

Análisis de la interconexión al Sistema Eléctrico Nacional de sistemas de generación con fuentes no convencionales.

Modalidad: Proyecto Tecnológico
Trimestre: 21P

Presentado por:

Luis Adrián Arteaga Villegas
2153034838
adriano1m4a1@gmail.com

Erika Santillán Hernández
2153035059
erikasanher28@gmail.com

Asesor

M. en C. Eduardo Campero
Littlewood
Profesor Investigador
Correo: ecl@azc.uam.mx
Departamento de Energía

Co-Asesor

Dr. Irvin López García
Profesor Investigador
Correo: ilg@azc.uam.mx
Departamento de Energía

Octubre, 2021.

Declaratoria

Yo, Eduardo Campero Littlewood, declaro que aprobé el contenido del presente Reporte de Proyecto de Integración y doy mi autorización para su publicación en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco.

Yo, Irvin López García, declaro que aprobé el contenido del presente Reporte de Proyecto de Integración y doy mi autorización para su publicación en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco.

Yo, Luis Adrián Arteaga Villegas, doy mi autorización a la Coordinación de Servicios de Información de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, para publicar el presente documento en la Biblioteca Digital, así como el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco.

Yo, Erika Santillán Hernández, doy mi autorización a la Coordinación de Servicios de Información de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, para publicar el presente documento en la Biblioteca Digital, así como el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco.

Agradecimientos

Este trabajo se lo dedico con mucho cariño a mi familia, principalmente a mis padres Mario y Francisca por todo el apoyo, comprensión y confianza en todo este tiempo de mi vida, que me ha ayudado a seguir adelante y que me hace estar muy agradecido y orgulloso de ellos.

A mi hermano Jonathan, por acompañarme y escucharme en todo momento y a mi mascota Cofy, por siempre acompañarme como lo fue en las noches de desvelo para este trabajo.

También, estaré siempre agradecido con la maravillosa Universidad Autónoma Metropolitana unidad Azcapotzalco, por todas las enseñanzas, oportunidades y por hacerme sentir como en casa, y del cual, siempre me sentiré orgulloso de haber pertenecido a esta gran institución.

Y por último, quiero agradecer a mi asesor M. C. Eduardo Campero Littlewood y co-asesor Dr. Irvin López García, por haberme brindado la oportunidad de recurrir a su capacidad y conocimiento, así como también haberme tenido paciencia y guiarme durante todo el desarrollo de este proyecto. Son grandes profesionales en su trabajo del cual admiro, y tienen todo mi respeto.

Adrián.

En primer lugar quisiera agradecer a la vida, por permitirme llegar a este momento tan anhelado, llena de salud y con muchas metas por cumplir.

Agradezco a mis padres, Heric y Elisabeth por todo su apoyo, amor, cariño, sus enseñanzas a lo largo del viaje de mi vida, gracias por la confianza y darme siempre las herramientas para cumplir mis metas.

A mi hermano Manuel por su apoyo, los consejos, el cariño y las palabras de aliento que siempre me das.

A Erick y Gael por llegar a mi vida cuando menos lo esperaba, pero más los necesitaba, gracias por todo su amor y cariño, por acompañarme en este andar, que no fue fácil pero lo estamos logrando.

Quiero agradecer infinitamente a la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco por abrirme sus puertas, brindarme la oportunidad de conocer a grandes académicos que sin lugar a dudas sus enseñanzas me han ayudado a crecer académicamente brindándome las herramientas necesarias para ser una gran profesionista.

Al asesor M. en C. Eduardo Campero Littlewood y al co-asesor Dr. Irvin López García, por todo el apoyo brindado a lo largo de este proyecto, gracias por las herramientas, las correcciones, por su paciencia y esfuerzo para las mejoras de éste proyecto. Gracias por cada una de sus palabras y consejos. Admiro el trabajo que cada uno desarrolla.

Erika.

Contenido

Resumen.....	I
Relación de Figuras.....	II
Relación de Tablas.....	III

Desarrollo del proyecto

Capítulo 1. Introducción

1.1 Motivación.....	1
1.2 Antecedentes.....	1
1.3 Formulación del problema.....	6
1.4 Justificación.....	6
1.5 Objetivos.....	8
1.5.1 Objetivo General.....	8
1.5.2 Objetivos Particulares.....	8

Capítulo 2. Sistema Eléctrico Nacional y Código de Red en México.

2.1 El Sistema Eléctrico Nacional.....	9
2.1.1 Operación y estructura del Sistema Eléctrico Nacional.....	10
2.1.2 Análisis de la capacidad instalada por central del SEN 2019-2020.....	15
2.2 Fuentes de generación de energía eléctrica y emisiones en México.....	17
2.3 El código de Red y Mercado Eléctrico Mayorista.....	20
2.3.1 Requerimientos para la interconexión de centrales eléctricas fotovoltaicas y eólicas en México.....	22
2.3.2 Requerimientos de interconexión de centrales eléctricas en Alemania.....	25

Capítulo 3. Sistemas Fotovoltaicos en México

3.1 Historia y origen de la energía solar fotovoltaica.....	27
---	----

3.2 Potencial y generación solar en México.....	28
3.2.1 Centrales fotovoltaicas en México.....	29
3.3 Análisis del impacto de la operación de los SFV en la red.....	32

Capítulo 4. Sistemas Eólicos en México

4.1 Historia y origen de la energía eólica.....	34
4.2 Potencial y generación eólico en México.....	35
4.2.1 Centrales eléctricas eólicas en México.....	38
4.3 Análisis de la operación de los sistemas eólicos en la red.....	39

Capítulo 5. Análisis del impacto de las centrales Eólicas y Solares interconectadas a redes eléctricas

5.1 Resultados del análisis.....	44
5.2 Conclusiones.....	46

Referencias.....	48
-------------------------	-----------

Resumen

En este proyecto de integración se realiza un análisis de la interconexión de los sistemas Fotovoltaicos y Eólicos de generación de energía a la red, en el caso particular de México. Se analiza la conformación del Sistema Eléctrico Nacional desde su operación hasta su estructura, haciendo una revisión de la capacidad que se tiene instalada en cada una de las centrales que conforman el sistema eléctrico nacional. Se revisa el Código de Red que es el que establece los requerimientos para que dichas centrales puedan ser conectadas a la red. Se incluye una comparación con el sistema eléctrico en Alemania, ya que es un país que está optando por usar este tipo de energía para generar su electricidad.

Se hace una revisión de la energía solar fotovoltaica y eólica para conocer el potencial que tienen en el país y su capacidad instalada. También se hace un análisis de las desventajas que tiene la imposibilidad de controlar la producción de energía de ambas fuentes y el impacto negativo que esto puede llegar a tener en el servicio de la red eléctrica.

Relación de Figuras

Figura	Descripción	Página
2.1	Regiones que conforman al Sistema Eléctrico Nacional. Fuente: CENACE y [25]	11
2.2	Sistema Eléctrico Interconectado (Generación, Transmisión, Distribución). Fuente: CFE	12
2.3	Sistema Interconectado Nacional (SIN). Fuente: CFE y [1]	13
2.4	Sistema Eléctrico Nacional Capacidad de las Interconexiones internacionales 2018. Fuente: PRODESEN 2019	14
2.5	Capacidad instalada en operación por tipo de tecnología: 79,599 MW, al 31 de Diciembre del 2019. Fuente: SENER y [34]	15
2.6	Capacidad instalada por CFE, PI, Privado y PEMEX. Fuente: SENER con información del CENACE.	16
2.7	Clasificación de las fuentes de energía en México. Fuente: SEMARNAT	18
2.8	El Código de Red, cubre todo el Sistema Eléctrico Nacional. Fuente: [37]	20
2.9	Generación de energía eléctrica neta en Alemania en 2020 (expresada en Teravatios hora (TWh)). Fuente: Energy-Charts.info	25
3.1	Evolución de la capacidad instalada por año de la energía Solar Fotovoltaica. Fuente: SENER	29
3.2	Centrales Eléctricas Solares en México 2021. Fuente:ASOLMEX	30
3.3	Clasificación de los Sistemas Fotovoltaicos. Fuente: [20]	32
3.4	Esquema de un Sistema Fotovoltaico conectado a la red pública. Fuente: [20]	32
4.1	Zonas con mayor potencial Eólico en México. Fuente: [58]	36
4.2	Centrales Eléctricas Privadas en México 2021. Fuente: [32]	38
4.3	Etapas de funcionamiento de un SGE típico (en algunos sistemas se evita la caja de cambios). Fuente: [61]	40
4.4	Distribución de aerogeneradores recomendada por DWIA. Fuente: [67]	43

Relación de tablas

Tabla	Descripción	Página
2.1	Capacidad Instalada por central de la CFE y permisionarios (MW) a octubre de 2020. Fuente: CENACE y [26]	16
2.2	Fuentes de energías convencionales y no convencionales. Fuente: [34]	19
2.3	Categorías de las centrales eléctricas dependiendo su capacidad instalada. Fuente: [21]	22
2.4	Tiempos de operación para una Central Eléctrica a frecuencias diferentes del valor nominal, sin desconexión de la red. Fuente: [21]	23
2.5	Valores de operación sin desconexión con la red para centrales eléctricas de tipo A. Fuente: CRE, Código de Red	24
2.6	Valores de operación sin desconexión con la red para centrales eléctricas de tipo B, C y D. Fuente: CRE, Código de Red	24
3.1	Principales centrales eléctricas fotovoltaicas privadas al 31 de diciembre del 2020. Fuente: [26]	31
4.1	Ejemplo de factores de planta típicos. Fuente: [55]	36
4.2	Principales centrales eléctricas eólicas privadas al 31 de diciembre del 2020. Fuente: [32]	39

CAPÍTULO 1. Introducción

1.1 Motivación

Como alumnos de Ingeniería Eléctrica y ser formados por una gran Universidad Pública como lo es la UAM unidad Azcapotzalco, cualquier tema relacionado con electricidad y en especial con el desarrollo energético en nuestro país, es y será de suma importancia e interés para nosotros.

Sabemos que, para el desarrollo energético, es importante el crecimiento en la producción y generación de energía con fuentes no convencionales o energías renovables y en este rubro nuestro país México tiene grandes oportunidades.

Por esto último nos unimos a la consideración de impulsar el uso de las energías renovables que provienen de los recursos que la naturaleza ofrece, como por ejemplo, el viento y la irradiación solar, ambas fuentes de energías originadas por nuestra única fuente de energía en el planeta, que es el sol. Además, el uso de estos últimos para la generación de la energía eléctrica, ofrece grandes beneficios en la reducción del efecto invernadero.

Ante la gran necesidad de satisfacer las necesidades energéticas que se tienen en México y sobre todo reducir el impacto ambiental que se tiene con las energías fósiles, se decide realizar una investigación sobre las energías renovables, en especial la energía Eólica y Solar y su aporte al Sistema Eléctrico Nacional (SEN), sin perder de vista el impacto que pueden tener en la operación de la red.

Ante la actual situación mundial por el COVID-19, el precio del petróleo tuvo una brutal caída, además de esto, según especialistas se espera que aproximadamente en 45 años (año 2070) ya no existirá producción de petróleo y solo existirán valiosas reservas, por esto la importancia y necesidad de impulsar mucho más a las energías limpias en comparación con las energías de origen fósil.

1.2 Antecedentes

La industria eléctrica se divide en cuatro principales actividades que son:

- Generación
- Transmisión
- Distribución
- Comercialización

Siendo la transmisión y distribución las actividades que, en México, sólo puede realizar el Estado y las otras dos pueden ser proporcionadas por el sector privado [1]. Dentro de esas cuatro actividades, podemos encontrar entes públicos como lo son:

- Secretaría de Energía (SENER): encargada de controlar la política energética del país para garantizar a los usuarios un suministro eficiente, viable y ambientalmente responsable de energéticos promocionando el uso de las fuentes de energía no convencionales [2].
- Centro Nacional de Control de Energía (CENACE): Organismo que controla la operación del SEN y del Mercado Eléctrico Mayorista (MEM) garantizando la calidad, confiabilidad, continuidad seguridad y sustentabilidad de la red [3].
- Comisión Reguladora de Energía (CRE): Esta comisión tiene a su cargo asuntos que tengan que ver que con la Ley de los Órganos Reguladores Coordinados en Materia de Energía (LORCME), Ley de la Industria Eléctrica, Ley de Transición Energética, Ley General del Cambio Climático, promover la competencia justa, la cobertura en todo el territorio y que la industria se desarrolle de manera eficiente [4]
- Comisión Federal de Electricidad (CFE): Es una empresa exclusiva del Gobierno, que se encarga de proveer el servicio de energía eléctrica siempre conforme a lo que establece la Ley de la Comisión Federal de Electricidad [5].

El trabajo en conjunto de estos entes permite que el suministro de la energía eléctrica del SEN sea eficiente y confiable, pero sobre todo que vaya disminuyendo su impacto en el medio ambiente. Por eso, en los últimos años se ha buscado la manera de usar recursos que no se encuentren sobreexplotados y que emitan menor contaminación a la hora de generar electricidad.

En el trabajo [6], se menciona que la liberación de dióxido de carbono (CO₂) y otros gases de efecto invernadero (GEI) por la actividad humana, está aumentando la temperatura media global del aire en la superficie, alterando los patrones climáticos, y acidificando el océano. Por ello, urge disminuir el crecimiento de las emisiones de GEI, ya que pueden hacer que las temperaturas medias globales aumenten aproximadamente otros 4° C o más para el año 2100. El sector eléctrico, representa uno de los sistemas a nivel mundial que hace un uso importante de combustibles de origen fósil para la generación de electricidad, por lo que su operación representa un impacto negativo para el medio ambiente en términos de emisiones de GEI. Sin embargo, actualmente se tiene claro, que las fuentes de energía renovables son de suma importancia tanto para la conciencia ambiental, como para el crecimiento económico [7]. Optar por políticas públicas, dirigidas a un desarrollo energético menos impactante al medio ambiente, está provocando inversiones importantes en países potencialmente altos en recursos energéticos. Estas inversiones y tecnología en energías limpias atraen el doble de capital global en comparación con energías fósiles [6].

Para el caso de los sistemas de generación de energía eléctrica con fuentes de energía amigables con el medio ambiente, también conocidos como Sistemas de Generación no Convencional, es necesario conocer su aportación al SEN y su impacto en su operación. Esto para saber qué tan factible es su contribución y así poder observar si se está preparado para una transición de generación a través de fuentes de energía limpia.

En el trabajo [8], se expone la importancia que tiene el disminuir el uso de recursos no renovables e invita a hacer uso de fuentes de energía renovable que ayuden a reducir los problemas ya ocasionados por la explotación de los recursos fósiles. Analiza la producción de energías limpias en México, así como también identifica los avances del uso de sistemas de generación de energías no convencionales.

En [9] se habla también de los cambios positivos que tiene el uso de energías renovables. En este trabajo la autora hace una comparación del potencial de generación de la SENER, con el potencial de regiones con una gran capacidad para generación de energía limpia y por último incluye al mercado del Programa Indicativo de la Instalación y Retiro de Centrales Eléctricas (PIIRCE) y concluye que México posee un alto potencial en distintas zonas para la producción de energía renovable, siendo la energía Fotovoltaica la de mayor campo de producción siguiéndole la energía Eólica.

En el caso particular de la energía Solar Fotovoltaica en [10] se propone una metodología que ayuda a predecir el impacto de los Sistemas Fotovoltaicos Conectados a una Red de Distribución (SFVCR) en baja tensión y se puede aplicar a cualquier topología de red, sin importar su ubicación geográfica. El método de diseño propone un software donde se involucran distintos parámetros relacionados con el comportamiento de los generadores fotovoltaicos con datos de mediciones reales.

En [11] se analiza la estabilidad del voltaje en redes eléctricas que tienen una penetración importante de centrales generadoras fotovoltaicas. El resultado del análisis muestra que si los sistemas fotovoltaicos se operan suministrando una potencia menor a su máxima capacidad, pueden ser un factor que ayude a mantener la estabilidad del voltaje de redes que tengan una demanda importante. Esto gracias a los nuevos sistemas de soporte de potencia reactiva que tienen los sistemas fotovoltaicos.

Una propuesta que se hace en [12], es encontrar una estrategia que permita controlar la corriente de manera adecuada, por medio del control de la corriente repetitiva para el inversor de bajo voltaje que se encuentra conectado a la red. Esto se puede lograr usando un dispositivo que controle la corriente de salida, de forma que tenga un factor de potencia alto y por medio de la técnica del “wavelet” poder identificar el estado en el que se encuentra la red eléctrica y detectar alguna posible necesidad de la “condición de isla” y que así se mejore la operación de la red eléctrica.

En el artículo [13] también se propone identificar la “condición de isla” para que los sistemas fotovoltaicos se desconecten de la red en caso de falla. Esto porque los patrones actuales requieren que dichos sistemas se mantengan trabajando en un factor de potencia unitario y con un seguimiento del punto de máxima potencia. Resalta que al interconectar grandes sistemas fotovoltaicos a la red se presentan varias situaciones por las que pueden llegar a ser desconectados, ya sea por algún corte de energía, un aumento o disminución del voltaje o la inestabilidad del sistema ajeno al sistema fotovoltaico. Sin embargo, la intención principal del artículo se centra en conocer el Código de Red y las modificaciones que ha ido presentando para que los sistemas ya mencionados se adapten y trabajen de una manera conjunta con la red eléctrica.

Para el caso de la generación con tecnología Eólica, en el artículo [14], se menciona que la capacidad instalada de esta tecnología, ha experimentado una tendencia al alza en todo el mundo en la última década y a medida que aumenta la penetración de ésta tecnología en el mundo, aparecen nuevos desafíos para el control y el funcionamiento de este sistema de generación de electricidad. También, en [15] se menciona que a medida que aumenta la penetración de la tecnología eólica en las redes eléctricas, se presentan desafíos técnicos sobre interconexión, en cuestión de: calidad de la energía, confiabilidad, protección, generación, despacho y control.

En el artículo [16] se menciona que los Sistemas de Generación Eólica (SGE) son la opción con la mayor disponibilidad del recurso energético, es decir, el viento tiene mayor disponibilidad que las demás fuentes de generación de energía del tipo no convencional. La aleatoriedad o variabilidad de la velocidad del viento, ha hecho del control de velocidad de Aerogeneradores (dispositivo que convierte la energía cinética del viento en energía eléctrica) un campo de estudio bastante amplio. En [17], se explican diferentes técnicas de control.

Entre las diferentes alternativas disponibles para construir un aerogenerador, el generador de inducción doblemente alimentado (DFIG por sus siglas en inglés) ha demostrado ser una opción adecuada. El alto rendimiento que puede alcanzar esta máquina en funcionamiento a velocidad variable, se suma el hecho de que se puede conectar directamente a la red, mejorando la eficiencia y evitando la necesidad de convertidores electrónicos de potencia igual a la capacidad del aerogenerador. En los DFIG el convertidor requiere tener una capacidad pequeña comparada con la capacidad del aerogenerador, lo convierte en una alternativa muy atractiva para el proceso de conversión de la energía del viento. En [18] se propone una estrategia de control del DFIG que logra la regulación del voltaje mediante el manejo de las potencias activa y reactiva a un valor que no corresponde al punto de máxima extracción de la energía eólica disponible.

La regulación de voltaje y frecuencia es el principal problema en los SGE. La energía mecánica de entrada al Sistema de Generación (SG), cambia en función de las variaciones de la velocidad del viento. Esto hace que la energía eléctrica que se genera, requiera de control para contrarrestar el efecto de la variabilidad del viento en la frecuencia y el voltaje. Este control resulta importante porque al conectar estos SG a la red eléctrica se requiere del cumplimiento de lo establecido en el código de red. Entonces se necesita un control adecuado en la tensión producida por los aerogeneradores, en términos de magnitud y frecuencia [15].

La literatura ha propuesto varios enfoques para permitir la regulación de la frecuencia, que pueden dividirse en dos: aquellos que emulan la respuesta inercial extrayendo energía extra de la inercia del rotor del aerogenerador en caso de que se presente una caída de frecuencia y aquellos que disminuyen la carga de la turbina eólica para proporcionar espacio para la regulación de frecuencia. Los resultados de la regulación de frecuencia se pueden dividir en dos grupos: mediante la disminución de la producción de potencia activa de los aerogeneradores modificando el ángulo de los alabes de la turbina y el otro operando las unidades eólicas a una velocidad del rotor menor a la necesaria para la captura de la energía máxima [14]. De cualquier forma, es necesario tener un control adecuado de la tensión producida por los aerogeneradores, en términos de magnitud y frecuencia, para la interconexión a la red [15].

Un estudio realizado en Alemania y reportado en [19], considera los 3 tipos de SGE más utilizadas en la región; Generador de Inducción doblemente alimentado (DFIG), Generador Síncrono de Accionamiento Directo (DDSG, por sus siglas en inglés) y el Generador Síncrono de Imanes Permanentes (PMSG, por sus siglas en inglés). En el análisis que se hace del ciclo de vida del proceso de manufactura de cimientos, torres y góndolas, muestra que estos procesos representan, respectivamente, un 19%, 30% y 99% del impacto de ciclo de vida en cada uno de los 3 SGE. Los principales impulsores son el uso de cobre, acero y en el caso del PMSG también los imanes permanentes de tierras raras.

El presente trabajo, basado en la bibliografía descrita en los párrafos anteriores, presenta las ventajas que la generación de energía Solar y Eólica tienen en el Sistema Eléctrico, al igual que los problemas que se pueden llegar a presentar cuando estos sistemas están interconectados con la red eléctrica. Por ello, también se plantean posibles soluciones que se han ido proponiendo a lo largo de los años, para lograr mejoras en la calidad de la energía que entregan a la red y que las fuentes de energía Solar y Eólica cumplan con los estándares requeridos.

1.3 Formulación del Problema

La interconexión a la red eléctrica de sistemas de generación de energía eléctrica fotovoltaicos y eólicos, ha crecido de manera considerable. Por otra parte, la interconexión de estos sistemas es compleja y complicada, sobre todo para proporcionar la potencia que requiere la red, ya que agregar nuevas instalaciones para la generación de energía a las líneas de generación y transmisión puede generar riesgos de pérdida de estabilidad de frecuencia e interrupciones del suministro que se reflejan en grandes costos.

De manera general, para cualquier sistema de energía, la electricidad es generada por un generador síncrono y alimentada a la red eléctrica.

La generación de energía y la demanda deben mantenerse siempre en equilibrio, para que la frecuencia del sistema de la red eléctrica se mantenga estable. Las alteraciones en el equilibrio entre la generación y la demanda pueden expresarse de la siguiente manera: exceso de generación hace que la frecuencia aumente, mientras que la disminución en la generación hace que baje la frecuencia en el sistema.

La variación de la frecuencia debe permanecer dentro de los límites especificados por la CRE; en las Disposiciones Generales del SEN Capítulo 2 “Disposiciones Generales para la operación en Estado Operativo Normal del SEN (OP)” sección 2.4.2 Rango de Frecuencia, esto para evitar apagones y/o que los equipos se dañen, para asegurar esto se tienen que plantear estrategias de control en los sistemas de generación de energía eléctrica [20].

El CENACE evalúa y supervisa los rangos de frecuencia, conforme a lo establecido en el Manual Regulatorio de Requerimientos Técnicos para la Interconexión de Centrales Eléctricas al SEN [21].

1.4 Justificación

En los últimos años, el uso de energías que disminuyan el impacto en el medio ambiente ha ido ganando popularidad. La energía solar es una alternativa confiable, aun cuando el día se encuentre nublado la luz solar está presente los 365 días del año. Sin embargo, aunque no genera electricidad durante todo el día, esta energía es utilizada en lugares lejanos donde no se puede llevar electricidad de manera convencional.

Muchas son las formas de aprovechar la energía que nos proporciona el Sol, pero para producir electricidad se tienen dos métodos:

- Método directo: Se produce la electricidad usando la luz solar por medio del uso de paneles solares.

- Método indirecto: Se produce la electricidad mediante la captación del calor y su aplicación en la generación de vapor y su aprovechamiento para el movimiento de una turbina acoplada a un generador (como por ejemplo en las centrales térmicas).

Para efectos de este trabajo, se analizará el método directo, que es la captación de la luz solar y su conversión mediante paneles solares en energía eléctrica. Se plantea el estudio de estos sistemas interconectados a la red [22].

En este trabajo también se incluirá el análisis del impacto que tiene la interconexión de los sistemas eólicos, que son otra alternativa de energía que hace uso de un recurso natural y que no tiene afectaciones en el medio ambiente.

Por otra parte, debido a la ubicación geográfica, México se ubica entre dos enormes sistemas de viento; estos corresponden al sistema tropical y el particular sistema de las zonas templadas. Por esto último, en los meses de mayo y octubre, gran parte del país se sitúa bajo la gran influencia de los vientos alisios [23]. Además, gracias a las características superficiales y las diferencias climáticas en el país, es muy común encontrar sitios donde la intensidad del viento es excepcional para la generación de electricidad en un ámbito de pequeña a gran escala.

La producción de energía mecánica con el viento también puede aprovecharse para bombear agua [24].

Conocer el aporte que hacen la energía solar y eólica al SEN, permite conocer qué energía puede tener más área de oportunidad en el sector eléctrico. Sin embargo, resulta importante estudiar las dificultades que representa el manejo de la generación de energía eléctrica, que se debe suministrar de manera continua a la demanda nacional. Entonces, resulta importante analizar el comportamiento de la generación con energías alternas (solar y eólica) y tener claridad de cuál es el impacto que pueden tener en su interconexión al SEN. También se deben plantear alternativas del manejo de los parques eólicos y las plantas de generación con energía solar para que aporten electricidad de calidad.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

Analizar el impacto que tiene en la calidad y confiabilidad de la red del Sistema Eléctrico Nacional (SEN), la interconexión de plantas generadoras de energía con fuentes no convencionales, como la Solar y la Eólica.

1.5.2 Objetivos Particulares:

- Analizar el proceso de generación de electricidad con energía Solar y las ventajas que tiene su aporte a la red eléctrica.
- Analizar el proceso de generación de electricidad con energía Eólica y las ventajas que tiene su aporte a la red eléctrica.
- Describir las características de operación de plantas que generan electricidad con energía Solar que limitan la confiabilidad de su capacidad de suministro.
- Describir las características de operación de plantas que generan electricidad con energía Eólica que limitan la confiabilidad de su capacidad de suministro.
- Determinar el impacto que la interconexión de estas formas de generación de energía puede tener en la red del SEN.
- Analizar las dificultades presentes en el manejo que debe llevarse a cabo en los sistemas de generación Solares y Eólicos para cumplir con los requisitos planteados en el Código de Red.
- Detectar posibles elementos a considerar para lograr una mayor confiabilidad en la interconexión del SEN.

CAPÍTULO 2. Sistema Eléctrico Nacional y Código de Red en México.

En este capítulo se incluye información referente al Sistema Eléctrico Nacional (SEN) en México, con el propósito de conocer su estructura actual en ámbitos de generación de energía eléctrica, tanto con fuentes convencionales y no convencionales, abordando información consultada en informes hechos por dependencias gubernamentales. Se hace una introducción al código de red en México, con el fin de mostrar cómo está planteado, que cubre a todo el SEN del país y que señala los requerimientos necesarios para la interconexión de las centrales eléctricas al SEN.

2.1 El Sistema Eléctrico Nacional

Un sistema eléctrico puede ser complejo dependiendo de su diseño y en función de las necesidades especificadas que tenga que cubrir. En este caso, de manera general se puede decir que son tres las fases fundamentales que componen a cualquier sistema eléctrico en el mundo y por ende, la de México: generación, transmisión y distribución de la energía [25].

La primera fase que comprende un sistema eléctrico, requiere de una central eléctrica que transforme o convierta alguna fuente de energía primaria en energía eléctrica. La central eléctrica, es una instalación que integra diversos equipos tecnológicos, cuyo grado de complejidad depende de la fuente energética. Ejemplo de esto son: Una central eléctrica de ciclo combinado, una central fotovoltaica o un parque eólico. Respecto a la segunda fase, para la generación de la energía eléctrica; se debe contar con una red de transmisión, que transporta la energía de la central generadora a un centro o estación que permita posteriormente como última fase técnica, la tercera fase, distribuirla con menor tensión hacia un usuario final [23].

El SEN en México, es de los más grandes y complejos de todo el mundo. Brinda servicio en dos millones de kilómetros cuadrados a 128 millones de mexicanos y alcanza alrededor del 98.7 % de cobertura del servicio [26]. Para la confiabilidad y planeación del SEN es necesario tener una regularidad económica, debido a que con esto se incorpora rápida y progresivamente todas las energías. Las energías intermitentes (fuentes de energía que no se pueden almacenar y no se encuentran continuamente disponibles para su transformación en electricidad) se incorporan necesariamente por medio de centrales eléctricas con alta disponibilidad, que otorguen reservas en la operatividad y planeación, así como el servicio de conexión para un viable funcionamiento.

Para el cumplimiento de esto último, se necesita correctas especificaciones en los productos requeridos, para dar mayor certeza a los participantes del mercado [27].

2.1.1 Operación y estructura del Sistema Eléctrico Nacional

De acuerdo con lo que establece la “Ley de la Industria Eléctrica en México”, el Estado ejerce el control operacional del SEN por medio del CENACE (Comisión Nacional de Control de Energía).

En este sentido, el CENACE tiene la facultad de decidir los actos obligatorios y requeridos para todos los participantes del mercado dirigidos al aseguramiento de la calidad y confiabilidad del SEN [29]. También se encarga de asegurar el acceso a la Red Nacional de Transmisión (RNT), a las Redes Generales de Distribución (RGD) y del control operacional del Mercado Eléctrico Mayorista (MEM) [3].

Objetivos del CENACE:

- Controlar la operación del SEN.
- Controlar la operación del MEM y asegurar de manera abierta y no discriminatoria el acceso a las RGD y RNT.
- Plantear modernizaciones y ampliaciones de la RNT y los componentes de las RGD correspondientes al MEM.

El control y operación, de forma confiable y segura, del SEN y MEM, se realiza desde el Centro Nacional (CENAL), que cuenta con sus instalaciones en la ciudad de México y del Centro Nacional de Control de Energía Alterno (CENALTE), que se encuentra en la ciudad de Puebla.

El SEN se conforma por 9 Gerencias de Control Regional (GCR) y el pequeño sistema eléctrico de Mulegé [25].

En la figura 2.1, se muestra un atlas de la república mexicana, con la ubicación y ámbito geográfico, que controlan cada una de las GCR que actualmente conforman al Sistema Eléctrico en México [25].



Figura 2.1. Regiones que conforman al Sistema Eléctrico Nacional. Fuente: CENACE y [25]

El SEN está constituido por:

- La Red Nacional de Transmisión (RNT): Sistema que está integrado por las redes eléctricas que transportan la energía, hacia las Redes Generales de Distribución, interconexiones a los sistemas eléctricos extranjeros y a los usuarios. Comprende tensiones mayores a 69 kV.
- Las Redes Generales de Distribución (RGD): Sistema que está integrado por las redes eléctricas encargadas de distribuir la energía al público en general, comprende redes de media tensión (niveles mayores a 1 kV hasta 35 kV) y redes en baja tensión (niveles menores a 1 kV).
- Las Redes Particulares: Sistema que está integrado por las redes eléctricas que no pertenecen a la RNT Y RGD.
- Centrales Eléctricas que proporcionan la energía eléctrica a la RNT o a las RGD.
- Las instalaciones y los equipos del CENACE, utilizados para la operación y el control del SEN.
- Otros elementos determinados por la Secretaría de Energía (SENER).

La responsabilidad de la operación, aplicación, modernización y mantenimiento en la RNT corresponde a la Comisión Federal de Electricidad (CFE), que es responsable de la interconexión de las distintas centrales eléctricas y de trasladar su energía hasta los centros de carga. Para esta tarea, se debe trabajar en 3 etapas, que se ilustra en la figura 2.2 [5].



Figura 2.2 Sistema Eléctrico Interconectado (Generación, Transmisión, Distribución). Fuente: CFE

Los 3 puntos siguientes, describen los subsistemas requeridos para el cumplimiento de las 3 etapas que conforman el Sistema Eléctrico Interconectado (SIN):

1. Subestaciones eléctricas de potencia: aquí se unen los generadores con la red eléctrica (por medio de interruptores) y se incrementa la tensión (por medio de transformadores de potencia), para alcanzar valores adecuados y ser transmitidos a grandes distancias, se minimizan las pérdidas con esta técnica.
2. Líneas de transmisión: aquí se transporta la energía eléctrica en alta tensión. La energía eléctrica es dirigida a los grandes centros de carga y posteriormente se interconectan las numerosas subestaciones de potencia, creando una red mallada en alta tensión. Esta técnica da mayor seguridad y calidad.
3. Las subestaciones de distribución: estas subestaciones reducen la tensión a valores adecuados (por medio de transformadores de potencia), posteriormente se conectan las cargas (por medio de interruptores) a través de las RGD.

El Sistema Interconectado Nacional (SIN), se integra por 7 de las 9 GCR, todas con excepción de Baja California y Baja California Sur. En estas, se reparten las reservas de capacidad ante las demandas operativas, para permitir un funcionamiento seguro y confiable de todo el SIN [25].

La figura 2.3, muestra información del Sistema Eléctrico en México, donde se puede observar el atlas de la república mexicana con la cobertura del Sistema Interconectado Nacional, además de las centrales eléctricas interconectadas a la RNT y RGD con su respectiva simbología y ubicación [5]. Para el caso de las centrales eléctricas fotovoltaicas y eólicas que se muestran en la figura 2.3, estas están interconectadas con el SEN mediante líneas de transmisión a distintos niveles de tensión. Es decir, niveles de tensión de 69-115 kV, 138-161 kV y 230 kV.

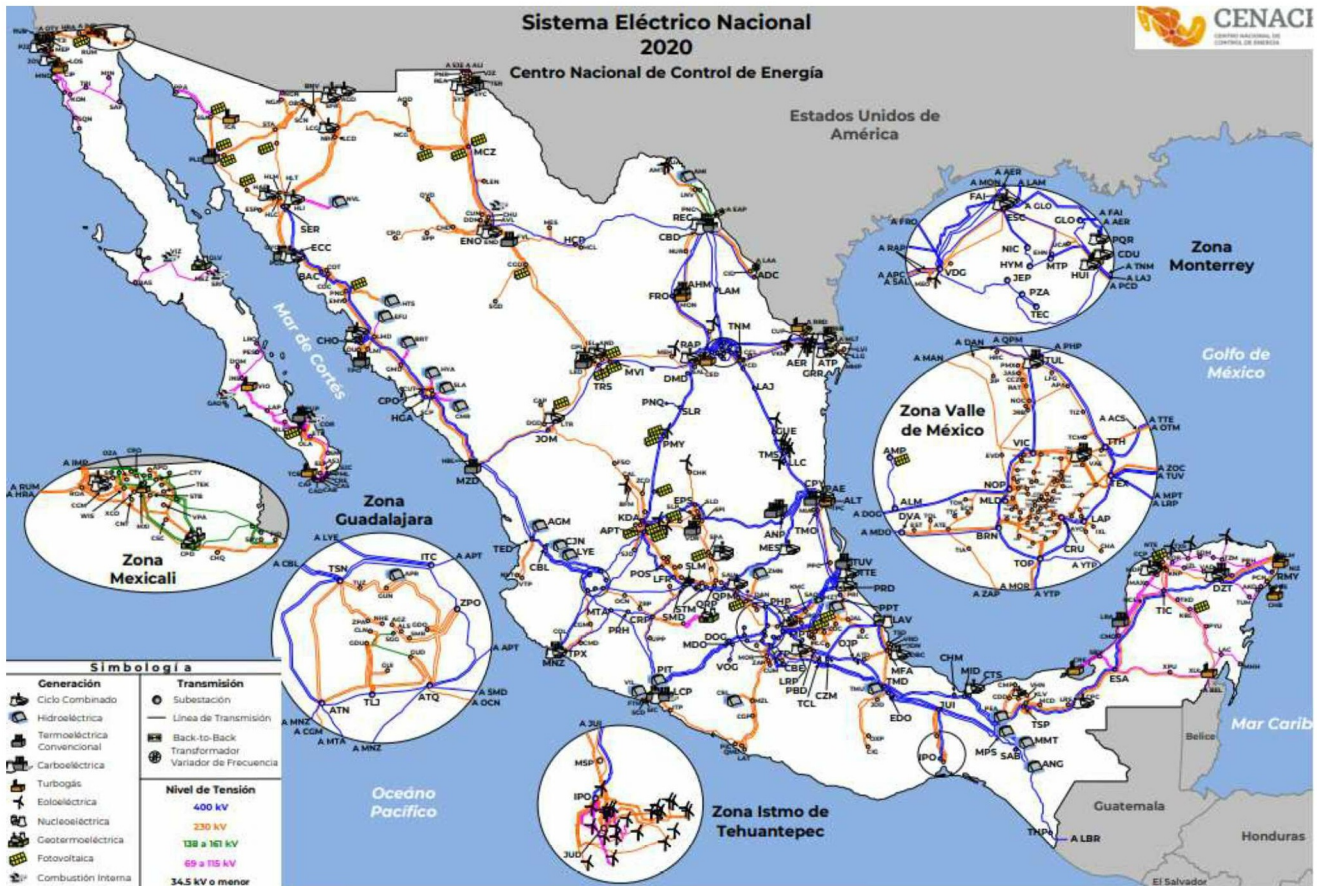


Figura 2.3. Sistema Interconectado Nacional (SIN). Fuente: CFE y [1]

De acuerdo con [25], el crecimiento de sistemas de generación de electricidad se debe a la construcción de centrales eléctricas de ciclo combinado, que operan con gas natural, además de la construcción de centrales eléctricas que trabajen con fuentes de energías limpias.

Este tema es muy importante para CFE, en especial para la RNT de CFE, debido a que la interconexión de nuevas centrales de generación y centros de carga implica la construcción de nuevas instalaciones y la modernización de las ya existentes [5].

En el informe [26], se menciona cuáles son los principales enlaces internacionales de interconexión del SEN y su capacidad en el 2020. En la figura 2.4, se observa la presencia de 4 enlaces asíncronos de 436 MW de capacidad con el estado de Texas en Estados Unidos. Los superíndices 1 y 2 en algunos nombres de las interconexiones, se refieren a: superíndice 1 a los enlaces de emergencia y operación con carga instalada, y superíndice 2 a una central eléctrica en Estados Unidos, que está interconectada al SEN con contrato de Interconexión de Generador. Los signos (+-) se refieren a la Exportación (+) e Importación (-).



Figura 2.4. Sistema Eléctrico Nacional Capacidad de las Interconexiones Internacionales 2018.
Fuente: PRODESEN 2019

Para el caso de las centrales eléctricas en México, hasta el 30 de junio de 2021, se cuenta con 65 centrales eléctricas pertenecientes a CFE y Productores Independientes de Energía (PIE) y 59 centrales eléctricas pertenecientes al sector privado [26].

Es importante reiterar el gran potencial de que dispone México en cuestión de energías limpias para la generación de electricidad. Y en este sentido, que el país disponga de diversas fuentes primarias de energía, fortalece al sistema energético al otorgar seguridad y auto eficiencia [25] [29].

Además de las energías solar y eólica que se mencionan en este reporte, el país también dispone de recursos de energía como: geotérmica, hidráulica, biomasa e inclusive oceánica [25]. Para la energía solar y eólica en México, en el capítulo 3 y 4, se dará mayor información al respecto.

Para conocer más a detalle el estado geográfico actual de la infraestructura energética, y las centrales eléctricas renovables, la Agencia Internacional de Energía (EIA, por sus siglas en inglés) [30] y [31], muestra información en forma gráfica, de la infraestructura energética y de los recursos renovables en México y en América del Norte.

2.1.2 Análisis de la capacidad instalada por central del SEN 2019-2020.

Para el análisis de la capacidad instalada por central eléctrica en el 2019, en el informe [33], en la figura 2.5 se presenta de forma gráfica el porcentaje de la capacidad, dependiendo del tipo de tecnología de generación. Se puede notar el dominio de las plantas de ciclo combinado (que entran en la categoría de planta termoeléctrica) con más del 35 % en operación.

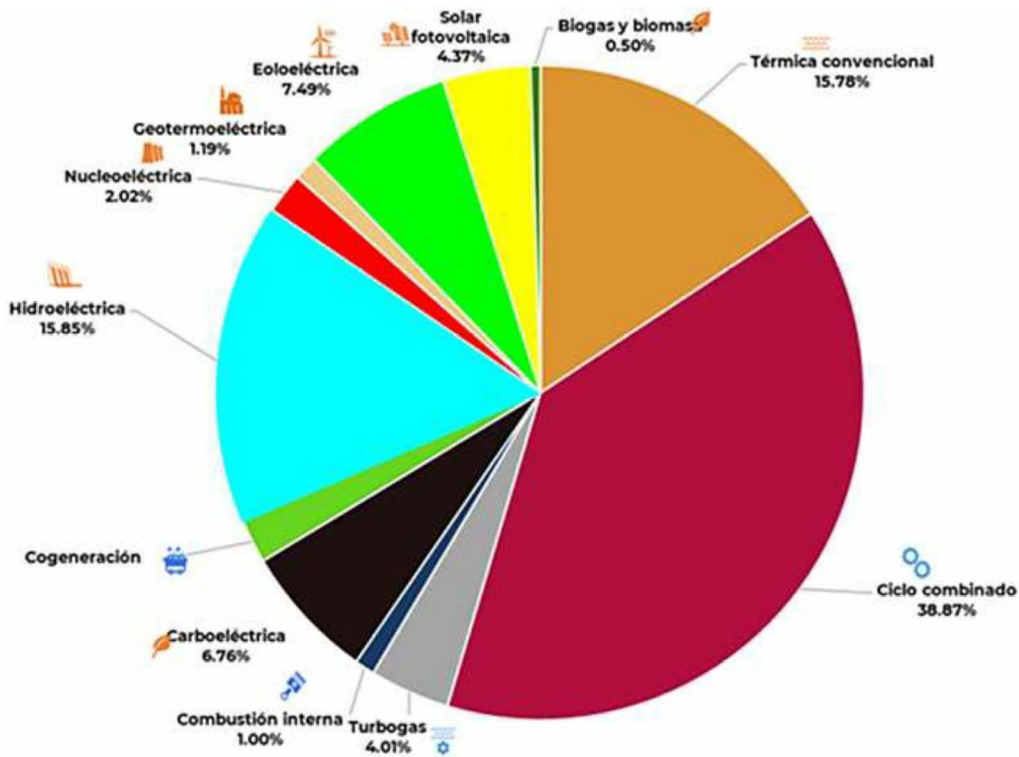


Figura 2.5. Capacidad instalada en operación por tipo de tecnología: 79,599 MW, al 31 de Diciembre del 2019. Fuente: SENER y [34]

En la tabla 2.1 se reproduce la información reportada por CENACE en [26], donde se menciona que en el mes de octubre del 2020 se contaba con 86´034 MW de capacidad entregada directamente a la red, con centrales eléctricas de la CFE, de Productores Independientes de Energía y Permisionarias. Con esto, se tuvo un incremento de alrededor del 9.7% en comparación con el año 2019 que se contaba con 79,599 MW de capacidad, este incremento se debe también principalmente a la adición de centrales eléctricas como: eólicas (930 MW), fotovoltaicas (2150 MW) y ciclo combinado (3345 MW).

Tabla 2.1: Capacidad Instalada por central de la CFE y permisionarios (MW) a octubre de 2020.
Fuente: SENER con información del CENACE y [26]

Tecnología	2019	2020
Hidroeléctrica	12,612	12,612
Geo termoeléctrica	899	951
Eolo eléctrica	6,050	6,977
Fotovoltaica	3,646	5,795
Bioenergía	375	408
Total (renovable)	23,582	26,743
Nucleoeléctrica	1,608	1,608
Cogeneración Eficiente	1,710	1,906
Total (no renovable)	3,318	3,514
Total de energía limpia	26,900	30,257
%	34.29	38.57
Ciclo combinado	31,402	33,746
Térmica convencional	11,831	11,831
Turbo gas	3,060	3,793
Combustión Interna	891	943
Carboeléctrica	5,463	5,463
Total	79,599	86,034

En la figura 2.6 se muestra la capacidad total instalada que se distribuye en: CFE (44,189 MW), Productores Independientes de Energía (16,686 MW), Sector Privado (24,238 MW) y PEMEX (921 MW) [29].

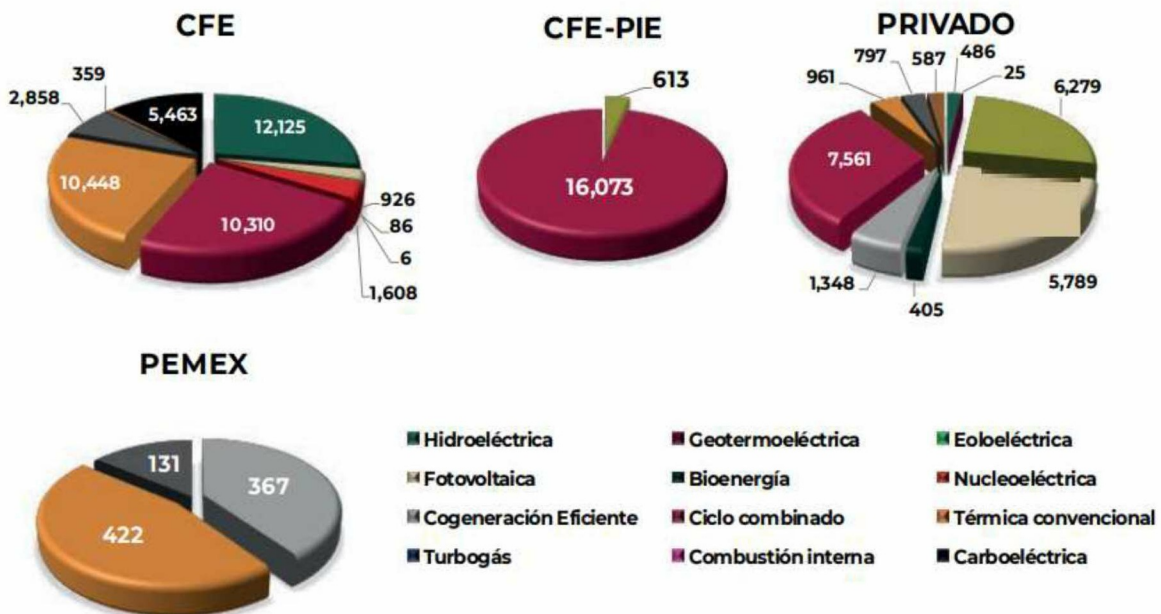


Figura 2.6. Capacidad instalada por CFE, PI, Privado y PEMEX. Fuente: SENER con información del CENACE

Para el caso de las energías renovables intermitentes que se encuentran en operación, como las fotovoltaicas y eólicas, a principios del 2020 representaron aproximadamente el 12 % de la capacidad total instalada en el país [33]. Para las centrales eléctricas del tipo; hidroeléctrica, geo termoeléctrica, eólica, fotovoltaica y de bioenergía, para el mes de octubre del 2020 la capacidad instalada es de 26,743 MW, con un incremento del 13.5 % a comparación del 2019 que se tenía una capacidad instalada de 23.583 MW [25].

Para la producción de energía eléctrica (generación neta) en el 2019 por parte de CFE y permisionarios, fue de 317,820 GWh, donde 74,573 GWh (23.46 %) pertenecía a energías limpias (Eólica, Solar, Bioenergía, Cogeneración, Hidroeléctrica, Geotérmica y Núcleo eléctrica). Para el 2020 la producción de la energía eléctrica (generación neta) fue de 236,628 GWh donde 65,401 GWh (27.64 %) son por energías limpias [25].

Un estudio importante es el de demandas horarias de las Gerencias de Control Regional (GCR), las demandas máximas y el comportamiento de éstas dando como resultado una estimación del comportamiento del consumo a un año. Los analistas desean conocer qué deparará el futuro del consumo energético y para poder realizar un pronóstico, se debe analizar la evolución que tiene el SEN en cada región. Generalmente las proyecciones por región se basan en estudios estadísticos de consumo y demanda de la energía eléctrica que se complementan con estimaciones con base en el servicio que se les provee a grandes consumidores.

2.2 Fuentes de generación de energía eléctrica y emisiones en México

Las energías disponibles en México se agrupan en fuentes primarias y secundarias, considerando como fuentes sólo las que producen energía directamente o utilizan un medio de transformación. Esto se señala de manera esquemática en la figura 2.7, donde se muestra las energías clasificadas como primarias, que son aquellas que usan los recursos naturales y que se generan a partir de procesos limpios y las otras de recursos limitados, las fuentes secundarias son aquellos que son para consumo final, es decir, aquellas que se necesitan para consumo del día a día, en el hogar como es el Gas LP y la electricidad, para los medios de transporte como lo son la gasolina, el diésel.

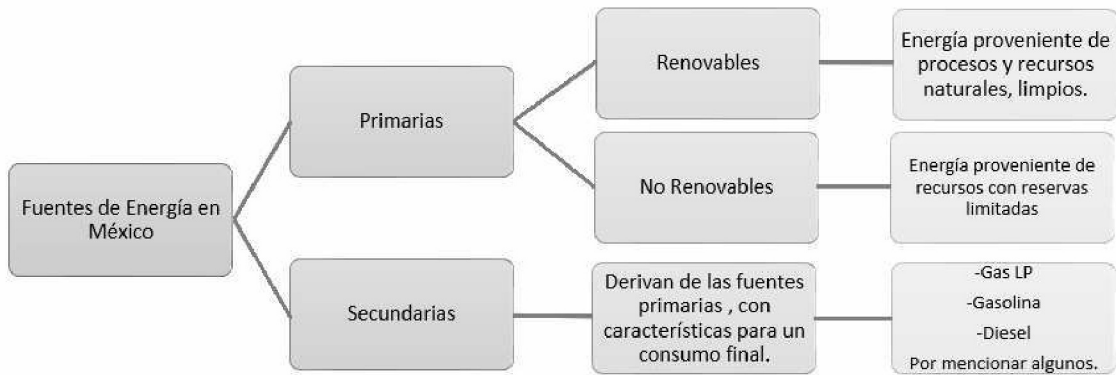


Figura 2.7. Clasificación de las fuentes de energía en México. Fuente: SEMARNAT

Para el esfuerzo del aseguramiento de la energía responsable, limpia y accesible para los ciudadanos, existe la Agencia Internacional de la Energía (AIE). Esta agencia es una organización intergubernamental que trabaja para 28 países del mundo como asesor en política energética [30].

Todos los países del mundo han sido impulsados principalmente por combustibles de carbono, durante más de dos siglos, con cierta demanda satisfecha de algunos países (Estados Unidos, Francia, Japón, Rusia, Alemania, de los más destacados) por las centrales nucleares durante las últimas 6 décadas. Las crecientes preocupaciones ambientales en los últimos años, sobre el calentamiento global y los efectos nocivos de las emisiones de carbono, han creado una nueva demanda de productos limpios y fuentes de energía sostenible, como el viento, el sol, el mar, la biomasa y la energía geotérmica [34].

Entre estos, la energía eólica y solar ha experimentado un crecimiento notable en los últimos 20 años. Ambos son fuentes de energía abundantes y libres de contaminación y en la figura 2.3, se puede observar que las centrales eléctricas fotovoltaicas y eólicas, se encuentran cerca de los centros de carga, por lo tanto, se elimina la necesidad de instalar líneas de transmisión de alto voltaje a través de sus paisajes rurales y urbanos. La desregulación, la privatización y las preferencias de los consumidores por la energía verde en muchos países, están expandiendo los mercados de energía eólica y fotovoltaica a un ritmo cada vez mayor [34].

Tabla 2.2. Fuentes de energías convencionales y no convencionales.

Fuente: [34]

Estado de las fuentes de energía convencionales y renovables	
Convencional	No convencional (renovable)
Carbón, energía nuclear, petróleo y gas natural con tecnologías completamente maduras y numerosos subsidios fiscales. De inversión integrados en las economías nacionales aceptados en la sociedad bajo una “vieja clausula” como un mal necesario.	Tecnología eólica, solar, de biomasa, geotérmica y oceánica en rápido desarrollo, algunos créditos fiscales y subvenciones disponibles de los gobiernos federales y de algunos estados pueden ser aceptados por sus propios méritos, incluso con una valoración limitada de sus beneficios ambientales y sociales.

Los recursos naturales con los que cuenta México son capaces de generar energía, para así poder disminuir la dependencia de las fuentes convencionales. Es importante mencionar que estas fuentes convencionales contaminan y además gran parte de éstas, son importadas de otros países. La reforma energética en México busca que el país sea responsablemente ambiental [30]. A continuación se señalan los elementos que destacan las ventajas de la utilización de energías limpias [35], [36]:

- Contribución importante para la reducción de emisiones en México y las establecidas en el Acuerdo de París, reduciendo el uso de combustibles fósiles que provocan el calentamiento global. Beneficiando a los mexicanos y a la población mundial.
- Con datos de la AMDEE, en el caso de los proyectos eólicos ya activos, estos evitan una importante cantidad de emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera.
- De acuerdo por la posición geográfica del país, es uno de los que goza de la mayor radiación solar para uso de la generación de electricidad o para calefacción.
- La energía solar al ser un recurso renovable no impacta en el calentamiento global y disminuye la producción de gases de efecto invernadero y lo más importante es que se trata de una fuente inagotable.
- Para la generación de electricidad con energía eólica y solar, se utilizan los recursos naturales que están disponibles en todo el territorio nacional. Se evita la necesidad de importación de otro tipo de fuentes de energía.

2.3 El Código de Red y Mercado Eléctrico Mayorista

El Código de Red (CR) es propuesto por la Comisión Reguladora de Energía (CRE), con base en el artículo 12 fracción XXXVII de la Ley de la Industria Eléctrica (LIE). El CR fue emitido en abril del 2016 y entró en vigor en abril del 2019 [1].

En todo el ámbito que engloba el sector eléctrico, el CR es muy importante, brinda una resolución de forma administrativa y carácter general enfocado al cumplimiento de criterios en un enfoque de eficiencia, confiabilidad, calidad y seguridad del SEN. También, se puede describir al CR, como el instrumento principal en materia de confiabilidad del SEN.

A continuación, en la Figura 2.8, se presenta de forma esquemática todos los elementos del SEN que deben de cumplir con el CR, partiendo también del ejemplo de la generación de energía eléctrica del tipo no convencional [37]:

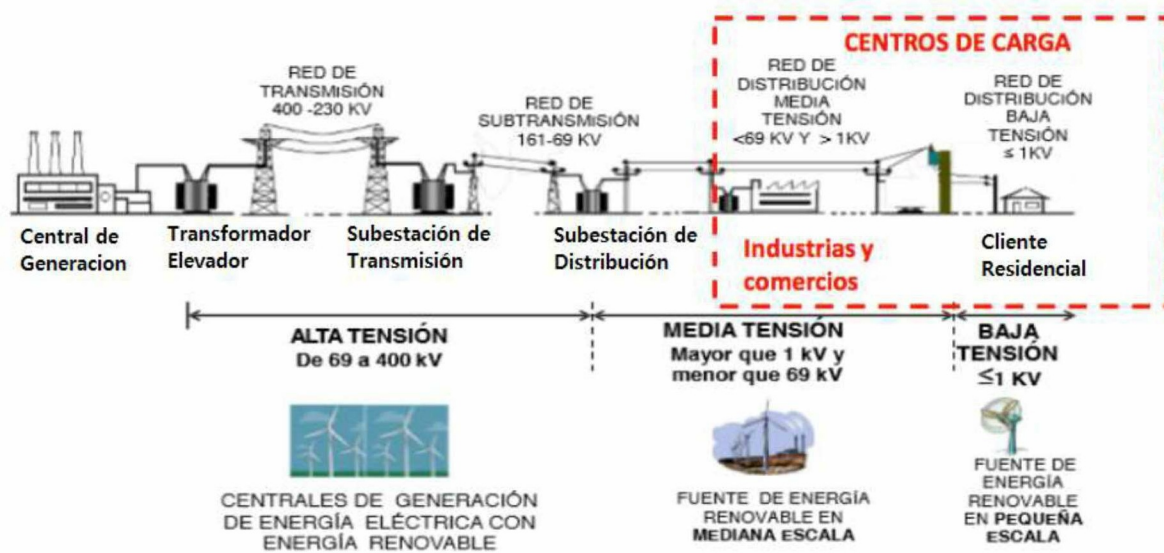


Figura 2.8. El Código de Red, cubre todo el Sistema Eléctrico Nacional. Fuente: [37]

Principales variables y elementos que, de acuerdo con el CR, deben cumplir con ciertos requerimientos:

- Frecuencia
- Tensión
- Factor de Potencia
- Control
- Administración de arreglo de protecciones
- Calidad de Energía

Con base en los requerimientos, el SEN puede regular actividades, tales como la interconexión de centrales eléctricas. Para el control del cumplimiento del CR, se realizan inspecciones y actos de verificación, con el fin de que los usuarios y

abastecedores de energía conectados al SEN, tengan una buena calidad de la energía eléctrica, que es uno de los objetivos principales del CR [37].

El contar con una regulación del sector eléctrico, permite contar con una eficiencia, seguridad y aseguramiento de los precios competitivos en el mercado. Uno de los aspectos principales de esta regulación, es la creación de un Mercado Eléctrico Mayorista (MEM) operado totalmente por el CENACE [1].

En este mercado los participantes pueden comprar y vender la energía eléctrica, certificaciones en energías limpias, potencia o cualquier otro servicio o producto para la aplicación en el SEN.

Para el caso de las energías limpias, se espera una alta competitividad en el mercado. El MEM tiene costos variables, por esto último las energías que tienen menor costo variable son las despechadas primeramente al SEN. De la misma manera, se encuentran las centrales generadoras no convencionales (energías limpias), estas cuentan con menores costos variables a comparación con las centrales convencionales (energías fósiles). Por esto último, las centrales no convencionales pueden contar con la prioridad en el despacho por parte del CENACE [37].

Un dato adicional; para el caso de la compra y venta de certificaciones en energías limpias, esto puede representar un ingreso agregado para los Generadores Limpios, además de que existen metas crecientes en el ámbito de las energías limpias en el país, ya que se espera un incremento en el ámbito energético del 40 % para el 2035 [38].

Todas las centrales eléctricas que cumplan con todos los requerimientos de interconexión del CENACE, tendrán acceso abierto a las redes de transmisión y distribución [38] en el momento que sea factible.

En el CR, específicamente en las “Disposiciones Generales del SEN”, capítulo 3: Disposiciones Generales de interconexión para generadores (INTG), se define los requerimientos para el aseguramiento de la eficiencia, calidad, continuidad, confiabilidad, seguridad y sustentabilidad en materia de interconexión al SEN, para cualquier central eléctrica. El “Manual Regulatorio de Requerimientos Técnicos para la Interconexión de Centrales Eléctricas al SEN”, complementa también esta disposición en el CR [21].

Las plantas generadoras de energía eléctrica, del tipo convencional y no convencional, que estén o deseen la interconexión a la red eléctrica, deben de cumplir todos los requerimientos de calidad y confiabilidad de energía, presentadas por el CR [39].

2.3.1 Requerimientos para la interconexión de centrales eléctricas fotovoltaicas y eólicas en México

En esta sección, se señalan las restricciones que, de acuerdo con el CR, deben cumplir los parámetros de potencia activa, potencia reactiva y los límites de operación de frecuencia y tensión para las centrales eléctricas fotovoltaicas y eólicas en México, para la aprobación de su interconexión al SEN. En este mismo caso, cualquier tipo de central eléctrica deberá tener un certificado del cumplimiento de los requerimientos emitidos por el CR, remitido por una unidad de Inspección [39].

En el CR se definen dos tipos de centrales eléctricas, dependiendo de su operación en la red eléctrica [1]:

- Central eléctrica asíncrona: Sistema de generación de electricidad, interconectada asíncronamente a la red o por medio de electrónica de potencia.
- Central eléctrica síncrona: Equipos e instalaciones que generan electricidad suficiente, manteniendo un valor constante de voltaje y en sincronía con la frecuencia especificada.

En el, “Manual Regulatorio de Requerimientos Técnicos para la Interconexión de Centrales Eléctricas al SEN” apartado “Requerimientos técnicos de interconexión de centrales eléctricas”, clasifica en 4 categorías a las centrales eléctricas dependiendo de su capacidad instalada [1]:

Tabla 2.3: Categorías de las centrales eléctricas dependiendo su capacidad instalada. Fuente: [21]

Áreas Síncronas	Central Eléctrica			
	Tipo A	Tipo B	Tipo C	Tipo D
Sistema Interconectado Nacional	P<500kW	500Kw ≤ P > 10MW	10MW ≤ P > 30MW	P≥30MW
Sistema de Baja California	P<500kW	500kW ≤ P > 5MW	5MW ≤ P > 20MW	P≥20MW
Sistema de Baja California Sur	P<500kW	500kW ≤ P > 3MW	3MW ≤ P > 10MW	P≥10MW
Sistema Interconectado de Mulegé	P<500kW	500kW ≤ P > 1MW	1MW ≤ P > 3MW	P≥3MW

Partiendo de la clasificación de una central eléctrica, dependiendo de su capacidad instalada, en este proyecto se analizarán los requerimientos establecidos en el CR para las centrales eléctricas fotovoltaicas y eólicas en México, que se encuentren en la categoría B, C y D en el área síncrona que comprende al Sistema Interconectado Nacional, ya que en este sistema es donde se tiene mayor impacto en la red eléctrica por la operación de centrales y por la capacidad que despachan.

A continuación, se muestran los requerimientos técnicos de interconexión, que se establecen en el CR, para estas dos centrales eléctricas en México.

- Requerimientos de interconexión ante variaciones de frecuencia

Para centrales eléctricas del tipo B, C y D: Durante su vida útil, la central eléctrica debe permanecer en operación e interconectada a la red, dentro de los rangos especificados de frecuencia y tiempo. La siguiente tabla, muestra los tiempos máximos a los que pueden operar, a frecuencias diferentes a la nominal, las centrales fotovoltaicas y eólicas en el área síncrona que comprende al SIN [21]:

Tabla 2.4: Tiempos de operación para una Central Eléctrica a frecuencias diferentes del valor nominal, sin desconexión de la red. Fuente: [21]

Áreas Síncrona	Rango de frecuencia	Tiempo máximo de operación
Sistema Interconectado Nacional y Baja California	61.8Hz = $f < 62.4\text{Hz}$	15 minutos
	61.2Hz = $f < 61.8\text{Hz}$	30 minutos
	58.8Hz = $f < 61.2\text{Hz}$	Ilimitado
	58.2Hz = $f < 58.8\text{Hz}$	30 minutos
	57.0Hz = $f < 58.2\text{Hz}$	15 minutos

Para las centrales eléctricas del tipo B, C y D, se deben cumplir los requerimientos ligados a: respuesta ante rapidez de cambio de frecuencia, respuesta ante alta frecuencia y mantener la potencia activa constante respecto a cambios de frecuencia. En el caso de presentarse una condición de alta frecuencia, la central eléctrica deberá controlar la potencia activa en respuesta al aumento en la frecuencia, en un tiempo menor a 2 segundos (el CR establece que este control se debe activar a partir de los 60.2 Hz) [21]. El control de la potencia activa según los requerimientos en el CR, se efectúa cuando se superan los límites establecidos de frecuencia en el sistema. La frecuencia nominal establecida en el CR es 60 Hz. Entonces, cuando se presenta una desviación mayor de la frecuencia nominal establecida, la central eléctrica debe proporcionar un cambio en la salida de potencia activa.

Para el caso exclusivo de centrales de tipo B, se debe tener un control de potencia activa (potencia de salida). Esta situación, va ligada con la disponibilidad de recursos de la fuente primaria de energía para la central eléctrica [21].

- Requerimientos de interconexión, ante variaciones de tensión

Para el caso exclusivo de las centrales eléctricas de tipo A, se debe mantener la interconexión con la red, operando dentro de los rangos establecidos de tensión y tiempo especificados en la siguiente tabla [21]:

*Tabla 2.5: Valores de operación sin desconexión con la red para centrales eléctricas de tipo A.
Fuente: CRE, Código de Red*

Áreas Síncronas	Rango establecido de tensión	Tiempo mínimo de operación
Sistema Interconectado Nacional, Baja California, Baja California Sur y Sistema Eléctrico de Mulegé	$0.90pu \leq V < 1.10pu$	Ilimitado

Para el caso de las centrales eléctricas de tipo B, C y D se aplica los requerimientos de la siguiente tabla [1]:

Tabla 2.6: Valores de operación sin desconexión con la red para centrales eléctricas de tipo B, C y D. Fuente: CRE Código de Red

Áreas Síncronas	Rango establecido de tensión	Tiempo mínimo de operación
Sistema Interconectado Nacional	$1.05pu \leq V < 1.10pu$	30 minutos

Cuando se presentan simultáneamente unidades: bajas o altas en la tensión y frecuencia, el CENACE tiene la facultad de otorgar tiempos más cortos de operación para interconexión con la red, para las centrales eléctricas [21].

Las centrales eléctricas, deben mantener la interconexión con la red y operar dentro de los rangos establecidos de tensión y tiempo especificados en las tablas 2.5 y 2.6. Las variaciones de tensión, no deben alcanzar valores menores o mayores al 10% de la tensión nominal en el punto de interconexión con la red eléctrica.

- Requerimientos de control de tensión y potencia reactiva

Las centrales eléctricas síncronas de tipo B, C y D deben de contar con el control de la potencia reactiva, que va en un rango de factor de potencia de 0.95 en atraso

y adelanto. Así también, el sistema de control automático de tensión debe proporcionar un voltaje constante en las terminales de la central eléctrica, es decir, sin inestabilidad [21].

Exclusivamente, para las centrales eléctricas síncronas de tipo C, el CENACE tiene la facultad de precisar la potencia reactiva adicional que debe proporcionar la central eléctrica. Para el sistema de control de tensión, se debe acordar con el CENACE los parámetros y ajustes que compongan el sistema [1].

2.3.2 Requerimientos de interconexión de centrales eléctricas en Alemania

Desde los años 90's, Alemania ha impulsado la producción de energía eléctrica a través de los recursos renovables. A partir del año 2000, con la publicación de la Ley de Energías Renovables se impulsó aún más el uso de este tipo de energía limpia. El gobierno alemán pactó con las empresas energéticas dejar de hacer uso de la energía nuclear en el año 2022. La transición al uso de las energías renovables comenzó a crecer rápidamente a partir del año 2011, esto a causa de lo ocurrido en Fukushima, Japón. Otro de las principales razones para ésta transición es dejar de hacer la importación de gas natural y petróleo [40].

En 2020, las energías renovables lograron aventajar la producción de energía eléctrica con combustibles fósiles, siendo la solar y la eólica las que destacaron.

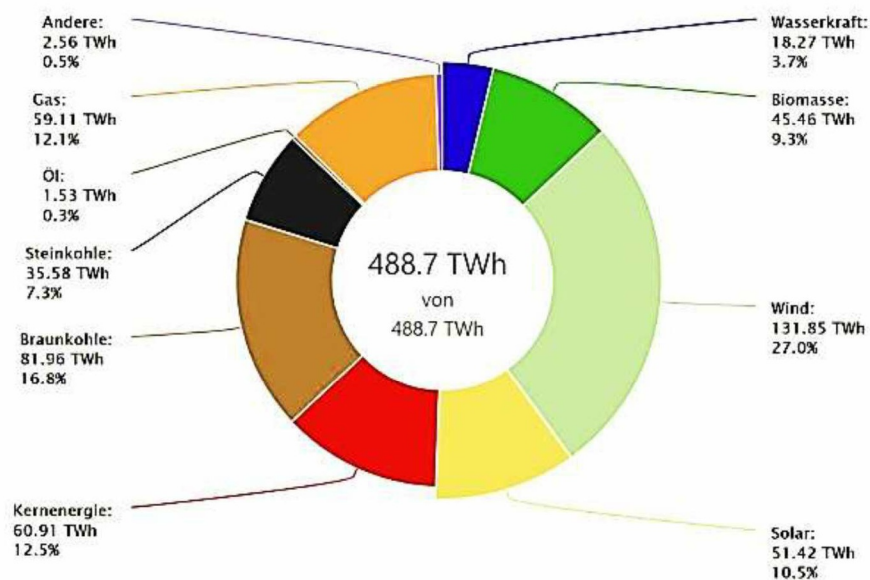


Figura 2.9. Generación de energía eléctrica neta en Alemania en 2020 (expresada en Tera vatios hora (TWh)). Fuente: Energy-Charts.info

Se puede ver en la Figura 2.9, que las energía Solar (color amarillo opaco) y Eólica (color gris), tuvieron un gran aporte al sistema eléctrico alemán representando más de 70GW de la capacidad instalada, por ésta razón, es que los reglamentos para la generación de electricidad se deben de ir adaptando y modificando para garantizar la continuidad y la calidad de la electricidad.

El Código de Red que cada uno de los países emite para poder garantizar la continuidad, calidad y el suministro fiable y seguro de energía eléctrica evoluciona con requisitos de suma importancia como lo son: tener un control de la energía reactiva, tensión y frecuencia. Esto nos muestra que los códigos de red suelen ser semejantes [41]. A continuación se mencionan algunas de las semejanzas entre los códigos de red mexicano y alemán:

- Control de la potencia activa y frecuencia: monitoreo de las frecuencias de los inversores y turbinas eólicas según los tiempos de respuesta
- Control de potencia reactiva y tensión: determinar la capacidad reactiva en el punto de conexión de acuerdo con el tipo de equipo.
- Calidad de la electricidad: Mantener los niveles de distorsión armónica y niveles de parpadeo adecuados para una correcta transmisión.
- Capacidad de respuesta a baja tensión: poder soportar averías en términos de inyección de la energía reactiva a la red
- Sistemas auxiliares: control de amortiguación de las oscilaciones de potencia, predicción de alguna avería [41].

El “RfG, Reglamento UE 2016/631”, es el código de red con los requisitos para la conexión a la red de los generadores, define las normas necesarias para el funcionamiento de las unidades de generación interconectadas a la red. Así también, incluye requisitos para el modelado y simulación de conformidad de los generadores.

Sin embargo, en cada país estos requisitos suelen adaptarlos de acuerdo a sus necesidad, una de las diferencias notorias entre el código de red alemán y el mexicano es en la clasificación de los generadores de acuerdo al tipo (A, B, C o D), ya que Alemania pide que si los generadores sobrepasan la frecuencia 50.2Hz sean desconectados de la red, para la capacidad de potencia reactiva, el factor de potencia debe ser de 0.9 en adelanto y retraso [42].

Cada país goza de un Código de Red que le permite cumplir con lineamientos para una mejora en la red eléctrica, algunos muy similares en sus requerimientos y otros totalmente diferente pero sin perder de vista su objetivo principal: el asegurar que nada afecte en la calidad de la red disminuyendo los problemas de transmisión que llegaran a presentarse y más particularmente para las energías no convencionales y más aún para la energía Solar y Eólica que son el interés particular de éste trabajo.

CAPITULO 3. Sistemas Fotovoltaicos en México

El aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica ha crecido de manera importante. Esto debido a la lucha en contra de la sobreexplotación de los combustibles fósiles para la generación de electricidad, al deseo de disminuir el impacto en el cambio climático y a la búsqueda de opciones que permitan generar electricidad de una manera limpia y sin tanto impacto en el medio ambiente. Este tipo de generación de electricidad a gran escala, es decir, con centrales eléctricas conectadas al SEN, pueden presentar problemas por la intermitencia de su operación, de forma que ocasione que la red no cumpla con la carga necesaria para mantener una estabilidad en el suministro y no cumpla con la generación requerida por los usuarios.

En este capítulo se describe, a grandes rasgos, el posible aprovechamiento de la energía solar, en particular la fotovoltaica, el potencial que México tiene para producir este tipo de energía. También se hace un análisis de la generación eléctrica a través de los sistemas fotovoltaicos y abordando el impacto que éstos tienen en el sistema eléctrico al interconectarse en la red pública.

3.1 Historia y origen de la energía solar fotovoltaica

Fueron los antiguos egipcios quienes encontraron la forma de aprovechar la energía que el Sol les otorgaba durante el día, la energía luminosa la usaron para iluminar sus edificios y la energía térmica para mantener el calor de sus construcciones durante la noche [43].

Sin embargo, si se analiza la historia, desde los siglos anteriores hasta la actualidad, se puede encontrar que se han desarrollado diversos proyectos que involucran a la energía solar y que buscan el aprovechamiento del calor, así como también del efecto fotovoltaico.

El efecto fotovoltaico se presenta cuando una partícula de la radiación solar, llamada fotón, interactúa con un electrón del material con el que está hecho el panel fotovoltaico y liberándose por distintos materiales que generan un voltaje y mantienen una corriente eléctrica. Dicho efecto, fue descubierto por Alexandre-Edmond Becquerel, un físico francés, allá por el año de 1839, sus estudios son un pilar científico [44].

Charles Fritts inventor norteamericano, en el año de 1883, fabrica la primera celda solar usando como semiconductor al Selenio con una pequeña y delgada capa de Oro, de 1% de eficiencia, su aplicación fue en sensores de luz para cámaras fotográficas. La celda de Silicio que actualmente es la más utilizada fue creada en 1940 por Russell Ohl [45].

Aproximadamente en la década de los setenta, en parte por el desabasto y aumento en el precio del petróleo, la energía solar aparece como una alternativa. Las primeras aplicaciones de los sistemas fotovoltaicos fueron los módulos para convertir la luz solar en energía útil y que se usaba en el diseño de satélites artificiales. Los intentos del ser humano por aprovechar la energía solar de manera directa, tratan de hacer lo que en ocasiones la naturaleza hace: convertir la irradiación del Sol en otra forma de energía [46].

En la actualidad, el compromiso de proteger el medio ambiente, incentiva al ser humano a hacer uso de las energías limpias, sobre todo ahora que va dándose la producción de paneles solares más económicos, que promueve la creación de grandes plantas solares conectadas a la red eléctrica pública [45].

3.2 Potencial y generación solar en México

La International Renewable Energy Agency (IRENA, 2015), dice que México se encuentra ubicado dentro del conocido “cinturón solar” y tiene un alto nivel de irradiación solar, en promedio al año se tienen 5.5kWh/m² por día, esto por el aprovechamiento de casi 11 horas de luz solar para el invierno y aproximadamente 13 horas en el verano.

En 2019, el CENACE recibió aproximadamente 2500 solicitudes para la interconexión de SFV, de los cuales 1400 fueron de 1 kW de capacidad [47].

Los proyectos a gran escala son desarrollados para interconectarse a la red de CFE. Con la introducción del Mercado Eléctrico Mayorista (MEM) en 2016, en su primera fase se lograron 28 contratos a largo plazo para proyectos de energía fotovoltaica que entraron en 2018 y 2019 [48].

A continuación, aparecen las distintas entidades que apoyan a este tipo de generación de energía eléctrica:

- Asociación Mexicana de Energía Solar (ASOLMEX)
- Asociación Mexicana de la Industria Fotovoltaica (AMIF)
- Asociación Nacional de Energía Solar (ANES)
- Asociación Mexicana de Energía “AME”
- Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE) [49].

Y así como es importante la difusión y el mayor conocimiento de este tipo de generación de electricidad, es también necesario apegarse a las normas y políticas que rigen en el país para que el suministro de electricidad sea confiable, continuo y seguro para los usuarios, apegados al Código de Red establecido. Los

organismos encargados de verificar y controlar que se cumpla con el Código de Red son:

- Comisión Federal de Electricidad (CFE)
- Secretaría de Energía (SENER)
- Centro Nacional de Control de Energía (CENACE)
- Comisión Reguladora de Energía (CRE).

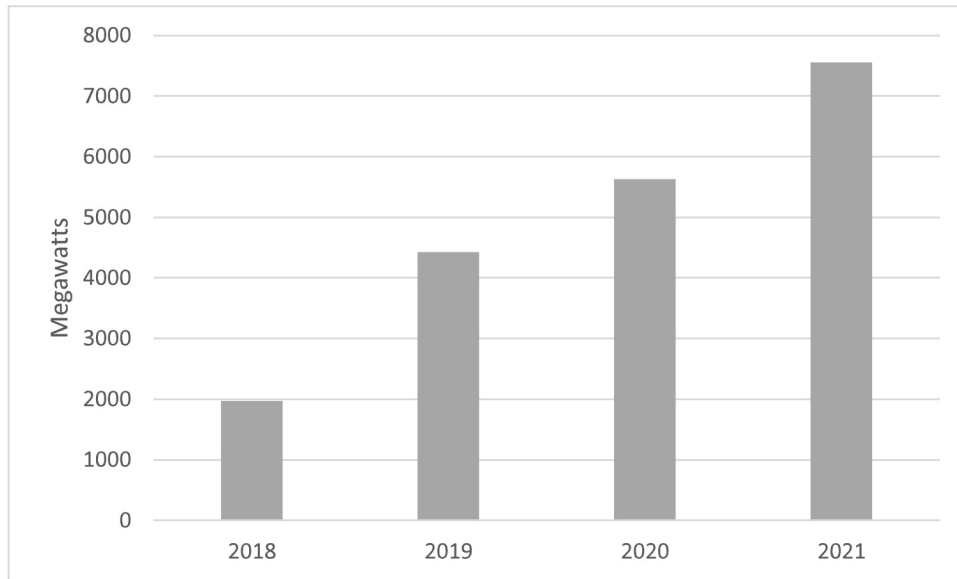


Figura 3.1. Evolución de la capacidad instalada por año de la energía Solar Fotovoltaica. Fuente: SENER

En el gráfico de la figura 3.1, se puede ver que la capacidad instalada en 2021 se triplicó a comparación de la de 2018, se puede ver un crecimiento importante. La capacidad a nivel global: Alemania, China, Japón y Estados Unidos suman aproximado el 60% de la generación de energía fotovoltaica.

3.2.1 Centrales fotovoltaicas en México

Como se mencionó en el capítulo 2, de acuerdo con el informe de la CENACE [26], las dependencias pertenecientes de las centrales eléctricas en México se clasifican en:

- Centrales eléctricas pertenecientes a CFE y los Productores Independientes de Energía (PIE)
- Centrales eléctricas pertenecientes al sector privado

La figura 3.2, muestra la ubicación de las centrales solares que se encuentran a lo largo de la República Mexicana.



Figura 3.2. Centrales Eléctricas Solares en México 2021. Fuente:ASOLMEX

Las centrales eléctricas solares fotovoltaicas en México pertenecen en su totalidad al sector privado, en la tabla 3.1 se describen a las 18 principales en el país [26].

Tabla 3.1 Principales centrales eléctricas fotovoltaicas privadas al 31 de diciembre del 2020.

Fuente: [26]

N°	Nombre de la Central Eléctrica Solar Fotovoltaica	Ubicación	Gerencia de Control Regional
10	EGP Magdalena Solar, S de R. L. de C. V. (Central la Magdalena II)	Tlaxco, Tlaxcala	Oriental
11	Energías Renovables Venta III S.A de C.V	Cuyoaco, Puebla	Oriental
12	Buenos Días Energía, S de R.L de C.V.	Calpulalpan, Tlaxcala	Oriental
18	ENR AGS, S.A. de C.V.	El Llano, Aguascalientes	Occidental
19	FRV Potosí Solar, S. de R.L. de C.V.	Villa de ramos, San Luis Potosí	Occidental
20	FRV Potrero Solar, S. de R.L. de C.V.	Lagos de Moreno, Jalisco	Occidental
21	Parque Solar Don José, S.A. de C.V.	San Luis, Guanajuato	Occidental
24	Parque Solar Los Cuervos, S.A. de C.V.	Aguascalientes, Aguascalientes	Occidental
25	Iberdrola Renovables Centro, S. A. de C.V	Villa de Arriaga, San Luis Potosí	Occidental
26	Cúbico Alten Aguascalientes Uno, S.A.P.I. de C.V	El llano, Aguascalientes	Occidental
28	Kenergreen, S.A.P. de C.V. (Central Navojoa Solar)	Navojoa, Sonora	Noroeste
29	AT Solar V, S. de R.L. de C.V.	Pitiquito, Sonora	Noroeste
30	Tuto Energy II, S.A.P.I. de C.V.	Pitiquito, Sonora	Noroeste
32	Villanueva Solar, S.A. de C.V	Viesca, Coahuila	Norte
33	Villanueva Solar Tres, S.A. de C.V.	Viesca, Coahuila	Norte
34	BNB Villa Ahumada Solar, S. de R.L. de C.V	Ahumada, Chihuahua	Norte
35	Central Fotovoltaica Border Solar Norte, S.A. de C.V.	Ciudad Juárez, Chihuahua	Norte
36	Fisterra Energy Santa Maria 1, S.A. P.I. de C.V.	Galeana, Chihuahua	Norte

3.3 Análisis del impacto de la operación de los SFV en la red

Un SFV se compone de dispositivos eléctricos y electrónicos. El principal elemento es el módulo fotovoltaico que genera electricidad por la captación de la radiación solar, ésta es captada por células que transforman la radiación en energía eléctrica de DC. Dependiendo de la aplicación para la que se necesite el sistema varían los demás componentes.

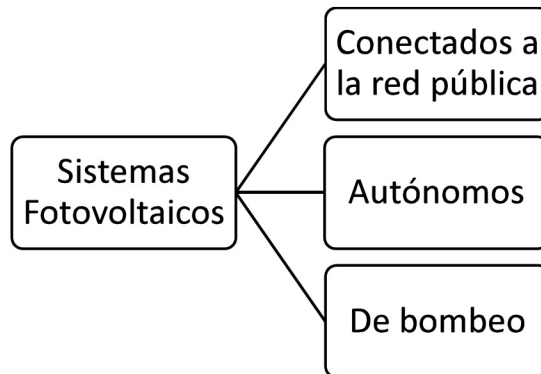


Figura 3.3 Clasificación de los Sistemas Fotovoltaicos. Fuente: [50]

En el esquema, podemos ver que dichos sistemas se clasifican en tres grupos. Los sistemas conectados a la red pública, que son los de interés de este proyecto. Se dice que son conectados a la red porque la energía que van captando y que no se consume, para no ocupar de un sistema de almacenamiento la inyectan al sistema eléctrico, cumpliendo las condiciones que establecen las normas para que la energía sea eficiente y de calidad.

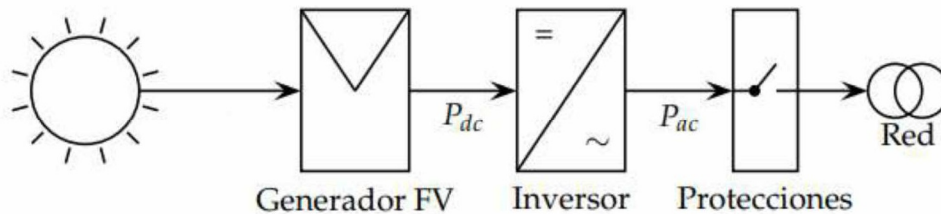


Figura 3.4. Esquema de un Sistema Fotovoltaico conectado a la red pública. Fuente: [50]

El esquema que se puede ver en la figura 3.4, es un sistema conectado a la red y se observa como la radiación captada se convierte en DC y el generador la pasa a un inversor DC y éste la transforma en AC para ser suministrada a la red [50].

A la instalación de este sistema se le conoce como planta, central, huerto o granja fotovoltaica donde los paneles se instalan en el piso en largas filas. Para diseñarlas se debe realizar un análisis que indique la viabilidad de la instalación y si es factible en términos económicos, además, es necesario contar con una amplia superficie para colocar los paneles de forma que puedan captar la radiación, es decir, se requiere de su adecuada inclinación y orientación [51].

Una de las problemáticas que se pueden presentar para que un sistema fotovoltaico no funcione es que en el lugar de instalación se presenten sombras, ya sea de algún factor externo que puede ser un árbol o algún muro e incluso entre los mismos paneles si la distancia de instalación entre cada panel no sea adecuada. También pueden surgir dificultades de funcionamiento, como puede ser que alguna conexión no esté bien realizada, se observe algún desprendimiento de la capa protectora del módulo, mala calidad de los materiales tanto de las células que captan la irradiación y de la estructura en general de los módulos. En [52] se muestra un ejemplo de esta problemática.

Sin embargo, una posible falla en el inversor es importante, pues éste es el que controla todo el funcionamiento. En el caso de que el inversor detecte una falla en la red eléctrica, se desconecta hasta que esta problemática se resuelva y pueda volver a su estado normal de funcionamiento. Si detecta una frecuencia fuera de sus límites, pasa a un modo isla, esto porque detecta una inestabilidad en la red. Otra situación es que el inversor detecte tensiones fuera de los rangos superiores o inferiores establecidos, entonces interrumpe su función porque la calidad de la tensión no es la adecuada y vuelve a su estado de funcionamiento hasta que se alcancen los límites de trabajo aceptables, esto también sucede cuando el generador presenta niveles bajos de tensión [53].

CAPÍTULO 4. Sistemas Eólicos en México

Un factor importante en la identificación de las fuentes de generación de energía del tipo no convencional es que no se tiene control sobre el recurso energético para la producción de electricidad. En este capítulo se plantea el recurso energético que es el viento, describiendo su origen, señalando también cuál es el potencial eólico que existe en México que, dicho sea de paso, tiene un gran potencial. Posteriormente se señala a las principales centrales eléctricas de este tipo en el país, con una breve descripción técnica, y para finalizar con el análisis de la operación de estos sistemas, se revisan las problemáticas que presenta, incluyendo técnicas y metodologías utilizadas para abordarlas, que hacen más adecuada la integración de los Sistemas de Generación Eólica (SGE) a la red eléctrica.

4.1 Historia y origen de la energía eólica

Desde el siglo XIII, los molinos de viento de eje horizontal ya eran parte integral de la economía rural. El uso de la energía eólica para la generación de electricidad se remonta a finales del siglo XIX y durante gran parte del siglo XX. Sin embargo, hubo poco interés en su utilización, aunque se usó para la carga de baterías para viviendas remotas. Posteriormente, estos sistemas de generación de baja potencia se dejaron de utilizar una vez que el acceso a la red eléctrica se hizo público [54].

En 1941, en Estados Unidos, se construyó una turbina eólica (diseñada por Palmer Putnam y fabricado por S. Morgan Smith) con una capacidad de 1250 kW, convirtiéndose en la turbina eólica más grande del mundo durante 40 años. Esta notable máquina tenía un rotor de acero de 53 metros de diámetro, control de paso de tramo completo y aletas para reducir las cargas [54].

Se puede definir como recurso energético; a las sustancias que pueden utilizarse como fuente de energía, que se puede obtener por diversos procesos y hay renovable y no renovable. Debido a la gran variedad de sustancias, se pueden clasificar en dos categorías generales: por su disponibilidad energética y en función de su proceso de formación [55].

El origen del viento, en un sentido macro-meteorológico, se define como la presencia, en la atmósfera, de masas de aire en movimiento producto principalmente de las diferencias de temperatura en la superficie de nuestro planeta ocasionada por la radiación solar. Por ello, la diferencia de temperatura en la superficie terrestre, es lo que da origen a este recurso energético, el cual es utilizado para la generación de electricidad. Se pueden comparar las zonas ecuatoriales con las zonas polares del planeta, para darse cuenta que en las zonas ecuatoriales hay mayor absorción de radiación solar [56].

En [17], se menciona que el viento se define principalmente por su velocidad y su dirección y estas dos características dependen de varios factores, como por

ejemplo; la ubicación geográfica, características climáticas, altura por encima topográfica del suelo y de la superficie. Los cálidos y livianos aires de la región ecuatorial se elevan a las capas externas de la atmósfera y se mueven hacia los polos, siendo reemplazado en las capas inferiores por un flujo de retorno de aire más frío procedente de las regiones polares. Esta circulación de aire se ve afectada también por las fuerzas de Coriolis asociadas con la rotación que presenta la Tierra [17]. Estos flujos de aire a gran escala, que tienen lugar en toda la atmósfera, constituyen los vientos geostróficos [54].

La capa inferior de la atmósfera se conoce como capa superficial y se extiende a una altura de 100 metros. En esta capa, los vientos se retrasan por las fuerzas de fricción y obstáculos que alteran, no solo su velocidad, sino también su dirección. Este es el origen de los flujos turbulentos, que provocan variaciones en la velocidad del viento en un amplio rango de amplitudes y frecuencias. Además, la presencia de mares y grandes lagos provocan la circulación de masas de aire de naturaleza similar a los vientos geostróficos. Todos estos movimientos de aire se denominan vientos locales [17].

El viento en un sitio determinado y cerca de la superficie de la Tierra, es el resultado de la combinación de los vientos geostróficos y locales. Por lo tanto, el viento depende de la ubicación geográfica, el clima, la altura a nivel del suelo, la rugosidad del terreno y los obstáculos del entorno. Estos son los vientos que interactúan con las turbinas eólicas en los aerogeneradores captando parte de la energía cinética contenida en ella y convirtiéndola en energía eléctrica utilizable [17].

4.2 Potencial y generación eólico en México

Para cualquier central eléctrica, el factor de planta o factor de capacidad es muy importante. Este factor indica la utilización de la capacidad de la central en el tiempo y varía dependiendo del tipo de combustible que utilice la central eléctrica y del tipo de sistema. Es importante indicar, que el factor de planta no es la eficiencia, ni el factor de disponibilidad y se calcula por medio del cociente de: la energía real generada por la central y la energía generada trabajando a plena carga (el periodo para este cálculo es generalmente de un año), todo esto de acuerdo con los valores nominales en las placas de identificación de los equipos. A continuación, se presenta un ejemplo del cálculo del factor de capacidad [57]:

Una central eléctrica con capacidad de 1000 MW, generó 648 MW-h en 30 días. La energía generada posible a plena capacidad, con disponibilidad de 100%, se calcula multiplicando la capacidad posible máxima por el número de horas en operación: $1000 \text{ MW} \times 30 \text{ días} \times 24 \text{ horas/día} = 720 \text{ MW-h}$. Con este último dato, el factor de planta se determina como: $(648 \text{ MW-h} / 720 \text{ MW-h})$. Para el caso de esta central eléctrica, el factor de planta es 0.9 (el 90%) [57].

Probablemente para este ejemplo, se puede tratar de una central nuclear o una termoeléctrica. En la tabla 4.1, se muestra el ejemplo de factores de planta típicos para diferentes centrales eléctricas:

Tabla 4.1. Ejemplo de factores de planta típicos. Fuente: [55]

Factores de Planta Típicos	
Parque Eólico	10%-40%
Central Fotovoltaica	10%-30%
Central Hidroeléctrica	60%
Central Nuclear	60%-98%
Central Termoeléctrica	70%-90%
Central de ciclo combinado	60%

En la referencia [58], se menciona que en México se tiene un gran potencial eólico, con sitios identificados donde el viento es de alta calidad. Las zonas costeras de los estados: Baja California Sur, Baja California, Sonora, Tamaulipas, Oaxaca y Yucatán, son los principales sitios en el país donde existe un gran potencial eólico.

Se han realizado puntuales exploraciones y reconocimiento de este recurso energético por instituciones federales mexicanas, para confirmar y descubrir áreas para el establecimiento de parques y centrales eólicas. Se concluyó que existen 3 regiones en donde, de manera estructural, se presentan factores de planta >40% en Yucatán, Oaxaca y Tamaulipas [59].

La figura 4.1, muestra las zonas con mayor potencial eólico en México y esta información es el resultado de un estudio realizado en el año 2018, donde se observa una clasificación del potencial eólico, según el factor de planta de la zona [59]. En este caso, los estados de Oaxaca, Yucatán y Tamaulipas, cuentan con factores de planta cercanos al 45 % y representan a las zonas con mayor potencial eólico en México.



Figura 4.1. Zonas con mayor potencial Eólico en México. Fuente: [58]

Es muy importante la mención de la zona del Istmo de Tehuantepec, en Oaxaca, porque presenta velocidades de viento ideales para la generación de electricidad con tecnología eólica. Tiene uno de los mayores potenciales eólicos en todo el mundo, aproximadamente entre 5 000 y 7 000 MW de capacidad anual, que son suficientes para el abastecimiento de aproximadamente 18 millones de personas [59].

El enorme potencial presente en esta zona se debe a la gran potencia del viento, que está por arriba de los 1200 W/m^2 , especialmente durante los meses de octubre y febrero. Se estima una velocidad alrededor de los 8 m/s a 50 metros por arriba del suelo, principalmente en las zonas de: La Mata, La Venta y La Ventosa. De igual manera, para este sitio y en particular en el estado de Oaxaca, colaboran con el desarrollo de los parques eólicos que integran el corredor Eólico del Istmo de Tehuantepec [59].

Para fomentar el desarrollo y generación de electricidad con tecnología eólica en el país y contribuir con la sustentabilidad y la seguridad energética, en el año 2005 se fundó la Asociación Mexicana de Energía Eólica (AMDEE). Esta asociación, representa a los desarrolladores de proyectos de energía eólica, presentándolos a las autoridades, sectores sociales y de economía, con el fin de ofrecer oportunidades de inversión, tanto nacional y extranjera para obtener un crecimiento y consolidación en el desarrollo de la energía eólica en México [32].

Con datos de la AMDEE y [26], en el país, se cuenta con un total de 7691 MW de capacidad instalada para la generación de electricidad con tecnología eólica, que supone el 8.6 % de la capacidad total instalada en el 2021. Actualmente, se cuenta con 68 parques en operación en 14 estados de la república mexicana, con alrededor de 3175 aerogeneradores instalados y cerca de 12.2 millones de toneladas de CO_2 evitadas por año [60].

Los estados de Oaxaca, Nuevo León y Tamaulipas son los que más aporte de generación de electricidad con esta tecnología brindan al país, con el 73.5 % de la capacidad total en conjunto [60]. Por ello, se puede decir con claridad que la generación de electricidad con tecnología eólica se encuentra ya en operación en el país y se genera totalmente por dependencias del sector privado [59].

En la modalidad de autoabastecimiento en el sector privado en México, existen empresas que consumen su energía por medio de parques eólicos. En estas empresas, se encuentran compañías del sector: alimenticio, minero, automotriz, cementero y tiendas privadas de autoservicio, entre otras [59].

4.2.1 Centrales eléctricas eólicas en México

En [26], se muestra información referente a las centrales eléctricas en operación en el país en 2021, donde se clasifica en dos a las dependencias pertenecientes de las centrales eléctricas en México:

- Centrales eléctricas pertenecientes a CFE y PIE
- Centrales eléctricas pertenecientes al sector privado

La figura 4.2 muestra la ubicación y numeración de las 59 principales centrales eléctricas privadas en México, por su tipo de tecnología.

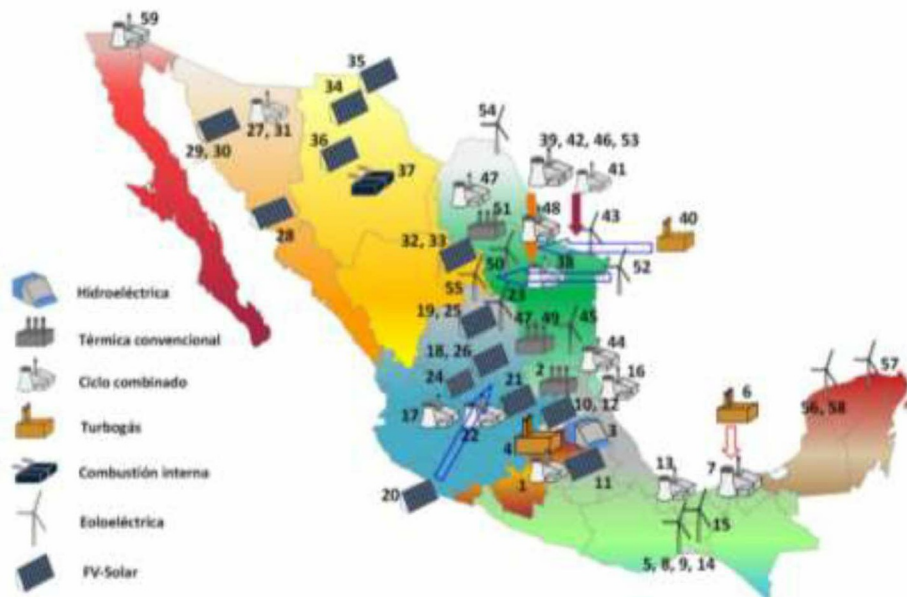


Figura 4.2. Centrales Eléctricas Privadas en México 2021. Fuente: [32]

Las centrales eléctricas eólicas en México pertenecen en su totalidad al sector privado. En la tabla 4.2, se describe a las 15 principales centrales eléctricas eólicas

en el país con su respectiva información técnica y numeración correspondiente en la figura 4.2 [26].

Tabla 4.2. Principales centrales eléctricas eólicas privadas al 31 de diciembre del 2020.
Fuente: [32]

PRINCIPALES CENTRALES EÓLICAS EN MÉXICO			
N°	Nombre de la Central Eléctrica Eólica	Ubicación	Gerencia de Control Regional
5	Eólica del Sur	Juchitán, Oaxaca	Oriental
8	Eurus	Juchitán, Oaxaca	Oriental
9	Fuerza y Energía Bii Hioxo	Juchitán, Oaxaca	Oriental
14	Eoliatec del Itsmo	Juchitán, Oaxaca	Oriental
15	Eoliatec del Pacifico	Santo Domingo, Oaxaca	Oriental
23	Dominica Energía limpia	Charcas, San Luis Potosí	Occidental
43	Parque eólico Reynosa III	Reynosa, Tamaulipas	Noreste
45	Eólica Mesa La Paz	Llera, Tamaulipas	Noreste
50	Dolores Wind	China, Nuevo Leon	Noreste
52	Parque Eólico El Mezquite	Mina, Nuevo León	Noreste
54	Energía limpia la Amistad (LIA)	Acuña, Coahuila	Noreste
55	Eólica Coahuila	General Cepeda, Coahuila	Noreste
56	Energía Renovable de la Península	Mérida, Yucatán	Peninsular
57	Fuerza y Energía Limpia de Tizimin	Tizimin, Yucatán	Peninsular
58	Eólica del Golfo	Mérida, Yucatán	Peninsular

4.3 Análisis de la operación de los sistemas eólicos en la red

Un sistema de generación eólico puede comprender una o más unidades de aerogeneradores de eje horizontal, operando eléctricamente en paralelo. Cada aerogenerador está constituido por los siguientes componentes principales: Estructura de la torre, un rotor con dos o tres palas unidas al buje, posiblemente una caja de cambios (para eliminar la transmisión directa), un generador eléctrico, mecanismos de control, sensores y un transformador [34] [61].

La figura 4.3, muestra los principales componentes empleados para la conversión de la energía eólica a energía eléctrica. La caja de cambios se evita en algunos sistemas de generación [61]:

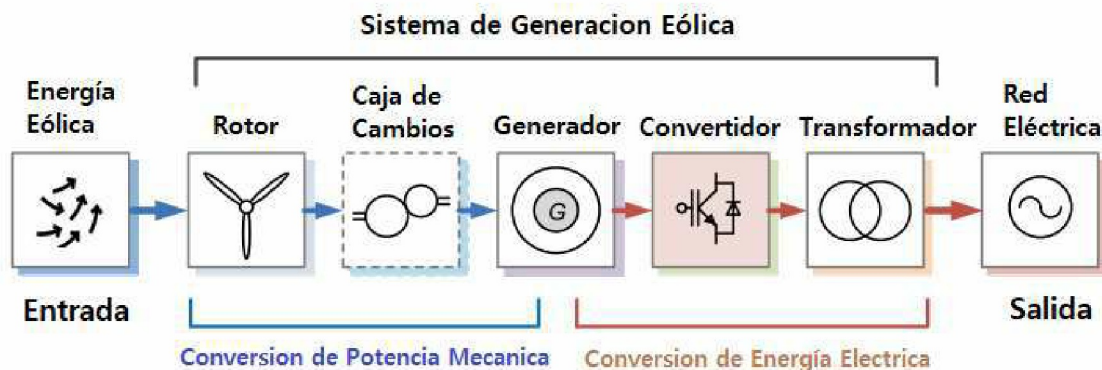


Figura 1.3. Etapas de funcionamiento de un SGE típico (en algunos sistemas se evita la caja de cambios). Fuente: [61]

El diseño de aerogeneradores de eje horizontal se puede clasificar por varios conceptos: dependiendo el tipo de generador, la capacidad de control de la velocidad y el enfoque mediante el cual se limita la potencia aerodinámica [62]. En un parque eólico, la capacidad de generación está sujeta al recurso eólico que se dispone en la zona, mientras que la potencia generada puede depender de los requerimientos de operación en la red eléctrica donde se está interconectado [34].

Ante el notable incremento de la interconexión de los SGE a la red eléctrica y las características fluctuantes e impredecibles de la energía eólica, que tienen un impacto en el funcionamiento y estabilidad en la red, la mayoría de los países han establecido estrictos requerimientos para el comportamiento de los aerogeneradores y la integración de los SGE, como es el caso del CR en México.

Esencialmente, los códigos de red siempre intentan hacer que los SGE actúen como centrales eléctricas convencionales desde el punto de vista de la operación con la red. Los SGE deben administrar sabiamente la potencia activa y reactiva entregada de acuerdo con la demanda, y proporcionar soporte de frecuencia y voltaje cuando sea requerido [61].

Respecto al control de los SGE, a continuación, se analizan algunas técnicas y metodologías de control utilizadas, para mejorar el rendimiento de los SGE, con el propósito de hacer que estos sistemas de generación eléctrica, sean cada vez más confiables para su conexión con la red eléctrica.

Debido al rápido crecimiento en la capacidad instalada de los SGE, las fallas en ellos pueden tener impactos adversos en la estabilidad de la red y el desempeño de confiabilidad que ahora se enfatiza en los altos costos de reparación y la pérdida de producción. Por ello, el control adecuado de los mismos juega un papel muy importante en la interacción con la red eléctrica por la naturaleza variable e intermitente del viento. Por este motivo, se emplean alguna metodología o mecanismos para limitar la captura de potencia en altas velocidades del viento y evitar sobrecargas [17] [61].

En el capítulo 4 de [17] se exploran los objetivos más comunes de los sistemas de control del aerogenerador bajo diferentes modos de funcionamiento. Se describen metodologías y estrategias de control utilizadas convencionalmente para cada una de las clasificaciones de los aerogeneradores de velocidad fija y variable. En este sentido, uno de los métodos de limitación de potencia, consiste básicamente en reducir la elevación de las palas, ya que la potencia capturada provoca elevadas velocidades de rotación afectando directamente el sistema de generación. Para ello, se incorporan dispositivos electromecánicos o hidráulicos en los aerogeneradores, para hacer girar las palas o parte de ellas, con respecto a sus ejes longitudinales [61]. Este método se conoce como “Pitch Control” y se describe a continuación.

El método “*Pitch Control*” permite cambiar el ángulo de inclinación de las palas del aerogenerador determinando el ángulo de ataque correspondiente a la velocidad de viento para controlar su eficiencia aerodinámica, disminuyendo el par producido en un aerogenerador de velocidad fija y la velocidad de rotación en un aerogenerador de velocidad variable [61] [63].

Al girar las palas alrededor de sus propios ejes, se modifica el flujo relativo del viento y en consecuencia, las cargas aerodinámicas ejercidas sobre el rotor. También, el coeficiente de potencia $C_p(\lambda, \beta)$ varía según el ángulo de ataque de las palas y en consecuencia, la captura de potencia también varía. El método “*Pitch Control*” opera cuando la producción de energía debe limitarse a la nominal y las altas velocidades del viento imponen cargas severas a la estructura del aerogenerador y al rotor [61].

La metodología “*Stall Regulated*” en aerogeneradores, ha tenido la mayoría de las investigaciones hace más de una década. Los principales argumentos que impulsaron la investigación de esta metodología fueron la reducción sustancial en los costos de instalación y mantenimiento, así como palas más livianas y sistemas de control más simples en comparación con los aerogeneradores por “*Pitch Control*” [64].

Los aerogeneradores por “*Stall Regulated*” se pueden diseñar para operar con la misma eficiencia que los sistemas de “*Pitch control*”, como es el caso de las palas del aerogenerador, ya que estas están diseñadas bajo efectos aerodinámicos para que cuando la velocidad del viento es alta (según los límites de velocidad establecidos) se controla la velocidad de rotación del aerogenerador, reduciendo la producción de la energía [66] [67]. Sin embargo, el principal inconveniente de los aerogeneradores por “*Stall Regulated*”, es mantener una potencia de salida constante en velocidades de viento altas. Por lo cual ha sido de los factores principales a favor de la adopción de la metodología “*Pitch Control*” para aerogeneradores de varios MW [64].

Conforme a los dos tipos de instalaciones de parque eólicos: “Onshore” (SGE, instalados en tierra) y “Offshore” (SGE, instalados en el mar), actualmente existe una cantidad importante de parques eólicos, que se encuentran en funcionamiento y que están aumentando la demanda de SGE más grandes de mayor eficiencia y fiabilidad [65]. A medida que aumenta el número de aerogeneradores y parques eólicos, la influencia del efecto sombra (Wake Effect, en inglés) tiende a ser más significativa. Este efecto, ocurre en volumen corriente aguas abajo (dependiendo de la dirección del viento), que se ve afectado por el aerogenerador de primera fila que absorbe el flujo de viento de entrada, lo que resulta en una reducción de la velocidad del viento al aerogenerador de atrás (o de segunda fila) [66]. Sin embargo, el flujo del viento provocado por el efecto sombra es más turbulento que el de la entrada, presentando pérdidas de generación de energía eléctrica en los aerogeneradores de atrás [63].

En los parques eólicos, los aerogeneradores a favor del viento sufren cargas estructurales y déficits de velocidad del viento causados por el “*wake effect*” de los aerogeneradores de primera fila. Esta degradación del rendimiento tiene un efecto importante sobre los beneficios que obtienen los parques eólicos. Por lo tanto, una mejor comprensión de las características del efecto sombra es esencial para obtener conocimientos y permitir la protección de los aerogeneradores de segunda fila en adelante, de los efectos sombra de los aerogeneradores de primera fila. La pérdida de viento y la intensidad de la turbulencia en los parques eólicos son dos aspectos relacionados con el patrón de colocación de los aerogeneradores, por ello este problema se puede mitigar optimizando el patrón de distribución de los aerogeneradores en un parque eólico [66].

En [67], se menciona que las pérdidas de potencia por el “*wake effect*” en los parques eólicos está entre el 5%-15% cuando los aerogeneradores están distanciados entre si 4-8 veces el diámetro del rotor. Normalmente, los parques eólicos operan con pérdidas de potencia entre el 10%-20% bajo este efecto [65].

En [65], se parte del análisis del “*wake effect*” donde menciona que el objetivo principal en el diseño de parques eólicos es aumentar la producción de energía. Por ello, la solución más sencilla para la reducción de este efecto es incrementar la

distancia entre aerogeneradores. Según la recomendación de la Asociación Danesa de la Industria Eólica (DWIA, por sus siglas en inglés), la separación entre los aerogeneradores debe ser entre 5-9 veces el diámetro del rotor en dirección al viento y 3-5 veces el diámetro del rotor en la dirección perpendicular al viento, como se muestra en la imagen de la figura 4.4 [67].

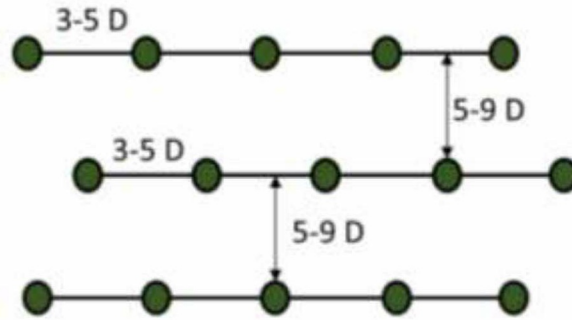


Figura 4.4. Distribución de aerogeneradores recomendada por DWIA. Fuente: [67]

Ante los exigentes códigos para el soporte de la red por parte de los SGF y SGE, por un lado, han aumentado el costo de la energía, pero por otro lado también han hecho que la energía fotovoltaica y eólica sea más adecuada para ser utilizada e integrada a la red eléctrica. Se prevé que los códigos de red más estrictos en más países seguirán impulsando la evolución de las tecnologías de electrónica de potencia, métodos y sistemas de red más avanzados. Estos dos sistemas de generación pueden emular más o menos el comportamiento de las centrales eléctricas convencionales, haciendo que las tecnologías de energía solar y eólica sean adecuadas para Integración a la red eléctrica.

CAPITULO 5. Análisis del impacto de las centrales Eólicas y Solares interconectadas a redes eléctricas

En general, el crecimiento de la población en todo el mundo ha causado que la demanda de energía eléctrica aumente. Sin embargo, se pronostica que en un futuro, a mediano plazo, se disminuirá de manera importante la producción de petróleo, que es el principal combustible para la generación de electricidad, pero que tiene un impacto negativo en el medio ambiente. Entonces el uso de fuentes alternas de energía para la generación de electricidad, como lo son las energías solar y eólica, representan una opción viable para cubrir el crecimiento de la demanda eléctrica y contrarrestar los impactos negativos al medio ambiente que tiene el uso de los combustibles fósiles en la generación de electricidad.

Particularmente, en México se debe impulsar el uso de estas dos energías para la generación de electricidad, ya que es un país con gran potencial de recursos de este tipo y esto puede originar beneficios como la mejora del desarrollo energético, mediante la generación de electricidad con fuentes no convencionales amigables con el medio ambiente y poder satisfacer la demanda energética [25][68].

5.1 Resultados del análisis

Como ya se mencionó en capítulos anteriores, los SFV y SGE son una solución altamente viable para ayudar a satisfacer la demanda de energía eléctrica, no sólo en México, sino también en otros lugares del mundo que tienen gran potencial del recurso solar y eólico [35], [36].

Por este motivo, los códigos de red (CR) que rigen en diferentes países, deben de actualizar sus requerimientos para la interconexión de este tipo de energías a la red, de manera que garanticen la confiabilidad de la infraestructura eléctrica. En los CR se determinan los requisitos obligatorios para cumplir con los lineamientos de eficiencia, calidad, confiabilidad y seguridad de los sistemas eléctricos. Por esto, en los CR se establecen estrictos requerimientos que deben cumplir las plantas generadoras de energía eléctrica, que estén o deseen su interconexión a la red eléctrica [39].

Para el caso particular de México, el CR indica los parámetros de potencia activa, reactiva y los límites de operación de frecuencia y tensión, que deben cumplir las centrales eléctricas fotovoltaicas y eólicas, para la aprobación de su interconexión al SEN [70] [39] [21].

Estas metodologías y configuraciones, son unas alternativas viables para mantener la interconexión de los SFV y SGE seguras y confiables en la red del SEN. Es decir, la generación de energía eléctrica con centrales fotovoltaicas y eólicas está dentro del margen y dentro de lo establecido en el CR, para su posterior distribución, en perspectiva de estabilidad transitoria.

El aumento de la integración de los SFV y SGE en la red, aumenta la inestabilidad en el sistema eléctrico [70]. Las intermitentes fuentes de energía como lo son el sol y el viento también afectan la estabilidad del sistema de energía. Los impactos negativos en la estabilidad transitoria del sistema, pueden ser solucionados agregando dispositivos y metodologías que han demostrado ser viables en condiciones reales.

Los SFV son sistemas que al realizar el proceso de generación de energía evitan el uso de combustibles fósiles y si se considera la parte económica es viable debido a que cada día el precio de los paneles cada vez es más bajo [71]. Sin embargo, eso no evita que se presenten problemas al momento de generar la energía, como

lo es que se presente alguna falla en algunos de los equipos, ya sea por instalación o su fabricación, como se mencionó anteriormente en el Capítulo 3.

Garantizar que los paneles solares sean fabricados de manera adecuada y con materiales que le permitan realizar el proceso de la captación de la energía solar. Cada uno de los componentes del panel es necesario que sea realizado detalladamente, desde el marco del panel que es de aluminio anodizado, las células solares que comúnmente están fabricadas de silicio policristalino o monocristalino. Por ser una opción más económica, usan celdas de película delgada, aun cuando el rendimiento no sea tan bueno y no sean tan duraderas y lleguen a presentarse desprendimientos. La fabricación de los paneles solares implica la utilización de materiales que si no se trabajan de manera correcta llegan a generar preocupaciones en el medio ambiente. Sin embargo, el tiempo de vida útil para la generación de electricidad es mayor y con el correcto manejo, trae más ventajas que desventajas la utilización de los paneles ya que éstos pueden generar energía hasta por 30 años en comparación con un sistema térmico que sólo puede durar de 5 a 10 años [72].

Por otro lado, cuando se interconecta una central a la red, la parte que más preocupa es que el inversor funcione de manera adecuada. Para ello es importante una elección adecuada de este dispositivo, ya que debe ser capaz de no causar fallas a la red eléctrica o cambios importantes del voltaje. Las centrales de SFV también deben ser capaces de optimizar la captura de la energía solar y tener una máxima potencia de transformación y un registro de datos adecuados, para así conocer el funcionamiento de la instalación y reconocer alguna falla, en el caso de que lo hubiera. De todo esto, la función más preocupante, al momento de realizar la conexión a la red, es que pueda mantener la estabilidad de la frecuencia y de la tensión de acuerdo con las características de red a la que está interconectada.

Todo lo anterior es importante para garantizar que la energía sea de calidad, eficiente y segura, y sobre todo, se estarán atendiendo las disposiciones del CR del lugar en el que se realiza la interconexión de los SFV.

Un elemento importante a mencionar es la opción de la instalación de SFV de capacidades pequeñas, que están distribuidos a lo largo de las redes de baja o media tensión, que tienen mucho menor impacto en la red que las centrales generadoras de grandes capacidades. Entonces, resulta conveniente promover la instalación de paneles solares domiciliarios, edificios habitacionales, escuelas y pequeñas empresas, ya que son un aporte a la red eléctrica, que por estar distribuido tiene muy poco impacto en la frecuencia y voltaje y seguramente no generan fallas importantes.

Para el caso de los SGE, debido al rápido crecimiento en la capacidad de generación eléctrica instalada y a la no controlabilidad de la energía del viento, las fallas de los SGE pueden tener impactos adversos en la estabilidad de la red, y el

desempeño de confiabilidad en la producción de energía para satisfacer la demanda eléctrica [17][69].

Como se mencionó en el capítulo 4 de este reporte, las características fluctuantes e impredecibles de la energía eólica, tienen un impacto en el funcionamiento y estabilidad en la red eléctrica. Es por ello que se aplican técnicas y metodologías para mejorar el rendimiento de los SGE, contrarrestando las problemáticas que se presentan en la generación y así lograr que los SGE sean cada vez más confiables para su conexión con la red eléctrica [17][69].

Los métodos “*Pitch Control*” y “*Stall Regulated*”, son dos importantes opciones para que los SGE tengan una operación segura y confiable en la red eléctrica. Además, estos dos métodos contribuyen para satisfacer los requerimientos establecidos en el CR.

El método “*Pitch Control*” se efectúa cuando se presentan velocidades altas de viento y se requiere mantener la producción de energía limitada a la nominal, manteniendo la potencia de salida constante del aerogenerador. Mientras que la metodología “*Stall Regulated*” opera cuando las velocidades del viento son altas, disminuyendo la producción de la energía. Entonces, la diferencia de estas dos metodologías radica en que los aerogeneradores por “*Pitch Control*” mantienen la potencia de salida constante en velocidades de viento por arriba de los límites establecidos, mientras que los aerogeneradores por “*Stall Regulated*” no tienen esta característica [69][73].

Por otra parte, el incremento significativo de instalaciones de SGE en el mundo ha hecho que la metodología de optimización del patrón de distribución de los aerogeneradores en un parque o granja eólica sea muy importante, porque de este modo se puede moderar los problemas de déficit de velocidad de viento y sobrecargas estructurales en los aerogeneradores, las cuales son causados por el efecto denominado “*Wake Effect*”, repercutiendo en pérdidas de generación de energía eléctrica [73][74].

El propósito de estas configuraciones y metodologías en SFV y SGE es hacer que estos sistemas sean confiables y seguros, mientras se encuentren interconectados en la red eléctrica. También, hay que tener presentes que los avances tecnológicos en el futuro son muy importantes, ya que se prevé que los códigos de red más estrictos en el mundo impulsen la evolución de electrónica de potencia y metodologías que harán que las centrales fotovoltaicas y eólicas sean más importantes y adecuadas para la interconexión a la red eléctrica.

En condiciones reales, estos dos sistemas tienen constantes fluctuaciones pequeñas o grandes en la tensión, y en la calidad de la energía suministrada al sistema eléctrico. Por ello, los SFV y SGE, deben ser capaces de adaptarse a estas condiciones cambiantes en el sistema y garantizar un funcionamiento satisfactorio

5.2 Conclusiones

En este proyecto se presentó el análisis general del impacto en la calidad y confiabilidad en la red del SEN (no lo hacen bien en esta sección), cuando se tiene la interconexión de centrales eléctricas fotovoltaicas y eólicas. Para efectos de este trabajo, los requerimientos técnicos para la interconexión de centrales eléctricas al SEN, nos permite saber los parámetros de potencia activa, reactiva y los límites de operación de frecuencia y tensión, que las centrales eléctricas fotovoltaicas y eólicas deben cumplir para la interconexión a la red eléctrica. Por ello, en este trabajo se plasmó el análisis de la operación de los SFV y SGE, además de las dificultades que pueden presentar, con el propósito de mejorar el rendimiento y confiabilidad de estos dos sistemas.

Las centrales fotovoltaicas enfrentan comúnmente el problema de la intermitencia del Sol e incluso también la contaminación del aire del lugar en el que se desee instalar el sistema puede llegar a afectar el proceso de generación de energía, ya que provoca que los paneles no puedan trabajar de una manera eficiente. Son una buena opción, si se considera el impacto ambiental al no generar GEI, pues el recurso para la generación de electricidad es prácticamente una fuente inagotable. También es necesario tener en cuenta que los equipos, como los paneles, deben de estar hechos con materiales de calidad y los inversores deben de cumplir con los requisitos necesarios para garantizar calidad en la generación de electricidad, todo esto apegado a las normas y requisitos que se establecen. Las nuevas tecnologías se van desarrollando para poder cumplir con todo lo anterior y poder resolver el problema de la intermitencia de la energía solar, para así mantener la producción de la energía que es demandada. Afortunadamente México cuenta con un gran potencial para este tipo de energía y aunque aún no se puede tener un mayor aporte al SEN, en la última década se ha impulsado el uso de la energía solar y la eólica para dejar a un lado la sobreexplotación de los recursos fósiles.

Por otra parte, la intermitencia característica de la velocidad del viento es un factor que interviene en el desempeño de los SGE, deben soportar perturbaciones graves, como velocidades de viento por arriba de los límites establecidos que pueden afectar en la generación que es el llamado problema de estabilidad transitoria [8]. La estabilidad transitoria es la capacidad de un sistema de energía para recuperar un punto de operación de equilibrio estable cuando se expone a una perturbación severa. Por tal motivo, se necesitan emplear distintas técnicas de control como el "Pitch Control" y "Stall Regulated" para limitar la captura de potencia a altas velocidades de viento. Además de la metodología de optimización en la distribución de los aerogeneradores en los parques eólicos, para aumentar la producción de energía.

Los avances tecnológicos y el uso de metodologías de control, son importantes para hacer que los SFV y SGE contribuyan de manera efectiva y segura la demanda eléctrica del mundo.

Referencias

- [1] C. R. D. ENERGIA, «Código Red,» Diario Oficial, Ciudad de México, 2016.
- [2] G. d. México, «Secretaría de Energía, ¿Qué hacemos?,» SENER, 2021. [En línea]. Available: <https://www.gob.mx/sener/que-hacemos>. [Último acceso: 07 08 2021].
- [3] CENACE, «Quienes Somos,» Blog, Secretaria de Energía , México , 2020.
- [4] G. d. México, «Comisión Reguladora de Energía, ¿Qué hacemos?,» CRE, 2020. [En línea]. Available: <https://www.gob.mx/cre/que-hacemos..> [Último acceso: 07 08 2021].
- [5] CFE, «PLAN DE NEGOCIOS 2018-2022,» Comision Federal de Electricidad , México , 2018.
- [6] B. Obama, «El impulso irreversible de la energía limpia,» *Foro de Política*, vol. 4, nº 10.1126, p. 4, 2017.
- [7] I. López García, C. S. Lopez Monsalvo, F. Beltran Carbajal, R. Escarela Perez y J. C. Olivares Galván, «Secure operating bounds for wind energy conversion systems working as conventional power generation plants,» *Journals The Institution of Engineering and Technology*, vol. 13, nº 12, p. 8, 2019.
- [8] J. C. Millán y D. Villavicencio , «La transición energética en México: disyuntivas, tensiones y avances en la ejecución del proyecto nacional,» *OpenEdition Journals*, nº 115, pp. 24-40, 2020.
- [9] A. Y. Fragoso-Altamirano, «México y su transición energética: un cambio en pro de la energía Renovable,» *LADDEE*, vol. 1, nº 1, pp. 26-42, 2020.
- [10] J. A. Hernández Mora, «Metodología para el análisis técnico de la masificación de sistemas fotovoltaicos como opción de generación distribuida en redes de baja tensión,» Bogotá, 2012.
- [11] E. Munkhchuluun and L. Meegahapola, "Impact of the solar photovoltaic (PV) generation on long-term voltage stability of a power network," 2017 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT-Asia), 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/ISGT-Asia.2017.8378456.
- [12] S. Joyce Pinto y G. Panda, «Wavelet technique based islanding detection and improved repetitive current control for reliable operation of grid-connected PV systems,» *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 67, pp. 39-51, Mayo 2015.

- [13] Y. Yang, P. Enjeti, F. Blaabjerg and H. Wang, "Wide-Scale Adoption of Photovoltaic Energy: Grid Code Modifications Are Explored in the Distribution Grid," in *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 21, no. 5, pp. 21-31, Sept.-Oct. 2015, doi: 10.1109/MIAS.2014.2345837.
- [14] F. Wilches-Bernal, H. Joe, J. Sanchez-Gasca. «A Fundamental Study of Applying Wind Turbines for Power System Frequency Control,» *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*, vol. 1, n° 2, p. 10, 2015.
- [15] R. Hemmatia, N. Azizia, M. Shafie-khahb y J. P.S. Catalão, «Decentralized frequency-voltage control and stability enhancement of standalone wind turbine-load-battery,» *Electrical Power and Energy Systems ELSEVIER*, vol. 1, n° 102, p. 10, 2018.
- [16] A. Mitra and D. Chatterjee, «A sensitivity based approach to assess the impacts of integration of variable speed wind farms on the transient stability of power systems,» *Renewable Energy*, vol. 60, pp. 662-671, 2013.
- [17] F. D. Bianchi, H. De Battista y R. J. Mantz, *Wind Turbine Control System*, Argentina: Springer, 2007
- [18] G. E.-P. & V. C. I. Lopez-Garcia, «Power control of a doubly fed induction generator connected to the power grid,» *International Journal of Control*. Taylor & Francis, vol. 1, n° 1, p. 11, 2017.
- [19] J. M. P. Z. Andrea Schreiber, «Comparative life cycle assessment of electricity generation by different wind turbine types,» *Journal of Cleaner Production*, ELSEVIER, vol. 1, n° 1, p. 12, 2019.
- [20] S. A. Bashar y K. G. Chin, «Estabilidad y control de frecuencia del sistema de potencia,» *Research India Publications*, vol. 11, n° 8, p. 8, 2016.
- [21] CRE, «Comisión Reguladora de Energía, Código Red,» *DIARIO OFICIAL*, vol. Tercera sección, n° Resolución Núm. RES/151/2016, p. 179, 2016.
- [22] T. D. a. G. Carmona, *Instalaciones Solares Fotovoltaicas*, España: McGraw-Hill, 2018.
- [23] S. M. Pérez, «Desarrollo de proyectos de generación de energía eléctrica en México para 2024, a través de fuentes de energía renovable, en el marco del mercado eléctrico,» UNAM, Ciudad de México, 2018.
- [24] J. M. Huacuz, «Energías renovables en el IIE, Punto de apoyo para la transición energética en México,» *Discograf S. A. de C. V.*, Cuernavaca Morelos, 2016.
- [25] SENER, «Programa de desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2020-2034,» *Secretaría de Energía*, Mexico, 2020.

- [26] CENACE, «Programa de Ampliación y Modernización de la Red Nacional de Transmisión y Redes Generales de Distribución del Mercado Eléctrico Mayorista 2021-2035,» CENACE, México, 2021.
- [27] G. d. México, «El Gobierno de México fortalece el Sistema Eléctrico Nacional,» Blog, Secretaría de Energía, México, 2020.
- [28] S. d. Energía, «Operación del Sistema Eléctrico Nacional,» Blog, Secretaría de Energía, México, 2020.
- [29] SENER, «Información Estadística,» Secretaría de Energía, México, 2021.
- [30] EIA, «International Energy Agency,» International , 2021. [En línea]. Available: <https://www.iea.org/countries/mexico>. [Último acceso: 17 Agosto 2021].
- [31] S. d. Energía, «Cooperación de América del Norte en Información Energética,» Gobierno de Mexico , 26 06 2016. [En línea]. Available: https://base.energia.gob.mx/nacei/mapas_infraestructura_energetica.aspx. [Último acceso: 15 09 2021].
- [32] AMDEE, «Acciones para el bien estar y desarrollo social 2020,» Blog, asociación mexicana de energía eólica, México, 2020.
- [33] G. d. México, «El Gobierno de México fortalece el Sistema Eléctrico Nacional,» Blog, Secretaria de Energía , Ciudad de México, 2020.
- [34] M. R. Patel, WIND AND SOLAR POWER SYSTEMS, Nueva York. USA: Tylor & Francis, 2006.
- [35] AMDEE, «AMDEE, Mitos y realidades,» Asociación Mexicana de Energía Eólica, 2018. [En línea]. Available: <https://amdee.org/mitos-y-realidades.html>. [Último acceso: 14 Octubre 2021].
- [36] S. SOLAR, «Todo lo que necesitas saber sobre la energía eólica,» SVEA SOLAR , [En línea]. Available: <https://sveasolar.com/es/blog/energia-eolica/> . [Último acceso: 2021 octubre 6].
- [37] I. E. Integral, «Cumplimiento del Código Red,» Ingeniería Energética Integral, México, 2019.
- [38] CRE, «Preguntas frecuentes sobre la nueva regulación en temas eléctricos,» Comisión Reguladora de energía , México, 2018.
- [39] V. M. R. Reyna, «Código de red. La interconexión de las centrales fotovoltaicas y eólicas,» Energy Management magazine , 7 Septiembre 2018. [En línea]. Available: <https://e-management.mx/2018/09/07/codigo-de-red-la-interconexion-de-las-centrales-fotovoltaicas-y-eolicas/>. [Último acceso: 20 Septiembre 2021].

- [40] «La Actualidad de Alemania,» [En línea]. Available: <https://www.tatsachen-ueber-deutschland.de/es/clima-y-energia/la-transicion-energetica>. [Último acceso: 28 09 2021].
- [41] I. Romero , J. Daniel, D. Pereira, F. Hashiesh, N. Raj y B. Buchhoiz, «Asesoramiento sobre el código de red,» 2020.
- [42] E. Gmbh, «Energynautics, solutions for sustainable develop ment,» 2020. [En línea]. Available: <https://energynautics.com/es/entso-e/>. [Último acceso: 22 09 2021].
- [43] Limón Portillo alejandro, «Centro de Investigacion Económica y Presupuestaria, A. C.,» 2017. [En línea]. Available: <https://ciep.mx/x3Da>. [Último acceso: 01 Octubre 2021].
- [44] Colectivo, «La energía solar, Aplicaciones prácticas,» España: Promotora general de estudios, 2009.
- [45] Corporativo, «Historia de la energía solar fotovoltaica,» *ENERGIZA*, 2020.
- [46] Colectivo, «Antecedentes,» de *La energía solar. Aplicaciones prácticas*, Quinta ed., Sevilla, España, PROGENSA, 2009, pp. 13-17.
- [47] «México alcanza los 50 parques fotovoltaicos operativos de gran escala.» Energía Latam, 09 Agosto 2019. [En línea]. Available: <https://www.energiaestrategica.com/mexico-alcanza-los-50-parques-fotovoltaicos-operativos-de-gran-escala-suman-4549-mw-de-potencia-solar-instalada/>. [Último acceso: 09 2021].
- [48] S. Rodríguez Suárez, E. Espinoza Navarrete, J. Rosenbuch, H. O. Ortega Navallo, M. Martínez Fernández, K. G. Cedano Villavicencio y M. M. Armenta, «La industria solar fotovoltaica y fototérmica en México,» México, 2017.
- [49] E. Latam, «Energía Estratégica,» 21 Junio 2019. [En línea]. Available: <https://www.energiaestrategica.com/quienes-deciden-el-futuro-de-las-energias-renovables-en-mexico-un-repaso-por-las-asociaciones-que-representan-al-sector/>. [Último acceso: 30 Septiembre 2021].
- [50] Perpiñan Lamigueiro, Oscar;, *Energía Solar Fotovoltaica*, España , 2020.
- [51] T. Díaz Corcobado y G. Carmona Rubio, *Instalaciones solares fotovoltaicas*, Mc Graw Hill, 2010.
- [52] Cornejo Lalupú, Héctor Armando;, «Sistema solar fotovoltaico de conexión a red en el centro materno infantil de la Universidad de Piura,» Piura, 2013.
- [53] Copoyol, Omar;, «KeeUI Solar,» 07 Diciembre 2020. [En línea]. Available: <https://keeui.com/>. [Último acceso: 29 Septiembre 2021].

- [54] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins y E. Bossanyi, *Wind Energy Handbook*, Inglaterra: John Wiley & Sons Ltd., 2001.
- [55] Wikipedia, «Recurso Energético,» La enciclopedia libre, Wikipedia, 19 Agosto 2021. [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Recurso_energ%C3%A9tico. [Último acceso: 26 Septiembre 2021].
- [56] M. E. González Ávila, L. F. Beltrán Morales y E. Troyo Diéguez, «Potencial de aprovechamiento de la energía eólica para la generación de energía eléctrica en zonas rurales de México,» INCI (Online), vol. 31, n° 4, pp. pp. 240-245, 2006.
- [57] CENACE, «Comite de transparencia, ¿Cuál es el factor de planta de la generación eólica para justificar económicamente la línea de transmisión en corriente directa de Oaxaca al centro del país?,» CENACE , México, 2016.
- [58] AMDEE, «Reporte de Apoyo al desarrollo del PRODESEN,» strategy&, México, 2016.
- [59] AMDEE, «El Potencial eólico mexicano: Oportunidades y retos en el nuevo sector eléctrico,» amdee, México, 2020.
- [60] AMDEE, «El viento en numeros,» AMDEE , Marzo 2021. [En línea]. Available: <https://amdee.org/el-viento-en-numeros.html> . [Último acceso: 2021 Octubre 2021].
- [61] K. Ma y F. Blaabjerg, «Wind Energy Systems,» *Proceedings of the IEEE*, vol. 11, n° 105, p. 16, 2017.
- [62] Z. Chen, J. M. Guerrero y F. Blaabjerg, «A review of the state of the art of power electronics for wind turbines,» *IEEE Trans. Power Electron*, vol. 24, n° 8, pp. 1859-1975, 2009.
- [63] J. E. Hernández Miranda, I. López García, E. Campero Littlewood, F. Beltrán Carbajal y V. M. Jiménez Mondragón, «Elementos de los parques eólicos que deben ser controlados para su interconexión con redes eléctricas,» *Pistas Educativas, Tecnológico Nacional de México en Celaya*, n° 128, p. 14, 2018.
- [64] T. Macquart y M. Alireza , «A Stall-Regulated Wind Turbine Design to Reduce Fatigue,» *Renewable Energy*, vol. 10, n° 1016, p. 15, 2018.
- [65] . R. Iracheta Cortez y J. Dorrego Portela, «Analysis of the Wake Effect in the Distribution of Wind Turbines,» *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS*, vol. 18, n° 4, p. 9, 2020.
- [66] S. Haiying, G. Xiaoxia y Y. Hongxing , «A review of full-scale wind-field measurements of the wind-turbine wake effect and a measurement of the wake-interaction effect,» *ELSEVIER Renewable and Sustainable Energy Reviews*, n° 132, p. 14, 2020.

- [67] M. Ali, J. Matevosyan, J. Milanovi y L. Söder, «Effect of wake consideration on estimated cost of wind energy curtailments,» 8th International Workshop on Large Scale Integration of Wind Power, Bremen, p. 15, 2009.
- [68] SENER, «Información Estadística,» Secretaria de Energía, México, 2021.
- [69] F. B. & K. Ma, «Wind Energy Systems,» Proceedings of the IEEE, vol. 11, nº 105, p. 16, 2017.
- [70] X. Shiwei, Z. Qian, S. T. Hussain, H. Baodi y Z. Weiwei, «Impacts of Integration of Wind Farms on Power System Transient Stability,» Applied Sciences, vol. 8, nº 1289, p. 16, 2018.
- [71] «Enchufe Solar,» 2021. [En línea]. Available: <https://enchufesolar.com/blog/ventajas-solar-fotovoltaica/>. [Último acceso: 10 2021].
- [72] M. Hilcu, «OTOVO,» Mayo 2021. [En línea]. Available: <https://www.otovo.es/blog/energia/energia-solar-ventajas-y-desventajas/>. [Último acceso: 09 2021].
- [73] L. G. I. C. L. E. B. C. F. & J. M. V. M. Hernández Miranda J. E., «ELEMENTOS DE LOS PARQUES EÓLICOS QUE DEBEN SER CONTROLADOS PARA SU INTERCONEXIÓN CON REDES ELÉCTRICAS,» Pistas Educativas, Tecnológico Nacional de México en Celaya , nº 128, p. 14, 2018.
- [74] T. M. & A. Maheri, «A Stall-Regulated Wind Turbine Design to Reduce Fatigue,» *Renewable Energy*, vol. 10, nº 1016, p. 15, 2018.