuenta con un potencial instalable posible de 50 GW y un potencial de Generación posible de 87,600 GWh/a con factores de planta superiores al 20%, asimismo se cuenta con un potencial probado de 7.688 GW con una potencia de generación de 25,104 GWh/a con un factor de planta de 36.7%.

Tabla 7. *Potencial Eólico aprovechable en México.*

Escenario	Área Disponible (km ²)	Capacidad Instalable (MW)	Potencial de Generación (GWh/a)	Factor de planta %
1	82,064	158,302	402,847	29.05
2	150,465	290,249	740,332	29.12
3	302,331	583,200	1,486,713	29.10
4	154,195	297,444	750,186	28.79
Total	689,055	1,329,195	3,380,078	29.03

Fuente. Elaboración propia. Datos obtenidos de: Atlas de Zonas con Energías Limpias, 2017

De la tabla anterior se calcula que, en promedio, los parques eólicos operan con un factor de planta de 29% y se requiere, un promedio, 518 km² por cada KW instalado. A manera de referencia, para producir la misma cantidad de energía anual que produce 1 KW de energía proveniente de una central nuclear, la cual opera en promedio con un factor de planta de 87.4%, se requerirían de 1,560 km² ocupados por parques eólicos. Cabe mencionar que la ocupación de superficie por turbinas eólicas puede tornarse en un problema social muy grande que hay que atender, si se propone incrementar la capacidad eólica en el país.

México cuenta con un enorme potencial eólico y aunque en los últimos años se han presentado los mayores incrementos en este tipo de tecnología de generación, con los datos anteriores se puede observar que aún queda mucho recurso por aprovechar ya que, como se mencionó con anterioridad, a finales del 2017 la capacidad instalada fue de 4,199 MW de los 158,302 MW del escenario 3; dicho escenario identifica zonas con cercanía a las redes generales de transmisión, representando los proyectos más viables. Esto aunado con las metas de generación limpia, permite considerar a la energía eólica como una opción viable de generación eléctrica para el país.

2.2.2 Potencial de generación eléctrica en diferentes regiones.

México cuenta con un enorme potencial eólico, tal como se mencionó anteriormente; esto ha propiciado una serie de estudios del recurso eólico que han permitido confirmar áreas factibles para el desarrollo de proyectos eólicos, dichas áreas son aquellas en donde se ha venido desarrollando las centrales eólicas con las que cuenta actualmente el país.

En la Figura 22, podemos observar las regiones del país con mayor potencial de recurso eólico aprovechable, dichas regiones son principalmente el Istmo de Tehuantepec, la

Península de Baja California, la Península de Yucatán, el Altiplano Norte, Golfo Norte y parte de la Región Central. Si bien es cierto que el país cuenta con más zonas donde el recurso está bien calificado, la ventaja de las regiones mencionadas líneas arriba, es que ya consideran las limitaciones topográficas, de uso de suelo y de la infraestructura del Sistema Eléctrico Nacional.

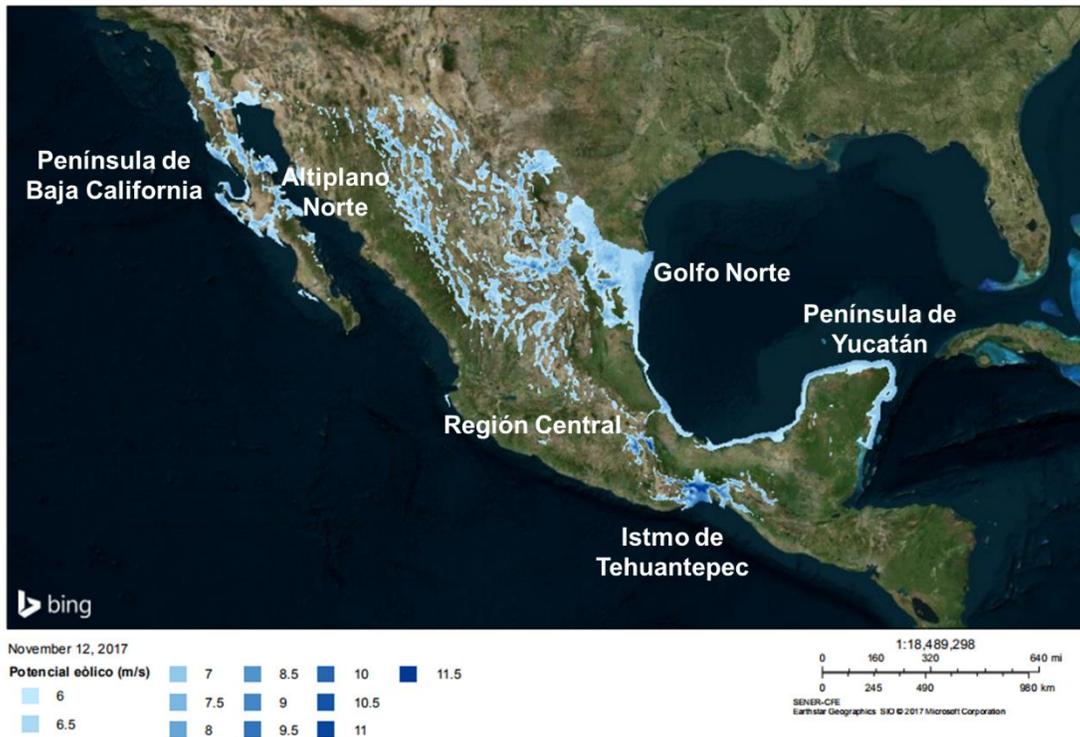


Figura 22. Regiones con mayor potencial de recurso eólico en México.

Fuente. Atlas de Zonas con Energías Limpias, 2017

2.2.2.1 Sur del Istmo de Tehuantepec.

Comprende los estados de Oaxaca y Chiapas, siendo la ventosa Oaxaca la zona con mayor potencial de esta región.

Oaxaca cuenta con 23 centrales eólicas que conforman una capacidad instalada³³ de 2,351 MW y una generación eléctrica anual de 6,478 GWh. Esto lo convierte en el estado con la mayor capacidad instalada en México y según INERE cuenta con un potencial de capacidad instalable de 38,117 MW para instalar proyectos eólicos. Por su parte Chiapas cuenta con una central eólica con capacidad instalada de 32 MW y una generación anual de 90 GWh, según INERE su potencial de capacidad instalable para proyectos potenciales es de 12,967 MW.

³³ Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2018-2032

2.2.2.2 Península de Baja California.

Comprende los estados de Baja California y Baja California Sur.

Baja California cuenta con 2 centrales eólicas con una capacidad de 166 MW y una generación eléctrica anual de 478 GWh, según datos de INERE su potencial de capacidad instalable para proyectos potenciales es de 20,730 MW, Baja California Sur tiene una central eólica cuya capacidad es de 1 MW, pero con una generación nula (0 GWh), cuyo potencial de capacidad instalable está estimado en 3,835 MW.

2.2.2.3 Península de Yucatán.

Comprende a los estados de Yucatán y Quintana Roo.

Yucatán aún no cuenta con una central eólica instalada, sin embargo, como resultado de las subastas de largo plazo se tienen contemplados 5 proyectos Eólicos con 798,298 MWh/a además según INERE³⁴ posee 6499 MW de capacidad instalable para proyectos con potencial de desarrollo, por su parte Quintana Roo tiene una central eólica con 2 MW de capacidad instalada y 2 GWh de generación eléctrica anual, según INERE cuenta con 2,403 MW de capacidad instalable para el desarrollo de proyectos futuros.

2.2.2.4 Altiplano del Norte.

Conformado por los estados de Jalisco, Coahuila, Zacatecas, Durango y Chihuahua.

Jalisco aporta 265 MW y una generación eléctrica de 369 GWh/a gracias a 2 centrales eólicas ubicada en este estado y cuenta con un potencial de capacidad instalable de 3,197 MW para desarrollo de proyectos, Coahuila aporta 200 MW de capacidad instalada y una generación de 625 GWh/a, con 1 central eólica representa la mayor capacidad instalada de esta región, su capacidad instalable es de 94,494 MW para el desarrollo de proyectos. Por su parte Zacatecas tiene 2 centrales eólicas que aportan 320 MW de capacidad instalada, generación eléctrica anual de 103 GWh, con una capacidad instalable de 39,301 MW para el desarrollo de proyectos, Chihuahua aún no contempla proyectos eólicos sin embargo posee una capacidad instalable de 125,048 MW según datos de INERE, convirtiéndolo en el estado con mayor potencial aprovechable en México.

2.2.2.5 Golfo Norte.

Integrado por Tamaulipas, San Luis Potosí y Nuevo León

Tamaulipas cuenta con 5 centrales eólicas que en conjunto aportan 303 MW de capacidad instalada y una generación eléctrica de 910 GWh/a, según datos de INERE este estado cuenta con una capacidad instalable de 69,713 MW para el desarrollo de proyectos potenciales, San Luis Potosí por su parte tiene 1 central eólica con una capacidad instalada de 200 MW y generación eléctrica de 367 GWh. Asimismo, de acuerdo con el estudio de INERE posee una capacidad instalable de 16,741 MW. Nuevo León tiene 3 centrales eólicas que en conjunto aportan 274 MW de capacidad instalada y 1,009 GWh de generación eléctrica al año, lo cual lo convierte en el estado de esta región con mayor generación eléctrica, además cuenta con una capacidad instalable de 57,307 MW para desarrollo de proyectos.

³⁴ Inventario Nacional de Energías Renovables (<https://dgel.energia.gob.mx/inere/>)

2.2.2.6 Región Central.

Integrado por Puebla, Hidalgo, Guanajuato y Querétaro

En Puebla se ubica una central eólica que aporta 66 MW de capacidad instalada, de generación 200 GWh/a y, conforme a datos de INERE, tiene una capacidad instalada de 8,474 MW. Los demás estados de esta región aún no cuentan con centrales eólicas instaladas; sin embargo, según datos de INERE, Guanajuato no contempla proyectos eólicos, pero tiene una capacidad instalable de 6,466 MW; Querétaro, aunque no contempla proyecto alguno, tiene una capacidad instalable de 2,375 MW; Hidalgo cuenta con una capacidad instalable de 1,871 MW.

Otras regiones que cuentan con recurso eólico aprovechable son la región Pacífico Norte con el estado de Sonora que posee una capacidad instalable de 14,561 MW para el desarrollo de proyectos y la región golfo centro que comprende parte del estado de Veracruz, con una capacidad instalable de 3,102 MW.

En la Figura 23 se aprecia que el estado con la mayor capacidad instalable para el desarrollo de futuros proyectos eólicos es Chihuahua con el 21.44% del potencial instalable, seguida de Coahuila con 16.20%, después Tamaulipas con 11.95% y Nuevo León con 9.14%, los cuales ocupan el 59% del total del potencial aprovechable de capacidad instalable por energía eólica en México.

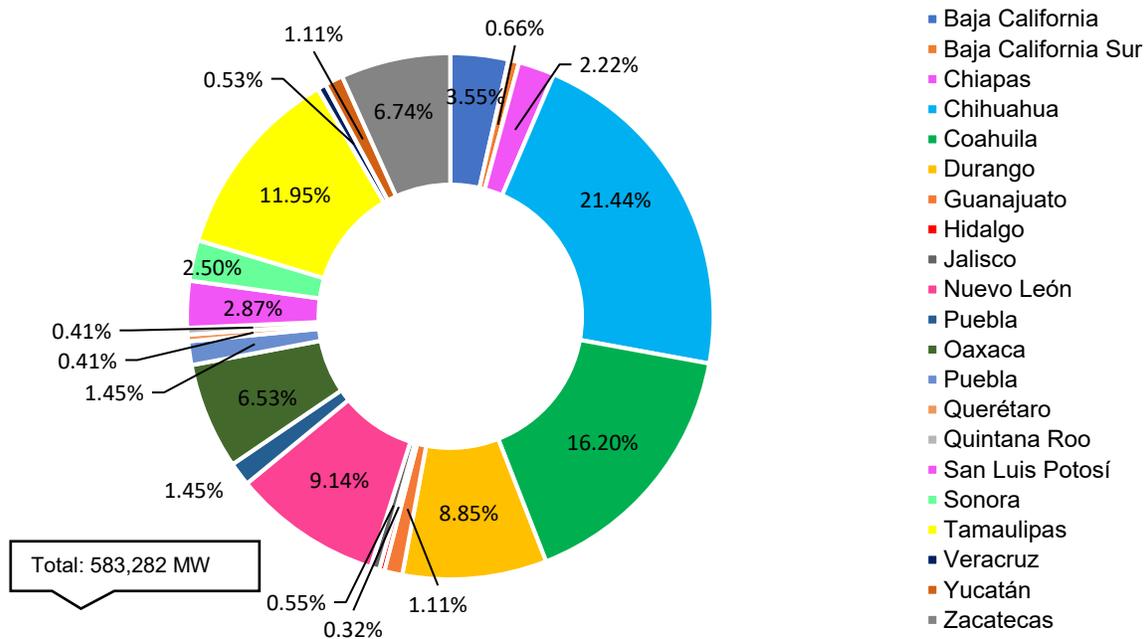


Figura 23. Participación por estado en el potencial identificado de capacidad instalable en México para proyectos eólicos.

Fuente. Elaboración propia. Datos obtenidos de: Inventario Nacional de Energías Renovables (septiembre 2016)³⁵

³⁵ <https://dgel.energia.gob.mx/AZEL/>

2.2.3 Competencia con otras fuentes de Energía.

A continuación, se presenta un análisis comparativo entre costo nivelado de electricidad, tiempos de desarrollo por tecnología y emisiones de CO₂ a la atmosfera. Siendo estos parámetros muy importantes para la selección de una tecnología; cabe mencionar que dicho comparativo se establece entre cinco tipos diferentes de tecnologías de generación eléctrica. En la comparación son consideradas la energía eólica, la energía hidroeléctrica, ya que en México es la tecnología renovable con mayor capacidad instalada actualmente, la energía fotovoltaica la cual fue la competencia directa de la energía eólica en las subastas de energía a largo plazo, Ciclo combinado que representa el 50 % de la generación eléctrica en México y la Energía Nucleoeléctrica ya que ésta última permite generar grandes cantidades de electricidad, por largos periodos de tiempo y con bajas emisiones de gases contaminantes, como veremos a continuación.

Este comparativo permite entender la competencia directa de la energía eólica con respecto al uso de otras fuentes de Energía Limpia.

2.2.3.1 Costo nivelado de electricidad.

El costo nivelado de la electricidad (LCOE por sus siglas en inglés) es la valoración económica del costo del sistema de generación de electricidad que incluye todos los costos a lo largo de la vida útil del proyecto: la inversión inicial, operación y mantenimiento, el costo de combustible, costo de capital, etc. El costo nivelado de electricidad es el factor principal para describir y comparar el comportamiento económico de un proyecto de generación eléctrica.

En la Figura 24 se observan valores del LCOE en dólares americanos (USD) a la paridad vigente respecto al peso mexicano (MXP) en el año 2016 para cada una de las tecnologías analizadas; es claro que la tecnología con el menor costo, es la eólica en la cual el precio de la energía eléctrica fluctúa entre un mínimo de alrededor de 30 USD/MWh y un máximo de 60 USD/MWh; sin embargo, es notable que no existe gran diferencia entre el costo de la energía Hidroeléctrica misma que fluctuó de un mínimo 40 USD/MWh a un máximo de 60 USD/MWh y el ciclo combinado con una rango entre 42 USD/MWh y 78 USD/MWh, seguido de la energía fotovoltaica que oscilo entre un mínimo de 76 USD/MWh y un máximo de 150 USD/MWh; así mismo, se observa que la energía nuclear presenta valores más altos de LCOE, con un rango de fluctuación entre un mínimo de 112 USD/MWh y un máximo de 183 USD/MWh.

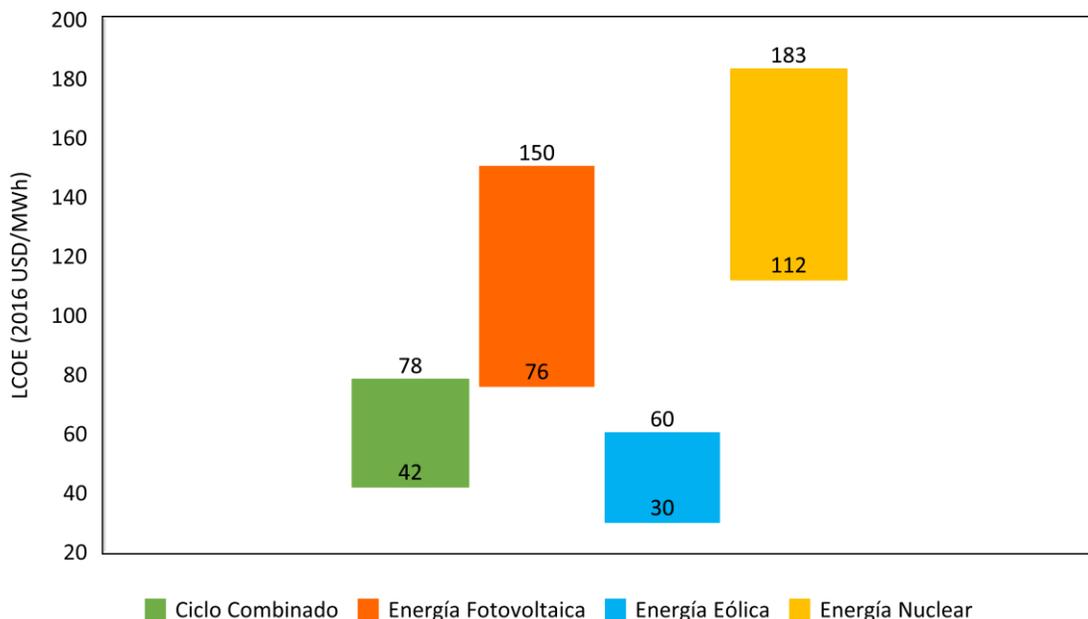


Figura 24. Costo Nivelado de Electricidad (LCOE) por tecnologías (2016).

Fuente. Lazard's Levelized Cost of Energy Analysis (noviembre 2017); Renewable Power Generation Costs in 2017 pp.125

2.2.3.2 Tiempo de desarrollo por tecnología.

El tiempo de desarrollo es aquel que transcurre durante todas las etapas de cadena de valor de desarrollo de un proyecto en el cual se incluye Planificación del proyecto, Manufactura - Construcción y Operación -Mantenimiento. En la Figura 25 se aprecia la comparación del tiempo empleado por etapas de la cadena de valor para cada una de las tecnologías seleccionadas. Los tiempos de desarrollo coinciden en la fase de Planificación del proyecto para todas las tecnologías, a excepción de la energía nuclear, que tiene unos ciclos de 2 a 3 años en esta fase, durante la cual se realiza estudios de disponibilidad de diseño y desarrollo de tecnología.

En la fase Manufactura y Construcción para la eólica y la solar, tenemos el periodo más corto ya que ambas resultan más fácil de instalar respecto a otras tecnologías, debido a que recurren a la habilitación de partes y al montaje de piezas. En el caso de la eólica se montan en campo la torre, la góndola y las aspas, mientras que el único trabajo de obra civil que se requiere es la cimentación de la torre, los caminos para el traslado de los componentes y la instalación eléctrica. Para el caso de la energía fotovoltaica, se recurre al montaje de los paneles y demás componentes; las plantas de ciclo combinado, requieren de al menos 3 años, debido a la construcción de la unidad de vapor; sin embargo, poseen la ventaja de que la construcción del sistema turbogás, puede ser terminada en un plazo breve e inmediatamente iniciar su operación; posteriormente, se puede terminar la construcción de la unidad de vapor, y completarse así el ciclo combinado. Para el caso de la Hidroeléctrica el periodo de tiempo es el mayor debido a la gran obra civil que representa

debido a la contracción de la presa. Para el caso de la Energía Nuclear el tiempo de manufactura y construcción es el mayor de las 5 tecnologías analizadas, esto debido a que se deben tener en cuenta ciertos parámetros de seguridad más astringentes que en el caso de las otras cuatro tecnologías, puesto que se precisa de la construcción de los edificios dedicados a la contención y del reactor y demás instalaciones que requiere una central nuclear.

En la fase de Operación y Mantenimiento, interviene el tiempo de vida de la planta; las plantas solares y eólicas generalmente tienen una vida útil promedio de 25 años, sin embargo, para las plantas eólicas existe el concepto denominado usualmente como la repotenciación y que consiste en el reemplazo de aerogeneradores, permitiendo la incorporación de equipos con mayores avances tecnológicos que aumenten la producción eléctrica y el tiempo de vida de la planta, mientras que las plantas de ciclo combinado tienen una vida media de 30 años, que es mayor comparada a las anteriores, seguidos de la hidroeléctrica la cual duplica el tiempo de vida de las plantas eólicas y solares. Las plantas Nucleoeléctricas son las que presentan el mayor tiempo de vida útil, lo que permite aprovechar mucho más tiempo la energía producida.

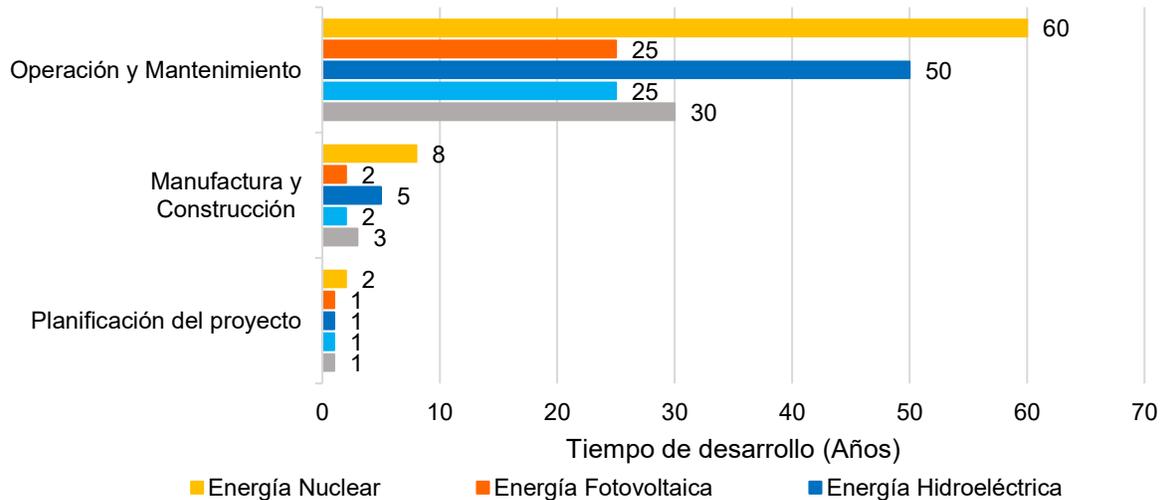


Figura 25. Tiempo de desarrollo por fases de la cadena de valor para cada tecnología.

Fuente. Elaboración propia. Datos obtenidos de: Boston Strategies International (2016) y Project management in nuclear power plant construction: guidelines and experience (International Atomic Energy Agency) (2012).

2.2.3.3 Emisiones de CO₂ a la atmosfera.

En la Figura 26 se observa un comparativo de emisiones de CO₂ (Dióxido de Carbono) equivalente por cada tipo de tecnología; todo cambio genera un impacto, es por ello que todas las opciones de generación de energía eléctrica tienen impactos ambientales entre ellos la generación de CO₂; sin embargo, actualmente se está gestionando para que la matriz de generación reduzca fuentes contaminantes y se incremente la participación de energías limpias y, con ello, se disminuyan las emisiones de GEI, entre ellos el CO₂. Según

el Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation³⁶, la energía hidroeléctrica es la que presenta menores emisiones durante su ciclo de vida; las principales emisiones son durante la construcción, mantenimiento, y el desmantelamiento de las plantas, en la generación eléctrica se puede decir que cuenta con cero emisiones debido a que no se asocia este tipo de energía con la combustión de combustible; después, se tiene a la energía eólica, en la cual las emisiones de GEI son principalmente durante la fabricación, transporte, instalación, operación y desmantelamiento de aerogeneradores; sin embargo, se puede considerar que dichas emisiones son pequeñas en comparación con la energía generada. Enseguida se posiciona la energía nuclear con emisiones principalmente a lo largo del ciclo de extracción del combustible, seguidamente se ubica la energía fotovoltaica con un notable aumento de emisiones en comparación con las anteriores, esto es debido a la fabricación de las celdas fotovoltaicas y principalmente en la extracción del silicio utilizado como la principal materia prima; según Solar Innova³⁷ la fabricación de celdas representa el 78% de las emisiones que ésta forma de energía genera y, dentro de esta actividad, la extracción de materia prima aporta el 91% de emisiones de GEI. Por último, se encuentra el ciclo combinado de gas natural, generando la mayor cantidad de emisiones en comparación con las otras tecnologías, esto tiene que ver principalmente con la combustión de combustible, en este caso Gas natural; sin embargo, la ventaja de este tipo de generación es que se podría implementar procesos de captura y almacenamiento geológico o biosecuestro de CO₂, logrando bajas emisiones de carbono conforme a estándares internacionales.

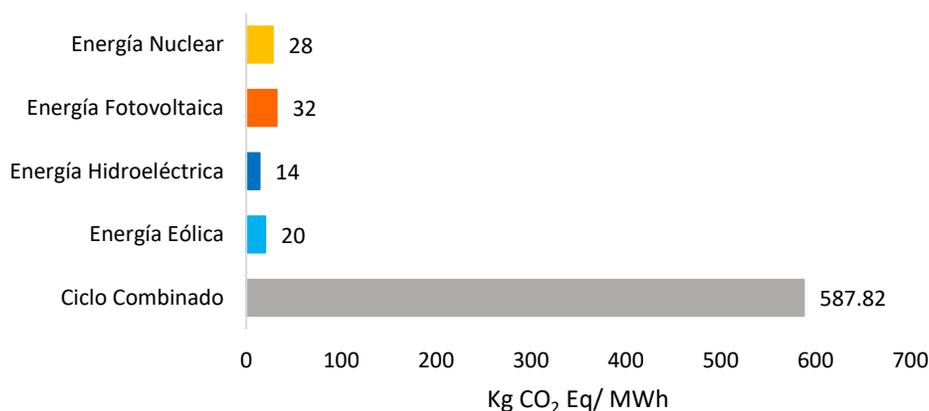


Figura 26. Emisiones de CO₂ por tecnología de generación eléctrica.

Fuente. Elaboración propia con datos de RESCCM³⁸.

En resumen, después de las comparaciones anteriores el análisis arrojó lo siguiente:

³⁶ Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2012.

³⁷ Huella de carbono: Fabricación de Módulos Fotovoltaicos, Solar Innova, <http://www.solarinnova.net/images/stories/es/productos/fotovoltaica/modulos/manual/pdf/si-esf-m-huella-carbono.pdf>

³⁸ Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2012.

El menor costo de nivelado de electricidad corresponde al de la Energía Eólica; sin embargo, el Ciclo Combinado y la Energía Hidroeléctrica continúan como la segunda y la tercera tecnología de generación con el menor LCOE respectivamente, siendo la Energía Fotovoltaica y la Energía Nuclear las de mayor LCOE; una planta eólica presenta los menores tiempos de manufactura y construcción; sin embargo, ofrece la mitad de tiempo de vida útil respecto a las plantas hidroeléctricas, con un tiempo promedio de vida útil en el orden de 50 años, siendo las plantas nucleares las que ofrecen el mayor tiempo de vida útil. El reducido tiempo de manufactura y construcción asociado a esta tecnología, permite instalar parques eólicos mucho más rápido respecto al tiempo requerido en la planificación y desarrollo de la obra civil para la implementación de las grandes hidroeléctricas y plantas nucleares. En cuanto a emisiones de CO₂ Equivalente, la energía eólica es la segunda fuente con las menores emisiones de GEI, prevaleciendo esta característica ~~este~~ para todo su ciclo de vida. Como se desprende de lo anterior, la energía eólica posee una alta competitividad respecto a las tecnologías analizadas; su principal desventaja competitiva radicaba en el LCOE ya que era elevado en comparación con otras tecnologías; sin embargo, esto ha quedado atrás y últimamente los precios de la energía eólica se están volviendo competitivos y, por ende, atractivos; otra clara ventaja al momento de competir en el mundo de hoy en día, corresponde a las bajas emisiones de GEI al ambiente, puesto que, actualmente, se pretende disminuir dichas emisiones para mitigar las afectaciones del calentamiento global y cumplir con las metas de generación eléctrica con energías limpias establecidas en México conforme al Acuerdo de París.

2.3 Impacto social, económico, legislativo y ambiental en el desarrollo de la energía eólica en México.

Los proyectos eólicos necesariamente provocan impactos en diferentes áreas tales como la sociedad, la economía y el ambiente, pero no se puede hablar de impactos exclusivos de cada sector sino más bien es una interrelación holística entre cada sector.

El impacto es el cambio inducido por un proyecto sostenido en el tiempo y, en muchos casos, extendido a grupos no involucrados en este efecto multiplicador. (Libera Bonilla, 2007)

2.3.1 Impacto social.

A continuación, se enuncian los principales impactos sociales asociados al desarrollo de la energía eólica.

2.3.1.1 Impactos Negativos

2.3.1.1.1 Cambio de estilo de vida de comunidades indígenas.

México es un país con gran presencia de comunidades indígenas dedicados principalmente a la agricultura y ganadería; las primeras preocupaciones de esas comunidades estriban en la creencia que los parques eólicos están controlados principalmente por empresas extranjeras; en segundo lugar, las comunidades que dependen de sus tierras, están preocupadas de que los proyectos eólicos limiten su acceso a la tierra arrendada; en tercer lugar, se plantean preocupaciones con respecto a la negociación y procesos de consulta

entre desarrolladores y comunidades, entre esas preocupaciones destacan señalamientos como: las barreras lingüísticas, la falta de intérpretes, la falta de firmas en los contratos, así como contratos que contienen información engañosa, dudosa o difícil de entender sobre la duración del proyecto y el precio del terreno arrendado; en cuarto lugar, también se presenta la preocupación sobre la falta de información donde se precise la rentabilidad, la compensación y la información adecuada respecto al uso de la tierra dañada.

En los desarrollos de parques eólicos en el Istmo de Tehuantepec se encontraron los siguientes conflictos:

- Falta de beneficios para la población local y falta de creación de empleos a largo plazo.
- Empleo, los contratos para la población local durante la fase de construcción solían ser semanales, lo que impide que los trabajadores se registren en el sistema de seguridad social mexicano.
- La fase de mantenimiento requiere normalmente alrededor de una persona por cada 15 aerogeneradores y los trabajadores locales generalmente no tienen la educación formal para cumplir con los requisitos.
- La relación Costo-beneficio con respecto al cambio de actividad preponderante o económica, convirtiéndose en constructor del parque eólico y dejando el trabajo agrícola.
- Desigualdad en el acceso al servicio de energía eléctrica, falta de información respecto al uso de la tierra y modificación del nivel social, cultural, de hábitat y también se presentaron afectaciones a los usos y costumbres locales.

2.3.1.1.2 Oponentes de la energía eólica mediante preocupaciones ambientales y de carácter social.

Las irregularidades de los proyectos eólicos en comunidades indígenas llevaron a que grupos y organizaciones civiles en la región, denunciaran actividades tales como el despojo de tierras, la falta de información y consulta en las asambleas para la instalación de los parques, corrupción, manipulación y clientelismo de la clase política, así como la falta de neutralidad de los funcionarios públicos estatales y federales. Esto llevó a la formación de un movimiento de resistencia con un fuerte componente étnico, que agrupaba a distintos tipos de organizaciones civiles; por su parte, también existen organizaciones civiles que cuestionan los beneficios y los impactos ambientales del desarrollo de proyectos eólicos, incluso han llegado a cuestionar la transparencia de las instituciones encargadas de evaluar los manifiestos de impacto ambiental, asegurando la falta de un encuadre regulatorio verdadero con normas e instrumentos que sean realmente pertinentes para evaluar el impacto de los parques eólicos en los ecosistemas; más adelante, en el apartado de impactos ambientales, se explica con mayor detalle los aspectos relacionados al ecosistema.

2.3.1.2 Impactos Positivos.

2.3.1.2.1 Generación de empleo calificado.

Anteriormente se mencionaron impactos negativos y si bien es cierta la generación de empleos, ésta para las comunidades indígenas es baja. También se requiere de mano de obra calificada para realizar actividades específicas que aseguren el funcionamiento óptimo

de la central eólica, según IRENA³⁹ en México a finales del 2017 se crearon 18,000 empleos directos en el sector eólico.

2.3.1.2.2 Fomento a la Investigación.

Como resultado de las metas de generación de energía limpia en México y de la Reforma Energética, según SENER se requiere un mínimo de 135 mil especialistas en energía renovable y eficiencia energética. Para generar este capital humano calificado y como parte de la política pública respectiva, se promueve el adiestramiento y la certificación técnica de mujeres y hombres, a fin de profesionalizar a los jóvenes que busquen insertarse al sector energía, fomentando la investigación científica-tecnológica y la transferencia de conocimiento de energías renovables y limpias y de eficiencia energética, para, a su vez, crear empleo para profesionistas y profesionales calificados, fortaleciendo el desarrollo de la ciencia y la tecnología en México.

2.3.2 Impacto Económico.

2.3.2.1 Impacto en el PIB.

A continuación, en la Figura 27, se observa la interacción de la energía eólica con otros sectores de la economía en México, según el Boston Strategies International, los mayores impactos a nivel de creación de Producto Interno Bruto (PIB) y de empleos por la generación eléctrica por energía eólica, se presentan en el sector comercio para el año 2015.

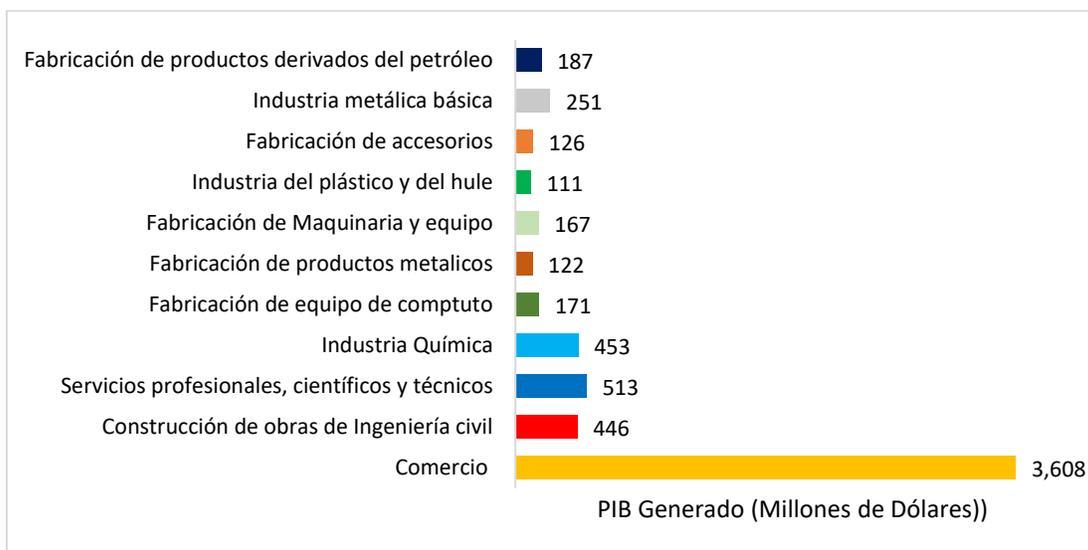


Figura 27. Interacción de la Energía Eólica con otros sectores de la economía en la generación de PIB (2015).

Fuente. Boston Strategies International, 2016

Esta aseveración no difiere al estudio realizado por PWC donde se estima que el PIB ascienda a \$ 45,000 MUSD por energías limpias para el periodo del 2015 al 2029, en donde

³⁹ Renewable Energy Employment by technology México, 2017, <http://resourceirena.irena.org/gateway/dashboard/?topic=7&subTopic=10>

la energía eólica representa un 25% y se espera la creación de 182,000 empleos en los que la energía eólica representa el 26% como se observa en la Figura 28; además, en la Figura 29 se observa el impacto en diversos sectores y, al igual que el estudio del Boston Strategies International, se coincide en el sector con mayor impacto en el PIB, corresponde al de la construcción.

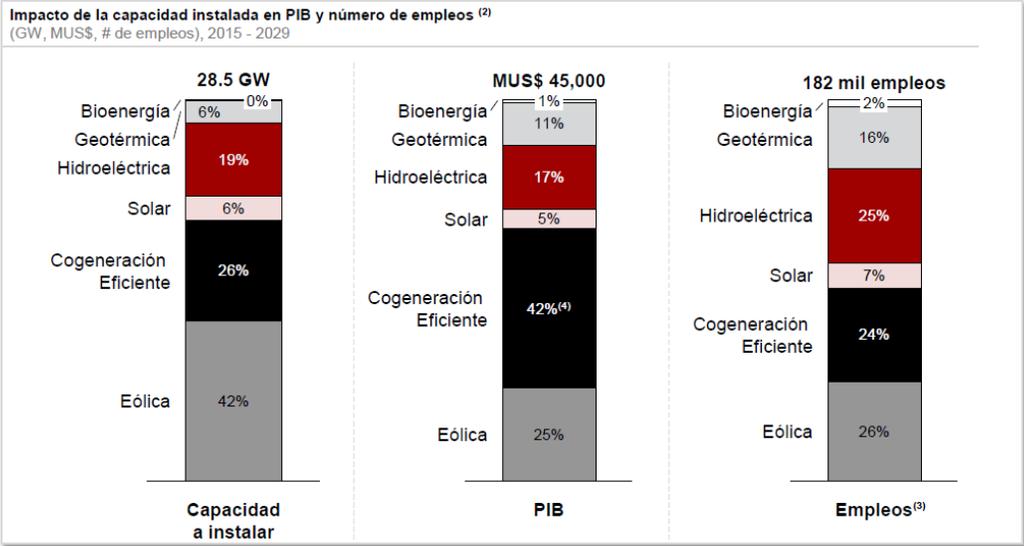


Figura 28. Impacto esperado en el PIB, capacidad instalada y números de empleos generados por energías limpias para el periodo 2015-2029.

Fuente. PWC 2015⁴⁰

⁴⁰ Estudio sobre las inversiones necesarias para que México cumpla con sus metas de Energías Limpias, octubre 2015, PWC (PricewaterhouseCoopers).

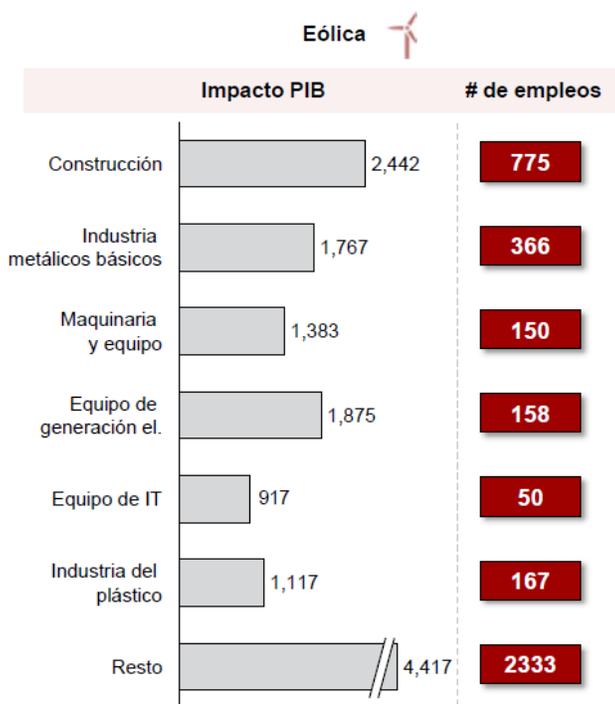


Figura 29. Impacto en el PIB (MUSD) y número de empleos en la instalación de 1 GW.

Fuente. PWC 2015⁴¹

2.3.2.2 Empresas Involucradas en la cadena de valor de la energía eólica.

Según el Boston Strategies International⁴², México cuenta con 63 empresas identificadas con actividades a 2016, en al menos una de las etapas de la cadena de valor de la energía eólica. La mayor concentración de empresas se encuentra en la fase de planificación de los proyectos, seguida de la fase de operación; al menos se ha identificado que 33 de estas empresas son mexicanas.

Las empresas internacionales que tienen una presencia importante en México en el desarrollo y operación de proyectos eólicos son empresas como Abengoa, Acciona, Alstom, EDF Energy, EDP Renováveis, Enel Green Power, Engie, Gamesa, Gas Natural Fenosa e Iberdrola.

México no cuenta con manufactura de turbinas eólicas hoy en día. Sin embargo, un número de empresas cuenta con fabricación nacional de componentes como generadores, aspas y, principalmente, torres. Las estadounidenses Clipper y Dynamik Kontroll en alianza con la mexicana Potencia Industrial, participan en la fabricación de generadores. Vientek, una alianza comercial entre Mitsubishi and TPI Composites, fabrica aspas. Acciona, CS Wind, Enertech Fabricaciones, Speco, Trinity y Tubac producen torres eólicas.

⁴¹ Estudio sobre las inversiones necesarias para que México cumpla con sus metas de Energías Limpias, octubre 2015, PWC (PricewaterhouseCoopers).

⁴² Estudios de Cadenas de Valor de Tecnologías Seleccionadas Para Apoyar la Toma de Decisiones en Materia de Mitigación en el Sector de Generación Eléctrica y Contribuir al Desarrollo de Tecnologías, Boston Strategies International, 2016.

Según datos del Boston Strategies Nacional 28 empresas mexicanas participan en la fase de planeación, 12 empresas en la etapa de construcción, 4 empresa en la fase de manufactura y 13 empresas en la fase de operación y mantenimiento. Cabe mencionar que algunas de las empresas participan en varias fases a la vez y algunas se dedican exclusivamente a una fase del proceso. (Ver Figura 30).

Actualmente, en materia de manufactura de equipo eólico, en México ya existen algunos centros productivos desde fabricas que integran torres transformadoras y generadores eléctricos, además de que hay una fábrica pequeña de aspas de Mitsubishi en el norte del país.

Respecto a la manufactura de equipo eólico se destacan las siguientes compañías, las cuales son Extranjeras: Acciona, Vestas, Gamesa y Siemens.

- **Fabricación de generadores:** Potencia Industrial, empresa 100% mexicana ubicada en la Ciudad de México; produce generadores para turbinas Clipper que se exportan a los Estados Unidos.
- Dynamik Kontroll, empresa de origen estadounidense, fabrica también generadores en Guadalajara, Jalisco.
- **Fábrica de palas:** Vientek, empresa conjunta de Mitsubishi y TPI Composites, produce palas en Ciudad Juárez para exportación al mercado eólico de los Estados Unidos.
- **Fabricación de torres:** Las empresas Trinity, Tubac, CS Wind, Speco, y Enertech Fabricaciones se encuentran produciendo torres de acero para el mercado eólico mexicano.
- **Otros componentes:** Las empresas Kaydon, Liebherr y Frisa, fabrican baleros y rodamientos para la energía eólica.

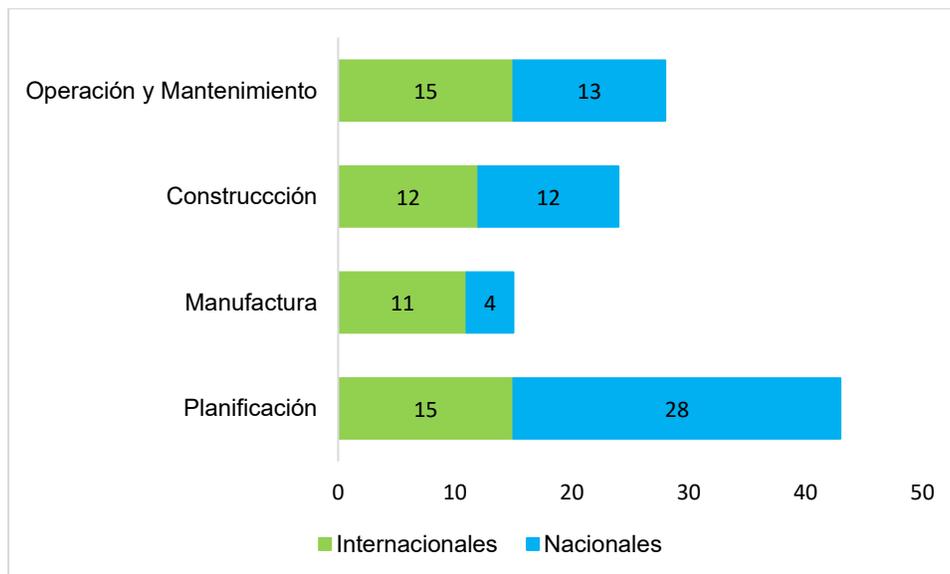


Figura 30. Número de Empresas Involucradas por Fase de la Cadena de Valor en México.

Fuente. Boston Strategies International, 2016.

2.3.3 Impacto Ambiental.

2.3.3.1 Emisiones de GEI.

La energía eólica tiene un potencial significativo para reducir emisiones de GEI debido a que no se realiza la combustión de un combustible durante la vida útil de la planta; sin embargo, si se analiza el ciclo de vida útil de la planta, es inevitable la emisión de GEI los cuales se presentan principalmente durante la fabricación, transporte, instalación, operación y desmantelamiento de aerogeneradores. Sin embargo, se puede considerar que dichas emisiones son pequeñas en comparación con la energía generada ya que, según el IPCC, el rango de emisiones de GEI se encuentra entre 8 a 20 g CO₂/KWh.⁴³

2.3.3.2 Uso de Terreno.

Los aerogeneradores generalmente se colocan en un terreno plano y tienen una separación de 5 a 10 diámetros de rotor; esto puede sugerir una ocupación considerable de tierras y pueden afectar los hábitats, ecosistemas a través de evitación o desplazamiento de un área, destrucción del hábitat y reproducción reducida, además, durante la etapa de construcción es necesario construir caminos provisionales y esto conlleva una pequeña degradación del suelo. Aunado a esto, tenemos la obra civil que implica la cimentación de la torre, aunque se busca mitigar estas afectaciones lo mejor posible; sin embargo, a pesar de que la tierra es utilizada para la construcción y se encuentran instalados aerogeneradores en ella, todavía es ocupable, puesto que la tierra se puede usar para carreteras, pastoreo de ganado y agricultura. Las turbinas eólicas también pueden colocarse fuera de la tierra (Offshore) muchos sugieren colocar turbinas de viento en el océano para que estén fuera de la vista, además, las turbinas podrían ser mucho más grandes y generar mucha más potencia. Sin embargo, esto puede afectar las actividades oceánicas; los posibles impactos negativos incluyen sonidos subacuáticos y vibraciones, campos electromagnéticos, disrupción física y el establecimiento de especies invasoras, aunque las estructuras físicas pueden crear nuevos lugares de cría o refugios y actúan como arrecifes artificiales o peces.

2.3.3.3 Vida Silvestre.

Las muertes de aves y murciélagos e insectos a través de colisiones con turbinas eólicas se encuentran entre las preocupaciones ambientales más publicitadas. Aunque queda mucho por conocer sobre la naturaleza y las implicaciones de estos impactos a nivel de la población, las tasas de mortalidad aviar se han reportado entre 0.95 y 11.67 por MW por año. Además, como la energía eólica offshore ha aumentado, también se han expresado preocupaciones sobre las aves marinas.

Según el IPCC, las muertes de murciélagos no se han investigado de manera exhaustiva, pero la mortalidad se ha informado en tasas que oscilan entre 0.2 y 53.3 por MW por año,

⁴³ Renewable energy sources and climate change, Intergovernmental panel on climate (IPCC), 2012

el impacto de las plantas de energía eólica en las poblaciones de murciélagos es de particular preocupación.

El número de muertes de aves en las centrales eólicas existentes parece ser de órdenes de magnitud inferior que otras causas antropogénicas de muertes de aves; se ha sugerido que las plantas de energía eólica en tierra actualmente no están causando una significativa disminución de los niveles de población de aves respecto a otras opciones de suministro de energía.

2.3.3.4 Uso de Agua.

Según Mekonnen & Hoekstra, la energía eólica utiliza menos agua que cualquier otra tecnología de generación de energía, como la energía nuclear o las centrales de carbón o gas natural, tal como se aprecia en la Figura 31.

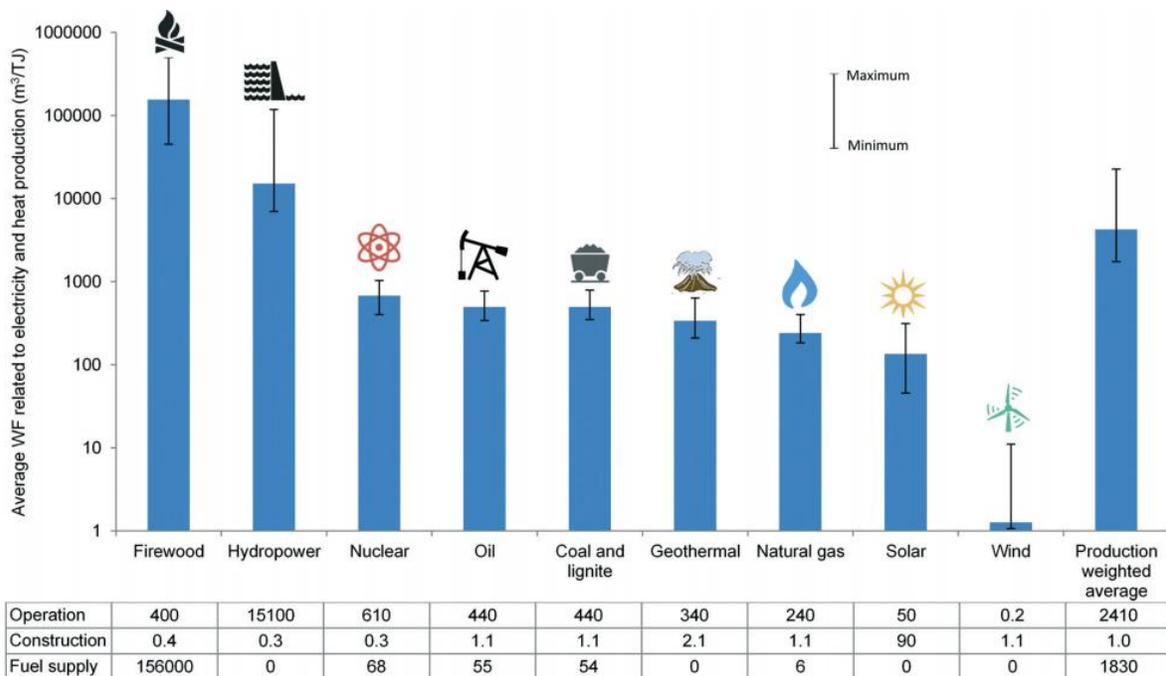


Figura 31. Consumo de agua por unidad de electricidad y calor producido (m³/TJ).

Fuente. Mekonnen & Hoekstra, 2015

CAPÍTULO 3. MODELO PARA LA EVALUACIÓN DE PARQUES EÓLICOS.

En el presente capítulo se presenta la metodología empleada para la evaluación de parques eólicos, aplicada en el programa System Advisor Model (SAM) desarrollado por el Laboratorio Nacional de Energía Renovable en E.E.U.U (NREL por sus siglas en ingles). Se abordarán, de manera breve, las bases matemáticas del programa, los datos requeridos y el manejo del mismo programa.

3.1 Descripción y Manejo de SAM.

El System Advisor Model (SAM) es un programa de modelado para obtener predicciones del rendimiento y el costo de las estimaciones de energía para los proyectos de energía conectados a la red, en función de los costos de instalación y operación y los parámetros de diseño del sistema que se especifican como entradas para el modelo.

El SAM consiste en una interfaz de usuario, el motor de cálculo, y la interfaz de programación. La interfaz de usuario es la parte del SAM que proporciona acceso a las variables de entrada y controles de simulación, muestra las tablas y gráficos de resultados. El motor de cálculo de SAM realiza una simulación en tiempo paso a paso del rendimiento de un sistema de energía, y un conjunto de cálculos financieros anuales para generar un flujo de caja del proyecto y las variables financieras. La interfaz de programación permite que los programas externos interactúen con SAM.

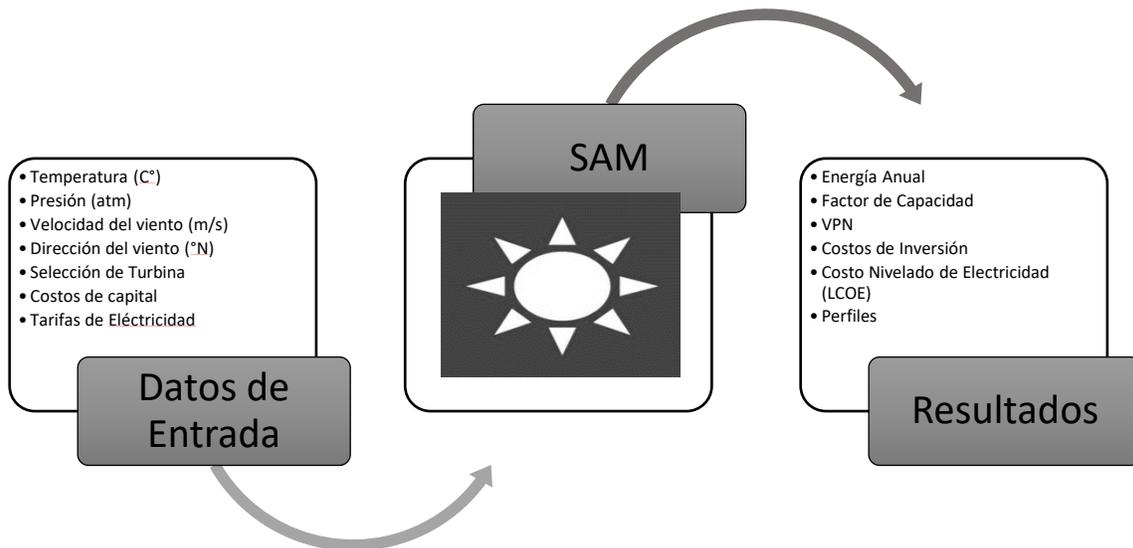


Figura 32. Interfaz de usuario del System Advisor Model.

Fuente. Elaboración propia con datos de SAM

En el SAM, cada tecnología de energía renovable tiene un modelo de rendimiento correspondiente que realiza cálculos los específicos de la tecnología. Del mismo modo, cada modelo financiero en el SAM también está asociado con un modelo financiero particular con su propio conjunto de entradas y salidas. Para la presente investigación se hará uso del modelo de rendimiento para energía eólica el cual se describirá más adelante.

Una simulación de rendimiento consiste en una serie de cálculos para simular el rendimiento del sistema durante un período de un año, en intervalos de una hora para la mayoría de las simulaciones, y pasos de tiempo más cortos para algunas tecnologías.

En la Tabla 8 se aprecian las tecnologías renovables que cuentan con un modelo de rendimiento; en el caso de sistemas fotovoltaicos, cuenta con 13 diferentes modelos de rendimiento.

Tabla 8. *Tecnologías renovables que cuentan con un modelo de rendimiento en SAM.*

Sistemas fotovoltaicos
<ul style="list-style-type: none"> • Modelo PV Watts • Concentración fotovoltaica • Concentración de energía solar • Concentrador solar parabólico (modelo físico CSP) • Torre de energía de sal fundida • Torre de energía Direct Steam • Sal fundida lineal de Fresnel • Linear Fresnel Direct Steam • Plato Stirling • Modelo genérico CSP • Calor de proceso industrial • Sistema genérico • Calentamiento solar de agua
Energía eólica
Geotérmica
Biomasa

Fuente. Elaboración propia con datos de SAM

3.1.1 Descripción general del Modelo de rendimiento de Energía Eólica del SAM.

El modelo de rendimiento de energía eólica del SAM es empleado para calcular la producción eléctrica por hora de una sola turbina o de un parque eólico; para esto se requiere información sobre el recurso eólico, las especificaciones de la turbina eólica, el diseño del parque eólico y los costos; además, el modelo de rendimiento se puede combinar con uno de los modelos financieros para calcular los indicadores económicos de proyectos eólicos residenciales, comerciales o de escala de servicios públicos.

Los modelos financieros residenciales y comerciales de SAM, son para proyectos de generación distribuida que compran y venden electricidad a precios minoristas. Para el propósito del presente trabajo se modelará para centrales de generación comercial que venden toda la energía generada por el sistema a un precio negociado, esto con el fin de analizar la situación de los parques eólicos en el país.

El algoritmo del modelo de rendimiento de energía eólica en el SAM consiste en siete pasos principales que se muestran en la Figura 33 y, a continuación, se presenta una descripción más detalla.

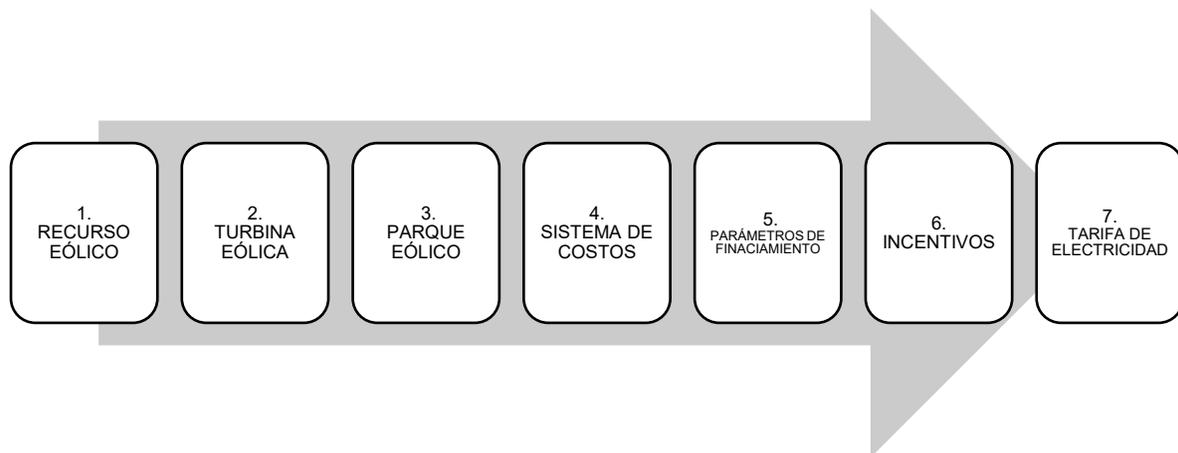


Figura 33. Algoritmo del modelo de rendimiento de energía eólica en SAM.

Fuente: Elaboración propia con datos de SAM

El algoritmo del modelo de rendimiento de energía eólica del SAM se describe a continuación:

Recurso eólico.

El módulo de recurso eólico cuenta con dos opciones

- 1) Archivo de recurso eólico con tres opciones
 - i. Archivo eólico típico representativo, cuyo paquete de instalación cuenta con una base de datos de 39 archivos meteorológicos desarrollado para la NREL por AWS para ubicaciones con topografía y combinación de climas de regiones representativas de Estado Unidos.
 - ii. Descarga online de datos desde NREL WIND, con información disponible para regiones del este y oeste de los Estado Unidos.
 - iii. El formato del archivo meteorológico SRW. El modelo de rendimiento eólico lee datos de recursos eólicos de un archivo meteorológico en el formato SRW, que es un formato de texto con valores separados por comas, está diseñado para ser lo suficientemente flexible como para permitirle crear archivos con datos propios, ésta

es la opción que se utilizará para introducir datos de recurso eólico de las diferentes regiones de México.

2) Datos de recursos eólicos con distribución de Weibull

Para los análisis que no requieren el detalle de los datos de recursos eólicos de series de tiempo, la opción de distribución de Weibull del SAM representa el recurso eólico como una distribución estadística caracterizada por una velocidad de viento anual promedio única y un factor Weibull K.

Turbina Eólica.

Para seleccionar el modelo de la turbina eólica se tienen dos opciones

- 1) Seleccionar una turbina desde biblioteca, donde se dispone de una base de datos de los modelos de turbinas eólicas utilizados con mayor frecuencia.
- 2) Definir las características de diseño de turbina, donde se hace uso de un conjunto de parámetros de diseño de turbina especificados por el usuario. Para calcular una curva de potencia de la turbina, se especifican los valores para los parámetros en la página de entrada de la turbina, y SAM calcula y muestra la curva de potencia.

Parque eólico.

En la sección de parque eólico se permite especificar el número de turbinas en el proyecto e incluye una representación simple de la distribución del parque eólico.

El módulo cuenta con las siguientes secciones

- 1) Tamaño del sistema

Las opciones de tamaño del sistema son las siguientes

- I. Una sola turbina. Esta opción es para modelar un proyecto con una sola turbina
- II. Especificar el tamaño del parque eólico. Esta opción permite indicar la capacidad en KW, con ello calcula automáticamente la cantidad de turbinas con un diseño básico de turbina para el parque eólico, indicado en el módulo de Turbina eólica.
- III. Especificar el número de turbinas y el diseño del parque eólico. Permite especificar la cantidad de turbinas y cómo están distribuidas. El SAM supone que todas las turbinas son del mismo tipo y están a la misma elevación sobre el nivel del mar
- IV. Definir forma de diseño. Permite modificar la disposición de forma del parque eólico, para un cuadrado, rectángulo o forma de paralelogramo, para una forma triangular o trapezoidal, SAM supone que cada fila tiene una turbina menos que la anterior.

- 2) Pérdidas y efectos de estela de viento

- I. Pérdidas de parques eólicos. En esta opción se indican pérdidas esperadas en la producción eléctrica del parque eólico como porcentaje de la producción total del parque eólico.
- II. Coeficiente de turbulencia. La intensidad de turbulencia ambiental que representa la variación en la velocidad del viento causada por el terreno o la temperatura local.
- III. Modelo de estela de viento. El SAM le permite elegir entre tres modelos diferentes de efecto de estela para estimar el efecto de las turbinas en contra del viento en el rendimiento de la turbina a favor del viento. El modelo simple utiliza un coeficiente de empuje para calcular el déficit de velocidad del viento en cada turbina debido a los efectos de activación de las turbinas en contra del viento.
 - a) Park (WAsP). Calcula el déficit de velocidad del viento detrás de cada turbina utilizando una constante de caída, y calcula la superposición de ese perfil de estela con la turbina a sotavento para calcular la velocidad del viento en la turbina a favor del viento
 - b) Eddy-Viscosity. Es similar al modelo de Park, excepto que se supone que el déficit de velocidad del viento detrás de cada turbina tiene forma gaussiana (no hay constante de decaimiento).

Costos del sistema.

El módulo Costos del sistema eólico le permite especificar los costos de un proyecto de energía eólica.

- a) Modelos de costos de capital

Los valores de costo de capital predeterminados provienen de los modelos de costos eólicos de NREL, que utilizan un conjunto diferente de supuestos de costos para parques eólicos terrestres y marinos.

El módulo de costos del sistema se divide en dos tipos de instalaciones de parques eólicos:

Instalación onshore, esta opción permite usar los valores de costo de capital predeterminados de los modelos de costo NREL para parques eólicos construidos en tierra.

Instalación offshore, esta opción permite usar valores predeterminados para parques eólicos marinos.

- b) Costos de capital

Para cada categoría de costo directo, puede especificar el costo en USD/KW de la capacidad del parque eólico, el costo fijo en USD o el costo por turbina en USD / turbina. Si especifica más de un costo, por ejemplo, un costo básico en USD /KW y USD / turbina, el SAM suma los valores para calcular el costo total de la categoría.

- c) Costos de operación y mantenimiento

El SAM permite ingresar los costos de operación y mantenimiento de tres maneras: Fijo anual, fijo por capacidad y costo variable por generación.

Para cada categoría de costos de O & M, se puede especificar una Tasa de escalamiento anual opcional para representar el aumento anual esperado en el costo de operación y

mantenimiento por encima de la tasa de inflación anual especificada en la página Parámetros financieros.

Parámetros financieros.

Este módulo describe las entradas de Parámetros financieros para el modelo financiero comercial.

- a) Parámetros de préstamos comerciales.
- b) Fracción de deuda, porcentaje del costo de capital neto a ser prestado.

Incentivos.

El módulo Incentivos le permite definir los parámetros para los siguientes tipos de créditos impositivos e incentivos en efectivo.

Un crédito fiscal es una cantidad que se deduce del impuesto a la renta del proyecto:

- Créditos fiscales a la inversión (ITC)
- Créditos fiscales de producción (PTC)

Un incentivo en efectivo es una cantidad pagada al proyecto que contribuye al flujo de efectivo anual del proyecto:

- Incentivo basado en la inversión (IBI)
- Incentivo basado en la capacidad (CBI)
- Incentivo basado en la producción (PBI)

Tarifas de electricidad.

El módulo de tarifas de electricidad determina cómo el SAM calcula la factura mensual de electricidad y cómo se compensa económicamente el proyecto por la electricidad generada por el sistema de energía renovable para los modelos financieros.

3.1.2 Datos requeridos.

El programa se encuentra organizado en diversos módulos tal como apreciamos anteriormente, a continuación, en la Tabla 9 se aprecian los principales módulos y los datos de entrada requeridos por cada uno para realizar una correcta simulación de rendimiento.

Tabla 9. Datos de entrada requerido en cada módulo de SAM.

Módulo	Datos de Entrada
Recurso Eólico	1. Velocidad de viento [m/s]
	2. Dirección de viento [° grados]
	3. Temperatura [° C]
	4. Presión [ATM]
Turbina Eólica	1. Modelo Comercial de Turbina
	2. Altura de Góndola [m]
Parque Eólico	1. Capacidad del Parque Eólico [KW]
	2. Pérdidas en producción eléctrica [%]
	3. Coeficiente de turbulencia
	4. Modelo de estela de viento
Costo del sistema	1. Costo de la capacidad del parque [USD/KW]
	2. Costo fijo de O y M por capacidad [USD/KW]
	3. Voltaje de interconexión [V]
	4. Distancia de Interconexión [m]
	5. Terreno del sitio
	6. Tiempo de construcción [meses]
	7. Tamaño de la construcción [ft ²]
Parámetros financieros	1. Porcentaje de Deuda [%]
	2. Plazo del préstamo [años]
	3. Tasa de préstamo [%]
	4. Período de análisis [años]
	5. Tasa de Inflación [%]
	6. Tasa de descuento real [%]
Tarifas de Electricidad	1. Tasa de venta

Fuente. Elaboración propia con datos de SAM's Help system

SAM realiza la simulación para cada modelo de rendimiento con un periodo específico de tiempo de acuerdo con el archivo de recurso eólico. Para el caso de energía eólica se usa el formato SRW, que es un archivo de texto delimitado por comas, los datos de recurso eólico son: dirección de viento, velocidad de viento, temperatura y presión, además pueden ser de una sola altura sobre el nivel del mar o de múltiples alturas. El archivo de recurso eólico toma en cuenta el modelo de año típico en el cual se usa un dato por hora de un año en específico que representa el recurso eólico y las condiciones del clima durante una serie de años, entonces debe contener 8760 valores de cada hora durante un año por cada uno de los cuatro datos de recurso eólico, lo que nos da como resultado un archivo de 35,040 datos para cada simulación, esto permite tener un mejor análisis de rendimiento.

3.2 Descripción de la metodología del modelo SAM.

3.2.1 Recurso eólico.

3.2.1.1 Velocidad de Viento.

SAM determina la velocidad del viento en la altura de la góndola de la turbina a partir de la velocidad del viento en el archivo meteorológico para la hora dada. El archivo de clima puede contener datos de velocidad del viento a una o más alturas de datos. Si la altura de la góndola de la turbina es la misma que una de las alturas de datos en el archivo de clima, SAM usa esa velocidad del viento. De lo contrario, determina la altura de datos más cercano a la altura de la góndola y utiliza el coeficiente de cizallamiento para estimar la velocidad del viento a la altura de la góndola.

$$V_{h,j} = V_{0,j} \times \left(\frac{h}{h_0}\right)^\alpha$$

[1]

Donde:

$V_{h,j}$ = Velocidad del viento a la altura de la góndola de la turbina (h) por hora (j)

$V_{0,j}$ = Velocidad del viento desde el archivo meteorológico a la altura de los datos más cercana a la altura del centro de la turbina durante una hora (j)

h = Altura de la góndola de la turbina

h_0 = Altura de datos (altura a la que se midió la velocidad del viento en el archivo de clima) más cercana a la altura de la góndola de la turbina

α = Coeficiente de cizalladura en la página de entrada de la turbina

3.2.1.2 Potencia de salida de la turbina a la velocidad del viento de la altura de la góndola.

Para determinar la salida de potencia de la turbina en una hora dada, el SAM encuentra la velocidad del viento en la altura de la góndola en la tabla de curvas de potencia de la turbina y busca la potencia de salida de la turbina para esa velocidad del viento. Si la velocidad del viento en la altura de la góndola cae entre dos puntos en la tabla de curvas de potencia, el SAM usa la interpolación lineal para estimar la salida.

$$P(V_{h,j}) = \frac{P(V_2) - P(V_1)}{V_2 - V_1} \times (V_{h,j} - V_1) + P(V_1)$$

[2]

Donde:

$P(V_{h,j})$ = Potencia de salida de la turbina a la altura de la góndola de la velocidad del viento por hora (j).

$V_{h,j}$ = Velocidad de viento de la altura de la góndola por hora (j).

$P(V)$ = Potencia de salida de la turbina a la velocidad del viento V de la curva de potencia.

V_1 y V_2 = Siguiente velocidad de viento de la curva de potencia más pequeña y más grande a la velocidad del viento de la altura de la góndola, respectivamente.

3.2.1.2.1 Potencia de salida de la turbina ajustada a la densidad del aire.

SAM supone que la curva de potencia de la turbina eólica es para una turbina instalada a nivel del mar. El modelo ajusta la potencia de salida de la turbina a la velocidad del viento de la altura de la góndola durante una hora determinada a la densidad del aire en la ubicación de la turbina en esa hora. La densidad del aire por hora depende del valor de la presión atmosférica del archivo meteorológico:

$$\rho_j = \frac{p_j}{R_{sp} \times T_j}$$

[3]

Donde:

ρ_j = Densidad del aire en la ubicación de la turbina por hora (j).

p_j = Presión atmosférica en la ubicación de la turbina desde el archivo de clima por hora (j) convertida de atm a Pa.

R_{sp} = Constante de gas específica para aire seco (287.058 J / kg · K).

T_j = Temperatura del archivo meteorológico para la hora (j) convertida de ° C a K.

3.2.1.2.2 Potencia de salida de la turbina eólica ajustada en W en una hora determinada.

$$P_j = P(V_{h,j}) \times \frac{\rho_j}{\rho_0}$$

[4]

Donde:

V_j = Velocidad del viento a la hora j del archivo meteorológico.

$P(V_{h,j})$ = Potencia de salida de la turbina a la velocidad del viento $V_{h,j}$ de la curva de potencia de la turbina.

ρ_j = Densidad del aire a la hora j del archivo del clima.

ρ_0 = Densidad del aire a nivel del mar, 1.225 kg / m³ a 15 ° C.

3.2.1.3 Producción eléctrica.

La producción eléctrica horaria del parque eólico es la suma de la producción eléctrica de todas las turbinas, ajustada por el factor de pérdidas del parque eólico:

$$P_{wf,j} = \frac{L}{100\%} \times \sum_{n=1}^N P_{j,n}$$

[5]

Donde:

$P_{wf,j}$ = Potencia eléctrica de salida del parque eólico en horas j en KWh / h, (Este valor no se muestra en la página de resultados del SAM).

L = Factor de pérdida, pérdidas de parques eólicos en la página de entrada de parques eólicos.

$P_{j,n}$ = Salida eléctrica de la turbina n en horas j en KWh / h.

N = Cantidad de turbinas en el parque eólico.

3.2.1.4 Sistema de producción eléctrica anual.

La producción eléctrica anual del sistema es la suma de la producción de las turbinas ajustada por los factores de ajuste de rendimiento. El SAM informa este valor en la página Resultados como Energía anual:

$$Q_{SYS} = \sum_{n=1}^{8760} (P_{wf,j} \times F_{adj,j})$$

[6]

Donde:

Q_{sys} = Salida de energía eléctrica anual ajustada del sistema en KWh.

$P_{wf,j}$ = Potencia eléctrica del parque eólico en horas j en KWh / h.

$F_{adj,j}$ = Factor de ajuste por hora definido en la página de entrada (Ajuste de rendimiento en SAM).

3.2.1.5 Factor de capacidad.

El factor de capacidad del sistema es la relación entre la producción eléctrica anual del sistema y su producción potencial en la capacidad nominal del parque eólico:

$$K = \frac{Q_{SYS}}{P_m \times 8760}$$

[7]

Donde:

K = Factor de capacidad del sistema.

Q = Salida eléctrica anual total del sistema en KWh después de los ajustes de rendimiento.

P_m = Potencial nominal del parque eólico en KW.

8760 = Cantidad de horas en un año.

3.2.2 Indicadores Financieros.

Los indicadores financieros son la selección de los resultados de un solo valor del modelo financiero que aparece en tablas en la página Resumen en forma de resultados generales.

Los indicadores financieros se calculan a partir de los valores en el flujo de caja del proyecto.

3.2.2.1 Costo nivelado real y nominal.

Para todos los modelos financieros, SAM calcula los valores de los costos nivelados tanto reales como nominales. El costo nivelado (LCOE) real es a dólar constante ajustado a la inflación. El LCOE nominal es un valor actual en dólares.

La elección de LCOE real o nominal depende del análisis. Los dólares reales (constantes) pueden ser apropiados para que los análisis a largo plazo representen muchos años de inflación a lo largo de la vida del proyecto, mientras que los dólares nominales (actuales) pueden ser más apropiados para los análisis a corto plazo.

Para el costo real nivelado, la tasa de descuento real aparece en el término de producción de energía total del denominador:

$$LCOE (real) = \frac{-C_0 - \frac{\sum_{n=1}^N C_n}{(1 + d_{real})^n}}{\frac{\sum_{n=1}^N Q_n}{(1 + d_{real})^n}}$$

[8]

De manera similar, para el costo nivelado nominal, la tasa de descuento nominal aparece en el término de producción de energía total del denominador:

$$LCOE (nominal) = \frac{-C_0 - \frac{\sum_{n=1}^N C_n}{(1 + d_{nom})^n}}{\frac{\sum_{n=1}^N Q_n}{(1 + d_{nom})^n}}$$

Donde:

Q_n (KWh)= La electricidad generada por el sistema en el año n . El modelo de rendimiento calcula este valor en función de los datos meteorológicos y los parámetros de rendimiento del sistema.

N = Período de análisis en años (Típicamente equivalente al tiempo de vida útil del proyecto o el periodo de vida de inversión)

C_0 = Monto de la inversión de capital del proyecto.

C_n = Costo anual del proyecto en el año n .

d_{real} = La tasa de descuento real. Ésta es la tasa de descuento sin inflación.

d_{nom} = La tasa de descuento nominal. Ésta es la tasa de descuento con la inflación.

3.2.2.1.1 Valor presente neto.

El valor presente neto (VPN) de un proyecto es una medida de la viabilidad económica de un proyecto que incluye ingresos y costo. En general, dada la tasa de descuento que se asume, un valor presente neto positivo indica un proyecto económicamente viable, mientras

que un valor presente neto negativo indica un proyecto económicamente inviable. Debe evaluar el VPN junto con otras métricas como el factor de capacidad, la tasa interna de retorno, el período de recuperación de la inversión, el tamaño de la deuda, etc.

El VPN es el valor actual del flujo de efectivo después de impuestos descontado al año uno utilizando la tasa de descuento nominal:

$$VPN = \sum_{n=0}^N \frac{C_n}{(1 + d_{nom})^n}$$

[9]

Donde:

C_n = Flujo de efectivo después de impuestos en el Año n.

N = Período de análisis en años. (típicamente coincide con el tiempo de vida útil del proyecto o el periodo de vida de inversión)

d_{nom} = Tasa de descuento nominal.

3.2.2.1.2 Costo neto de capital.

Para los modelos comerciales, SAM considera el costo neto de capital como el costo total instalado que se indica en el módulo Costos del sistema:

$$\begin{aligned} \text{Costo neto de capital} \\ &= \text{Costo total del sistema} - \text{Incentivo basado en inversión (IBI)} \\ &- \text{Incentivo basado en capacidad (CBI)} \end{aligned}$$

[10]

3.2.2.1.3 Capital.

Para los proyectos con deuda a plazo, el capital es la cantidad de efectivo invertido por el propietario o inversionista del proyecto:

$$\text{Capital (\$)} = \text{Costo neto de capital}^{44} (\$) - \text{Deuda (\$)}$$

[11]

3.2.2.1.4 Deuda.

Para los modelos financieros residenciales y comerciales, el tamaño de la deuda depende del porcentaje de la deuda y el costo neto de capital:

$$\text{Deuda} = \text{porcentaje de la deuda (\%)} \times \text{costo neto de capital (\$)}$$

[12]

⁴⁴ El costo neto de capital se refiere al Capital total invertido en el proyecto

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE CARACTERÍSTICAS TECNOLÓGICAS Y ECONÓMICAS DE PARQUES EÓLICOS.

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos del procesamiento y análisis de los datos de recurso eólico de los 32 sitios de México, uno para cada estado del país. Se parte del análisis de diversas tecnologías con el objetivo de determinar el tipo de turbina eólica, comportamiento de la tecnología para cada estado y, en su caso, concluir si es viable introducir proyectos eólicos al sector eléctrico a partir del análisis técnico económico realizado con el programa SAM.

Las variables analizadas son tipo (tecnología) de turbina eólica, Factor de Capacidad (FC), Costo nivelado de electricidad (LCOE) y Valor Presente Neto (VPN), esto con el fin de analizar las características del recurso eólico de cada estado del país y determinar la viabilidad de proyectos eólicos futuros.

4.1 Análisis de Características Tecnológicas de Parques Eólicos.

4.1.1 Selección de Emplazamiento.

Se llevó a cabo una selección de los posibles emplazamientos, para la construcción de parques eólicos en cada estado de la República Mexicana en función de los siguientes criterios:

1. Localizar Zonas de alta abundancia del recurso eólico

La energía que produce un aerogenerador depende directamente de la velocidad del viento que incide sobre sus palas. En México se cuenta con diversas velocidades de viento, teniendo en cuenta zonas muy identificadas. Como se explicó en el capítulo 2, dichas zonas son: el Istmo de Tehuantepec, el Golfo norte, el Altiplano norte y la Península de Baja California, sin embargo, resulta interesante estudiar la viabilidad de construir parques eólicos en otras regiones que pueden contar con las características ideales, y evitar la saturación de los sitios mencionados anteriormente. Para ello, se ha utilizado el mapa de velocidades de viento que proporciona el Renewable Energy Data Explorer– México (RED E-MÉXICO), una plataforma digital desarrollada por el Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL) conjuntamente con la Secretaría de Energía (SENER).

Es importante mencionar que, parte fundamental de cualquier análisis de energía eólica es la selección de los perfiles de viento del recurso eólico, por ello se compararon la base de datos de Meteororm, la base de datos interna de SAM y la base de datos de RED-MÉXICO, como resultado se encontraron muchas inconsistencias de datos de recurso eólico de acuerdo con lo presentado en INERE, por lo que se decidió utilizar datos de RED-MÉXICO. Esta red presentó datos más consistentes de acuerdo con mapas de vientos creados en años anteriores.

2. Descartar zonas con Áreas naturales protegidas y con asentamientos sociales.

Se obtuvieron los mapas con las zonas con Áreas naturales protegidas y los Humedales declarados de importancia internacional de RED-E MÉXICO, en conjunto con los mapas proporcionados por la plataforma digital Atlas de zonas con energías limpias (AZEL), desarrollada por SENER.

Así mismo, se identificaron las zonas con localidades urbanas y rurales del mapa de exclusiones sociales proporcionados en el AZEL.

3. Descartar zonas con Riesgos Naturales.

Se obtuvieron los mapas con zonas susceptibles de inundación, volcanes activos, alta incidencia de ciclones tropicales, incidencia de huracanes y zonas sismogénicas proporcionados por la plataforma digital del Inventario Nacional de Energías Limpias (INEL).

4. Eliminación de las zonas inadecuadas por su orografía.

La viabilidad de construcción y las condiciones de suelo están relacionados a la rugosidad del terreno, la selección de las zonas óptimas se realizó basado en los criterios de la Tabla 10, la zona elegida de cada estado se encuentra entre rugosidad del 0 al 1.

Tabla 10. Clase de rugosidad superficial.

Clase [Rugosidad]	Índice de Energía [%]	Tipo de Terreno
0	100	Superficie de agua
		Terreno abierto
		Superficie lisa
0.5	73	Pistas de hormigón (aeropuertos)
		Césped
1	52	Campos abiertos sin cerca
		Edificios dispersos
		Colinas suavemente redondeadas
1.5	45	Campos con alguna casa y arbolado de hasta 8 m situado como mínimo a 1250 m
2	39	Campo con alguna casa y arbolado de hasta 8 m situado como mínimo a 500 m
2.5	31	Campo con alguna casa y arbolado de hasta 8 m situado como mínimo a 250 m
3	24	Pueblos, bosques y terreno accidentado y desigual
3.5	18	Ciudades con edificios altos
4	13	Grandes ciudades con edificios muy altos

Fuente. Transmisión mecánica principal: caja multiplicadora de un aerogenerador marino, Alberto Vera García

5. Descartar zonas lejanas a la RNT.

Un elemento importante para el aspecto económico es que los emplazamientos se encuentren próximos a líneas eléctricas y subestaciones eléctricas ya construidas para poder distribuir la energía eléctrica generada. En el caso de que no exista ninguna línea eléctrica o subestación relativamente próxima a la ubicación del parque, sería conveniente realizar un análisis más exhaustivo para determinar si la construcción del parque eólico en dicho emplazamiento es rentable, o, por el contrario, la energía que se va a producir no compensa con el desembolso económico que se va a realizar, no solo para la construcción del parque, si no para la construcción de una línea eléctrica capaz de transportar la energía generada para su posterior consumo. Para esta característica se obtuvo el mapa de la Red Nacional de Transmisión (RNT) que se obtuvo de los diagramas unifilares del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) y del Catálogo de Nodos 2018 publicado por CENACE. Además, de acuerdo con las Reglas generales de interconexión al SEN para generadores con fuentes renovables (Comisión Reguladora de Energía, 2012), las centrales de generación de energía eléctrica, con energía renovable, con una capacidad mayor a 500 kW, la tensión de suministro debe ser mayor a 1 kV y hasta 400 kV, por lo que los nodos seleccionados cumplen con estas características.

De acuerdo con los criterios anteriores, en la Figura 34 se muestra la posible ubicación para instalación de parques eólicos en cada uno de los estados de la República Mexicana. También, se puede observar que en algunos estados la zona seleccionada es la costa ya que en dichos lugares se tienen mayores velocidades de viento, condiciones de emplazamiento favorables, sin obstáculos naturales para el viento y con zonas poco pobladas.



Figura 34. Mapa de México con la ubicación de los sitios óptimos para instalación de parques eólicos para cada estado.

Fuente. Elaboración propia, 2018.

En la Tabla 11 se observan los rangos de velocidad encontrados para cada uno de los estados de México. Se observa que 15 de los estados se encuentran en el rango de 0.5-2.10 m/s y que, según la escala de Beaufort, se encuentran entre calma, viento ligero y brisa ligera, lo que tiene un efecto sobre los aerogeneradores desde ninguno, hasta deficiente (Figueredo, 2007). Además, se encuentran por debajo de los 3 m/s que representan la velocidad mínima del viento a la que las palas de la turbina comienzan a girar. Estos sitios en primera instancia podrían ser descartados para implementación de parques eólicos, sin embargo, se tomará en cuenta el factor de planta en esos estados para descartarlos definitivamente de lugares con potencial de instalación de parques eólicos. También se puede observar que 17 estados, según la escala de Beaufort, se encuentran entre brisa suave, brisa moderada, brisa fresca y brisa fuerte, en algunos casos. Su efecto sobre el aerogenerador va desde aceptable hasta excelente, y cumplen con la velocidad mínima de 3 m/s, resulta interesante ver que estados como Chiapas, Jalisco y Puebla registren velocidades bajas aun cuando son estados con parques eólicos instalados actualmente. Asimismo, se observa que Oaxaca, Tamaulipas, Coahuila y Nuevo León no reportan rangos de velocidades muy altas, contrario a lo que se ha presentado en estudios anteriores de recurso eólico. Los sitios más interesantes son los estados de Baja California Sur (BCS) y Nayarit, que registran el rango de velocidad más alto en México, todo lo anterior considerando que se tomó en cuenta un lugar específico para cada estado dejando la posibilidad de que otras regiones de los estados cumplan con los criterios mencionados anteriormente para la selección de emplazamiento.

Tabla 11. *Rango de Velocidad de viento en los 32 estados de México.*

RANGO DE VELOCIDAD DE VIENTOS (m/s)	ESTADOS
0.5-2.10	Aguascalientes(AGS), Campeche(CAMP), Ciudad de México(CDMX), Colima(COL), Chiapas(CHIS), Durango(DGO), Estado de México(EDOMEX), Guanajuato(GTO), Guerrero(GRO), Hidalgo(HGO), Jalisco(JAL), Morelos(MOR), Puebla(PUE), Querétaro(QRO), Tlaxcala(TLAX).
2.10-3.60	Baja California (BC), Michoacán(MICH), San Luis Potosí(SLP), Zacatecas(ZAC).
3.60-5.70	Chihuahua(CHIH), Coahuila(COAH), Nuevo León(NL), Oaxaca(OAX), Quintana Roo (Q ROO), Sinaloa(SIN), Sonora(SON), Tabasco(TAB), Tamaulipas(TAMPS), Veracruz(VER), Yucatán(YUC).
5.70-8.80	Baja California sur (BCS), Nayarit(NAY).

Fuente. Elaboración propia. Datos Obtenidos de: REData Explorer México (NREL), 2018

4.1.2 Análisis del aerogenerador óptimo.

4.1.2.1 Selección de Aerogeneradores.

Para la selección del aerogenerador, se tiene en cuenta 3 características: Curva de potencia, Factor de Planta, la velocidad de viento, los cuales están interrelacionados de manera importante.

Para determinar el factor de planta y la energía anual producida se utilizó como dato principal la velocidad de viento. Tal y como se mencionó en el capítulo 3, el archivo de recurso eólico toma en cuenta el modelo de año típico en el cual se usa un dato por hora

de un año en específico que representa el recurso eólico y las condiciones del clima durante una serie de años, entonces debe contener 8760 valores durante un año.

De acuerdo con el Boston Strategies Internacional, las empresas con mayor presencia de turbinas eólicas instaladas en México son: Gamesa, Vestas, Acciona y Siemens, sin embargo, desde 2016 se consolidó la fusión Siemens Gamesa, en el mismo año se consolidó la fusión de Acciona wind con Nordex.

Para seleccionar el aerogenerador más adecuado, primero se analiza la información de recurso eólico, por lo que el primer criterio es la velocidad de viento. Para el presente análisis se seleccionaron turbinas para vientos de baja y media velocidad, ya que como se mencionó anteriormente la mayoría de los estados cuenta con vientos de estas características. El segundo criterio es el análisis del factor de planta en relación con la curva de potencia.

Se ha realizado un análisis de 6 aerogeneradores diferentes para comprobar qué aerogenerador ofrece un mayor rendimiento y producción para las velocidades que se dan en los emplazamientos que se están analizando. De esta manera, se puede comparar y decidir, con qué aerogenerador puede ser más conveniente realizar el diseño de los posibles emplazamientos analizados anteriormente.

En la Tabla 12 se puede observar los modelos seleccionados de los fabricantes Vestas, Siemens Gamesa y Acciona, que son las dominantes del mercado nacional e internacional y cuentan con aerogeneradores de cuarta generación enfocados a bajas y medias velocidades, además se observan las características principales de los modelos seleccionados.

Tabla 12. Modelos de Turbinas eólicas.

FABRICANTE	MODELO	POTENCIA (MW)	DIÁMETRO DE ROTOR (m)	VELOCIDAD MINIMA PARA OPERAR (m/s)	VELOCIDAD DE CORTE (m/s)
VESTAS	V110	2	100	3	20
GAMESA	G114-2000	2	114	3	20
SIEMENS GAMESA	SG2.1-114	2.1	114	3	20
SIEMENS GAMESA	SG2.6-126	2.6	126	3	20
ACCIONA WIND	AW125	3	125	3	25
VESTAS	V136	3.45	136	3	22

Fuente. Elaboración propia. Datos obtenidos de: Siemens Gamesa Renewable Energy, vestas.com y Nordex Acciona online, 2018

4.1.2.1.1 Curva de Potencia.

La curva de potencia de un aerogenerador es un gráfico que indica cuál será la potencia eléctrica disponible en el aerogenerador para cada velocidad de viento.

En la Figura 35, se muestra la curva de potencia de los modelos de turbinas eólicas seleccionadas para el análisis., Se puede observar que cuando se alcanza la velocidad mínima de funcionamiento de 3 m/s, para todos los modelos, la turbina comienza su generación de potencia, a medida que la velocidad del viento aumenta, la respuesta en potencia de la máquina va siendo mayor, luego viene un área de funcionamiento donde la potencia de salida de la turbina es constante, independiente de la velocidad del viento (esto se debe al sistema de control que posee la turbina), para los modelos V110, G114-2000,

SG2.6-114 y SG2.1-126 esto sucede entre los 10 y 20 m/s, para el modelo V136 se ubica entre los 12 y 22 m/s y por ultimo para el modelo AW125 se ubica entre los 12 y 25 m/s. Cuando la velocidad del viento supera un cierto umbral, el cual es su velocidad máxima, la turbina se desconecta y deja de producir energía (luego de los 20, 22 y 25 m/s según el modelo de turbina). Este fenómeno es necesario para proteger a la turbina de esfuerzos mecánicos extremos, además podemos observar que los modelos SG2.1-114 y SG2.6-126 son más aptos para obtener mayor generación a baja y media velocidad, con lo que se puede deducir que son los modelos óptimos para las características del recurso eólico en México, sin embargo esto se verificará después de analizar los factores de planta.

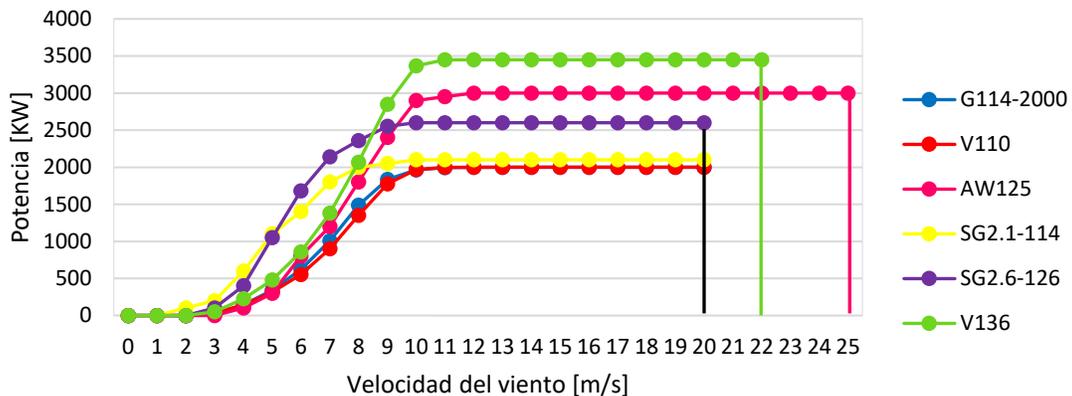


Figura 35. Curvas de potencia de los modelos de turbinas eólicas seleccionadas para el estudio.

Fuente. Elaboración propia. Datos obtenidos de: Siemens Gamesa Renewable Energy, vestas.com y Nordex Acciona online, 2018

4.1.2.1.2 Factor de Capacidad.

El Factor de Capacidad (FC) o Factor de Planta (FP), se define como la relación entre la producción eléctrica por un aerogenerador, o parque eólico, durante un período y la cantidad de energía que generaría el sistema si funcionara con su capacidad nominal cada hora del año durante el mismo periodo.

A nivel mundial los factores de capacidad de energía eólica típicos son del 20-40%⁴⁵, además se asume como aceptables los factores mayores a 20% para que un proyecto eólico se considere factible económicamente. En la Tabla 13, se muestra la calificación del funcionamiento de parques eólicos según el factor de capacidad (llamado también factor de planta).

⁴⁵ Renewable Energy Research Laboratory

Tabla 13. Calificación del funcionamiento de parques eólicos según el factor de capacidad.

FACTOR DE CAPACIDAD (FC)	CALIFICACIÓN
< 20 %	Inaceptable
20 %-25 %	Aceptable
25 %-30 %	Bueno
30%-40%	Muy Bueno
40 %-50 %	Excelente
> 50 %	Extraordinario

Fuente. Moreno Figueredo, et al. (2007). Diez preguntas y respuestas sobre energía eólica. La Habana: Ed. Cubasolar.

En la Figura 36, se observan los FC para cada estado según el modelo de turbina eólica analizada, la simulación se realizó para un parque de 10 MW, con una altura de buje de 115 m, siendo la altura máxima de buje que se puede simular en SAM, esto debido a que los datos de recurso eólico se encuentran a una altura de medición de 80 m y SAM permite un límite de ± 35 m.

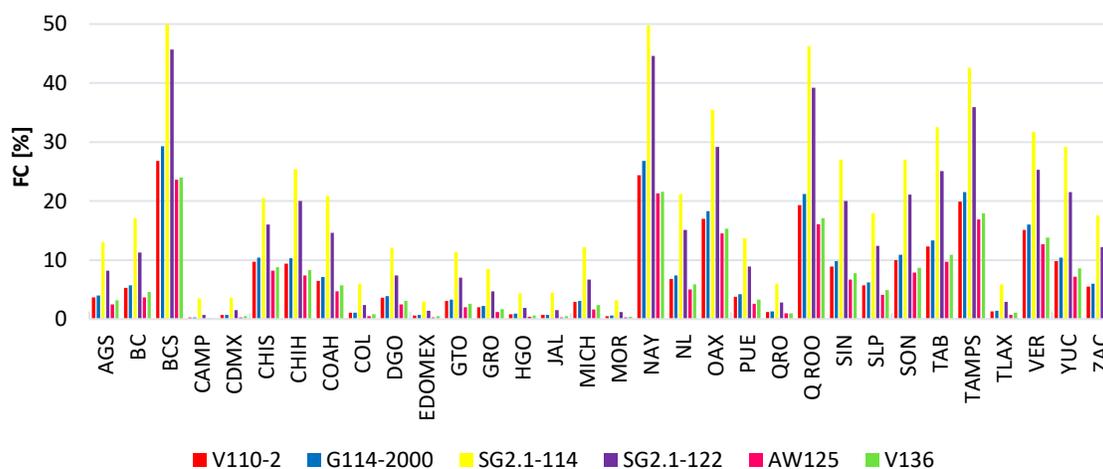


Figura 36. Factores de Capacidad de acuerdo con el modelo de turbina eólica.

Fuente. Elaboración propia. Datos obtenidos de: SAM, 2018

De la Figura 36 se observa para el modelo V110-2, Baja California Sur es el estado con mayor FC con 27%, seguido de Nayarit con un FP de 24%, después se encuentra Tamaulipas (20%), Quintana Roo (19%) y Oaxaca (17%), de acuerdo con la Tabla 13 sólo tres estados cuentan con factor de capacidad aceptable para el desarrollo de proyectos eólicos con este modelo de turbina, por lo tanto, los 29 estados restantes se ubican en la calificación de inaceptables, asimismo con el modelo G114-2000, 4 estados cuentan con FC aceptable, siendo Baja California Sur con un FC de 29%, Nayarit con 27 %, Tamaulipas y Quintana Roo con 22%, los 28 estados restantes se ubican como inaceptables, con el

modelo AW125 se obtuvieron los FC más bajos, sin embargo, se tienen dos estados con calificación aceptable, BCS (FC=24%) y Nayarit (FC=21%), los estados restantes son calificados como inaceptables. Resultados similares se obtuvieron con el modelo V136 donde BCS (FC=24%) y Nayarit (FC=22%) tienen calificación de aceptable. Con los modelos Siemens Gamesa se obtuvo un mayor número de estados con factores de capacidad aceptables, el modelo SG2.6-126 cuenta con 2 estados con excelentes factores de capacidad, BCS (46%) y Nayarit (45%), seguidos de Quintana Roo (39%) y Tamaulipas (36%) con factores de capacidad muy buenos. Oaxaca, Veracruz, Tabasco, Sinaloa, Sonora y Chihuahua con buenos factores de capacidad.

Con el modelo SG2.1-114 se obtuvieron los mejores factores de capacidad, en primer lugar se tienen a BCS y Nayarit registran FC de 50%, en segundo lugar se ubica Quintana Roo (FC=46%) y en tercer lugar se tiene a Tamaulipas (FC=43%) de acuerdo con la Tabla 13, estos estados cuentan con FC excelente, en cuarto lugar se ubica Oaxaca (FC=36%), en quinto lugar se tiene a Tabasco (FC=33%), en sexto lugar Veracruz (FC=32%), estos estados se califican como muy buenos de acuerdo con la Tabla 13, en seguida se ubican Yucatán (FC=29%), Sinaloa (FC=27%), Sonora (FC=27%), Chihuahua (FC=25%), Chiapas (FC=21%), Coahuila (FC=21%) y Nuevo León (FC=21%), cuya calificación es de bueno, los 19 estados restantes tienen una calificación de inaceptable.

4.1.2.1.3 Síntesis de Resultados.

Después del análisis de los factores de capacidad, el modelo de turbina óptimo para las características de recurso eólico en México es el SG2.1-114, ya que con este modelo se tienen 14 estados con potencial de instalación de parques eólicos, en general el modelo es el más adecuado debido a su diseño, ya que como se ve en la Figura 35, la curva de potencia indica que a bajas velocidades entrega mayor potencia que los otros modelos analizados, lo que permite un mayor aprovechamiento por los estados que cuentan con un rango de velocidades bajas (3 a 5 m/s), cabe destacar el caso de Baja California Sur y Nayarit los cuales presentaron las velocidades de viento más altas y en consecuencia los mayores factores de capacidad siendo calificados como excelentes para la instalación de proyectos eólicos.

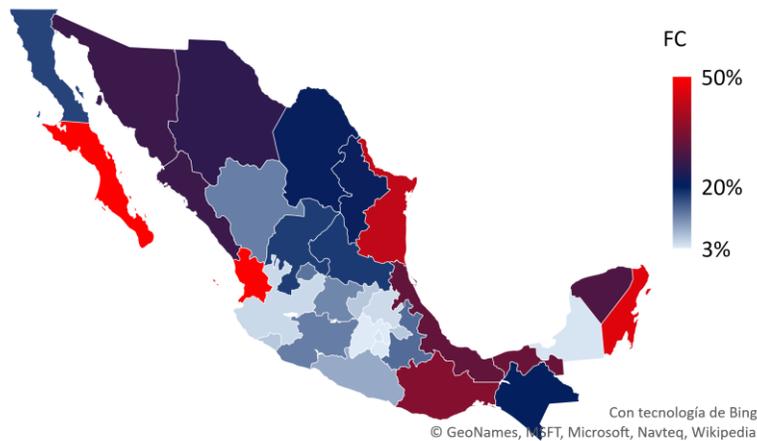


Figura 37. Factores de Capacidad obtenidos con el modelo SG2.1-114.

Fuente. Elaboración propia. Datos obtenidos de: SAM, 2018.

Después de analizar criterios tecnológicos tales como velocidad de viento y Factor de Capacidad, de acuerdo con la Figura 37, se concluye que los estados con potencial de instalación de parques eólicos son: Baja California Sur, Nayarit, Quintana Roo, Tamaulipas, Oaxaca, Tabasco, Veracruz, Yucatán, Sinaloa, Sonora, Chihuahua, Chiapas, Coahuila y Nuevo León, descartando el resto de los estados por ser calificados como inaceptables debido a la velocidad de viento y factores de capacidad obtenidos en el presente análisis.

4.2 Análisis Económico.

Además de realizar un análisis de características de referencia tecnológicas, también es importante hacer un análisis económico. Para el presente proyecto se analizó el LCOE y el VPN, el cual está en función del costo de la electricidad que es tomado de las tarifas eléctricas que en el presente proyecto se definió como los precios marginales locales (PML) publicados por CENACE. El objetivo fue tener una referencia de comparación y de calificación de aceptación de factibilidad de los proyectos anteriormente seleccionados.

Es importante mencionar que aspectos tales como la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el análisis de flujo de caja, no se incluyen en el presente proyecto, debido a que el cálculo de la TIR implica una corrida financiera supeditada a costos locales detallados, los cuales varían de región a región y resulta difícil caracterizarlos de primera instancia los proyectos deben ser más específicos, y el objetivo principal de la tesis es determinar parámetros de referencia tecnológica y de costos que, ayuden a determinar lugares en el país donde los proyectos eólicos son viables, con el fin de contar con información actualizada de características asociadas a México.

En este sentido, se han analizado los siguientes aspectos financieros:

1. Costo nivelado de electricidad (LCOE): Es una herramienta que permite analizar distintos proyectos de generación, que pueden ser de tamaños diferentes y/o de distintas tecnologías, y llevarlos a una unidad común de comparación. Esta unidad de comparación facilita la toma de decisiones del inversionista, permitiendo evaluar y comparar una cartera de proyectos respecto a sus costos.
2. Valor Presente Neto (VPN): Es utilizado para tomar decisiones sobre la rentabilidad de un proyecto, En otras palabras, el Valor Presente Neto permite analizar la factibilidad de un proyecto de inversión.
 - Cuando el Valor Presente Neto es mayor que cero ($VPN > 0$), es decir, cuando es positivo, indica que el proyecto es factible y debería aceptarse.
 - Cuando el Valor Presente Neto es menor que cero ($VPN < 0$), es decir, cuando es negativo, indica que no es factible el proyecto y debería rechazarse.
 - Cuando el Valor Presente Neto es igual a cero ($VPN = 0$), indica que no se obtienen beneficios adicionales en el proyecto, por tanto, es indiferente si se acepta o se rechaza.

Para poder obtener los parámetros descritos anteriormente, es necesario determinar datos de entrada requeridos por SAM, como son:

Tabla 14. *Parámetros iniciales para análisis económico.*

Vida útil [años] ¹	25
Costo total de instalación [USD/KW] ²	1477
Costo fijo de Operación y Mantenimiento [USD/KW] ³	38.1
Tasa de degradación de producción de energía [%] ⁴	1.31
Tasa de inflación [%] ⁵	6.4
Pérdidas en parques eólicos [%] ⁶	10
Tarifas de venta [USD/KWh] ⁷	PML
Porcentaje de Deuda [%] ⁸	0.5
Tasa de Préstamo [%] ⁹	7.5

Nota. 1) Recuperado de <http://www.ewea.org>; 2) Costo total de instalación para el año 2017, Recuperado de Renewable Power Generation Cost in 2017, IRENA; 3) Recuperado de PRODESEN 2018-2032; 4) Recuperado de How does wind farm performance decline with age? (Iain Staffell, Richard Green, 2014); 5) Tasa de Inflación media anual 2017 Recuperado de Worldwide inflation data; 6) Recuperado de Energies 2014; 7) Precios Marginales Locales Recuperado de CENACE, 8 y 9) Valores tomados a partir de proyectos consultados de años anteriores.

4.2.1 Determinación de NodoP.

Un NodoP o nodo de fijación de precios corresponde a uno o varios nodos de conectividad de la red, donde se modela la inyección o retiro físicos de energía y para el cual un Precio Marginal Local se determina para las liquidaciones financieras en el Mercado Eléctrico Mayorista.

El análisis económico a continuación se realizó únicamente para los estados con viabilidad técnica mencionados anteriormente, siendo: Baja California Sur, Nayarit, Quintana Roo, Tamaulipas, Oaxaca, Tabasco, Veracruz, Yucatán, Sinaloa, Sonora, Chihuahua, Chiapas, Coahuila y Nuevo León, descartando el resto de los estados por ser calificados como inaceptables.

En primer lugar, se procedió a determinar el NodoP para cada estado analizado, respetando el criterio de cercanía con los puntos de emplazamiento seleccionados anteriormente, esto con el fin de contar con los precios marginales locales (PML), para esto SAM requiere una base de datos de 8760 valores identificados como tarifas de venta, en la Tabla 15 se observan los NodosP seleccionados para cada estado de acuerdo con el emplazamiento, además se observa la región de control del SEN para cada nodo.

Tabla 15. *NodosP seleccionados para cada estado con viabilidad técnica.*

ESTADO	CLAVE DE NODO	NOMBRE DEL NODO	REGIÓN DE CONTROL DEL SEN
Baja California Sur	07CAD-115	Cabo San Lucas Dos	BAJA CALIFORNIA SUR
Chiapas	02ARR-115	Arriaga	ORIENTAL
Chihuahua	05CUN-115	Chihuahua Norte	NORTE
Coahuila	06AUA-138	Acuna	NORESTE
Nayarit	03TES-115	Tepic Uno	OCCIDENTAL
Nuevo León	06VKM-230	Ventika Manioras	NORESTE
Oaxaca	02JUD-115	Juchitán Dos	ORIENTAL
Quintana Roo	08MHH-115	Mahahual	PENINSULAR
Sinaloa	04LMI-115	Los Mochis Industrial	NOROESTE
Sonora	04EFR-230	El Fresnal	NOROESTE
Tabasco	02CDN-115	Cárdenas	ORIENTAL
Tamaulipas	06MTM-138	Matamoros	NORESTE
Veracruz	02LAV-400	Laguna Verde	ORIENTAL
Yucatán	08PPO-115	Puerto Progreso	PENINSULAR

Fuente. Elaboración propia. Datos obtenidos de: Mapa de la Red Nacional de Transmisión (RNT) de los diagramas unifilares del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) y del Catálogo de Nodos 2018 publicado por CENACE

4.2.2 Costo Nivelado de Electricidad.

En la Figura 38, se observan los costos nivelados de electricidad obtenidos de la simulación en SAM, para Baja California Sur, Nayarit, Quintana Roo y Tamaulipas. Se tienen costos nivelados de electricidad por debajo del mínimo para energía eólica y para ciclo combinado publicados por Lazard⁴⁶, mientras que Chihuahua, Oaxaca, Sinaloa, Sonora, Veracruz y Yucatán, se encuentran en el rango de costos nivelados publicados por Lazard. Por su parte Chiapas, Coahuila y Nuevo León tienen costos nivelados por encima del máximo para energía eólica; sin embargo, es notable que cinco de los estados analizados se encuentran por debajo del LCOE mínimo de Ciclo Combinado y nueve estados se encuentran en el rango de LCOE de Ciclo Combinado. Además, todos los costos nivelados obtenidos en SAM se encuentran por debajo del costo nivelado máximo para ciclo combinado, que es de 78 USD/MWh, lo que representa una ventaja competitiva para la implementación de proyectos eólicos bajo las características analizadas en el presente análisis.

⁴⁶ Lazard's Levelized Cost of Energy Analysis; Lazard, 2017.

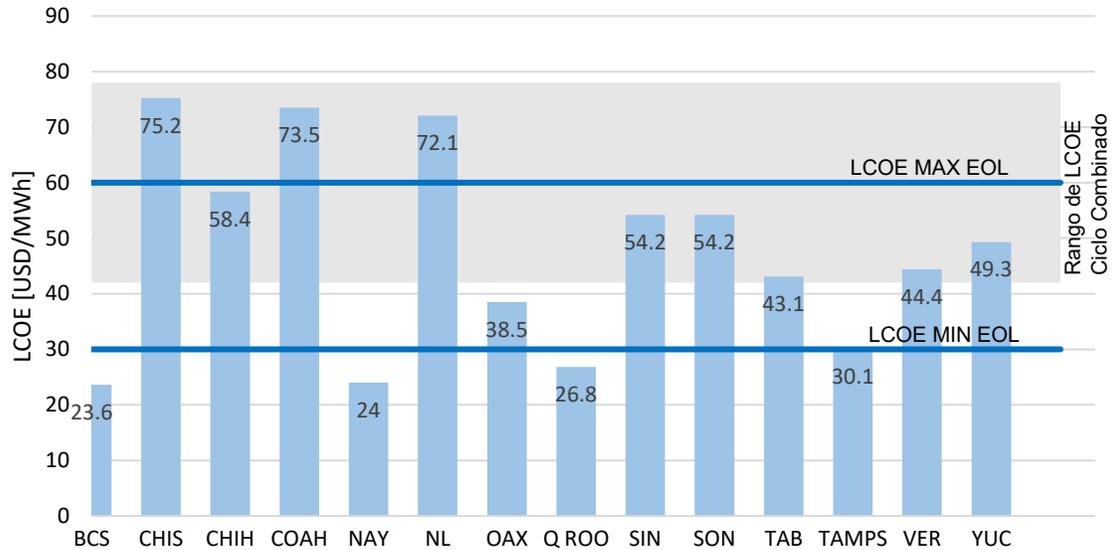


Figura 38. Costos Nivelados de Electricidad obtenidos de la simulación con SAM.

Fuente. Elaboración propia. Datos obtenidos de: SAM, 2018.

En la Figura 39, se muestran los factores de capacidad para los estados analizados a diferentes alturas de buje, se decidió realizar el análisis para 80 m, 100 m y 115 m, ya que SAM especifica que la diferencia entre la altura de buje y la altura correspondiente a los datos de velocidad del viento más cercano en el archivo debe ser ± 35 m, siendo la altura de medición del recurso eólico de 80 m. Además, se puede observar el crecimiento porcentual en el factor de capacidad de la simulación a 80 m de altura de buje con respecto a la simulación con 115 m que es la altura máxima para este análisis.

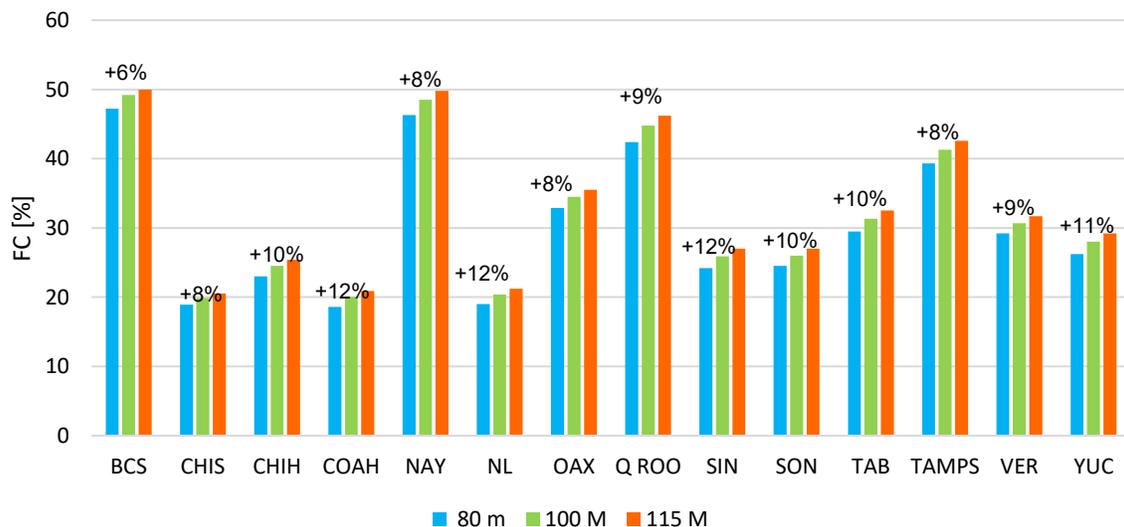


Figura 39. Factores de Capacidad a 80 m, 100 m y 115 m de altura de buje.

Fuente. Elaboración propia. Datos obtenidos de: SAM, 2018.

En la Figura 40, se muestran los costos nivelados de electricidad para los estados analizados a diferentes alturas de buje, además se observa el decremento porcentual para cada estado. En relación con la Figura 39 se observa que a mayor altura se tienen mayores factores de capacidad y por lo tanto menores costos nivelados de electricidad, esto debido a que a mayor altura se tiene mayor velocidad de viento.

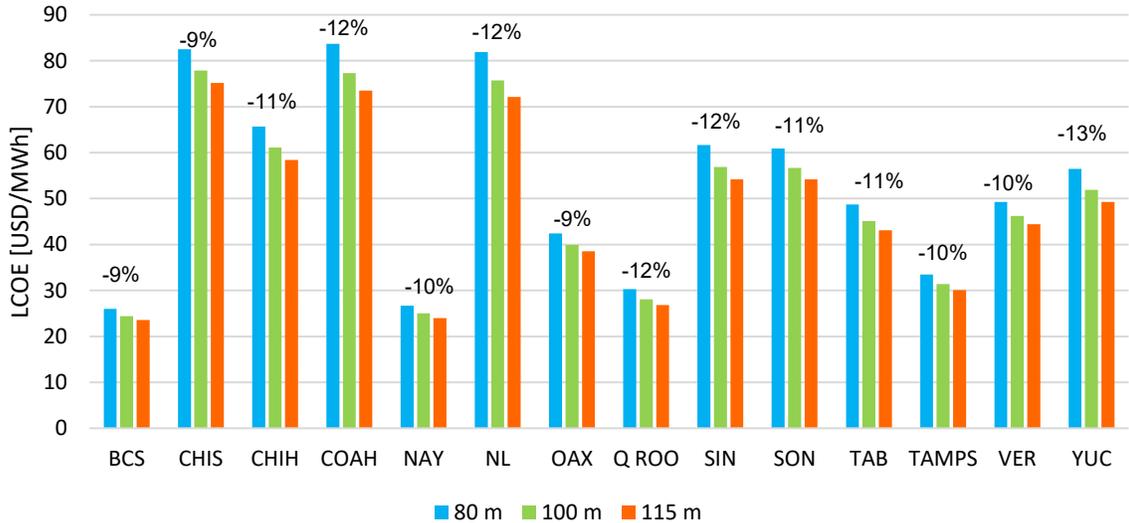


Figura 40. Costos nivelados de electricidad a 80 m, 100 m y 115 m de altura de buje.

Fuente. Elaboración propia. Datos obtenidos de: SAM, 2018.

4.2.3 Valor Presente Neto.

Como se observa en la Tabla 14, se seleccionó un porcentaje de deuda del 50% esto considerando que una estructura de capital óptima teórica que se basa en el equilibrio de los beneficios y costos del financiamiento de deuda, la tasa de endeudamiento ideal se sitúa entre el 40% y el 60%, ya que si la razón de endeudamiento se sitúa por encima del 60% significaría que la empresa está dejando a terceros su financiación, perdiendo autonomía. Si, por el contrario, la razón de endeudamiento es inferior al 40% indica que la empresa presenta un nivel de exceso de capitales propios superior al recomendable.

En la Tabla 16, se observan los valores presentes netos obtenidos para los estados analizados, el costo neto de capital es el mismo debido a que se utilizó un costo total de instalación de 1477 USD/KW, además se consideró un parque eólico con una capacidad de 100 MW y el modelo SG2.1-114 de turbina eólica para todas las simulaciones realizadas. Cabe mencionar que, aunque se consideró un parque de 100 MW al realizar las simulaciones la capacidad fue de 98.7 MW, debido a que la potencia del modelo es de 2.1 MW y con estas características se emplea un total de 47 aerogeneradores. Lo importante de estos resultados es que para todos los estados el VPN resulta positivo lo que indica que el proyecto es factible y debería aceptarse, sin embargo, debido a que el análisis financiero

requiere una serie de datos macroeconómicos específicos deben realizarse estudios de mercado y financieros específicos para cada proyecto y así determinar su factibilidad de acuerdo con características reales.

Tabla 16. *Valores Presentes Netos obtenidos en el análisis.*

	VPN	COSTO NETO DE CAPITAL (CAPITAL TOTAL INVERTIDO)
BCS	\$ 407,976,448.00	\$ 145,779,904.00
CHIS	\$ 70,234,496.00	\$ 145,779,904.00
CHIH	\$ 125,686,512.00	\$ 145,779,904.00
COAH	\$ 74,663,776.00	\$ 145,779,904.00
NAY	\$ 400,387,136.00	\$ 145,779,904.00
NL	\$ 78,652,680.00	\$ 145,779,904.00
OAX	\$ 239,065,024.00	\$ 145,779,904.00
Q ROO	\$ 360,420,576.00	\$ 145,779,904.00
SIN	\$ 143,923,888.00	\$ 145,779,904.00
SON	\$ 143,773,568.00	\$ 145,779,904.00
TAB	\$ 205,568,928.00	\$ 145,779,904.00
TAMPS	\$ 319,332,160.00	\$ 145,779,904.00
VER	\$ 196,920,608.00	\$ 145,779,904.00
YUC	\$ 168,312,496.00	\$ 145,779,904.00

Fuente. Elaboración propia. Datos obtenidos de: SAM, 2018

4.3 Caso Particular de Estudio: Baja California Sur.

Con el fin de profundizar en el conocimiento de las funciones del programa SAM se analizó el estado de Baja California Sur, la elección de dicho estado resulta del análisis anterior donde BCS obtuvo el factor de capacidad más alto que Oaxaca y Yucatán que tradicionalmente son conocidos por su gran capacidad de generación eólica, asimismo presentó el menor costo nivelado de electricidad.

De acuerdo con los Precios Marginales Locales publicado por CENACE, de los 14 estados analizados Baja California Sur presenta el mayor PML promedio, con lo que se propone como un estado en el cual se puede favorecer con una mayor adopción de fuentes de energía menos contaminantes y de bajo costo como resulta ser la energía eólica, ya que de la totalidad de la energía despachada en BCS el 97.79% proviene de Centrales Térmicas según datos de CENACE.

4.3.1 Series de tiempo.

Los datos de series de tiempo son datos hora por hora a lo largo de un año, para variables tales como: velocidad de viento, dirección de viento, temperatura, presión, potencia del sistema generada. A continuación, se observan las series de tiempo obtenidas para Baja California Sur.

En la Figura 41, se observa la variabilidad estacional de la velocidad de viento la cual sufre variaciones dependiendo de las estaciones del año, para verano se tienen vientos más fuertes que los vientos de invierno. La siguiente figura ilustra el efecto de la variabilidad del viento estacional para el estudio realizado en Baja California Sur.

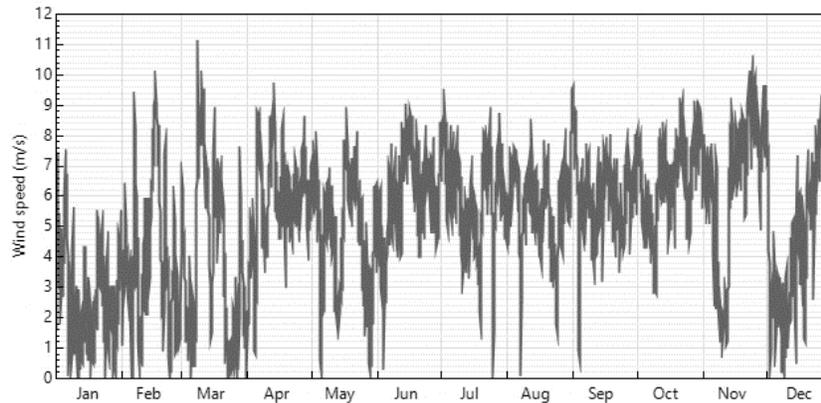


Figura 41. Variación horaria de Viento de Baja California Sur para 2016.

Fuente. SAM, 2018

En la Figura 42, se observa el perfil horario del mes de marzo 2016 para Baja California Sur. En la mayoría de las localizaciones del planeta el viento sopla más fuerte durante el día que durante la noche, esta variación se debe principalmente a las diferencias de temperatura, las cuales son mayores durante el día (presencia del sol). Adicionalmente, el viento presenta también más turbulencias y tiende a cambiar de dirección más rápidamente durante el día que durante la noche (Ver Figura 43).

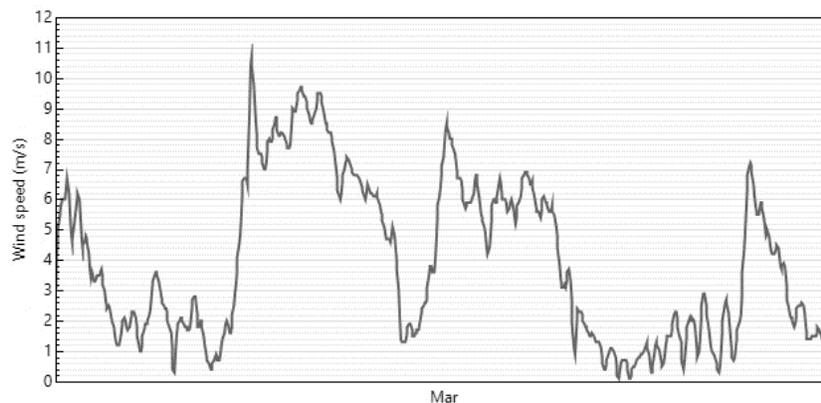


Figura 42. Perfil horario de velocidad de viento para el mes de marzo del 2016 en Baja California Sur.

Fuente. SAM, 2018

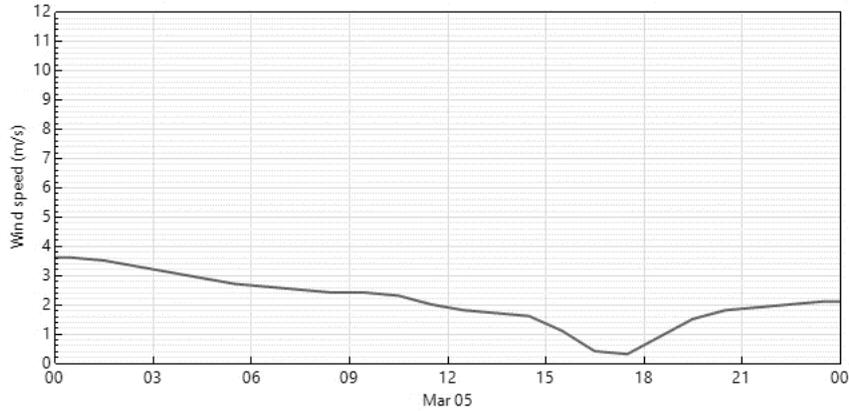


Figura 43. Perfil de velocidad de viento para el día 5 de marzo del 2016 de Baja California Sur.

Fuente. SAM, 2018

Como se observa en la Figura 42, el recurso eólico presenta mayores fluctuaciones en las velocidades medias horarias, sin embargo las fluctuaciones en la velocidad media anual tienden a ser más bajas, esto implica que la energía anual generada por un parque eólico podría tener variaciones de un año al otro muy bajas. Por lo anterior, las series de tiempo obtenidas con SAM son de utilidad para visualizar la variabilidad del viento de manera anual. sin embargo, para contar con mayor certidumbre en el análisis de proyectos específicos, serían de gran utilidad herramientas de predicción climática.

En la Figura 44, se observa la potencia del sistema que es generada, para este caso es de 98.7 MW, para los meses de abril, junio, julio, agosto, septiembre, octubre y noviembre se tiene la mayor potencia del sistema, lo cual coincide con los meses con mayores velocidades tal como se observar en la Figura 41.

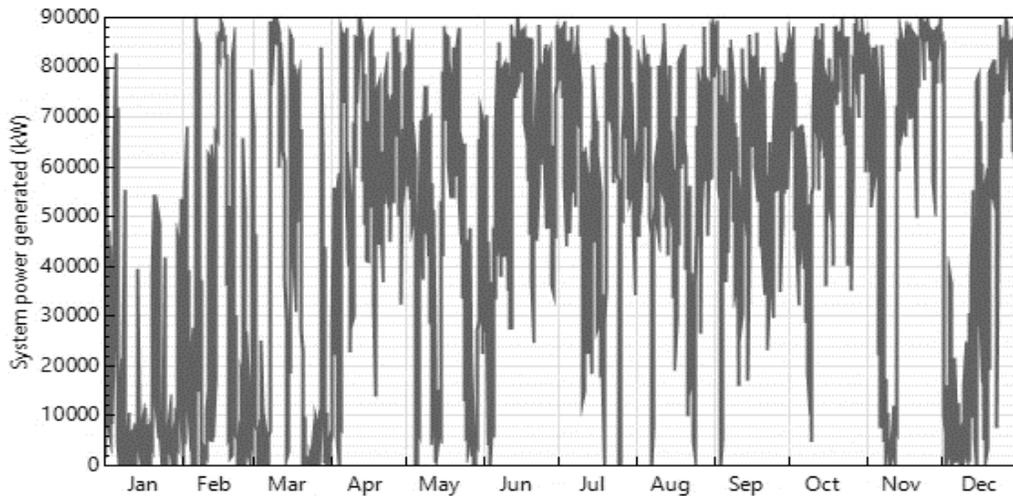


Figura 44. Potencia del sistema generada para Baja California.

Fuente. SAM, 2018

4.3.2 Perfiles.

La pestaña Perfil muestra los datos de las series de tiempo como un perfil diario promedio para cada mes del año, también se puede ver un perfil anual, que se calcula promediando todos los perfiles mensuales.

En la Figura 45, se observan los perfiles mensuales desde enero hasta diciembre para el año 2016, también muestra que abril, junio, julio, agosto, septiembre, octubre y noviembre son los meses con la mayor velocidad de viento y en la Figura 43, se ilustra el perfil anual como un perfil diario promedio.

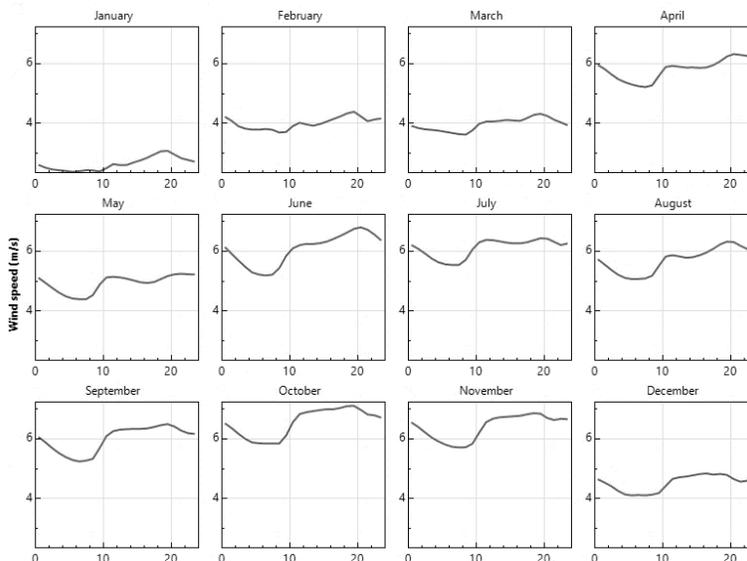


Figura 45. Perfil de velocidad de viento mensual.

Fuente. SAM, 2018

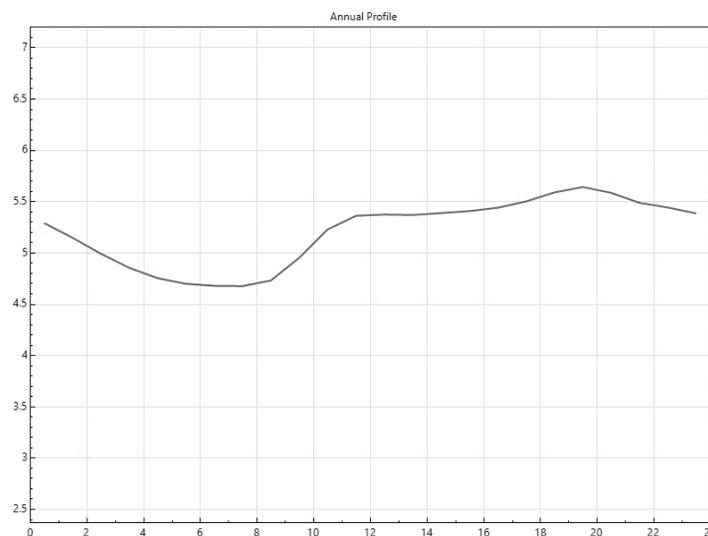


Figura 46. Perfil anual diario promedio de velocidad de viento.

Fuente. SAM, 2018

Además, SAM permite elegir dos variables para mostrar en un solo gráfico tal como se observa en la Figura 47, en la que se observa la íntima relación entre velocidad de viento y potencia del sistema generada, con lo cual se comprueba la importancia de la veracidad y fiabilidad de los datos de recurso eólico.

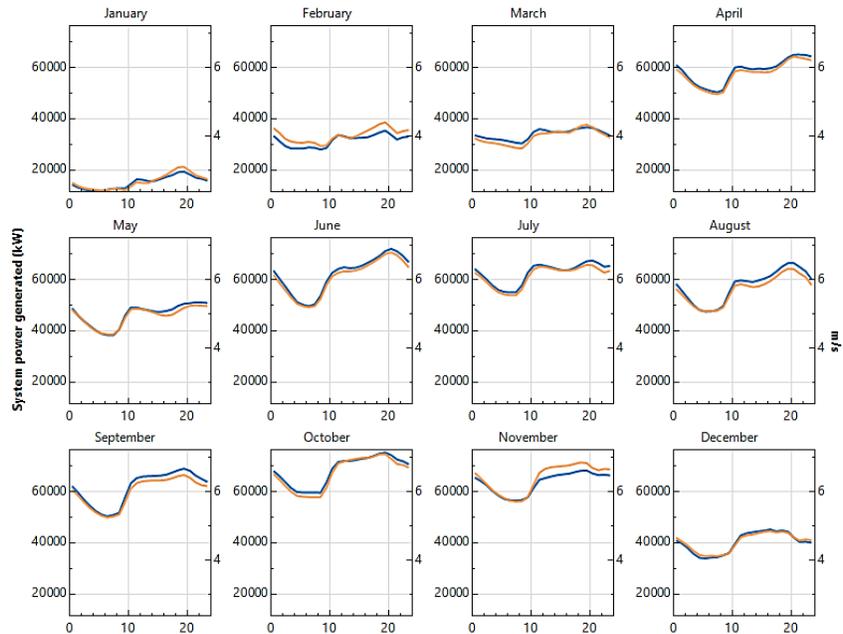


Figura 47. Perfil de Velocidad de viento (Gráfica Naranja) contra perfil de potencia de sistema generada (Gráfica Azul).

Fuente. SAM, 2018

4.3.3 Mapas de calor.

La pestaña Mapas de calor permite ver cómo los datos varían según la hora del día y la época del año en el mismo gráfico. La época del año está en el eje X, y la hora del día está en el eje Y, sólo se puede ver una variable a la vez en el mapa de calor. (ver Figura 48).



Figura 48. Mapa de calor de Potencia del sistema generada (KWh).

Fuente. SAM, 2018

En conclusión, se afirma que SAM representa una herramienta de análisis muy adecuada para evaluar diferentes proyectos. Para el caso de energía eólica resulta muy favorable como se muestran gráficos de resultados de los modelos de rendimiento, ya que permite una mejor visualización de la variabilidad del recurso y las características de éste, así como, la relación con la energía generada por el sistema.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y PROPUESTAS.

En este capítulo se muestran las conclusiones de acuerdo con la investigación realizada y con los objetivos planteados; asimismo, se muestran las propuestas que se tienen para complementar el estudio realizado y futuros temas de investigación para proyectos eólicos enfocados a la generación eléctrica en México.

5.1 Conclusiones.

El presente proyecto de tesis tuvo como principal objetivo investigar cuáles deberían ser los costos y parámetros de referencia tecnológica de las plantas eólicas que se proponen como candidatas para la optimización simultánea de generación y transmisión, teniendo en cuenta el recurso eólico disponible en cada región, la demanda de cada región y la infraestructura de generación y transmisión del sistema eléctrico nacional.

De acuerdo con la investigación realizada y los resultados presentados en el capítulo 4, se concluye lo siguiente:

Se constató un gran problema derivado de la falta de acceso a la información actualizada y confiable. En México aún no se cuenta con la suficiente información sobre el potencial de recursos renovables, ni con las características del desempeño de las tecnologías y sus costos que reflejen realmente la situación de la energía eólica en el país. Además, la información a la cual se tuvo acceso difiere respecto a las diversas fuentes de datos consultada y, en general, no se observa consistencia, debido a que los datos estadísticos, llegan a ser imprecisos y las herramientas de software tienen una base de datos integrada que, en la mayoría de las veces es teórica, impide tener certeza sobre los resultados obtenidos. Aunado a la falta de información que, por razones de índole comercial, no todas las compañías de turbinas eólicas permiten el acceso a datos como la curva de potencia, lo que impide manejar una base de datos con información con mayor cantidad y precisión, además de una mayor diversidad de modelos de turbinas eólicas, lo que permitiría seleccionar las más convenientes en cada sitio para obtener un mayor aprovechamiento del recurso eólico de cada estado y/o región del país.

De acuerdo con el análisis de recurso eólico que se desprende de esta tesis, México cuenta zonas de buen potencial de recursos eólicos. También como resultado de este estudio, se aprecia que 15 de los estados de la República presentan velocidades de viento que tienen un efecto deficiente sobre los aerogeneradores, puesto que se encuentran por debajo de los 3 m/s recordando que este valor representa la velocidad mínima del viento a la que las palas de la turbina comienzan a girar. También se determinó que 17 presentan velocidades aceptables y excelentes para la instalación de parques eólicos, ya que satisfacen la velocidad mínima de 3 m/s; sin embargo, el análisis muestra que estados como Chiapas, Jalisco y Puebla, registran velocidades bajas aun cuando son estados con parques eólicos instalados actualmente. Asimismo, se muestra que Oaxaca, Coahuila y Nuevo León no

presentan rangos de velocidades muy altas contrario a lo que se ha presentado en estudios anteriores de recurso eólico. Definitivamente, lo más interesante es detectar que los estados de Baja California Sur (BCS) y Nayarit, registran el rango de velocidad más alto, siendo calificados como excelentes para la instalación de proyectos eólicos bajo las características del recurso eólico proporcionadas por RED-MEXICO NREL.

Después del análisis de los factores de capacidad obtenidos de la simulación con el programa SAM, se concluye que el modelo de turbina óptimo para las características de recurso eólico en México es el Siemens Gamesa SG2.1-114, ya que con este modelo se tienen 14 estados con potencial de instalación de parques eólicos. En general el modelo es el óptimo debido a su diseño, puesto que, de acuerdo con la curva de potencia, se desprende que, a bajas velocidades, entrega mayor potencia que los otros modelos analizados, lo que permite un mayor aprovechamiento por los estados que cuentan con un rango de velocidades bajas (3 a 5 m/s). Con esto, se llegó a la conclusión de que, en México, se recomienda la implementación de proyectos eólicos que consideren aerogeneradores de cuarta generación orientados a bajas y medias velocidades, porque con el diseño adecuado de la tecnología enfocada a vientos de baja velocidad, una mayor cantidad de estados aportarían energía eólica de calidad y cantidad aprovechable.

Los costos nivelados de electricidad obtenidos de la simulación en SAM, para Baja California Sur, Nayarit, Quintana Roo y Tamaulipas se encuentran por debajo de 30 USD/MWh que es el mínimo para energía eólica y debajo del mínimo para ciclo combinado que es de 42 USD/MWh, mientras que Chihuahua, Oaxaca, Sinaloa, Sonora, Veracruz y Yucatán, se encuentran en el rango de costo nivelado típico para energía eólica que se encuentra entre 30 USD/MWh y 60 USD/MWh; por su parte, Chiapas, Coahuila y Nuevo León tiene costos nivelados por encima del máximo para energía eólica de 60 USD/MWh, sin embargo todos los costos nivelados obtenidos en SAM se encuentran por debajo del costo nivelado máximo para ciclo combinado que se encuentra alrededor de los 78 USD/MWh, lo que representa una ventaja competitiva para la implementación de proyectos eólicos bajo las características analizadas en el presente trabajo.

Se determina un costo de inversión asociado a las plantas eólicas que se proponen en el presente análisis de \$145,779,904.00 USD, esto considerado un costo total de instalación de 1477 USD/KW para el año 2017, el costo de inversión asociado a las plantas eólicas puede variar dependiendo del año de análisis, de acuerdo con esto los valores presentes netos obtenidos para los estados analizados resultaron positivos, lo que indica que el proyecto es factible y debería aceptarse bajo las características definidas en el presente análisis, ya que en todos los caso se maximiza la inversión, aunque se deben realizar estudios más específicos debido a que los parámetros financieros varían de región a región y resulta difícil caracterizarlos de primera instancia.

En cumplimiento con los objetivos específicos se desarrolló una base de datos en Excel de recurso eólico para cada uno de los estados del país con 8760 datos con cuatro tipos de datos: velocidad de viento, dirección de viento, temperatura y presión, para una altura de medición de 80 m. Así mismo, se desarrolló una base de datos en Excel de los principales parámetros de referencia tecnológica de las plantas eólicas para la selección de la mejor tecnología por región, que incluyen modelo de turbina, potencia de la turbina y curva de

potencia, incluyendo turbinas eólicas de cuarta generación de los fabricantes Siemens Gamesa, Vestas, y Acciona Wind, ambas bases de datos pueden ser actualizadas.

Del análisis realizado a los resultados de las subastas a largo plazo de 2015, 2016 y 2017, se puede inferir que están basadas en datos sobreestimados del recurso eólico o están basados en una fuente de información diferente a la que se utilizó en este proyecto, esto aunado a la mejora tecnológica de turbinas eólicas en los últimos años. Sin embargo, considerar estos aspectos optimistas de las subastas, puede representar un riesgo para México porque si en realidad no se cuenta con el recurso eólico estimado tan alto, los factores de capacidad propuestos no se cumplirían, lo que conllevaría a no contar con la contribución de energía limpia esperada de origen eólico. Además, en las subastas se tiene una menor participación de la energía eólica con relación a la energía fotovoltaica ya que como resultado se tiene una adición de 2,289.22 MW eólicos contra 5,368.27 MW fotovoltaicos; a pesar de esto, con esta adición la capacidad instalada de energía eólica ascendería a 6,488.44 MW y la capacidad instalada de energía fotovoltaica ascendería a 5,582.27 MW, lo que refleja una mayor participación de energía eólica con el inicio de operación de los proyectos ganadores de las subastas.

Se comprueba que SAM representa una gran herramienta de análisis para diferentes proyectos. Para el caso de energía eólica resulta muy favorable como se muestran gráficos de resultados de los modelos de rendimiento, debido a que permite una mejor visualización de la variabilidad del recurso y las características de éste, así como la relación con la energía generada por el sistema, presenta un buen desempeño para el análisis técnico de factibilidad, sin embargo, para el análisis financiero presenta algunas limitaciones ya que se necesita una serie de datos macroeconómicos característicos del proyecto analizado, además de una mayor comprensión de conceptos financieros que permitan una interpretación de correcta de los resultados.

En general después del análisis realizado en el presente proyecto se concluye que la energía eólica cuenta con varios criterios favorables como son: Costo nivelado de electricidad más bajo en comparación con otras tecnologías de generación; corto tiempo de planificación de proyecto, manufactura y construcción, lo cual permite un rápido acceso al sistema eléctrico; cuenta con un potencial significativo para reducir emisiones de GEI debido a las bajas emisiones de CO₂ que genera, asociado principalmente a la fabricación, transporte e instalación de turbinas; sin embargo, también cuenta con criterios que no favorecen el desarrollo principalmente el impacto social asociado a la negociación y proceso de consulta entre desarrolladores y comunidades. Aunado a esto, se tienen organizaciones que dudan sobre los beneficios y los impactos ambientales del desarrollo de proyectos eólicos cuestionando la transparencia de las instituciones gubernamentales.

5.2 Propuestas.

Al término del estudio se derivan una serie de propuestas que se muestran a continuación:

- Desarrollar un proyecto de análisis que contemple más zonas de emplazamiento por estado, con el fin de caracterizar de manera más específica cada región de la república, esto con el propósito de contar con un estudio de recurso eólico más detallado,

mientras más información se analice en el estudio de recurso eólico, mayor será la oportunidad de obtener resultados positivos y característicos de más regiones en el país.

- Ampliar la base de datos de recurso eólico para contar con perfiles de viento a diferentes alturas de medición por ejemplo 100 m, 150 m y 200 m. Aunado a la implementación de herramientas de predicción climática, para contar con mayor diversidad y análisis de datos.
- Ampliar la base de datos de parámetros de referencia tecnológica con los actuales modelos de turbinas; investigar las respectivas curvas de potencia y asociarlos con los perfiles de velocidad obtenidos; además, proponer alturas de buje más altas y estudiar el impacto económico y tecnológico del uso de torres más altas en México.
- Desarrollar un proyecto sobre el análisis de manifiestos de impacto ambiental y evaluaciones de impacto social para los proyectos eólicos, con el fin de reafirmar la viabilidad de los proyectos eólicos en el país.
- Efectuar un análisis más profundo de la producción de energía a través de la utilización de programas de simulación para proyectos eólicos, con el fin de ampliar la información sobre proyectos de generación eléctrica, así como realizar un estudio financiero completo y detallado para cada proyecto eólico considerando características más específicas.
- Desarrollar un proyecto de análisis para la instalación de parques eólicos marinos en México, con el fin de analizar el recurso eólico, las características de la tecnología empleada y determinar parámetros tecnológicos y costos asociados a la instalación de estos proyectos.

BIBLIOGRAFÍA.

- A. P. Talayero Navales, & E. (2008). Energía Eólica. En *Aerogeneradores* (pág. 69). Zaragoza España.
- Agencia Insular de Energía de Tenerife. (s.f.). *Agencia Insular de Energía de Tenerife*. Recuperado el 18 de septiembre de 2017, de Información general sobre energía eólica:
http://www.agenergia.org/files/resourcesmodule/@random49917eec3c3bd/1234272293_e_eolica.pdf
- Boston Strategies International. (2016). *Estudios de cadenas de valor de tecnología seleccionadas para apoyar la toma de decisiones en materia de mitigación en el Sector de Generación Eléctrica y Contribuir al Desarrollo de Tecnologías*. Ciudad de México.
- BUN-CA. (2002). Manuales sobre energía renovable. En *Manuales sobre energía renovable* (págs. 6-7).
- Cámara de Diputados del H. Congreso de la unión. (2012). Ley General de Cambio Climático. En *Artículos Transitorios art.2 y art. 3*.
- Cámara de diputados del H. congreso de la unión. (2014). Ley de la Industria Electrica. En *Cap 1 Art 3 XXII* (págs. 3-4). CDMX.
- Cámara de diputados del H. congreso de la unión. (2015). Ley de Transición Energética. En *Cap 1 Art 3 XVI* (págs. 2-3). CDMX.
- Centro Nacional de Control de Energía. (2018). *Diagramas Unifilares del Sistema Eléctrico Nacional 2017-2022*.
- Centro Nacional de Control de Energía . (2018). *Cátalogo de NodosP del Sistema Eléctrico Nacional*.
- Centro Nacional de Control de Energía. (noviembre de 2017). *cenace.gob*. Obtenido de Fallo de las subastas de Largo Plazo 2015-2017.
- Centro Nacional de Control de Energía. (s.f.). *cenace.gob*. Recuperado el 2018, de Historia de Precios de Energía Marginales Locales:
https://www.cenace.gob.mx/SIM/VISTA/REPORTES/H_RepPreEnergiaSisMEM.aspx?N=9&opc=divCssPreEnergia&site=Precios%20de%20la%20energ%C3%ADa/Precios%20Marginales%20Locales/MTR/Mensuales&tipoArch=C&tipoUni=SIN&tipo=Mensuales&nombrenodop=Precios%20Marginales%20Lo
- Comisión Reguladora de Energía. (22 de 05 de 2012). <http://dof.gob.mx>. Obtenido de <http://dof.gob.mx>:
http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5249086&fecha=22/05/2012

- Comunidad Eduambiental. (septiembre de 2017). *Comunidad Eduambiental*. Obtenido de Curso Energía Eólica: <http://comunidad.eduambiental.org/file.php/1/curso/contenidos/docpdf/capitulo20.pdf>
- Deivis Ávila-Prats, R. A.-G.-A. (2011). Sistemas híbridos con base en las energías renovables para el suministro de energía a plantas desaladoras. *Ingeniería Mecánica*, 22-30.
- ENERCON. (octubre de 2017). Obtenido de <https://www.enercon.de/en/technology/wec-components/>
- ENERCON. (2017). *Aerogeneradores ENERCON*. España.
- Energy Technology Systems Analysis Program and International Energy Agency. (2016). *Wind Power: Technology Brief*.
- European Climate Foundation. (2014). *Cambio Climático: Implicaciones para el sector energético*.
- Figueredo, C. M. (2007). *Diez preguntas y respuestas sobre Energía Eólica*. La Habana: CUBASOLAR.
- FTI Consulting. (2018). *Global Wind Market Update: Demand and Supply*.
- GAMESA CORP. (octubre de 2017). *GAMESA CORP*. Obtenido de <http://www.gamesacorp.com/es/productos-servicios/aerogeneradores/disenyo-y-fabricacion/proceso-fabricacion-montaje.html>
- Global Wind Energy Council. (Abril 2018). Global Wind Report 2017. En *Global Wind Report 2017* (págs. 20-21).
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2012). *Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*.
- International Atomic Energy Agency. (2012). *Project Mngement in Nuclear Power Plant Construction*.
- International Energy Agency (IEA). (07 de septiembre de 2017). Obtenido de Statistics Electricity Information: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/ElectricityInformation2017Overview.pdf>
- International Renewable Energy Agency . (2017). *Resource Irena*. Obtenido de <http://resourceirena.irena.org/gateway/dashboard/?topic=7&subTopic=10>
- International Renewable Energy Agency. (4 de septiembre de 2017). <http://resourceirena.irena.org>. Obtenido de Resource IRENA: <http://resourceirena.irena.org/gateway/dashboard/?topic=4&subTopic=17>

- International Renewable Energy Agency. (4 de septiembre de 2017). <http://resourceirena.irena.org>. Obtenido de Resource IRENA: de <http://resourceirena.irena.org/gateway/dashboard/?topic=4&subTopic=19>
- International Renewable Energy Agency. (2017). *Renewable Power Generation Costs in 2017*. Abu Dhabi.
- LAZARD. (2017). *Levelized Cost of Energy Analysis*.
- Libera Bonilla, B. E. (2007). Impacto, impacto social y evaluación del impacto. *ACIMED*.
- López, M. V. (2012). Capítulo 11: Aspectos económicos y ambientales. En M. V. López, *Ingeniería de la Energía Eólica* (págs. 250-256). Barcelona: marcombo.
- Mekonnen, M., & Hoekstra, A. (2015). The consumptive water footprint of electricity and heat: a global assessment. *Environmental Science Water Research and Technology*, 255–396.
- National Renewable Energy Laboratory. (2017). SAM's Help System.
- National Renewable Energy Laboratory. (s.f.). *Renewable Energy Data Explorer- México*. Recuperado el 25 de enero de 2018, de <https://maps.nrel.gov/gst-mexico/>
- Navales, A. T., & Martínez, E. T. (2008). Energía Eólica. En C. Pueyo, E. T., & J. J., *Recurso Eólico* (págs. 40-52). Zaragoza, España: Prensas Universitarias de Zaragoza.
- Nieves, A. A. (2011). Gestión del mantenimiento de instalaciones de energía eólica. En A. A. Nieves, *Constitución general de un parque eólico* (pág. 7). Vértice.
- PricewaterhouseCoopers. (2015). *Estudio sobre las inversiones necesarias para que México cumpla con sus metas de Energías Limpias*.
- REN 21. (2018). *Renewables 2018 Global Status Report*. Paris.
- Renewable Energy Research Laboratory. (s.f.). Wind Power: Capacity Factor, Intermittency, and what happens when the wind doesn't blow? Massachusetts.
- Secretaría de Energía. (2018). *ww.gob.mx*. Obtenido de Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2018-2032: <https://www.gob.mx/sener/acciones-y-programas/programa-de-desarrollo-del-sistema-electrico-nacional-33462>
- Secretaría de Energía. (2016). *Estrategia de Transición para promover el uso de tecnologías y combustibles más limpios*. Recuperado el 30 de mayo de 2017, de <https://www.gob.mx/sener/prensa/mexico-cumplira-con-su-meta-del-35-de-generacion-electrica-con-energias-limpias-en-2024-consejo-consultivo-para-la-transicion-energetica>
- Secretaría de Energía. (2017). *Programa de desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2017-2031*. Ciudad de México.
- Secretaría de Energía. (2017). *Prospectivas de Energías Renovables 2017-2031*. México.

Secretaría de Energía. (6 de Agosto de 2018). *AZEL*. Obtenido de Atlas de Zonas con Energías Limpias: <https://dgel.energia.gob.mx/AZEL/>

Solar Innova. (noviembre de 2017). *www.solarinnova.net*. Obtenido de Huella de carbono: Fabricación de Módulos Fotovoltaicos: <http://www.solarinnova.net/images/stories/es/productos/fotovoltaica/modulos/manual/pdf/si-esf-m-huella-carbono.pdf>

U.S Department of Energy. (2016). *Wind Technologies Market Report*. Alexandria, Virginia.

Valdés, J. F. (2011). El problema Energético en México. En J. F. Valdés, *Panorama Energético de México* (pág. 17). México.