



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Unidad Zacatenco

**Estudio para la interconexión de generadores
eólicos a la red eléctrica de distribución.**

TESIS

Que para obtener el título de ingeniero electricista

López López Miguel Angel

Pacheco Guzmán Mariana

Asesor técnico

M. en C. Gilberto Enríquez Harper

Asesor Metodológico

Ing. Oscar Caballero Hernández



México, D. F. 2015

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
UNIDAD PROFESIONAL “ADOLFO LÓPEZ MATEOS”

TEMA DE TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO
POR LA OPCIÓN DE TITULACIÓN
DEBERA (N) DESARROLLAR

INGENIERO ELECTRICISTA
TESIS COLECTIVA Y EXAMEN ORAL INDIVIDUAL
MIGUEL ANGEL LÓPEZ LOPEZ
MARIANA PACHECO GUZMÁN

“ESTUDIO PARA LA INTERCONEXIÓN DE GENERADORES EÓLICOS A LA RED ELÉCTRICA DE DISTRIBUCIÓN”

PROPONER UNA ALTERNATIVA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE FORMA QUE NO AFECTE EL MEDIO AMBIENTE UTILIZANDO EL POTENCIAL DEL VIENTO ASÍ COMO LOS ELEMENTOS NECESARIOS PARA SU INTERCONEXIÓN A LAS REDES ELÉCTRICAS DE DISTRIBUCIÓN

- INTRODUCCIÓN.
- LA GENERACIÓN EÓLICA.
- REQUISITOS DE INTERCONEXIÓN A LA RED.
- PROTECCIÓN DE LOS GENERADORES EÓLICOS.
- ANÁLISIS DE UN ESTUDIO DE INTERCONEXIÓN DE UN PARQUE EÓLICO A LA RED DE DISTRIBUCIÓN.
- CONCLUSIONES.

MÉXICO, D.F. A 7 DE SEPTIEMBRE DEL 2015.

ASESORES


M. EN C. GILBERTO ENRIQUEZ HARPER


ING. OSCAR CABALLERO HERNÁNDEZ


ING. CESAR DAVID RAMIREZ ORTIZ
JEFE DEL DEPARTAMENTO ACADÉMICO
DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



DEDICATORIAS

Agradezco infinitamente a mis padres Jaime López y Josefina López por el apoyo incondicional, valores y enseñanzas que me brindaron para poder cumplir esta meta ya que en gran parte este logro es de ellos también.

De igual manera agradezco a mi hermano Diego Fernando por siempre apoyarme cuando lo necesite. También agradezco a mis amigos los cuales me apoyaron dentro y fuera de la institución.

Y finalmente agradezco al Instituto Politécnico Nacional y a sus profesores en especial al Ing. Gilberto Enríquez Harper por todas las enseñanzas y el gran apoyo brindados en la parte más importante de la carrera y al Ing. Oscar Caballero Hernández por el apoyo y paciencia que me brindo.

Atte. MIGUEL ANGEL LÓPEZ LÓPEZ

Él que me ha dado la fortaleza para continuar y nunca desistir con toda la humildad de mi corazón dedico y le doy gracias a Dios.

Aunque a la mayoría de las veces parece que estuviéramos en una batalla, hay momentos en los que la guerra cesa y nos unimos para lograr nuestros objetivos. Gracias por no solo ayudarme en su totalidad a culminar mi etapa académica, sino también por cultivarme como una persona con valores y principios, que me ayudaron y ayudaran en la vida, gracias por los momentos en este proceso Fernando Pacheco Elvira y Remedios Guzmán Díaz.

Les agradezco por estar presentes: Fernando Manuel eres un ejemplo a seguir y gracias por tú apoyo escolar desde niveles básicos hasta ahora en el proceso de tesis, Luis Carlos, Natalia y Monserrat gracias por su presencia, risas y hasta enojos durante todos estos meses, espero un día de igual manera poder compartir con ustedes la culminación de sus estudios.

Agradezco al Instituto Politécnico Nacional por haberme abierto las puertas de su seno científico para poder estudiar mi carrera así como también a los diferentes profesores que me brindaron su conocimiento y su apoyo para seguir día a día. Así mismo quiero agradecer a mis asesores de tesis el M. en C. Gilberto Henríquez Harper y al Ing. Oscar Caballero Hernández por haberme brindado la oportunidad de recurrir a sus capacidades y conocimientos en la materia, así como también haberme tenido la paciencia del mundo para guiarme durante todo el desarrollo de la tesis, no me queda más que darles las gracias y mostrarles mi admiración y respeto que tengo hacia ustedes desde el primer instante.

Atte. MARIANA PACHECO GUZMÁN

ÍNDICE

1. Introducción	4
1.1.Descripción general de los métodos de generación convencionales, con energías renovables y no convencionales.....	4
1.1.1. Energía no convencional.....	4
1.1.1.1. Solar fotovoltaica	5
1.1.1.2. Eólica.....	6
1.1.1.3. Geotérmica	7
1.1.1.4. Termosolar.....	8
1.1.1.5. Biomasa.....	10
1.1.2. Energía convencional.....	11
1.1.2.1. Termoeléctrica	12
1.1.2.2. Combustión interna.....	14
1.1.2.3. Ciclo combinado	15
1.1.2.4. Carboeléctrica.....	16
1.1.2.5. Hidroeléctricas	17
1.2. Las energías renovables en el país.....	18
1.2.1. Pequeña producción	19
1.2.2. Capacidad total instalada en México.....	20
1.2.3. Definición de energías renovables	20
1.2.4. Reducción de los costos y los riesgos económicos de la energía.....	22
1.2.5. Mayor acceso a servicios energéticos sustentables de áreas rurales..	22
1.2.6. Mitigación del cambio climático.....	22
1.2.7. Energía eólica	23
1.2.7.1. Tecnología.....	23
1.2.7.2. Potencial.....	24
1.2.7.3. Metas.....	24
1.2.7.4. Estado actual.....	26

2. La generación eólica.....	28
2.1. Principios de generación eólica.....	29
2.2. Tipos de viento.....	31
2.3. Medición de la potencia generada.....	32
2.3.1. Determinación de la velocidad de viento.....	32
2.3.2. Variación de la velocidad de viento.....	33
2.3.3. La potencia del viento.....	33
2.3.4. La densidad de viento.....	35
2.4. Factores que varían el viento.....	35
2.4.1. La velocidad del viento y la altura.....	35
2.4.1.1. Variaciones de viento.....	36
2.4.1.2. Variaciones temporales de viento.....	36
2.4.1.2.1. Ciclos energéticos.....	36
2.4.1.2.2. Las ráfagas de viento.....	36
2.4.1.3. Variaciones especiales de viento.....	36
2.4.1.3.1. Variación vertical.....	36
2.4.2. Obtención y tratamiento de datos de viento.....	37
2.4.2.1. Parámetros representativos del potencial eólico.....	37
2.4.2.2. La medición de las características.....	37
2.5. Dimensiones de los generadores eólicos.....	38
2.6. Tipos de generadores.....	41
2.6.1. Generadores síncronos.....	41
2.6.2. Generadores asíncronos.....	42
2.6.2.1. Generadores con rotores jaula de ardilla.....	43
2.6.2.2. Generadores con rotores devanados.....	43
2.7. Generación eólica distribuida.....	44
2.7.1. Definición.....	44
2.7.2. Ventajas.....	45
2.7.3. Aplicaciones.....	45

3. Requisitos de interconexión a la red.....	47
3.1. Requisitos técnicos generales de interconexión a la red nacional.....	47
3.1.1. Tensión, capacidad y frecuencia cuando el solicitante hace uso de sistema para portear energía a los puntos de carga	47
3.1.1.1. Tensión.....	47
3.1.1.2. Variaciones periódicas de amplitud de tensión.....	48
3.1.1.3. Desbalance y cambios rápidos de tensión	49
3.1.1.4. Capacidad de generación.....	49
3.1.1.5. Rangos de frecuencia.....	50
3.1.2. Equipo de protección y seccionamiento cuando el solicitante hace uso del sistema para portear energía a los puntos de carga	50
3.1.3. Esquema de comunicación para la supervisión	51
3.1.4. Equipo de medición.....	52
3.1.5. Calidad de la energía	53
3.1.5.1. Niveles de armónicos	53
3.1.5.2. Filtros.....	56
3.1.5.2.1. Filtrado pasivo.....	56
3.1.5.2.1.1. Filtros sintonizados.....	57
3.1.5.2.1.2. Filtros pasa altas.....	57
3.1.5.2.2. Filtrado activo.....	57
3.1.6. Factor de potencia.....	58
3.1.7. Estación meteorológica	58
3.1.8. Viabilidad.....	59
4. Protección de los generadores eólicos	61
4.1. Protección contra sobrevoltaje y bajo voltaje.....	63
4.2. Protección contra alta frecuencia y baja frecuencia	64
4.3. Protección contra pérdida de secuencia de fases	66
4.4. Protección contra sobrecorriente.....	67
4.5. Protección contra embalamiento	67
4.6. Protección contra alta velocidad del viento.....	69
4.7. Protección contra descargas atmosféricas.....	69

5. Análisis de un estudio de interconexión de un parque eólico a la red de distribución	72
CONCLUSIONES	99
Referencia de normas	100
Bibliografía.....	102
Apéndice A.....	104
Apéndice B.....	105
Apéndice C.....	106
Apéndice D.....	107
Apéndice E.....	108
Apéndice F	109
Apéndice G	110

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. 1 Proyección de energías limpias	18
Tabla 1. 2 Desarrollo, aplicaciones de las energías	21
Tabla 1. 3 Metas del Programa Especial para el Aprovechamiento de Energías Renovable	25
Tabla1.4 Metas complementarias del Programa Especial para el Aprovechamiento de Energías Renovables	26
Tabla 2. 1 Proyección de capacidad instalada	28
Tabla 2. 2 Escala del viento.	32
Tabla 3. 1 Respuesta de la Central ante variaciones de tensión.	45
Tabla 3. 2 Límites de emisiones permisibles	46
Tabla 3. 3 Límite de capacidad de generación a interconectar para media tensión.	47
Tabla 3. 4 Tiempo de respuesta ante frecuencias anormales	48
Tabla 3.5 Niveles armónicas (impares) en la tensión para MT (% de la fundamental).	52
Tabla 3.6 Niveles armónicas (pares) en la tensión para MT (%de la fundamental).	53

ÍNDICE DE IMAGENES

Fig.-1. 1 Parque fotovoltaico.....	5
Fig.-1. 2 Parque Eólico.	6
Fig.-1. 3 Geiser provocado por el calentamiento de la Tierra.	7
Fig.-1. 4 Central termosolar de torre central.	8
Fig.-1. 5 Central termosolar de colectores distribuidos.	9
Fig.-1. 6 Central Biomasa.	10
Fig.-1. 7 Central termoeléctrica de Petacalco.	13
Fig.-1. 8 Central de Baja California V	14
Fig.-1. 9 Central Ciclo Combinado Tamazunchale I	15
Fig.-1. 10 Central Carbón II	16
Fig.-1. 11 Central Hidroeléctrica "La Yesca"	17
Fig.-1. 12 Parque eólico.	23
Fig.-2. 1 Rosa del viento	30
Fig.-2. 2 Aerogeneradores de baja potencia.	38
Fig.-2. 3 Aerogeneradores de potencia media	39
Fig.-2. 4 Aerogeneradores de potencia alta.	39
Fig.-2. 5 Generador síncrono	41
Fig.-2. 6 Generador jaula de ardilla.	42
Fig.-2. 7 Esquema de conexión de generadores a la red de distribución.	44
Fig.-3. 1 Representación de variaciones de tensión.	45
Fig.-3. 2 Viabilidad de la GD renovable en México	57
Fig.-4. 1 Curvas tiempo/corriente	60
Fig.-4. 2 Limites de operación bajo carga de una turbina específica.	61
Fig.-4. 3 Característica de disparo resultante de la gráfica "frecuencia tiempo"	62
Fig.-4. 4 Freno mecánico del aerogenerador.	65
Fig.-4. 5 Freno dinámico del aerogenerador.	65
Fig.-4. 6 Zonas de protección contra rayos para una turbina eólica.	67
Fig.-4. 7 Métodos de protección de las palas contra impactos de rayos.	68
Fig.-5. 1 Ubicación con referencia a la frontera.	69
Fig.-5. 2 Potencial eólico a 80m de altura.	70
Fig.-5. 3 Mapa de vías y de uso de suelo	70
Fig.-5. 4 Rosa del viento anual en Reynosa, Tamaulipas.	71
Fig.-5. 5 Rosa del viento por estación.	71
Fig.-5. 6 Ubicación de la subestaciones de la compañía suministradora.	73

Fig.-5. 7 Infraestructura eléctrica existente en la zona.	73
Fig.-5. 8 Diagrama de flujos de potencia del circuito original.	75
Fig.-5. 9 Acercamiento al diagrama de flujos de potencia del circuito original.	76
Fig.-5. 10 Grafica de barrido de frecuencia vista desde el bus colector del circuito original.....	77
Fig.-5. 11 Grafica de niveles armónicos en el bus colector del circuito original.	78
Fig.-5. 12 Acercamiento al diagrama del análisis armónico en el circuito original. ...	79
Fig.-5. 13 Forma de onda de corriente vista desde el bus colector del circuito original.	80
Fig.-5. 14 Acercamiento al diagrama de flujos de potencia con el filtro pasa altas operando.	82
Fig.-5. 15 Grafica de barrido de frecuencia vista desde el bus colector del circuito con el filtro pasa altas operando.	83
Fig.-5. 16 Grafica de niveles armónicos en el bus colector del circuito con el filtro pasa altas operando.	84
Fig.-5. 17 Acercamiento al diagrama del análisis armónico en el circuito con el filtro pasa altas operando.	85
Fig.-5. 18 Forma de onda de corriente vista desde el bus colector del circuito con filtro pasa altas operando.....	86
Fig.-5. 19 Acercamiento al diagrama de flujos de potencia con el filtro pasa altas y de sintonización sencilla operando.	88
Fig.-5. 20 Grafica de barrido de frecuencia vista desde el bus colector del circuito con el filtro pasa altas y de sintonización sencilla operando.	89
Fig.-5. 21 Grafica de niveles armónicos en el bus colector del circuito con el filtro pasa altas y de sintonización sencilla operando.	90
Fig.-5. 22 Acercamiento al diagrama del análisis armónico en el circuito con el filtro pasa altas y de sintonización sencilla operando.	91
Fig.-5. 23 Forma de onda de corriente vista desde el bus colector del circuito con filtro pasa altas y d sintonización sencilla operando.	92

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad se puede observar un crecimiento de la población de manera exponencial, por lo cual la demanda en el consumo de la energía eléctrica crece de igual manera, y una disminución de los suministros y componentes tradicionales para la generación de la misma en plantas generadoras como son: Hidroeléctricas, Carboeléctricas, Termoeléctricas (Diésel, carbón, etc.), y Nucleoeléctricas, con sus debidos riesgos de contaminación, costos de construcción y operación son muy elevados.

Estas plantas de generación tradicionales transportan su energía a grandes distancias por medio del sistema eléctrico de potencia ya que su ubicación se encuentra lejos de las cargas que alimentan, por el gran espacio que ocupan las unidades de generación, la maquinaria, los centros de control, etc.

Este tipo de transmisión de energía conlleva a tener una desventaja muy importante como son las pérdidas.

Una forma de generar de manera más viable dentro de los ámbitos de costo, cuidado del medio ambiente y la obtención de la fuente prima para la generación es: “la generación eólica”.

Con la posibilidad de tener un suministro alternativo al de la empresa suministradora de energía, esto ha llevado a algunos a aceptar o a tomar iniciativas de desarrollo de proyectos de autoabastecimiento que les permiten tener electricidad a un precio menor al que fijan las tarifas eléctricas.

De esta manera, aprovechar la energía solar, eólica, mini hidráulica, biomasa y los residuos sólidos y líquidos (incluidos los desechos sólidos de la basura que pueden utilizarse para generar gas y electricidad) para generación de energía eléctrica.

Este tipo de generación dependiendo de su capacidad y ubicación, se pueden catalogar como “energía distribuida”, pero también existen una serie de parámetros que se tienen que tomar en cuenta para la conexión de la misma en el sistema eléctrico.

Hoy en día se ha presentado un panorama y una aceptación para el desarrollo de la generación distribuida, que se proyecta hacia un nuevo modelo de negocio en el sector eléctrico, sin embargo existen una serie de barreras que impiden la implementación masiva de este tipo de instalaciones, las más importantes son técnicas, económicas y regulatorias.

Los inconvenientes técnicos están relacionados con el nivel de desarrollo de las tecnologías y con los sistemas de generación a las redes de distribución.

También tomando en cuenta que la producción de dicha energía depende de la disponibilidad del recurso renovable, el cual tiene variaciones aleatorias, lo que la hace bastante impredecible. Y por estas mismas variaciones, viene aunado un problema de regulación de los parámetros con los cuales trabaja el generador.

OBJETIVO GENERAL

Proponer una alternativa de generación de energía eléctrica de forma que no afecte el medio ambiente utilizando el potencial del viento, así como los elementos necesarios para su interconexión a las redes eléctricas de distribución y de esta manera contribuir para satisfacer la demanda de las cargas que alimenta el sistema eléctrico de potencia del país.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Hacer ver la relación entre la velocidad del viento y la potencia que se genera.
- Aprovechar la potencia del viento en zonas cercanas a las líneas de distribución para generar energía eléctrica mediante generadores eólicos.
- Conocer las ventajas y desventajas de la generación distribuida.
- Dar las herramientas necesarias para que el generador y sus parámetros tanto tensión como frecuencia permanezcan estables.
- Establecer en el trabajo los parámetros necesarios para que cumplan con las normativas que rige la compañía suministradora (código de red).
- Demostrar mediante un estudio con el programa de simulación DigSILENT el comportamiento de un parque eólico ubicado en el área de Reynosa Tamaulipas, lo más real posible.
- Aprovechar el estudio para ubicar las irregularidades y problemáticas más comunes, como lo son la compensación por medio de filtros entre otros y así mismo darle una propuesta para la solución a estos eventos.

JUSTIFICACIÓN

Para implementar actualmente la interconexión de generadores eólicos a la red del sistema eléctrico se tienen barreras de interconexión que incluyen las exigencias de la compañía suministradora, dirigida a la compatibilidad con la explotación de la red (especificaciones relativas a calidad de suministro, fiabilidad y continuidad, seguridad, medida, distribución local y control). Las redes de distribución no están preparadas técnicamente para conectar "generación distribuida", pues fueron diseñadas para conectar cargas, no generadores, es por esto que la conexión de dichos generadores puede acarrear problemas de estabilidad, fiabilidad, flujos bidireccionales, etc.

Por tanto hay que adoptar normativas técnicas de interconexión que aseguren la confiabilidad, calidad y seguridad del suministro de energía.

En la actualidad a pesar de que existen reglamentaciones que definen los requisitos procedimentales, los criterios de conexión exigidos por la empresa distribuidora son muy restrictivos, debido a la falta de experiencia con ese tipo de generación

Esto hace que muchas veces los criterios aplicados sean redundantes y se produzcan sobre costos innecesarios.

ALCANCE

Se pretende realizar en este trabajo una serie de conceptos necesarios para la interconexión de generadores eólicos a la red de distribución de la compañía suministradora, mediante las normativas que rigen a dicha empresa de abastecimiento eléctrico, así mismo resaltar que la generación eólica y la generación distribuida son dos elementos importantes para el desarrollo y sustentabilidad del país.

1- Introducción.

La Comisión Federal de Electricidad es la empresa del Estado que se encarga de la generación, transmisión, distribución y comercialización de energía eléctrica en el país. Actualmente atiende a 25.3 millones de personas. Sin embargo, poco se sabe de dónde proviene la energía que todos los días de forma permanente mantiene las actividades de personas, empresas y gobierno. La capacidad de generación cuenta con 177 centrales generadoras de energía, lo que equivale a 49,854 MW (Megawatts), incluyendo a aquellos productores independientes que por ley están autorizados para generarla. La capacidad instalada se integra con todas las formas de generación; las termoeléctricas representan el 44.80% de la generación, en tanto las hidroeléctricas el 22.17%, seguidas de las carboeléctricas que generan el 5.22% del total de la electricidad en el país, mientras que las nucleoeeléctricas contribuyen con el 2.74%, con menor capacidad están las Geotermoeléctricas con 1.92% de generación total y las Eoloeléctricas con sólo 0.171%. Un caso especial son los productores independientes que producen un alto porcentaje en relación con las otras formas de generación, ya que aportan el 22.98% de la capacidad instalada, según la misma CFE.

1.1. Descripción general de los métodos de generación convencionales, con energías renovables y no convencionales.

1.1.1. Energía no convencional.

Se refiere a aquellas formas de producir energía que no son muy comunes en el mundo y cuyo uso es limitado debido todavía a los costos para su producción y su difícil forma para captarlas y transformarlas en energía eléctrica. También se les conoce como "energías limpias", ya que por lo general no combustionan, no contaminan (aunque todas tienen algún impacto en el medio ambiente) y no dejan desechos (excepto la madera) [1].

Cabe aclarar que las siguientes fuentes mencionadas también entran en la clasificación de energías renovables ya que se denomina energía renovable a la energía que se obtiene de fuentes naturales virtualmente inagotables, ya sea por la inmensa cantidad de energía que contienen, o porque son capaces de regenerarse por medios naturales [2].

A continuación se describen algunas fuentes no convencionales:

1.1.1.1. Solar fotovoltaica.

Es un tipo de fuente de energía renovable que se obtiene directamente de los rayos del Sol, gracias a que posee un mecanismo de foto-detección cuántica de un determinado dispositivo, que generalmente se trata de una lámina metálica semiconductora llamada célula fotovoltaica (se encuentra en fase laboratorio).

La corriente eléctrica continua que proporcionan los módulos fotovoltaicos se puede transformar en corriente alterna, mediante un aparato electrónico llamado inversor y conseguir inyectarlo a la red eléctrica, operación actualmente sujeta a subvenciones en muchos lugares para una mayor viabilidad [3].

Fig.-1.1 Parque fotovoltaico



Fuente: <http://www.anelosolar.com/wp-content/uploads/2012/06/La-Castra-Parque.jpg>

1.1.1.2. Eólica.

Esta es la energía que es obtenida a partir del viento, eso quiere decir que es proveniente de la energía cinética provocadas por las corrientes de aire y que son transformadas en otras formas útiles para la actividad humana. La energía eólica es una de las energías que ha sido utilizada y aprovechada desde la antigüedad para la construcción de barcos de vela o hasta para hacer funcionar la maquinaria a molinos a través de sus aspas. La energía eólica es un recurso abundante y casi ilimitado, es renovable porque es una energía alternativa, limpia y permite disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero al reemplazar el consumo a partir de combustibles fósiles, lo que la permite que se la denomine como una energía verde Sin embargo, el principal inconveniente es su intermitencia y que produce un impacto ambiental en el medio ya sea el impacto visual, acústico, también se puede observar que en las aspas de los aerogeneradores pueden atrapar aves y matarlas por el movimiento [3].

Fig.-1. 2 Parque Eólico.



Fuente: <https://ciudadycultura.wordpress.com/2012/02/09/mexico-tendra-tres-nuevos-parques-eolicos/>

1.1.1.3. Geotérmica.

Es la energía que se aprovecha el calor interno de la tierra. Existen numerosos tipos de fuentes geotérmicas: En las zonas en las que se encuentran aguas termales muy calientes situadas a poca profundidad, se perfora por fracturas naturales de las rocas básicas o rocas sedimentarias. El agua caliente o el vapor pueden fluir naturalmente, por bombeo o por impulsos de flujos de agua y vapor. Hay diferentes métodos que son conveniente utilizar pero para cada caso el más conveniente será siempre el más económico [3].

Fig.-1. 3 Geiser provocado por el calentamiento de la Tierra.



Fuente: <http://elsentido.com/noticias/tecnologia/conoce-cmo-se-forman-giser/>

1.1.1.4. Termosolar.

Una central termosolar es una instalación que permite el aprovechamiento de la energía del Sol para producir electricidad utilizando un ciclo térmico parecido al de las centrales térmicas convencionales. Hay diferentes esquemas de centrales termosolares, aunque las más importantes son:

Centrales de torre central. Disponen de un conjunto de espejos direccionales de grandes dimensiones que concentran la radiación solar en un punto. El calor es transferido a un fluido que circula por el interior de la caldera y lo transforma en vapor, empezando así un ciclo convencional de agua-vapor [4].

Fig.-1. 4Central termosolar de torre central.



Fuente: <http://de.construmatica.com/gemasolar-un-gran-paso-hacia-la-energia-termosolar/>

Centrales de colectores distribuidos. Utilizan los llamados colectores de concentración, que concentran la radiación solar que reciben en la superficie, lo cual permite obtener, con buenos rendimientos, temperaturas de hasta 300°C, suficientes para producir vapor a alta temperatura, que se usa para generar electricidad o también para otros procesos industriales [4].

Fig.-1. 5 Central termosolar de colectores distribuidos.



Fuente: http://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/recursos-interactivos/produccion-de-electricidad/xii.-las-centrales-solares

1.1.1.5. Biomasa.

Es la energía solar almacenada en los seres vivos, vegetales o animales por medio del proceso de fotosíntesis (vegetales) y la digestión (comida) de estos vegetales por los animales. Se trata, por tanto, de un pequeño porcentaje de la energía solar que llega a la tierra. En la práctica pueden suponerse tres fuentes de energía de la biomasa:

De origen vegetal: biomasa natural, cultivos energéticos.

De origen animal: excrementos y purines.

De origen humano: los Residuos Sólidos Urbanos (RSU), procedentes de viviendas, comercios, fábricas, etc.

La energía de la biomasa se emplea directamente para producir calor por combustión de la misma (calefacción, cocción), o indirectamente para producir electricidad (evaporando agua y transformándola en energía mecánica con una turbina). También se puede transformar la biomasa en combustibles líquidos (bioalcoholes) o gaseosos (biogás) para ser posteriormente quemados y convertidos en energía calorífica y posteriormente, en mecánica (automoción o generación eléctrica). [5]

Fig.-1. 6Central Biomasa.



Fuente: <http://www.fierasdelaingenieria.com/planta-de-biomasa-markinch-en-reino-unido/>

1.1.2. Energía convencional.

Podemos definir energía convencional como aquella energía tradicional que se comercializa entrando a formar parte del cómputo del Producto Interior Bruto (PIB).

Existen dos grandes grupos en cuanto a tipos de energía: las energías renovables, que son recursos ilimitados y limpios, y las llamadas energías convencionales o tradicionales, estas son las fuentes más comunes para producir energía eléctrica.

Las energías convencionales son las que provienen de recursos energéticos naturales (petróleo, carbón, madera y gas natural), estos recursos son limitados y el uso indiscriminado que se ha hecho de ellos durante muchos años ha derivado en que cada vez son más difíciles de obtener, tendiendo a su desaparición. Por otro lado son altamente contaminantes y deterioran el medio ambiente provocando un paulatino calentamiento del planeta.

Es por todo esto que los gobiernos de los países desarrollados, han creado en los últimos tiempos una serie de medidas políticas para restringir su uso masivo y fomentar el desarrollo de otras políticas energéticas más respetuosas con el medio ambiente.

Uno de los acuerdos más importantes suscritos por un gran número de países desarrollados es el llamado "Protocolo de Kioto" por el cual, los países firmantes se comprometen a reducir en un 5% sus emisiones de gases regulados que provocan el efecto invernadero, en el año 2012.

Dentro de las energías convencionales, podríamos citar también la energía hidráulica ya que es utilizada por el hombre desde hace muchos siglos, pero este tipo de energía suele citarse dentro del grupo de las energías renovables, ya que se trata de un recurso ilimitado y limpio.[6]

Se puede mencionar dentro de los métodos de generación convencional:

1.1.2.1. Termoeléctrica.

En el proceso termoeléctrico existe una clasificación de tipos de generación, según la tecnología utilizada para hacer girar los generadores eléctricos:

- Vapor

Con vapor de agua se produce el movimiento de una turbina acoplada al generador eléctrico.

- Turbo gas

Con los gases de combustión se produce el movimiento de una turbina acoplada al generador eléctrico.

- Combustión Interna

Con un motor de combustión interna se produce el movimiento del generador eléctrico.

- Ciclo Combinado

Combinación de las tecnologías de turbogas y vapor. Constan de una o más unidades turbogas y una de vapor, cada turbina acoplada a su respectivo generador eléctrico.

Otra clasificación de las centrales termoeléctricas corresponde al combustible primario para la producción de vapor:

- Vapor (combustóleo, gas natural y diésel)

- Carboeléctrica (carbón)

- Dual (combustóleo y carbón o combustóleo y gas)

- Nucleoeléctrica (uranio enriquecido)

Para el cierre de septiembre de 2008, la capacidad efectiva instalada y la generación de cada uno de estos tipos de generación termoeléctrica, es la siguiente:

Descripción del proceso de las centrales termoeléctricas tipo vapor. Una central termoeléctrica de tipo vapor es una instalación industrial en la que la energía química del combustible se transforma en energía calorífica para producir vapor, éste se conduce a la turbina, donde su energía cinética se convierte en energía mecánica, la que se transmite al generador para producir energía eléctrica. Secuencia de transformaciones de energía. Centrales termoeléctricas tipo vapor. Estas centrales utilizan el poder calorífico de combustibles derivados del petróleo (combustóleo, diésel y gas natural), para calentar agua y producir vapor con temperaturas del orden de los 520°C y presiones entre 120 y 170 kg/cm², para impulsar las turbinas que giran a 3600 r.p.m. (revoluciones por minuto). [7].

Fig.-1. 7 Central termoeléctrica de Petacalco.



Fuente <http://iacmexico.com/proyectos-energia.php?proyecto=35>

1.1.2.2. Combustión interna.

Descripción del proceso en las plantas de combustión interna. Las plantas de combustión interna están equipadas con motores de combustión interna en la que aprovechan la expansión del gas de combustión para obtener energía mecánica, que luego se transforma en energía eléctrica en el generador.

Las plantas de combustión interna son usualmente alimentadas por gasóleo, y en el caso de la planta ubicada en San Carlos, Baja California Sur, para alimentar sus dos motores de combustión interna utilizan una mezcla de combustóleo y el gasóleo [8].

Fig.-1. 8 Central de Baja California V



Figura: <http://www.accionamx.com/noticias/accionamx-se-adjudica-la-central-elctrica-de-baja-california-sur-v-en-mxico-por-77-millones>

1.1.2.3. Ciclo combinado.

Descripción del proceso en instalaciones de ciclo combinado.

Las plantas de ciclo combinado constan de dos tipos diferentes de unidades generadoras: turbogas y vapor. Una vez que la generación de energía eléctrica de ciclo se termina en las unidades turbogas, la alta temperatura de gases de escape se utiliza para calentar agua para producir vapor, que se utiliza para generar energía eléctrica adicional.

Esta combinación de dos tipos de generación nos permite aprovechar al máximo los combustibles utilizados, mejorando así la eficiencia térmica en todos los tipos de generación termoeléctrica. Esquema de una planta de ciclo combinado.

El plan general de una planta de ciclo combinado se puede organizar de acuerdo a las diferentes posibilidades. El número de unidades turbogas por unidad de vapor varía de 1-1 a 4-1.

Hay tres variables de vapor para la fase de diseño:

- a. - sin quemar combustible adicional
- b. - con la quema de combustible adicional para el control de calor
- c. - con la quema de combustible adicional para aumentar el calor y la presión de vapor.

Una de las ventajas de este tipo de plantas es la posibilidad de construirlas en dos etapas. La primera etapa, turbogas, puede ser terminada en un corto período de tiempo y la planta inicia operaciones de inmediato y posteriormente, la construcción de la unidad de vapor puede ser terminado, y completar así el ciclo combinado.[7]

Fig.-1. 9 Central Ciclo Combinado Tamazunchale I



Fuente: <http://iacmexico.com/proyectos-agua.php?proyecto=7>

1.1.2.4. Carboeléctricas.

Descripción del proceso de carboeléctricas.

En cuanto a su concepción básica, las carboeléctricas son básicamente las mismas que las plantas termoeléctricas de vapor, el único cambio importante es que son alimentadas por carbón, y las cenizas residuales requieren maniobras especiales y amplios espacios para el manejo y confinamiento [9].

Fig.-1. 10 Central Carbón II



Fuente: <http://www.vanguardia.com.mx/inicianinspeccionextraordinariaacentraltermoelectricadenavacoahuila-1155587.html>

1.1.2.5. Hidroeléctrica.

Las centrales hidroeléctricas utilizan la energía potencial del agua como fuente primaria para generar electricidad. Estas plantas se localizan en sitios en donde existe una diferencia de altura entre la central eléctrica y el suministro de agua.

De esta forma, la energía potencial del agua se convierte en energía cinética que es utilizada para impulsar el rodete de la turbina y hacerla girar para producir energía mecánica. Acoplado a la flecha de la turbina se encuentra el generador, que finalmente convierte la energía mecánica en eléctrica. Una característica importante es la imposibilidad de su estandarización, debido a la heterogeneidad de los lugares en donde se dispone de aprovechamiento hidráulico, dando lugar a una gran variedad de diseños, métodos constructivos, tamaños y costos de inversión.

Las centrales hidroeléctricas se pueden clasificar de acuerdo con dos diferentes criterios fundamentales:

1. Por su tipo de embalse.
2. Por la altura de la caída del agua. [10].

Fig.-1.11 Central Hidroeléctrica "La Yesca"



Fuente: <http://www.publimetro.com.mx/noticias/fotos-esta-es-la-sorprendente-presa-la-yesca/mlkg!lvNvVlu9ZOV0I/>

1.2. Las energías renovables en el país.

Finalmente, las energías renovables cuentan hoy con un marco legal específico: la Ley para el Aprovechamiento de las Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética (LAERFTE), que establece, entre otras disposiciones, la obligación de la Secretaría de Energía de elaborar un programa especial para el aprovechamiento de energías renovable, así como una estrategia nacional para la transición energética y el aprovechamiento sustentable de la energía. El programa especial para el aprovechamiento de energías renovables incluye indicadores que esperan ser alcanzados, referidos a la participación de fuentes renovables en la capacidad instalada y generación de energía eléctrica en México. A diferencia del programa sectorial de energía, los indicadores incluidos en este documento, no incluyen los proyectos de hidroeléctricas de más de 30 MW de acuerdo con lo que marca la LAERFTE. Los indicadores del programa especial establecen que en el 2012, se esperaba contar con una capacidad de 7.6% y una generación entre el 4.5% y el 6.6% del total nacional a partir de fuentes renovables de energía.

Tabla 1. 1 Proyección de energías limpias

Documento	Plazo	Metas
Estrategia Nacional de Energía	2009-2024	Capacidad de generación eléctrica con tecnologías limpias* de 35%.
Programa Sectorial de Energía	2007-2012	Participación de las energías renovables** en la capacidad de generación de energía eléctrica de 23 a 26%
Programa Especial para el Aprovechamiento de Energías Renovable	2009-2012	Capacidad de 7.6% y una generación entre el 4.5 y 6.6% del total nacional a partir de fuentes renovables de energía***

Nota: En la tabla anterior se muestra el estudio de la planeación para las energías limpias en el país.

* Energías renovables, grandes hidroeléctricas y energía nuclear

** incluyendo grandes hidroeléctricas

*** según la definición de la Ley para el Aprovechamiento de las Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética (excluyendo grandes hidroeléctricas)

Según la definición de fuentes renovables de energías del Programa Especial para el Aprovechamiento de Energías Renovable, lo cual no contempla plantas hidroeléctricas con una capacidad mayor a 30 MW, se cuenta con una capacidad instalada a partir de dichas fuentes de 2,365 MW o 4%. Con base en las metas del programa antes mencionado, aún será necesaria una capacidad adicional de fuentes renovables de 3.6% del total hasta 2012.

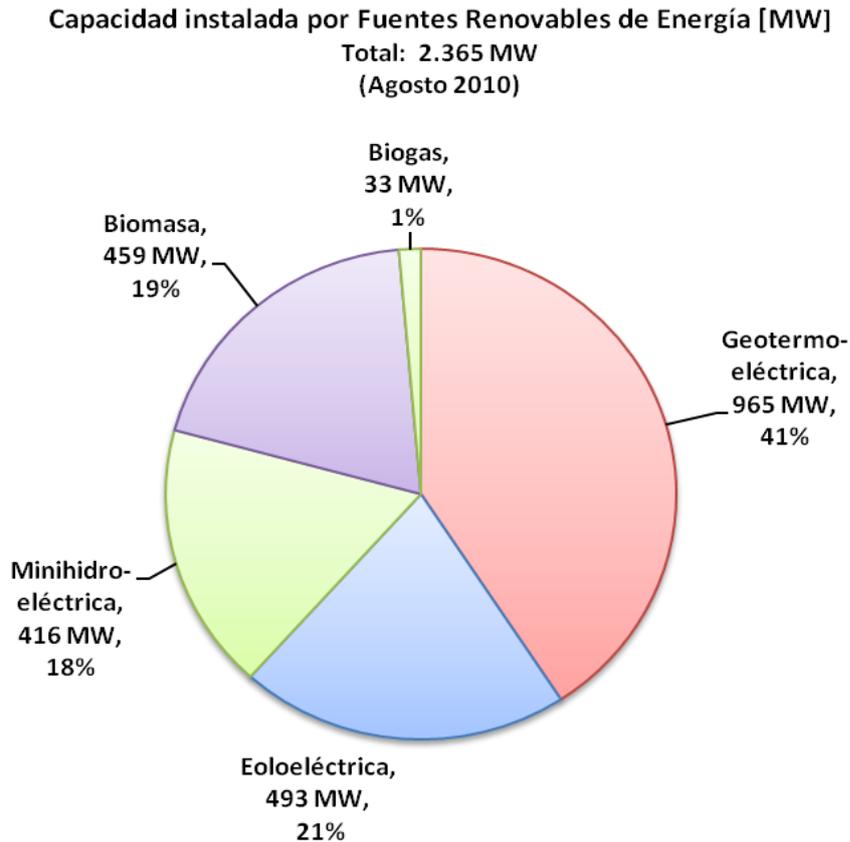


Grafico 1. 1 Capacidad de instalación por fuentes renovables de energía [MW]

1.2.1. Pequeña producción

Es la generación de energía eléctrica destinada a:

- La venta a CFE de la totalidad de la electricidad generada, en cuyo caso los proyectos no podrán tener una capacidad total mayor de 30 MW en un área determinada.
- El autoabastecimiento de pequeñas comunidades rurales o áreas aisladas que carezcan del servicio de energía eléctrica, en cuyo caso los proyectos no podrán exceder de 1 MW.
- La exportación, dentro del límite máximo de 30 MW

1.2.2. Capacidad total instalada en México

Hasta Agosto de 2010 la capacidad total instalada (servicio público y sector privado) para la generación de energía eléctrica en México es de 60.795 MW. La mayor parte es aportada por plantas termoeléctricas con un total de 43,231 MW o 71% del total. Según la definición de fuentes de energías renovables del programa especial para el aprovechamiento de energías renovables, lo cual no contempla plantas hidroeléctricas con una capacidad mayor a 30 MW, se cuenta con una capacidad instalada a partir de dichas fuentes de 2,365 MW o 4%.

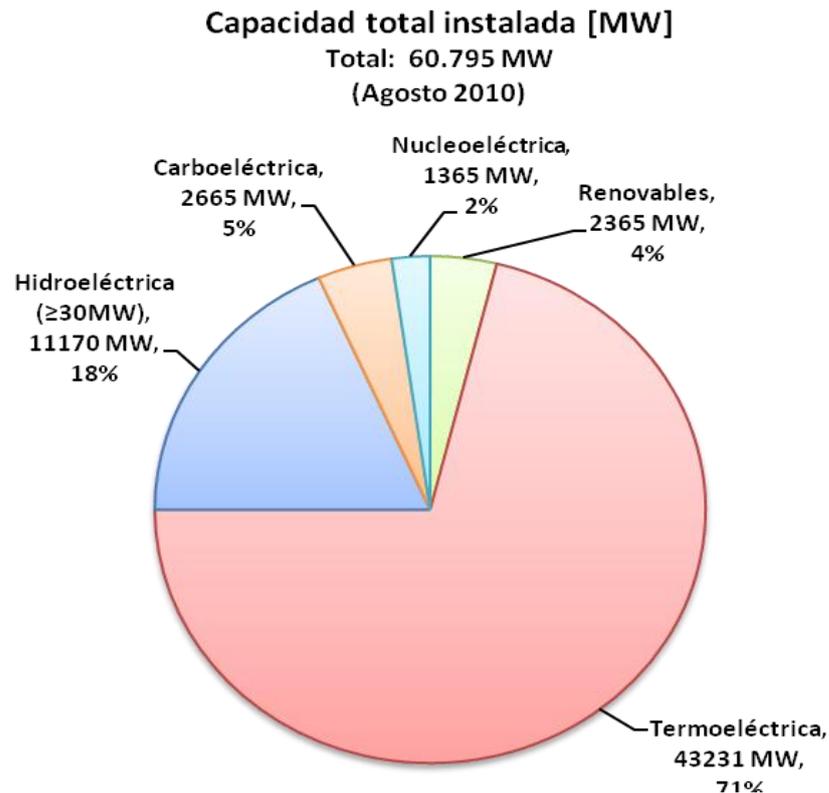


Grafico 1. 2 Capacidad instalada.

1.2.3. Definición de energías renovables.

Las energías renovables (véase tabla 1.2) son aquellas cuya fuente reside en fenómenos de la naturaleza, procesos o materiales susceptibles de ser transformados en energía aprovechable por la humanidad, y que se regeneran naturalmente, por lo que se encuentran disponibles de forma continua [LAERFTE, Art. 3, Frac. II].

Las fuentes renovables de energía perdurarán por miles de años. Las energías renovables se pueden clasificar de distintas formas: por su origen primario de la energía, por el nivel de desarrollo de las tecnologías, y por las aplicaciones de las energías. [RESOLUCIÓN Núm. RES/571/2014].

Tabla 1. 2 Desarrollo, aplicaciones de las energías

	Origen primario de la energía			Nivel de desarrollo de las tecnologías			Aplicaciones		
	Energía del sol ⁽¹⁾	Calor de la corteza terrestre	Movimiento relativo de la luna y el sol	Tradicional	Nueva	En proceso de desarrollo	Electricidad ⁽²⁾	Calor ⁽²⁾	Combustibles líquidos ⁽²⁾
Eólica									
Radiación solar									
Hidráulica									
Bioenergía					(3)				
Geotermia						(4)			
Olas									
Mareas									
Corrientes oceánicas			(5)						
Otras energías oceánicas ⁽⁶⁾									

Notas:

- (1) La mayoría de las fuentes de energía tienen a la energía del sol como origen de forma indirecta. Por ejemplo, en el caso del viento, la radiación solar calienta masas de aire, lo que a su vez provoca su movimiento.
- (2) Todas las fuentes renovables pueden ser utilizadas para generar electricidad, y a partir de ésta producir calor o energía para el transporte, pero aquí se muestran sólo aquellas fuentes que pueden tener estas aplicaciones de manera directa.
- (3) La bioenergía se utiliza tradicionalmente como combustible desde hace milenios. Sin embargo, existen también tecnologías para su aprovechamiento para generar electricidad o para la producción de biocombustibles, que son relativamente nuevas o que están en proceso de desarrollo.
- (4) La geotermia se aprovecha tradicionalmente de varias maneras, y existen además tecnologías en desarrollo, tales como la de rocas secas y la geotermia submarina.
- (5) Las corrientes oceánicas se deben a diversos factores: viento, diferencias en temperaturas, diferencias en salinidad, rotación de la tierra y mareas.
- (6) Otras energías oceánicas incluye el gradiente térmico oceánico y el gradiente de concentración de sal (en desembocaduras de ríos).

Los beneficios de las energías renovables

La experiencia internacional demuestra que las energías renovables producen diversos tipos de beneficios a los sistemas energéticos y a los países en su conjunto. Estos beneficios son tanto económicos, como sociales y ambientales.

1.2.4. Reducción de los costos y los riesgos económicos de la energía

Muchas tecnologías de energías renovables, tales como los calentadores solares de agua o los sistemas de electrificación rural para comunidades aisladas, son las opciones más económicas para sus usuarios. Su uso les reporta, por tanto, importantes ahorros de manera directa

1.2.5. Mayor acceso a servicios energéticos sustentables de áreas rurales

La provisión de energía es uno de los principales motores para el desarrollo rural, y las energías renovables son a menudo la mejor opción para proveer de servicios energéticos a comunidades rurales. En particular, la electrificación rural por energías renovables es, en muchos casos, una opción más rentable que las extensiones de la red eléctrica, para el 2.5% de las viviendas del país que no disponen de acceso a la energía eléctrica.

1.2.6. Mitigación del cambio climático.

En México el sector energía contribuye con el 61% de las emisiones de gases de efecto invernadero, y el país ocupa el lugar número 13 a nivel mundial en cuanto a emisiones de estos gases. El aprovechamiento de las energías renovables, al desplazar el consumo de combustibles fósiles, constituye una de las principales estrategias de mitigación del cambio climático a nivel mundial.

Con la excepción de tecnologías como la hidráulica y la geotérmica, que permiten obtener en un solo sitio cantidades significativas de energía, las energías renovables están por lo general dispersas en el territorio, lo que quiere decir que es necesario un mayor territorio para obtener una determinada cantidad de energía, en comparación con las tecnologías convencionales. Por lo mismo, los proyectos de energías renovables suelen ser de una escala menor que los proyectos convencionales de energía. Esta característica de los proyectos de energías renovables se convierte en un obstáculo para su desarrollo cuando las reglas de funcionamiento de los sistemas energéticos han sido concebidas para tecnologías de gran escala.

Muchas de las tecnologías para el aprovechamiento de las energías renovables dependen de procesos naturales variables, lo que hace que en algunos casos su disponibilidad no sea predecible o controlable. Esta particularidad de las energías renovables es especialmente relevante para el caso de la generación de electricidad.

Los costos de inversión de las energías renovables por MW son más altos que para las tecnologías convencionales, mientras que sus costos de operación son más bajos. Esta particularidad se convierte en una barrera más para el desarrollo de las energías renovables, sobre todo en un contexto de escasez de financiamiento para inversiones.

1.2.7. Energía eólica.

1.2.7.1. Tecnología.

Las turbinas eólicas transforman la energía cinética del viento en energía mecánica, ya sea para mover directamente una máquina, tal como una bomba de agua o un molino de granos, o bien para impulsar un generador eléctrico. Las tecnologías de turbina más comunes en la industria son las de eje horizontal y las de eje vertical; las primeras resultan más eficientes para aplicaciones industriales como granjas eólicas ubicadas en zonas rurales con grandes disposiciones de terreno; sin embargo, para ambientes urbanos las turbinas de eje vertical están tomando importancia debido a que requieren una menor área de instalación, generan menos ruido y se pueden acoplar a otros usos como alumbrado público y anuncios publicitarios.

Fig.-1. 12 Parque eólico.



Fuente. <http://codiceenlinea.com/wp-content/uploads/2012/12/Parque-Eólico.jpg>

1.2.7.2. Potencial.

México cuenta con un gran potencial para fuentes renovables de energía, como por ejemplo la energía eólica en la región de Oaxaca o energía fotovoltaica en el desierto de Sonora o Chihuahua.

El potencial eólico del país no ha sido evaluado de manera exhaustiva. Sin embargo, se ha evaluado el recurso en regiones específicas. En particular el Laboratorio Nacional de Energías Renovables de los Estados Unidos ha coordinado la realización de mapas eólicos para Oaxaca, Baja California Sur, las costas de Yucatán y de Quintana Roo y las franjas fronterizas de los estados de Baja California, Sonora y Chihuahua y Tamaulipas. Estos mapas se han realizado conjuntando información de estaciones meteorológicas con técnicas de prospección remota.

1.2.7.3. Metas.

La Ley para el Aprovechamiento de las Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética (LAERFTE) establece, que la Secretaría de Energía (SENER) elabore y coordine la ejecución del Programa Especial para el Aprovechamiento de Energías Renovables (LAERFTE, Art. 6, Frac. I), por lo cual la SENER estableció en el primer Programa entre otras cosas las metas de participación de las energías renovables en la generación de electricidad [LAERFTE, Art. 11, Frac. IV] indicadas a continuación.

Tabla 1. 3 Metas del Programa Especial para el Aprovechamiento de Energías Renovable

Objetivo	Impulsar el desarrollo de la industria de energías renovables en México.	Ampliar el portafolio energético del país.	Ampliar la cobertura del servicio eléctrico en comunidades rurales utilizando energías renovables.
Indicador	Capacidad Instalada mediante fuentes de energía renovable.	Porcentaje de Generación eléctrica mediante fuentes de energía renovable.	Comunidades electrificadas mediante fuentes de energía renovable
Unidad de Medida	MW	%	Número de Comunidades
Situación inicial	1,993 (2008)	3.9 (2008)	0 (2008)
Desglose:			
Eólica	90 MW	0.09%	
Mini hidráulica	389 MW	0.64%	
Geotérmica	994 MW	2.86%	
Biomasa y Biogás	515 MW	0.33%	
Meta	5,146 (al 2012)	4.5 - 6.623 (al 2012)	2,500
Desglose:			
Eólica	2,939 MW	1.74 - 2.91	
Mini hidráulica	521 MW	0.36 - 0.61	
Geotérmica	1,117 MW	2.19 - 2.74	
Biomasa y Biogás	576 MW	0.19 - 0.32	

Además de las metas del Programa Especial para el Aprovechamiento de Energías Renovable se definen metas complementarias en varios otros documentos oficiales:

Tabla 1. 4 Metas complementarias del Programa Especial para el Aprovechamiento de Energías Renovables

Documento	Plazo	Metas
Estrategia Nacional de Energía	2009-2024	Contar con un 35% de capacidad de generación eléctrica con tecnologías limpias*
Programa Sectorial de Energía	2007-2012	Participación de las energías renovables** en la capacidad de generación de energía eléctrica de 23 a 26%

Nota: * Energías renovables, grandes hidroeléctricas y energía nuclear

** incluyendo grandes hidroeléctricas

1.2.7.4. Estado Actual.

La energía eólica se ha desarrollado a pasos acelerados en el mundo durante los últimos años.

En el año 2008, la capacidad instalada mundial llegó a los 120,800 MW (Global Wind Energy Council, Global Wind Report 2009).

En Mayo 2010 existen en México 492.3 MW de capacidad eólica en operación, que se dividen en:

Capacidad instalada en el Servicio Público (CFE):

- 1.6 MW en el proyecto La Venta I
- 83.3 MW en el proyecto La Venta II

Capacidad instalada por el sector privado (Permisarios; >500KW)

- 79.9 MW del proyecto Parques Ecológicos de México en Oaxaca desde el 31 de Enero 2009
- 250 MW del proyecto EURUS en Oaxaca desde el 30 de Junio 2009
- 10 MW del Municipio de Mexicali en Baja California desde 29 de Octubre de 2009
- 67.5 MW de Eléctrica del Valle de México desde 01 de Abril 2010 en Oaxaca.

En mayo 2010 se encuentran 1,557.45 MW del sector privado en construcción, que se dividen en:

- Un total de 741.5 MW en la modalidad "Autoabastecimiento", por ejemplo el proyecto de Desarrollos Eólicos Mexicanos de Oaxaca con 228 MW, en operación el 18 de Octubre 2011
- 300 MW en la modalidad "Exportación" del proyecto Fuerza Eólica de Baja California, en operación el 31 de Diciembre 2011
- Un total de 510.85 MW en la modalidad "Productor Independiente", por ejemplo La Venta III en Oaxaca con 102.85 MW, en operación el 30 de Junio 2011
- 5 MW en la modalidad "Pequeño Productor" del Instituto de Investigaciones Eléctricas en Oaxaca, en operación el 30 de Junio 2010

Observación:

- Datos recientes sobre permisionarios se encuentra a la página web de la Comisión Regulador de Energía (CRE) excluyendo parques eólicos operados por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y plantas eólicas con una capacidad instalada debajo de 500 kW.
- Por un análisis profundo de los datos de los permisionarios se sugiere utilizar “Tablas dinámicas”.

Datos recientes sobre la capacidad instalada y generación eléctrica de plantas eólicas exclusivamente operados por CFE se encuentra en el área de estadísticas de la página web de CFE [11].

2 La generación eólica.

Las energías limpias y renovables, como la eólica, son esenciales para transitar hacia una forma de energía limpia, que permita propiciar un equilibrio para el desarrollo sustentable

En 2010, México tenía una capacidad instalada en operación de 519 megawatts (MW) de energía eólica, y la previsión era que para 2011 se duplicará y para 2015 se multiplique al menos por cinco. Esta tendencia representa el reto de lograr un crecimiento sostenido para consolidar a la industria.

Se estima que para 2026 la capacidad instalada para la generación de electricidad a partir de energías renovables se incremente en 20,544 MW, de los cuales, se estima que las fuentes de energía eólica e hidráulica tengan la mayor participación, con 58.6% y 27.3%, respectivamente. Este pronóstico incluye las modalidades de servicio público, autoabastecimiento y generación distribuida [12].

Tabla 2. 1 Proyección de capacidad instalada

	Servicio público	Autoabastecimiento	Generación distribuida	Total	Participación
Eólica	3,219	8,352	461	12,032	58.6%
Hidráulica	4,771	701	139	5,611	27.3%
Solar	20	752	1,186	1,958	9.5%
Fotovoltaica	6	752	1,170	1,928	9.4%
Termosolar	14	-	16	30	0.1%
Biomasa	-	422	345	767	3.7%
Geotérmico	151	-	25	176	0.9%
Total	8,161	10,227	2,156	20,544	100%

Fuente: *Prospectiva de Energías Renovables 2012-2026, SENER*

2.1. Principios de generación eólica.

La tecnología eólica se ha ido diversificando y ha permitido bombear agua, moler grano y, en la actualidad, generar electricidad. Los últimos avances permiten aprovechar mejor el viento y, en consecuencia, producir más energía y reducir su coste. La energía eólica es hoy el sector energético con un crecimiento más rápido en todo el mundo.

Los aerogeneradores tienen una vida útil de entre 20 y 25 años de media. Pasado este período, se pueden sustituir los aerogeneradores antiguos o bien desmantelar el parque. Los aerogeneradores viejos se pueden reutilizar para determinados usos o bien aprovecharse como chatarra. De este modo, la instalación de un parque eólico es completamente reversible.

Las energías renovables son vitales en nuestra lucha contra el cambio climático y tecnologías como la eólica pueden ayudar a construir un sistema de generación de energía sostenible para el futuro **[13]**.

La potencia proveniente del viento resulta una alternativa a la potencia obtenida por medio de combustibles fósiles. El viento representa una de las mejores oportunidades para generar potencia, otras ventajas del viento incluyen lo siguiente:

- Hay una enorme capacidad disponible a escala mundial.
- El viento es una fuente limpia de energía prácticamente sin emisiones.
- El viento es una alternativa para los combustibles fósiles.
- El viento es libre y con una tecnología moderna puede ser capturado en forma eficiente.
- Aun cuando usada la generación eólica a nivel de empresa eléctrica en los llamados parques eólicos o granjas eólicas, ocupan mucho terreno para agricultura o algunos otros propósitos.
- La generación eólica se puede usar en forma aislada en comunidades retiradas de la red eléctrica.

El viento se crea cuando el sol calienta al planeta en distintas temperaturas y en diferentes lugares, en la medida que el aire de arriba se calienta, se eleva y se crea y crea una presión negativa debajo del mismo, las masas de aire originadas por las diferencias de temperatura en la superficie de la tierra se establecen tres componentes que determinan la energía que se aprovechan y son: la dirección, la velocidad y la densidad.

Una vez que una masa de aire está en movimiento, lleva con ella la energía que crea el movimiento esta es conocida como la energía cinética. Las turbinas de viento convierten la energía cinética del viento, tanto en energía mecánica como en energía eléctrica, la energía mecánica se puede usar para bombeo y para operaciones de molienda.

El proceso de formación de los vientos en la superficie de la tierra se basa en que el aire caliente del ecuador asciende y se tiende a desplazar hacia los polos, lo cual genera zonas de baja presión, pero cuando el aire sube se enfría y luego baja hacia los trópicos produciendo de esta manera las llamadas zonas de baja presión, de tal manera que el aire frío que desciende choca con el aire caliente y produce bajas presiones. Este proceso se repite en forma continua y los cambios de temperatura dan lugar a la generación de los vientos.

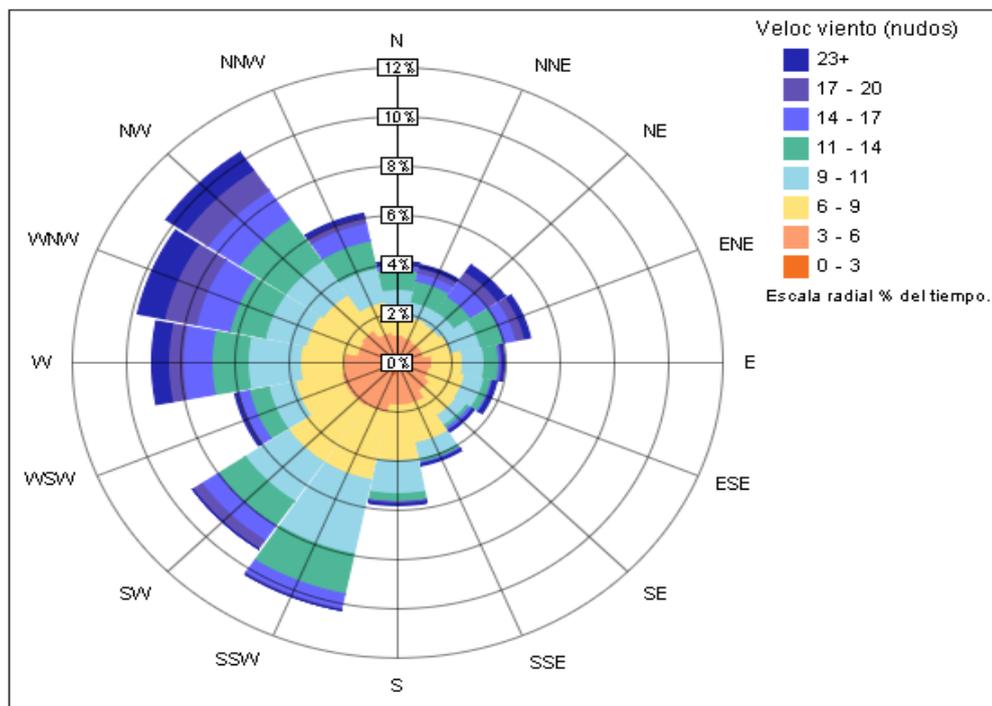
Se puede decir que el movimiento de aire es inagotable como es una gran fuente de energía, pero es disperso y aleatorio y se desplaza con velocidades muy distintas.

Los llamados parques eólicos o granjas eólicas se instalan en sitios denominados: vientos en laderas y montañas.

En sitios generalmente se tienen condiciones favorables a la velocidad del viento, por lo que en la mayoría de los casos resultan favorables para la velocidad del viento. Durante el día, en el hemisferio norte del planeta sopla hacia el sur, en tanto que en el hemisferio sur se orientan los generadores hacia el norte.

Durante la noche, este efecto se invierte, teniéndose también excelentes condiciones eólicas [14].

Fig.-2. 1 Rosa del viento



Fuente: Harper, E. (2013). ABC DE LAS ENERGIAS RENOVABLES EN LOS SISTEMAS ELECTRICOS. Limusa.

2.2. Tipos de viento.

Se tienen tres tipos de vientos: los vientos planetarios, los vientos regionales y los locales.

Los vientos planetarios, globales o constantes se generan principalmente como consecuencia del movimiento de rotación terrestre, que origina un desigual calentamiento de la atmósfera por la insolación y proceden de centros de acción dispuestos en franjas latitudinales de altas y bajas presiones, es decir, de anticiclones y depresiones. Estos cinturones se disponen aproximadamente en las latitudes ecuatoriales, subtropicales y polares.

Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), es un cinturón de bajas presiones en las latitudes ecuatoriales, y está determinada por el movimiento de rotación terrestre el cual genera lo que se conoce como abultamiento ecuatorial terrestre, mucho más notorio, por la diferente densidad, en los océanos que en los continentes y aún más notorio en la atmósfera que en los océanos.

Zonas de Divergencia Subtropical, son zonas de subsidencia de aire frío procedente de grandes alturas en la zona de convergencia intertropical, es decir, de la franja ecuatorial, y que dan origen, a su vez, a los vientos alisios, que se regresan hacia el ecuador a baja altura, y a los vientos del oeste, que van incrementando su velocidad a medida que aumentan también de latitud.

Zonas de Convergencia Polar, son zonas de baja presión que atraen a los vientos provenientes de las latitudes subtropicales. Estos vientos traen masas de aire más cálidas y húmedas, humedad que van perdiendo por condensación (lluvias, rocío y escarcha) a medida que van encontrando aire más frío con el aumento de la latitud.

Estos vientos son conocidos como alisios en las latitudes intertropicales y vientos del oeste en las zonas templadas.

- A) Brisa marina diurna
- B) Brisa terrestre nocturna

Vientos regionales, son determinados por la distribución de tierras y mares, así como por los grandes relieves continentales.

Vientos locales, los vientos locales presentan un desplazamiento del aire desde zonas de alta presión a zonas de baja presión, determinando los vientos dominantes y los vientos reinantes de un área más o menos amplia.

Estos tipos de vientos son los siguientes:

- Brisas marina y terrestre
- Brisa de valle
- Brisa de montaña [15].

2.3. Medición de la potencia generada.

2.3.1. Determinación de la velocidad del tiempo.

Para hacer un estudio de factibilidad eólica, el parámetro que determina su viabilidad es la velocidad del viento cuyo valor se puede expresar según el sistema de unidades usado, en metros/segundo (m/s), kilómetros/hora (km/h), millas/hora (m/h), etc., pero también por sus efectos sobre el ambiente sobre el cual actúa, por medio de una cantidad denominada el número de Beaufort. Este número establece la velocidad del viento en base a una escala de acuerdo con la siguiente expresión:

$$v = 0.837 B^{3/2}(m/s) \qquad \text{Ecu. (2.1)}$$

Donde:

B= Numero de Beaufort o de la escala de Beaufort.

v= Velocidad del viento en metros/segundo.

Tabla 2. 2 Escala del viento.

ESCALA DEL VIENTO BASADA EN EL NUMERO DE BEAUFORT		
NUMERO DE BEAUFORT.	VELOCIDAD (KM/H)	SITUACIÓN O DENOMINACIÓN
0	0-1	CALMA
1	2-5	VIENTO MUY LIGERO
2	6-11	BRISA MUY DEBIL
3	12-19	BRISA DEBIL
4	20-28	BRISA NO DESCRITA
5	29-38	BRISA FRESCA
6	39-49	BRISA FUERTE
7	50-61	VIENTO FUERTE
8	62-74	VIENTO DURO O TEMPORAL
9	75-88	VIENTO MUY FUERTE
10	89-102	TEMPORAL MUY FUERTE
11	103-117	BORRASCA O TORMENTA TROPICAL
12	MAS de 118	HURACAN

2.3.2. Variación de la velocidad del viento.

Los valores anteriores de la escala de Beaufort corresponden a una condición de desplazamiento superficial del viento, pero se sabe que el valor de esta velocidad cambia con la altura, por lo que se aplica un factor de corrección.

La relación entre velocidad de referencia, designada por (V_0) y la velocidad a la que incide el viento (v) en las palas de una turbina de un generador eólico montado sobre una torre o estructura a una altura h , está dada por la expresión siguiente:

$$V/V_0 = (h/h_0)^\infty \qquad \text{Ecu. (2.2)}$$

Dónde:

V_0 = *velocidad de referencia del viento.*

V = *velocidad del viento a la altura h .*

h = *Altura de montaje del generador eólico.*

h_0 = *Altura de referencia (por lo general 10m).*

∞ = *Valor que queda determinado por la topografía del sitio, algunos valores de los más representativos, son los siguientes:*

$$\infty = 1/2 \text{ Para velocidades menores de } 8 \text{ Km/h}$$

$$\infty = 1/5 \text{ Para velocidades de } 8 \text{ a } 56 \text{ Km/h}$$

$$\infty = 1/7 \text{ Para velocidades mayores de } 56 \text{ Km/h}$$

2.3.3. La potencia del viento.

La cantidad de energía en el viento se puede expresar como una relación matemática entre la velocidad y la masa. La velocidad del viento cambia constantemente, algunas veces momento a momento y es afectada por muchos factores, incluyendo la hora del día (o de la noche).

Debido a que el sol cambia su posición en el cielo con algún grado sobre las bases de un día, su impacto en un punto dado sobre la superficie de la tierra cambia de acuerdo a esto, (los patrones de tormentas estacionales, también afectan a la velocidad del viento y su consistencia).

Se puede usar como una norma aceptable usar la velocidad promedio del viento durante un periodo de un año; "El viento es muy importante ya que a mayor velocidad, se tiene más energía". El segundo factor en la determinación de la energía del viento, es su masa.

A cualquier valor dado de velocidad, hay mayor energía cinética almacenada en un objeto pesado, que en uno ligero. Aun cuando el aire es muy ligero con la relación a la mayoría de las cosas, tienen una masa medible. (Un metro cúbico de agua debido a su masa puede almacenar más energía que un metro cúbico de aire, pero el aire tiene volumen y velocidad, lo que compensa su baja masa).

$$m = \rho AVt \quad \text{Ecu. (2.3)}$$

Masa = Densidad x (área x velocidad x tiempo)

Una vez que la masa de aire es conocida, se puede encontrar la energía del viento usando la siguiente ecuación:

$$\text{Energía del viento: } \frac{1}{2} \times \text{masa} \times (\text{velocidad})^2 = \rho AVt \quad \text{Ecu. (2.4)}$$

$$\text{Energía del viento: } \frac{1}{2} \times (m) \times (V)^2 \quad \text{Ecu. (2.5)}$$

El cálculo de la masa se puede cambiar con los cálculos de la energía, de manera que se tiene:

$$E.V. = \frac{1}{2} \times \text{densidad} \times (\text{área} \times \text{velocidad} \times \text{tiempo}) \times (\text{velocidad})^3$$

$$E.V. = \text{Energía del viento} = \frac{1}{2} \rho AVtV^3 \quad \text{Ecu. (2.6)}$$

De la ecuación anterior, se observa que ya se ha aumentado la velocidad del tiempo a su masa se aumenta la velocidad del viento se crea una mayor energía que incrementando la masa debido a la relación del cubo de la velocidad (V^3) en la ecuación.

El área (A) corresponde al área del rotor y se puede escribir como:

$$A = \pi r^2 = \frac{\pi D^2}{4} (\text{m}^2) \quad \text{Ecu. (2.7)}$$

Dónde: D= diámetro del rotor

La energía del viento se puede escribir como:

$$EC = \frac{1}{2} \rho \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) tV^3$$

$$EC = \frac{\rho \pi D^2}{8} tV^3 \quad \text{Ecu. (2.8)}$$

La potencia desarrollada es:

$$\rho = \frac{EC}{t} = \frac{\rho \pi D^2 V^3}{8} \quad \text{Ecu. (2.9)}$$

La densidad del aire es:

$$\rho = 1.25 \text{ Kg/m}^3$$

$$\rho = \frac{\rho \times \pi D^2 V^3}{8}$$

$$\rho = 0.4 D^2 V^3 \rho(\text{watts}) \quad \text{Ecu. (2.10)}$$

La expresión anterior representa un valor teórico, tratándose de generadores eólicos en la práctica, se debe tomar en consideración las pérdidas en la máquina.

2.3.4. La densidad de viento.

El termino densidad de potencia se usa para cuantificar la cantidad de potencia disponible, la potencia se mide en watts/metro cuadrado (W/m^2), la densidad de potencia se puede escribir como P/A que toma en consideración la velocidad del aire y la densidad del aire.

Cuando los estudios muestran que la energía producida por una turbina específica es insuficiente, hay tres formas de aumentarla:

- Usando un rotor más grande.
- Encontrando un nuevo sitio con mejores condiciones de viento.
- Encontrando una turbina con mejor eficiencia.

2.4. Factores que varían el viento.

2.4.1. La velocidad del viento y la altura.

El viento que se siente al nivel de tierra se puede sentir intenso en ocasiones, pero es débil en comparación con la velocidad del tiempo (y la potencia disponible) a alturas mayores.

El viento cercano a la tierra decae, debido a la fricción causada por la obstrucción de los árboles, de los edificios y colinas. Algunas obstrucciones tienen más impactos que las otras, por ejemplo, el viento que sopla a través de un lago está sujeto a menos fricción que el viento que sopla a través del bosque.

Por lo general la velocidad del viento es mayor a grandes alturas, debido a la ausencia de obstrucciones, por ejemplo, en montañas y laderas (la velocidad del viento tiende a incrementarse).

2.4.1.1. Variaciones del viento.

Las variaciones del viento hay que caracterizarlas desde dos puntos de vista, variaciones temporales y variaciones especiales, siendo su conocimiento de vital importancia a la hora de seleccionar un emplazamiento para un parque eólico.

2.4.1.2. Variaciones temporales del viento.

2.4.1.2.1. Ciclos energéticos.

Se puede observar que existen ciertas fluctuaciones en las medidas a lo largo del tiempo, pudiéndose establecer los denominados ciclos energéticos. Estos ciclos están asociados las diferentes escalas del movimiento atmosférico, las cuales no están directamente producidas por la radiación solar, sino también por las energías procedentes de otro tipo de intercambios. Las fluctuaciones temporales del viento pueden ser a corto plazo, debidas al intercambio atmosférico, o a largo plazo, asociados a fenómenos meteorológicos a gran escala. Es por ello por lo que hay que establecer la escala temporal a la que se refiere que puede ser del orden de minutos, horas o días.

2.4.1.2.2. Las ráfagas del viento.

Los valores máximos, rachas o picos de viento que implican variaciones bruscas de esfuerzos dinámicos o estructurales. El análisis de los datos de viento muestra que en general el valor de la racha máxima, la velocidad media y la desviación estándar.

2.4.1.3. Variaciones especiales del viento.

2.4.1.3.1. Variación Vertical.

Debido principalmente al rozamiento de la corriente de aire con la superficie terrestre, el perfil vertical no es constante, y aumenta con la altura.

Cuando las características del terreno cambian bruscamente, como en el caso de mar a tierra, campos de cultivo a bosque, a partir de tal discontinuidad se genera una capa limite interna cuya altura crece con la distancia al punto de cambio dependiendo del grado de turbulencia.

2.4.2. Obtención y tratamiento de datos de viento.

2.4.2.1. Parámetros representativos del potencial eólico.

Cuando se trata de evaluar un sitio hay que determinar las características del viento en el mismo, para lo cual habrá que considerar cada uno de los siguientes factores:

-Condiciones generales del viento en un sitio (medidas diarias, estacionales, anuales).

-Datos de 10 minutos a 1 hora de promedio.

- Condiciones meteorológicas (Temperatura, precisión atmosférica, humedad relativa, densidad del aire)
- Distribución de frecuencias de dirección.
- Variación temporal de la velocidad.
- Potencial eólico disponible.

-Características del viento para el funcionamiento del sistema

-Datos de 10 minutos a 1 hora de promedio

- Perfil vertical de velocidad horizontal.
 - Variaciones temporales.
 - Relaciones con la dirección.
- Variación de la velocidad vertical.
 - Relaciones entre el viento vertical y la dirección.
 - Relaciones entre el viento vertical y el horizontal.

-Datos de 1 minuto a 10 minutos de promedio.

- Factores de ráfaga.
 - Relaciones entre la velocidad, dirección y factor de ráfagas.
- Característica de la turbulencia.
 - Relaciones entre dirección y turbulencia.
 - Relaciones entre velocidad y turbulencia.
- Desviación de la velocidad.

2.4.2.2. La medición de las características

Los instrumentos de medida necesarios en energía eólica son:

- * Anemómetro para medir la velocidad del viento.
- * Veletas para medir la dirección.
- * Termómetros para medir la temperatura ambiente del aire.
- * Barómetros para medir la precisión atmosférica ambiental.

En general, la señal que proviene de los instrumentos de medida está conectada a un sistema de registro de diversos tipos:

- * Un dispositivo de integración.
- * Un indicador.
- * Un dispositivo de grabación, por ejemplo, el soporte magnético o eléctrico. [16].

2.5. Dimensiones de los generadores eólicos.

Existe una gran cantidad de variables utilizadas mediante las cuales es posible hacer una clasificación de los aerogeneradores.

De esta manera, se obtienen tres categorías perfectamente diferenciadas:

- Aerogeneradores de potencia baja: son aquellos que entregan una potencia de hasta 100 kW. Se utilizan principalmente para abastecer viviendas, así como establecimientos de pequeño tamaño, reservándose casi exclusivamente al ámbito privado. Se encuentran ubicados de manera dispersa alrededor del país.

Fig.-2. 2 Aerogeneradores de baja potencia.



Fuente: <http://twenergy.com/a/neuquen-se-convierte-en-el-laboratorio-eolico-de-argentina-1012>

- Aerogeneradores de potencia media: poseen una potencia de salida entre 100 KW y 30 MW, su aplicación se da generalmente en pequeños desarrollos comunitarios.

Fig.-2. 3 Aerogeneradores de potencia media



Fuente:<http://www.taringa.net/posts/economia-negocios/13897734/Peak-Oil.html>

- Aerogeneradores de potencia alta: son aquellos capaces de generar más de 30 MW. Son utilizados para proveer electricidad a la red nacional, por ello se encuentran comúnmente en zonas con gran potencial eólico. En general, se instalan varios generadores juntos, formando un parque eólico.

Fig.-2. 4 Aerogeneradores de potencia alta.



Fuente: <http://www.mincyt.gob.ar/noticias/se-fabricaran-aerogeneradores-de-alta-potencia-en-la-provincia-de-chubut-9911>

El tamaño del aerogenerador está directamente ligado a la potencia que posee el mismo. Por lo tanto, un generador de baja potencia será considerablemente más pequeño que uno de alta potencia.**[16]**

Para los tamaños medio y grande de los aerogeneradores, la excitación es un factor importante a considerar, ya que por medio de esta se controla la potencia eléctrica que se aporta al exterior, tienen que generar un campo de excitación intenso, para que el devanado de armadura o inducido pueda generar potencia nominal en las máquinas grandes y que normalmente es del orden de mega watts (MW).

2.6. Tipos de generadores.

Un generador eléctrico es una máquina capaz de transformar la energía mecánica en energía eléctrica. Los cuales clasificaremos en de corriente continua (dinamos) y corriente alterna estos últimos sub clasificándolos en síncronos y asíncronos.

Los dinamos, generadores de corriente continua, son máquinas eléctricas sencillas que tienen a ventaja de no necesitar sistemas especiales para cargar baterías y generan corriente aun para bajas velocidades de giro. Sin embargo, su uso cada vez es menor, se ha ido reemplazando por los generadores de corriente alterna ya que presentan el inconveniente de que necesitan un mantenimiento periódico y son más pesadas y caras que los generadores de corriente alterna de igual potencia aunque hay que tener en cuenta que son idóneos para aerogeneradores de muy pequeño tamaño (desenas de volts). [17].

2.6.1. Generadores Síncronos.

El generador síncrono opera por medio de un campo de excitación que puede ser dinámico o estático, la frecuencia de la tensión generada en el llamado devanado de armadura depende del número de pares de polos en este devanado, el valor de esta frecuencia se calcula con la ecuación:

$$f = \frac{PN}{120} \qquad \text{Ecu. (2.11)}$$

Dónde:

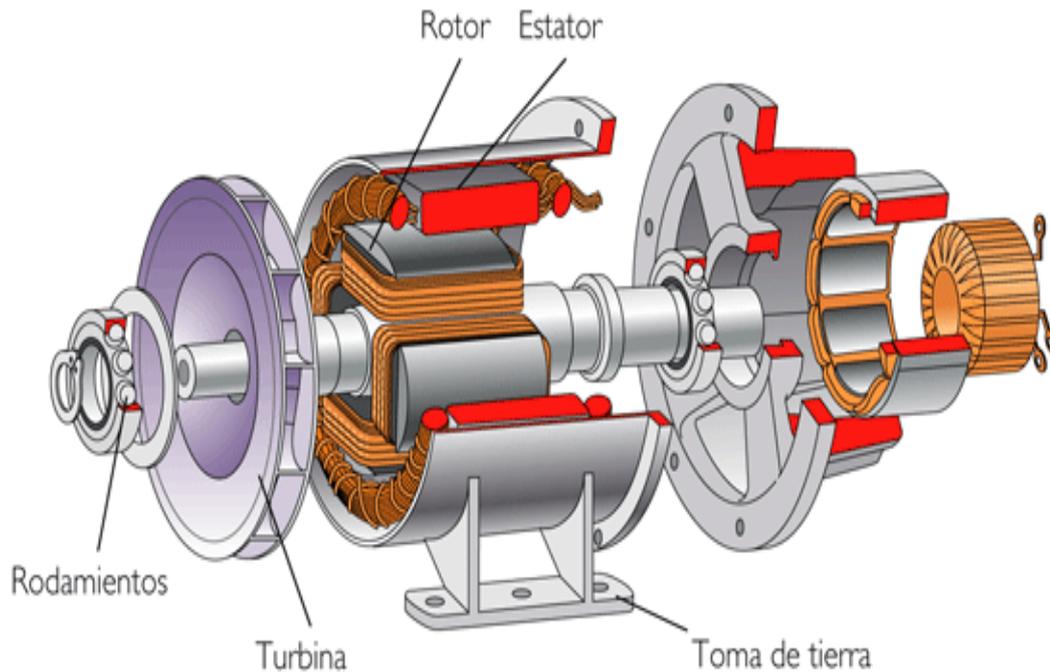
P= Numero de polos

N= velocidad en revoluciones por minuto (RPM)

Aun cuando los generadores más antiguos pueden generar en corriente directa (D.C.) para alimentar bancos e baterías, es más práctico para conectarse a las redes eléctricas, generar en corriente alterna (C.A.)

Los generadores de C.A. que no usan el multiplicador de velocidad son generalmente de mayor tamaño, pero esto lo compensan usando un sistema de imanes permanentes que reduce el peso, estos imanes están colocados en el rotor del generador, en lugar de las bobinas con conductores de cobre que construyen el devanado de campo.

Fig.-2. 5 Generador síncrono



Fuente: <http://www.ventageneradoreselectricos.es/Generador-Electrico-Tipos-de-alternadores>

2.6.2. Generadores asíncronos.

Los llamados generadores de inducción o asíncronos producen corriente eléctrica cuando se les hace operar a una velocidad superior a la llamada velocidad de sincronismo, a este pequeño incremento de velocidad se le conoce como el deslizamiento y la frecuencia de la parte rotatoria es entonces:

$$f_r = s \times f \quad \text{Ecu. (2.12)}$$

Dónde:

f= frecuencia de sincronismo

s= Deslizamiento o incremento de la velocidad con respecto a la del sincronismo (f)

El valor del deslizamiento es del orden de 0.2 – 0.5% y se obtiene con la siguiente expresión:

$N_n = \text{Velocidad nominal}$

$N_s = \text{Velocidad sincrona}$

$$S(\%) = \frac{N_n - N_s}{N_s} \times 100 \quad \text{Ecu. (2.12)}$$

Este tipo de generadores se construye en dos versiones:

- Con rotor jaula de ardilla.

Con rotor devanado.

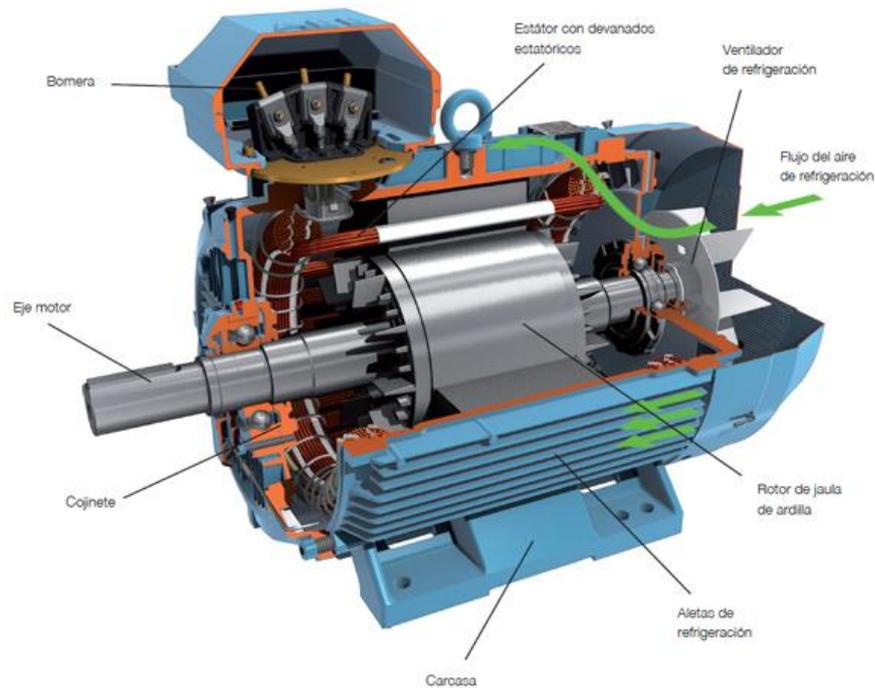
2.6.2.1. Generadores con rotor jaula de ardilla.

Estos generadores están contruidos básicamente como los motores de inducción de jaula de ardilla, por lo que las barras del rotor del generador se encuentran en corto circuito, lo que produce que al girar la generación de un campo magnético débil de excitación, pero que es suficiente para que arranque el generador, después se puede realimentar la tensión generada, lo que permite elevar la tensión de excitación hasta alcanzar su valor nominal.

2.6.2.2. Generadores con rotor devanado.

En este tipo de generadores se aplica una tensión externa de excitación al devanado del rotor por medio de un sistema de anillos rozantes y escobillas, como la energía magnética de excitación esta en relación directa con la energía eléctrica producida por generador, entonces hay una forma directa de controlar la potencia generada y usando dispositivos de electrónica de potencia se puede variar su valor con un margen amplio [18].

Fig.-2. 6 Generador jaula de ardilla.



Fuente: <http://www.voltimum.es/articulos-tecnicos/motor-asincrono-trifasico-parte-i>

2.7. Generación eólica distribuida.

2.7.1. Definición.

Las definiciones de GD guardan similitud pero no son únicas y difieren en algunos aspectos. Se han propuesto diversas definiciones, pero no existe una genérica y totalmente consensuada.

Se define la GD como generadores relativamente pequeños de 60 MW o inferiores. Estos generadores están ubicados cerca de los clientes para hacer frente a sus necesidades específicas, para apoyar el funcionamiento económico de la red eléctrica de distribución, o ambos.

2.7.2. Ventajas.

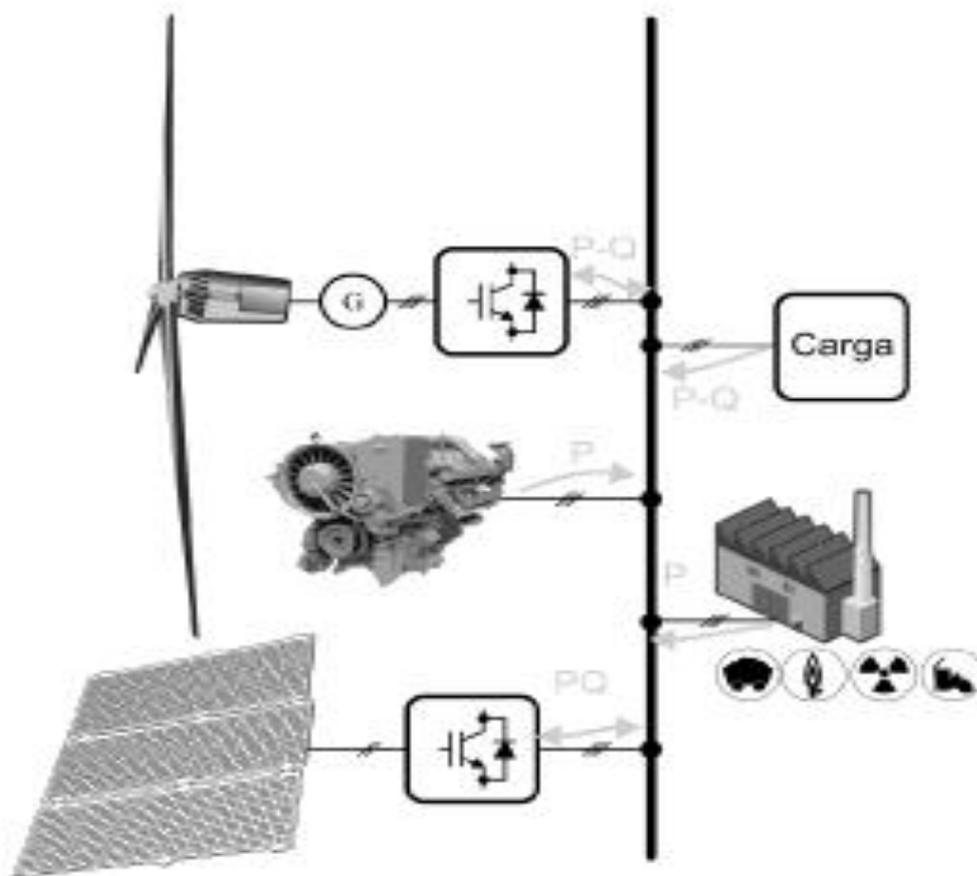
- Fiabilidad, especialmente en aquellas zonas donde los apagones son frecuentes.
- La gran variedad de tecnologías permiten al usuario elegir la mejor opción para un lugar determinado.
- Alta calidad del suministro eléctrico
- Reducción de pérdidas en las redes de transmisión y distribución.
- Reducción de costes debido a la reducción de la demanda pico en la red de distribución
- Mejoras en la eficiencia cuando se usan junto con sistemas de cogeneración (calefacción, frío...)
- Suministro energético en aquellos lugares donde la red convencional no es una opción (micro redes, sistemas aislados)
- Beneficios medioambientales. Reducción de emisiones por algunas tecnologías de generación distribuida (solar, eólica)

2.7.3. Aplicaciones.

La aplicación de una u otra tecnología en la GD depende de los requerimientos particulares del usuario. Las más usuales son:

- *Generación continua.* Se utiliza para generar energía eléctrica continuamente, operando en paralelo con la red de distribución. (Parques eólicos y centrales fotovoltaicas)
- *Generación en punta.* Se utiliza para suministrar la energía eléctrica en períodos punta, con lo que disminuye la demanda máxima del consumidor, ya que el costo de la energía en este período es el más alto.
- *Generación aislada* (sistemas aislados, microrredes)
- *Soporte a la red de distribución.* A veces, en forma eventual o bien periódicamente, la empresa eléctrica requiere reforzar su red eléctrica instalando pequeñas plantas debido a altas demandas puntuales o por faltas en la red.
- *Almacenamiento de energía.* Se puede tomar en consideración esta alternativa cuando es viable el costo de la tecnología a emplear, las interrupciones son frecuentes o se cuenta con fuentes de energía renovables [19].

Fig.-2. 7Esquema de conexión de generadores a la red de distribución.



Fuente: Extracto de información de CFE

3 Requisitos de interconexión a la red.

3.1. Requisitos técnicos generales de interconexión a la red nacional

Las Fuentes de Energía pueden estar constituidas por una o varias unidades de generación.

3.1.1. Tensión, capacidad y frecuencia cuando el solicitante hace uso del sistema para portear energía a los puntos de carga.

3.1.1.1. Tensión.

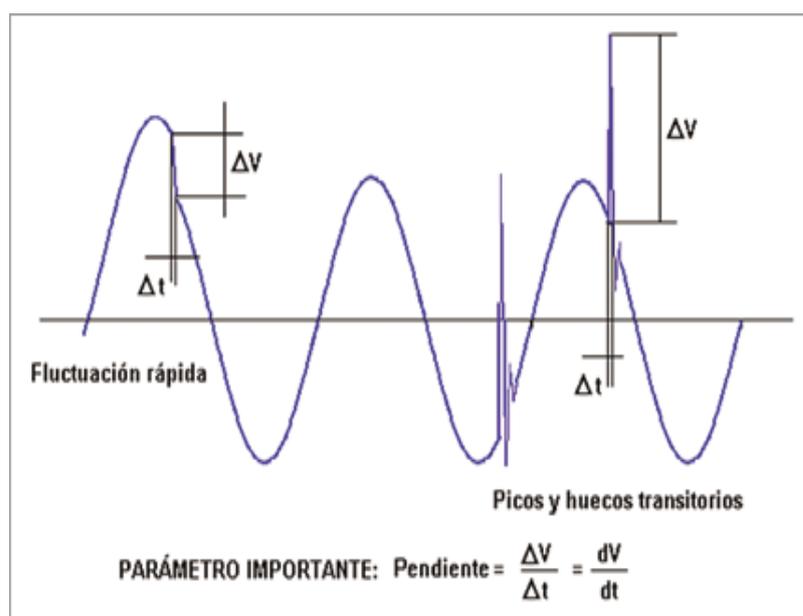
Mayor a 1 kV y menor a 69 kV.

En estado permanente las Fuentes de Energía deberán ser capaces operar y mantenerse conectadas ante fluctuaciones que no excedan de un rango de +5 % a -10% de la tensión nominal en el Punto de Interconexión conforme a la norma **NMX –J-098 ANCE 2012.**

Tabla 3. 1 Respuesta de la Central ante variaciones de tensión.

<i>% Tensión en el punto de Interconexión</i>	<i>Tiempo de operación</i>
$90 \leq V \leq 110$	<i>Operación Continua</i>
$110 \leq V \leq 115$	<i>5 min.</i>
$115 \leq V \leq 120$	<i>5 seg.</i>
$V > 120$	<i>0.16 seg.</i>
<i>Central $\geq 500KW$, Tiempo Recomendado</i>	

Fig.-3. 1 Representación de variaciones de tensión.



Fuente: Extracto de información de CFE.

3.1.1.2. Variaciones periódicas de amplitud de la tensión.

Hay dos índices básicos que se emplean para evaluar la severidad de las variaciones periódicas de amplitud de la tensión:

a) Indicador de variación de tensión a corto plazo (Pst): Evalúa la severidad de las variaciones periódicas de amplitud de la tensión a corto plazo, con intervalos de observación de 10 minutos. El valor del Pst se expresa en unidades de perceptibilidad en (p.u.).

b) Indicador de variaciones de tensión a largo plazo (Plt): Evalúa la severidad de las variaciones periódicas de amplitud de la tensión a largo plazo, con intervalos de observación de 2 horas. Se calcula a partir de valores sucesivos de Pst.

La interconexión de una **Fuente de Energía** en un alimentador de MT no debe causar niveles de emisión individuales que se encuentren fuera de los límites establecidos permisibles en la Tabla:

Tabla 3. 2 Límites de emisiones permisibles

<i>Indicador</i>	<i>Limite</i>
E_{Psti}	0.35
E_{Plti}	0.25

Dónde:

EPsti, EPlti: son los límites de emisión para los usuarios de la instalación directamente suministrados en MT.

Las variaciones periódicas de amplitud de la tensión serán medidas en Fuentes de Energía que por sus características presenten este fenómeno.

La combinación para severidad de variaciones periódicas de amplitud de la tensión causadas por varias instalaciones puede encontrarse en la siguiente forma:

$$P_{st} = \sqrt[3]{\sum_i Psti^3} \quad \text{Ecu. (3.1)}$$

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_i Plti^3} \quad \text{Ecu. (3.2)}$$

Formula indicador de variaciones a corto y largo plazo.

Las expresiones anteriores permitirán encontrar el nivel de variaciones periódicas de amplitud de la tensión resultante de varias fuentes, como es el caso de una planta generadora formada por varias unidades.

3.1.1.3. Desbalance y cambios rápidos de tensión.

El desbalance máximo de la tensión en estado estable en un lapso de 10 minutos o más será de 2%.

Para Fuentes de Energía eólicas se deben limitar los cambios rápidos de tensión a valores por debajo de +- 6% de la tensión nominal con no más de 4 eventos por día.

$$\text{variación rápida de tensión} = \% \frac{\Delta V}{V_{\text{nominal}}} \quad \text{Ecu. (3.3)}$$

3.1.1.4. Capacidad de generación.

Las capacidades de generación permitidas en los diferentes niveles de tensión se indican en la Tabla:

Tabla 3. 3 Límite de capacidad de generación a interconectar para media tensión.

Nivel de tensión Nominal del Sistema (kV)	A lo largo del alimentador, hasta alimentador (MW)	En buses de la subestación del suministrador, hasta (MW)
13.8	4	8
23.0	8	16
34.5	10	20

Estas capacidades son los valores acumulados a lo largo del alimentador. Pudiendo ser mayor a la capacidad indicada en la Tabla 3.3 cuando los estudios técnicos así lo determinen, dependiendo de la ubicación del Punto de Interconexión en el Sistema. En todo proyecto en media tensión, el Suministrador tendrá que realizar un estudio de factibilidad para determinar, en base a la capacidad del proyecto el Punto de Interconexión. Por lo que la Tabla 3.3 es solo una referencia para el Solicitante.

3.1.1.5. Rangos de Frecuencia.

Las Fuentes de Energía deben ser capaces de operar, ante cambios de frecuencia, de acuerdo a lo indicado en la Tabla 3.4 El ajuste del tiempo será determinado por el Suministrador.

Tabla 3. 4 Tiempo de respuesta ante frecuencias anormales

Frecuencia (Hz)	Tiempo de ajuste de las protecciones
57.5>frecuencia	Instantáneo
57.5=frecuencia<59.3	Tiempo ajustable hasta 5 seg.
59.3=frecuencia=60.5	Operación continua
60.5<frecuencia=61.2	Tiempo ajustable hasta 5 seg.
61.2<frecuencia	Instantáneo

3.1.2. Equipo de protección y seccionamiento cuando el Solicitante hace uso del sistema para portear energía a los puntos de carga.

Dependiendo del proyecto específico de que se trate, el Suministrador proporcionara al Solicitante la lista de protecciones que le apliquen conforme al listado **LSPA No. 68/2013**.

En caso de fallas en el Sistema, las Fuentes de Energía deberán contar con los dispositivos de protección para desconectarse del mismo.

Se debe contar con un sistema de protección para las unidades de las Fuentes de Energía, transformador y tramo de la línea de media tensión con que se interconecta al Sistema.

Los ajustes y pruebas de los sistemas de protección del Punto de Interconexión, del generador y de los enlaces con el Sistema, deberán estar coordinados y supervisados por el Suministrador. El equipo requerido de protecciones deberá cumplir con las especificaciones del Suministrador, de acuerdo con lo siguiente:

Protecciones básicas en el punto de interconexión:

- 25 Verificador de sincronismo.
- 27 Protección para baja tensión (tiempo ajustable).
- 59 Protección para sobre tensión (tiempo ajustable).
- 81U Protección para baja frecuencia (tiempo ajustable).
- 81O Protección para sobre frecuencia (tiempo ajustable).
- 51/51N Relevadores sobrecorriente de fase y tierra
- 50 Protección sobrecorriente instantáneo

Nota: Generalmente, si se cuenta con relevadores 51/51N, también se incluye en los interruptores la protección 50.

Dependiendo del tipo de fuente de generación y de las características específicas del proyecto el esquema de protección se podrá complementar con algunas de las protecciones siguientes:

Protección por desplazamiento de neutro

- 67/67N. Direccional de sobrecorriente de fase y tierra
- 51V Sobrecorriente con restricción de tensión
- 46 Secuencia negativa
- 32 Potencia inversa
- 51NT Sobrecorriente a tierra en el
- 47 Secuencia negativa de tensión
- 64N Falla a tierra
- 78 Angulo de fase
- Disparo transferido directo DTD
- 3V0 Secuencia cero de tensión

3.1.3. Esquema de comunicación para la supervisión.

Independientemente de la capacidad de generación de la central del **Solicitante**, el proyecto debe contar con medios de comunicación para los servicios de voz y datos. Dichos servicios deberán contar con un canal dedicado hacia el centro de control definido por el Suministrador que garantice las interfaces, ancho de banda y protocolos de comunicación para la transmisión de datos en tiempo real.

Los proyectos de generación de mediana y pequeña escala establecidos en la **RES/054/2010** quedan exentos de este requisito.

Si el Solicitante requiere utilizar la red de fibra óptica propiedad del Suministrador, debe previamente contratar los servicios de provisión y arrendamiento de la misma.

La base de datos de las señales requeridas por el Suministrador se acordara con el Solicitante (estados de interruptores, alarmas y mediciones entre otros) como se enuncian a continuación:

En el generador:

Estados:

- Generador sincronizado
- Generador fuera de servicio

Mediciones (Por generador o grupo de generadores):

- Tensiones entre fases (salida)
- Potencia activa (salida)
- Potencia reactiva (salida)
- Energía activa en la hora (MWh)
- Energía reactiva en la hora (MVARh)

En el punto de interconexión:

Mediciones:

- Corrientes en Amperes por fase
- Tensiones entre fases
- Potencias activa (de entrada y salida)
- Potencias reactiva (de entrada y salida)
- Energía activa en la hora (kWh)
- Energía reactiva (kVARh)
- Frecuencia (Hz)

Alarmas:

- Banderas de operación de la protección
- Interruptor bloqueado
- Bajo nivel de tensión de CD del banco de baterías
- Falta de tensión de CD en el circuito de protección
- Bobina de disparo

Estados (abierto/cerrado):

- Interruptor

Para el caso de plantas eólicas:

Variables Meteorológicas: Dirección y velocidad del viento, temperatura, humedad y presión atmosférica.

3.1.4. Equipo de medición.

Los medidores y los transformadores de instrumento destinados a la facturación deben ser instalados en el Punto de Interconexión. Los medidores deben contar con acceso remoto mediante un canal dedicado. Las características del acceso remoto serán definidas según cada proyecto por el área de medición del Suministrador. Se debe cumplir con la especificación **CFE G0000-48** "Medidores Multifunción para Sistemas Eléctricos" y con las normas **NRF-027-CFE** y **NRF-026-CFE** para los transformadores de instrumento.

Los esquemas de medición deberán cumplir con los siguientes requerimientos:

- Medición bidireccional redundante para facturación. Para plantas de capacidad hasta 500 kW y que no requieren hacer uso del **Sistema** para portear energía a sus cargas, se solicitara solo un medidor.
- En los puntos de carga se deberá contar con un medidor fiscal con características definidas por el Suministrador.
- Medición capaz de grabar en memoria masiva los parámetros de calidad de la energía, tales como: decrementos repentinos de la tensión (Sags), incremento repentino de tensión (Swells), interrupciones, parpadeo, forma de onda con limites programables y captura de forma de onda con muestreo de al menos 128 valores por segundo. Aplicable a plantas que requieren hacer uso del

Sistema para portear energía a sus cargas.

- Sincronización de tiempo con Sistema de Posicionamiento Global (GPS). Esta sincronización aplica al Punto de Interconexión y a los Puntos de Carga cuando se portee energía.
- Caseta de medición con acceso exclusivo a personal del Suministrador, de acuerdo con las especificaciones que el Suministrador proporcionara al Solicitante.

3.1.5. Calidad de la energía.

En caso de existir variaciones cíclicas de tensión o repercusiones indeseables como desbalanceo de fases y corrientes armónicas los cuales demeriten la calidad del servicio que el Suministrador le otorga al resto de sus usuarios, el Solicitante deberá instalar los sistemas de compensación requeridos.

3.1.5.1. Niveles de armónicos.

El nivel de distorsión de armónica se medirá en el Punto de Interconexión. Los límites de distorsión armónica de la tensión en la interconexión aplican conforme a las Tablas 3.5 y 3.6. El intervalo de tensión abarca las posibles tensiones de interconexión de las Fuentes de Energía consideradas en este documento.

A continuación se muestran los valores de los niveles de armónicas impares y pares permitidos:

Tabla 3. 5 Niveles armónicas (impares) en la tensión para MT (% de la fundamental).

Orden de Armónica	Nivel de Armónica (% de la tensión fundamental)
3	4
5	5
7	4
9	1.2
11	3
13	2.5
15	0.3
17	1.7
19	1.5
21	0.2
23	1.2
25	1.09
27	0.20
29	0.91
31	0.84
33	0.20
35	0.72
37	0.67
39	0.20
41	0.59
43	0.55
45	0.20
47	0.49
49	0.46

Tabla 3. 6 Niveles armónicas (pares) en la tensión para MT (% de la fundamental).

Orden de las Armónicas	Nivel de Armónica (% de la tensión fundamental)
2	1.8
4	1.0
6	0.5
8	0.5
10	0.47
12	0.42
14	0.39
16	0.37
18	0.35
20	0.34
22	0.33
24	0.32
26	0.32
28	0.31
30	0.30
32	0.30
34	0.29
36	0.29
38	0.29
40	0.28
42	0.28
44	0.28
46	0.27
48	0.27
50	0.27

El nivel de distorsión armónica total permitida es THDMV = 6.5%

La distorsión armónica total será medida en forma continua y las armónicas individuales solo cuando se exceda la distorsión total.[20].

3.1.5.2. Filtros

Un filtro eléctrico es un elemento que discrimina una determinada frecuencia o gama de frecuencias de una señal eléctrica que pasa, a través de él pudiendo modificar tanto su amplitud como su fase.

La creciente presencia de cargas no lineales en los sistemas eléctricos modernos provoca la distorsión de las formas de onda de tensiones y corrientes, lo que se traduce como la existencia de armónicos e interarmónicos en dichos sistemas. Las normas internacionales como la IEEE 519-92 [1-2], recomiendan los límites permisibles de distorsión en las redes eléctricas para reducir los efectos nocivos de la circulación de armónicos por dichas redes y sus componentes. Los filtros de armónicos cumplen la función de evitar la circulación de las corrientes de armónico por el sistema y reducir la distorsión de la tensión.

Estos pueden ser pasivos o activos. Los primeros, están contruidos en base a resistencias, bobinas y condensadores, mientras los activos están conformados por resistencias, condensadores y Amplificadores Operacionales

Para definir el tipo de equipo a instalar es necesario efectuar un minucioso estudio de armónicas, con mediciones de tensión y corriente, análisis mediante simulador y selección del equipo más adecuado. Como el circuito de filtrado absorbe parte o la totalidad de las armónicas generadas por los convertidores, deberá ser adecuadamente diseñado. Los filtros pueden clasificarse en:

Se pueden considerar dos grandes procedimientos de filtrado de armónicos, con compensación o no de la energía reactiva convencional.

Filtrado pasivo

Filtrado activo

Basados respectivamente en la utilización exclusivamente de componentes pasivos o bien de componentes activos.

3.1.5.2.1. Filtrado Pasivo

Los filtros pasivos utilizan exclusivamente componentes pasivos para la cancelación de las energías reactivas y armónicas.

En el caso de compensación de energía reactiva de carácter inductivo, como es sabido, el procedimiento consiste en la puesta en paralelo de bancos de condensadores con la carga consumidora de energía reactiva, cuya capacidad varía de forma escalonada para adaptarse al consumo variable de energía reactiva. Este procedimiento ha sido, y es, masivamente utilizado y de probada eficacia pero, debido a la también masiva aparición de armónicos en las redes eléctricas, estos sistemas convencionales de compensación han quedado afectados por su presencia.

3.1.5.2.1.1. Filtros Sintonizados

Estos filtros presentan una impedancia muy baja para la corriente armónica individual, derivando la mayor parte de la corriente distorsiva generada por las cargas no lineales, hacia el filtro y no hacia el suministro. El valor de frecuencia de resonancia en este caso, se encontrará siempre levemente por debajo de la armónica que se desea filtrar. En estos casos es muy importante tener en cuenta el valor de la corriente armónica máxima que se desea filtrar, pues de ésta depende el dimensionamiento del reactor y de la tensión del condensador.

Los equipos de filtrado, empleados en las instalaciones industriales y redes, permiten obtener las siguientes mejoras:

Compensación de la potencia reactiva a la frecuencia fundamental para un factor de potencia especificado. Disminuyen el porcentaje de distorsión armónica total (THD). Evitan fenómenos de resonancia, que surgirían al conectar capacitores sin protección contra armónicas. Disminución de pérdidas activas en cables y aparatos electromagnéticos, por reducción del THD.

3.1.5.2.1.2. Filtro Pasa altas

Este es el segundo de los filtros pasivo, el único cambio que presenta es la conexión de la salida, la cual en vez de tomarse del capacitor se toma de la resistencia lo cual nos provoca que en vez de dejar “pasar” las frecuencia bajas pasen las frecuencias altas.

Físicamente la salida se toma de la resistencia.

En su totalidad en el capacitor, el cual se comporta como una impedancia de valor muy alto, por lo que en la salida no se tiene casi voltaje, cuando la frecuencia aplicada es aumentada se tiene que el valor de la impedancia representada por el capacitor disminuye hasta que casi no consume voltaje, y la mayoría del voltaje se tiene a la salida.

3.1.5.2.2. Filtrado Activo

Para evitar estos problemas, que son característicos de los filtros pasivos, es necesario utilizar sistemas de compensación, tanto para los armónicos como para la energía reactiva convencional, que se auto adapten a las variaciones que se produzcan en cuanto a su contenido y valor. A estos sistemas de compensación se les denomina *Filtros Activos de Potencia (FAP)*, y están formados por convertidores estáticos de potencia, conectados en serie o paralelo con la carga contaminante que, mediante los algoritmos de control apropiados, actúan como fuentes de corriente o de tensión, cancelan de forma instantánea los armónicos de ambos tipos y se auto adaptan a la variación de los mismos.

3.1.6. Factor de potencia.

Para capacidades mayores o iguales a 1.5 MW y hasta 20 MW, en estado permanente la Central debe operar con un factor de potencia variable y continuo dentro de un rango ajustable desde 0.95 inductivo hasta 0.95 capacitivo de acuerdo a los requerimientos de la red eléctrica del Suministrador en el Punto de Interconexión. El rango total de operación para el factor de potencia debe ser desde 0.90 inductivo hasta 0.90 capacitivo, donde el factor de potencia es fijo entre el rango de 0.95 al 0.90 tanto capacitivo como inductivo, y el valor a utilizar, será definido por el Suministrador.

3.1.7. Estación meteorológica.

El Solicitante debe instalar una estación meteorológica capaz de monitorear variables de interés para el comportamiento de su generación renovable, tales como, dirección y velocidad del viento, temperatura ambiente, humedad relativa, presión atmosférica, irradiación Solar, directa, indirecta, y global. La Estación meteorológica debe cumplir con la norma NMX-AA-166/1-SCFI-2012 “Estaciones Meteorológicas, Climatológicas e Hidroclimatológicas parte1: Especificaciones Técnicas que deben cumplir los materiales e instrumentos de medición de las estaciones meteorológicas automáticas y convencionales”.

La información generada por la estación meteorológica debe estar disponible para su envío a través del enlace de comunicación de datos establecido con el Suministrador. Para proyectos entre 30kW a 500 kW en media tensión, la información de variables meteorológicas podrá estar disponible para su consulta a través del medio acordado entre el Suministrador y el Solicitante.

Para proyectos mayores a 500 kW en media tensión, la información de variables meteorológicas debe estar disponible en tiempo real a través del canal de comunicación de datos establecido con el Suministrador.

La definición de las variables medidas de interés se acordara con el esquema de comunicación para la supervisión que establezca el Suministrador (véase 2.4 de esta sección).

El número de medidores de irradiación solar, dependerá de la topografía y extensión del terreno de la Central, previo acuerdo con el Suministrador.[21].

3.1.8. Viabilidad.

El sistema de interconexión a la red está conformado por una serie de elementos que permite realizar la conexión física del generador distribuido y los equipos a la red eléctrica y con las cargas, protección, monitorización y control.

La complejidad de la conexión dependerá del nivel de interacción que se necesite entre los generadores, las cargas y la red eléctrica, permitiendo:

-Operar el equipo de generación distribuida como la principal fuente de energía y comprar energía al sistema en las horas que se produzcan picos de demanda.

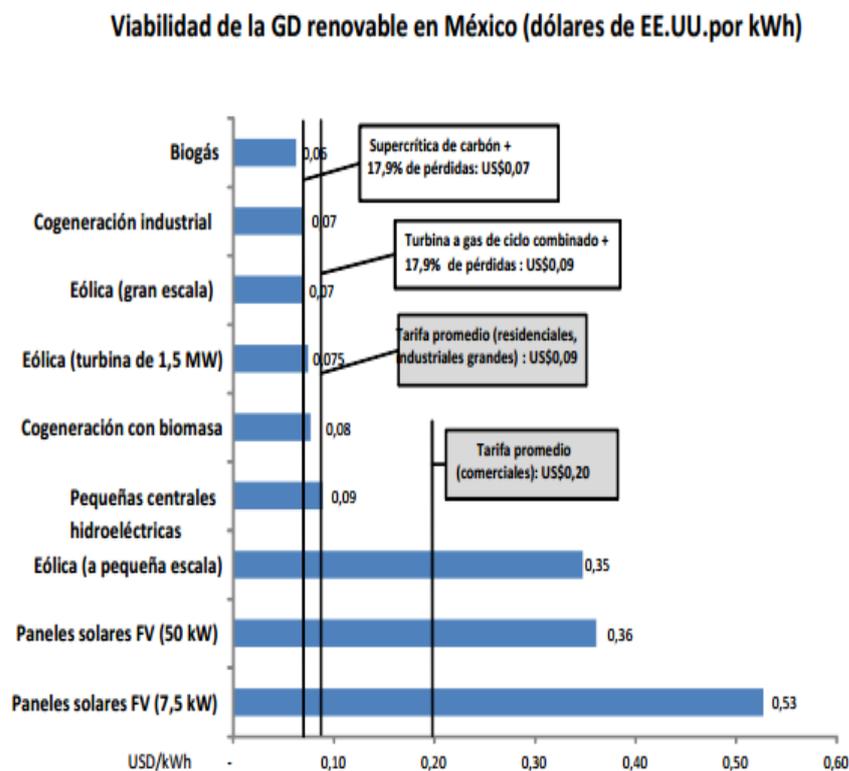
-Obtener energía de la red en caso de que se produzca una indisponibilidad en el sistema de generación distribuida.

-Exportar energía, proporcionar servicios auxiliares al sistema eléctrico o vender energía en el mercado liberalizado.

-Mejorar la fiabilidad proporcionando una fuente de energía alternativa.

El gráfico ilustra la viabilidad económica y financiera de los proyectos de GD renovable a escala Comercial y a pequeña escala en México.

Fig.-3. 2 Viabilidad de la GD renovable en México



Fuente: <http://competecaribbean.org/>

La generación distribuida renovable a escala comercial es mayormente viable, si bien la generación eólica requiere financiamiento en condiciones favorables, subvenciones o financiamiento de carbono.

La generación eólica a gran escala es más económica que el costo total de las TGCC, pero como se trata de una tecnología no firme, probablemente solo sería competitiva con el costo variable de generación de las TGCC. Los proyectos eólicos en México han dependido del financiamiento de carbono y las subvenciones para poder cubrir la brecha de viabilidad frente a la generación convencional.

Las turbinas eólicas de 1,5 MW fabricadas a nivel local en México con el apoyo del BID (BID, 2011b), y con financiamiento en condiciones favorables del BID (con una tasa de sólo el 5%), también podrían ser viables.

Para poder realizar la interconexión de una fuente de generación distribuida se deben tomar en cuenta requisitos técnicos generales, los cuales ya se mencionaron anteriormente, así mismo hay una serie de documentación y requisitos tanto legales como técnicos que involucra y emite la compañía suministradora.**[20]**.

4 Protección de los aerogeneradores eólicos.

El generador es uno de los dispositivos más costosos e importantes del sistema eléctrico de potencia por lo cual debe de estar protegido contra cualquier falla ya sea mecánica y/o eléctrica por lo cual se utilizan varios dispositivos tanto para monitorear que el generador opere correctamente como dispositivos encargados de actuar de manera que el generador no sufra ningún daño, de estos dispositivos se hablara en este capítulo.

Es sumamente importante que las condiciones anormales de operación de un generador eléctrico sean detectadas a la mayor brevedad y que el área afectada sea aislada tan rápido como sea posible.

La protección de un generador debe considerar algunas condiciones anormales que no se presentan en otros elementos del sistema. Si el generador es no atendido debe proporcionarse protección automática contra todas las condiciones peligrosas, en instalaciones atendidas puede ser preferible dar una alarma por alguna condición anormal antes de sacar el generador de servicio.

Los esquemas de protección varían grandemente en función de las características propias de cada instalación y de los objetos buscados.

Los generadores se encuentran sometidos, más que ningún otro equipo del sistema, a los más diversos tipos de condiciones anormales.

En algunas ocasiones, el operador puede evitar que un generador salga fuera de servicio en el caso de que su salida implique un trastorno significativo para el sistema eléctrico al que se encuentra conectado.

No puede negarse la gravedad que puede significar para un sistema eléctrico la desconexión momentánea e innecesaria de un generador; pero tampoco puede evitarse ese daño mediante la falta de una protección necesaria.

La protección de los generadores frente a la posibilidad de daños significativos es más importante que la protección a la continuidad momentánea del servicio del sistema eléctrico nacional al que están conectados.

Una consideración a tener en cuenta al analizar las protecciones de un generador y que no se manifiesta en los restantes equipos que conforman un sistema eléctrico, es el hecho que la apertura de su interruptor principal es condición necesaria, pero no suficiente para evitar la prolongación de ciertos daños [22].

Con el objeto de limitar el tiempo de falla y preservar las personas y equipos eléctricos involucrados en cada tipo de falla, son requeridos distintos tipos de relés.

La función de los mismos es limitar el tiempo de falla minimizando el daño a los equipos.

En función de la variable que controlan surgen los siguientes relés básicos:

Por sobrecarga (I)

Por cortocircuitos (I)

Por sobretensiones (U)

Por temperatura (t; I)

Por falta o exceso de tensión (U)

Por exceso o defecto de frecuencia (f)

Por sentido inverso de circulación de corriente (I) o potencia (W)

Por corriente de desequilibrio (i) o pérdida (diferencia) de corriente

Imagen térmica (i y temperatura)

La función normal de los relés es proteger las instalaciones eléctricas, aguas abajo del punto de su instalación o medición [23].

Los aerogeneradores al igual que todos los generadores deben estar protegidos eléctricamente y contra bajo voltaje y sobrevoltaje, altas y bajas frecuencias y secuencia de fases ya que estos valores al estar por encima o debajo de los nominales pueden dañar el generador y la red eléctrica nacional. Un aerogenerador también tiene que estar protegido contra sobrecorrientes ya que estas pueden afectar el aislamiento de los devanados y los cables que conducen dicha sobrecorriente.

Todas estas protecciones eléctricas se realizan mediante un arreglo de transformadores de instrumento (sensor), relevadores (actuador) e interruptores (desconectador).

En la actualidad al comprar un aerogenerador ya vienen incluidas dentro del generador todas estas protecciones pero es importante tener el conocimiento de cómo funcionan para poder realizar los ajustes necesarios para que en caso de falla los elementos actúen correctamente.

Finalmente el aerogenerador debe protegerse contra problemas específicos que pueden presentarse por su construcción y operación como por ejemplo la protección contra el embalamiento, protección contra fuertes corrientes de viento y una muy importante y frecuente en los aerogeneradores, la protección contra descargas atmosféricas debido a que generalmente son el punto de mayor altura lo cual los hace propenso a sufrir este tipo de descargas.

4.1. Protección contra sobrevoltaje y bajo voltaje.

Se puede dar el caso de que la sobretensión es producida por una descarga atmosférica la cual produce un aumento del valor de la tensión a valores muy altos durante un transitorio de pocos milisegundos, causadas por la caída o inducción en la línea de un rayo. Por parte de la máquina eléctrica rotatoria voltajes excesivos en los terminales pueden ser producidos por el rechazo de carga sin la necesidad que se supere el límite en la relación de voltaje frecuencia de la máquina, los excesos de velocidad de rotación pueden llegar a alcanzar un aumento del 200% bajo esta condición de relación voltaje frecuencia la sobreexcitación puede no resultar excesiva, la tensión sostenida se puede encontrar sobre los niveles admisibles, este problema en general es controlado por el sistema de regulación de velocidad y el sistema de regulación de tensión, por lo cual no se presenta en todos los distintos tipos de turbinas.

La norma C37-102. Recomienda el uso de un relé con un elemento instantáneo y un elemento inverso. En la nomenclatura ANSI se le conoce con el número 59.El elemento instantáneo:

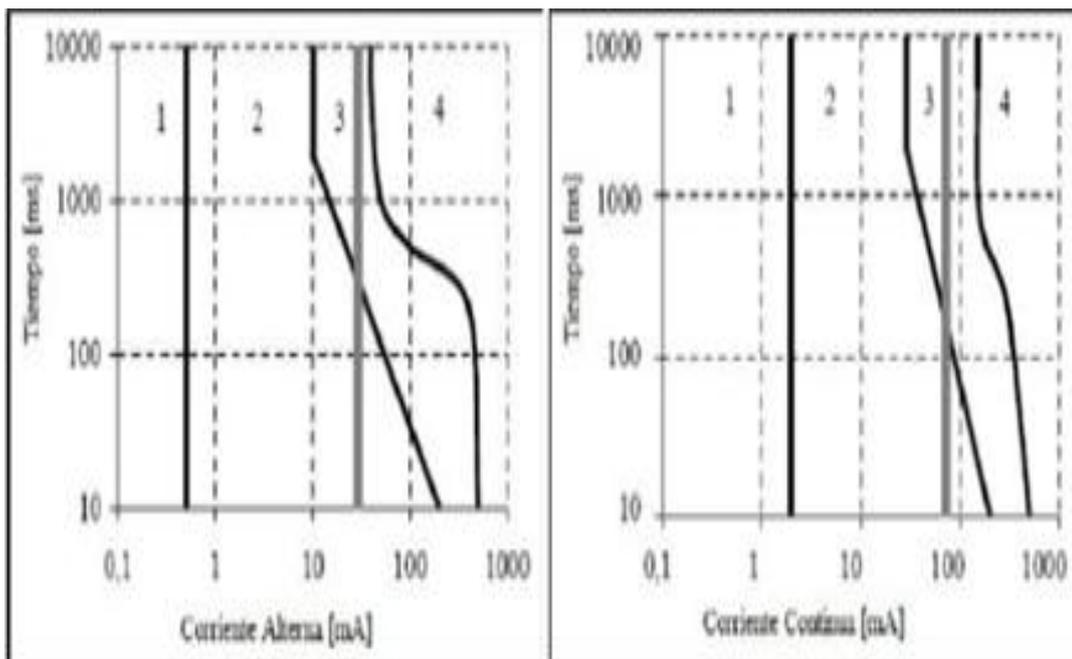
$$130\%V_n \leq V \leq 150\%V_n \quad \text{Ecu. (4.1)}$$

El elemento inverso

$$V = 110\%V_n \quad \text{Ecu. (4.2)}$$

Estos efectos están asociados a curvas tiempo/corriente tanto para continua como para alterna.

Fig.-4. 1 Curvas tiempo/corriente



Fuente: Extracto de información de CFE.

4.2. Protección contra alta frecuencia y baja frecuencia.

La protección de baja frecuencia se emplea en turbogeneradores de gran capacidad puesto que los alabes grandes en las partes de baja presión de la turbina presentan problemas de vibración a velocidad baja.

En el diseño de estos alabes es crítico: se calcula de manera que sus frecuencias naturales de vibración de la velocidad nominal de la turbina. Este equilibrio es tan fino que a velocidades ligeramente distintas a la nominal si puede a ver frecuencia natural de vibración o sus armónicas debiendo evitarse que la turbina opere bajo carga en esas condiciones.

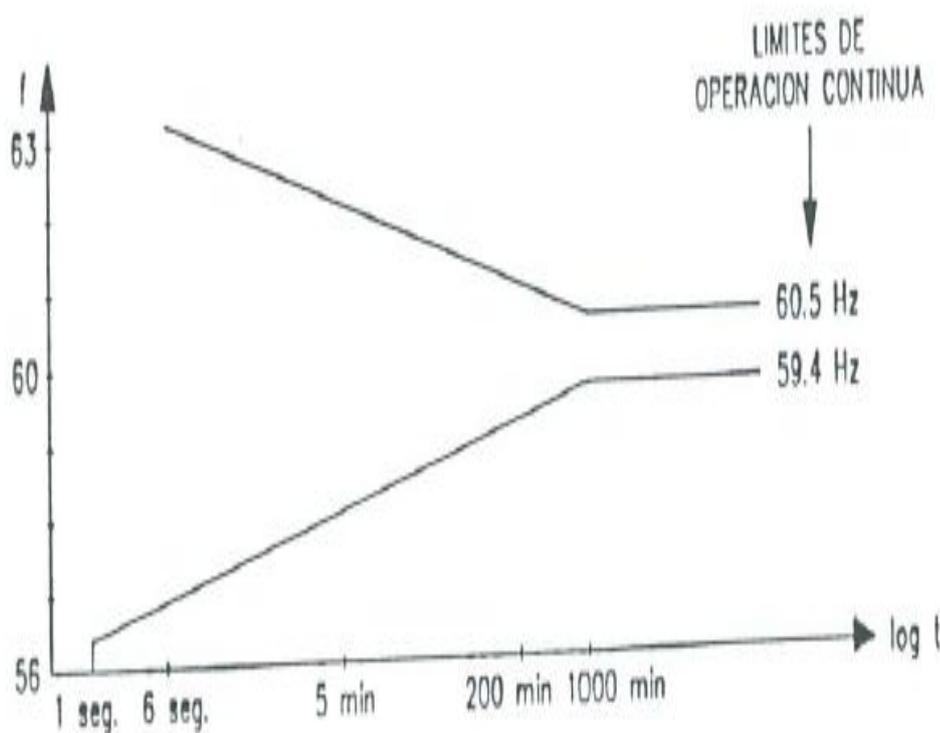
La operación de baja frecuencia se debe generalmente a sobrecarga del sistema.

El fenómeno de daño a los alabes grandes por vibración es acumulativo: la fatiga total se compone de la suma de los tiempos operados fuera de los límites admisibles de velocidad.

Para medir la velocidad de la turbina y protegerla contra valores peligrosos se emplea la frecuencia que es directamente proporcional a la velocidad angular.

Así se emplea un relevador de frecuencia ANSI 81 que solo requiere una velocidad de voltaje.

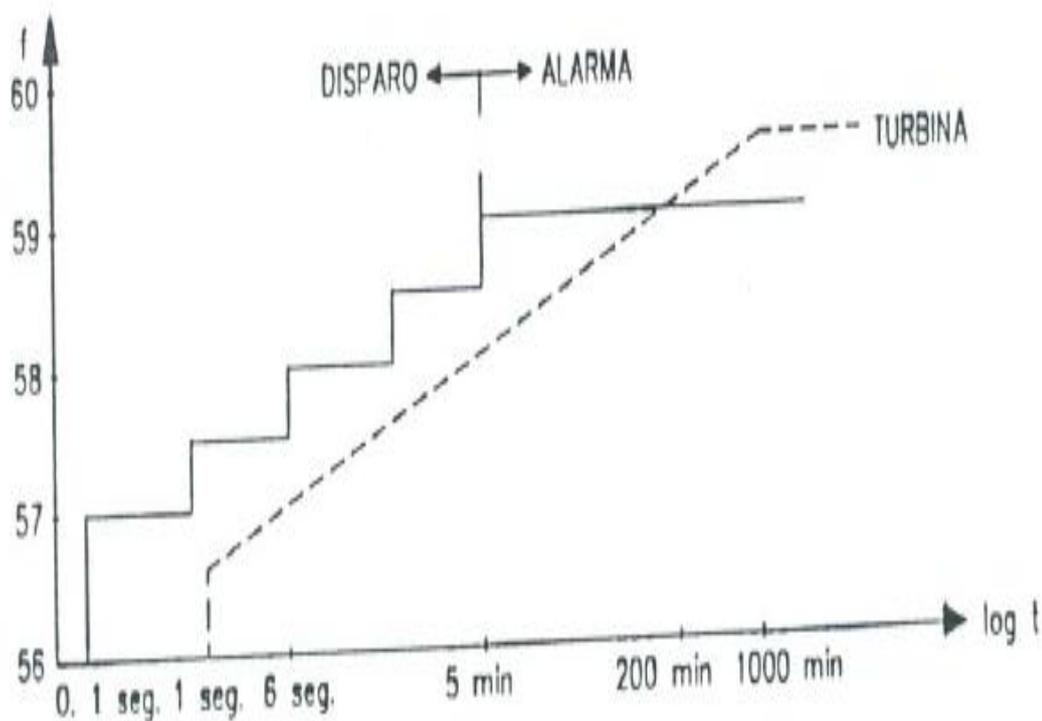
Fig.-4. 2 Límites de operación bajo carga de una turbina específica.



Fuente: extracto de información de CFE

Aun no existe un relevador especial para esta aplicación, cuya característica se adapte totalmente a la curva de frecuencias límite de operación de la turbina, ante esta situación, es común utilizar varios relevadores instantáneos de frecuencia y hacerlos disparar por medio de relevadores auxiliares de tiempo. Se recomienda entre 3 y 5 pasos de frecuencia y tiempo.

Fig.-4. 3 Característica de disparo resultante de la gráfica "frecuencia tiempo"



Fuente: extracto de información de CFE

El relevador de baja frecuencia de tiempo inverso no es adecuado para la aplicación puesto que debe ajustarse aproximadamente a 58.5Hz. Deja las frecuencias mayores sin proteger y a frecuencias bajas es demasiado lento, además comúnmente cruza la característica de la turbina en dos puntos.

Los contactos de los relevadores auxiliares de tiempo correspondientes a los valores de frecuencia de 58.5Hz.

El inferior se conectan para disparar exclusivamente el interruptor de la unidad; la unidad quedara girando y excitada, dando servicio a sus auxiliares y disponible para ser resincronizada tan pronto como las condiciones del sistema lo permitan.

El elemento ajustado a 59Hz. Generalmente se conecta para dar alarma únicamente el ajuste de tiempo que tiene es relativamente largo, pues la turbina puede operar entre 58.5 y 59 Hz. Un tiempo considerable dando así oportunidad al operador para efectuar maniobras correctivas.

4.3. Protección contra pérdida de secuencia de fases.

Una sincronización inapropiada de un generador al sistema, puede resultar en daño al transformador elevador y a cualquier tipo de unidad de generación.

El daño provocado podría ser:

- Deslizamiento de coples.
- Incremento en la vibración de la flecha.
- Fatiga en la flecha y otras partes mecánicas.

Para evitar daño al generador durante la sincronización, el fabricante del generador proporciona límites de sincronización, en cuanto al ángulo de cierre del interruptor y ventana (diferencia) de voltaje los cuales se mencionan en el capítulo 3.

Idealmente, el cierre del interruptor deberá ser cuando el ángulo de la fase entre el generador y el sistema sea cero.

Para lograr esto, el cierre del interruptor deberá ser enviado antes, para que los ángulos de fase coincidan al momento en que se cumpla el tiempo de cierre del interruptor.

La diferencia de voltaje deberá ser minimizada y no exceder el 5%. Esto ayuda a mantener la estabilidad del sistema previniendo el flujo de potencia (VARS) al sistema.

Adicionalmente, si el voltaje del generador es excesivamente menor al del sistema al momento de cierre del interruptor, el ajuste sensible del relevador de potencia inversa deberá dispararlo.

La diferencia de frecuencia deberá ser minimizada en la práctica por el control del motor primario (dentro de sus limitaciones de respuesta).

Una gran diferencia de frecuencias causa una rápida carga del generador, o una excesiva motorización de la máquina.

4.4. Protección contra sobrecorriente.

La sobre corriente encuentra su origen en la sobrecarga o en el cortocircuito y se define como cualquier corriente cuyo valor es más alto que la corriente nominal del circuito, el funcionamiento de la protección contra sobrecorriente se basa en controlar la intensidad del circuito protegido. Cuando dicha intensidad sobrepasa un valor prefijado, el dispositivo de protección realiza una acción (apertura del circuito, señal de alarma, etc.).

En sobrecargas

-La intensidad nominal del interruptor automático I_n estará comprendida entre la intensidad de cortocircuito I_{sc} y la intensidad de carga admisible I_{ca} , de tal forma que se cumpla:

$$I_{sc} \leq I_n \leq I_{ca} \quad \text{Ecu. (4.3)}$$

La condición de desconexión se deberá cumplir cuando la intensidad convencional de desconexión o intensidad más retardada I_{cd} sea menor o igual a 1,45 veces de la intensidad de carga admisible I_{ca} , como se puede ver a continuación:

$$I_{cu} = K_1^2 * S^2 \quad \text{Ecu. (4.4)}$$

Dónde:

K_1 = Valor de corriente del material.

S = Sección del conductor mm^2

4.5. Protección contra embalamiento.

La protección contra embalamiento consiste en tener un freno del rotor en caso de falla ya que al ser dependiente del viento, al presentarse una falla el viento seguirá fluyendo. Por ejemplo si actúa una protección contra sobrecorriente y desconecta el generador este seguirá girando ya que el viento continuara impulsando las palas y como esta desconectado no se presentara el freno electromagnético que presenta la carga normalmente, por lo que el rotor acelerara bastante rápido y si no se frena y supera la velocidad del diseño se dañaran los mecanismos de rotación o en el peor de los casos se caerá es por eso que es importante que tenga un freno mecánico o aerodinámico.

Un freno mecánico es aquel que frene el rotor ejerciendo una fricción en el sistema rotativo mediante dos discos uno fijo y otro se mueve soldado al eje de transmisión de modo que cuando se presente una falla las pinzas unan estos dos discos eléctricamente, mecánicamente o neumáticamente para que de esta manera se valla frenando el movimiento de rotación hasta su paro total. Y por otra parte el freno

aerodinámico se logra mediante un mecanismo que hace rotar cada una de las palas o en algunos casos solo la punta de la pala alrededor de 90 grados sobre su eje y de esta manera no tener una incidencia directa del viento que haga girar al generador.

En base a la experiencia este tipo de freno es muy confiable ya que el frenado no se hace bruscamente si no paulatinamente para no dañar la flecha del rotor. Este freno se lleva mediante resortes en el caso de que los generadores sean pequeños ya que al no requerir energía eléctrica pueden funcionar mecánicamente, por otra parte si el generador es muy grande se usan servomotores para realizar el giro de las palas.[24].

Fig.-4. 4 Freno mecánico del aerogenerador.



Fuente:http://www.motiva.fi/myllarin_tuulivoima/windpower%20web/es/tour/wtrb/safety.htm

Fig.-4. 5 Freno dinámico del aerogenerador.



Fuente:<http://www.economiadelaenergia.com/2011/05/energia-eolica-como-se-para-un-aerogenerador/>

4.6. Protección contra alta velocidad del viento.

La protección contra alta velocidad del viento es de suma importancia ya que de no hacerlo puede ser causante de la caída del aerogenerador la protección más usada es la que esta mencionada en el subtema anterior, el frenado dinámico ya que al no tener el flujo directo de aire en las flechas se disminuirá la velocidad con la que gira el rotor hasta disminuir la velocidad para la cual está diseñado el generador. [25]

4.7. Protección contra descargas atmosféricas.

Por la altura de un aerogenerador generalmente es el punto que presenta menor resistencia lo cual lo hace propenso a recibir descargas atmosféricas y estas pueden dañar el aerogenerador o incluso causar su caída por lo cual es de suma importancia protegerlos contra este tipo de descargas.

Existen varios tipos de descarga atmosférica las cuales son:

- Rayos nube-nube
- Rayos nube-tierra ascendentes positivos
- Rayos nube-tierra ascendentes negativos
- Rayos nube-tierra descendentes positivos
- Rayos nube-tierra descendentes negativos

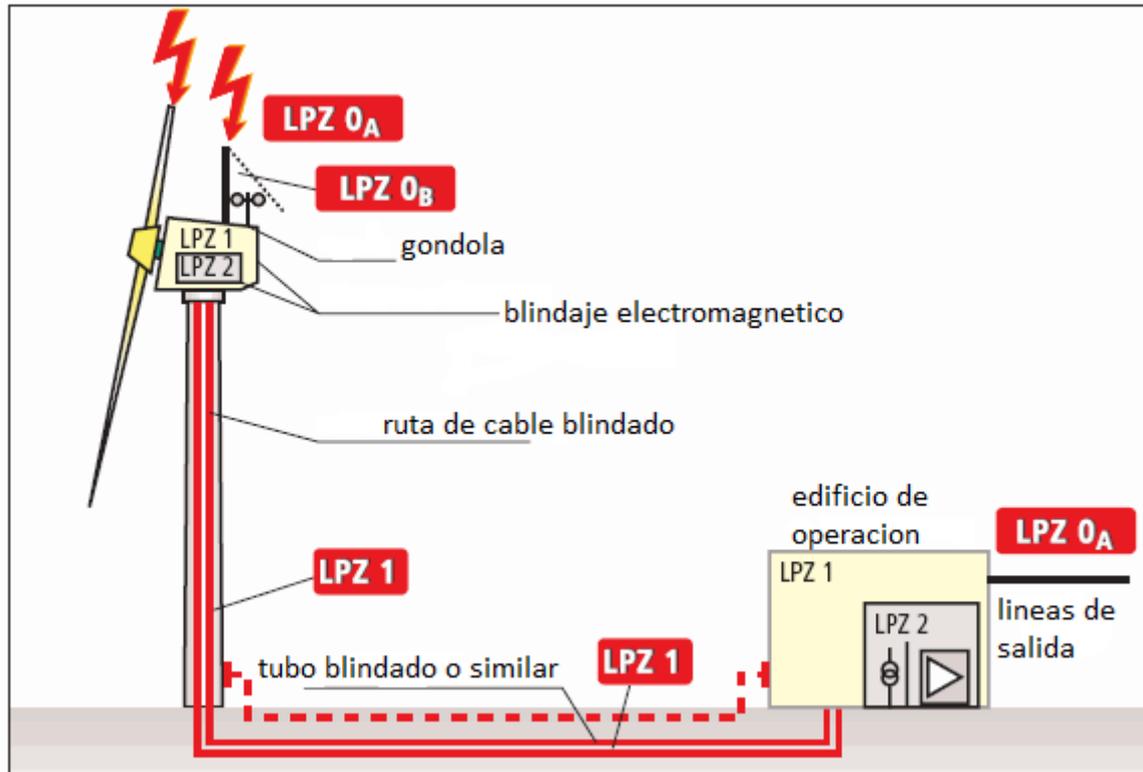
El tipo de descarga que nos interesa es nube-tierra ya que son las que pueden afectar a nuestro aerogenerador.

El concepto de zonas de protección en una estructura o instalación garantiza la protección de todo el equipamiento sensible en un ambiente libre de perturbaciones electromagnéticas. Es por esto que para definir qué medidas tomar para proteger una turbina eólica contra el impacto de rayos, primeramente se deberá subdividir la misma en zonas de protección:

- LPZ OA: Impacto directo de las descargas, plena corriente, campos electromagnéticos no atenuados.
- LPZ OB: No impacto directo de las descargas, plena corriente, campos electromagnéticos no atenuados.
- LPZ 1: No impacto directo de las descargas, corriente reducida, campos electromagnéticos atenuados.
- LPZ 2: Mayor reducción de la corriente, mayor atenuación de los campos electromagnéticos.

Es muy importante que los parámetros de las corrientes de rayos que afectan la zona OA desde el exterior deban ser reducidos mediante medidas de apantallamiento y mediante la instalación de dispositivos de protección contra sobretensiones (DPS), lo cual asegure que los equipos eléctricos y electrónicos que se encuentran situados dentro del aerogenerador trabajen sin interferencias.

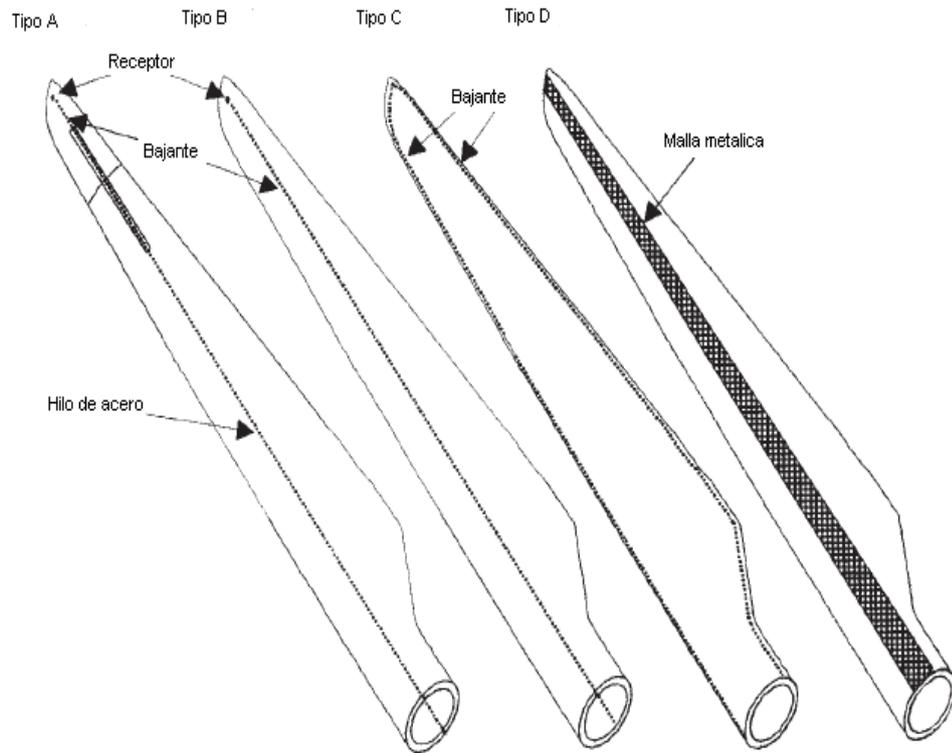
Fig.-4. 6 Zonas de protección contra rayos para una turbina eólica.



Fuente: <http://www.monografias.com/trabajos57/proteccion-turbinas-eolicas/proteccion-turbinas-eolicas2.shtml>

En la protección contra descargas atmosféricas se protegen principalmente las palas ya que la mayoría de los elementos que se encuentran dentro del nacelle el cual es una jaula de Faraday casi perfecta, lo cual protege a todos los elementos que estén dentro de ella. Para proteger las palas es necesario contar un buen sistema de tierras y conectar las palas a dicho sistema ya que los fabricantes colocan una malla de metal dentro de las palas y de esta manera drenar la corriente de la descarga a tierra. [26].

Fig.-4. 7 Métodos de protección de las palas contra impactos de rayos.



Fuente: <http://www.monografias.com/trabajos57/proteccion-turbinas-eolicas/proteccion-turbinas-eolicas2.shtml>

5 Análisis de un estudio de interconexión de un parque eólico a la red de distribución.

Se hará un estudio de interconexión a la red de distribución de un parque eólico tomando como base datos de Reynosa, Tamaulipas.

Ubicación: Reynosa, Tamaulipas.

Población actual en Tamaulipas: 3, 508,008 habitantes (Diciembre 2014)

Población actual en Reynosa: 608, 891 habitantes

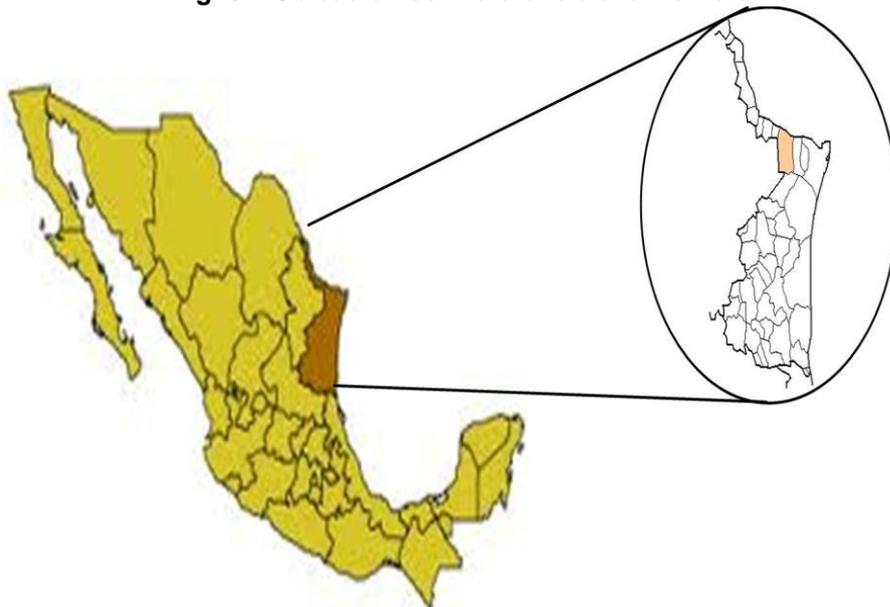
Tasa de crecimiento: 3% (Estimado)

Actividades económicas predominantes: Agricultura (dos ciclos de siembra y cosecha al año), ganadería (principalmente bovino y algo de equino fino), industria donde destacan la industria petrolera y la maquiladora y el sector servicios.

Tipo de energía a establecer en la zona: Eólica, Energía limpia y eficiente.

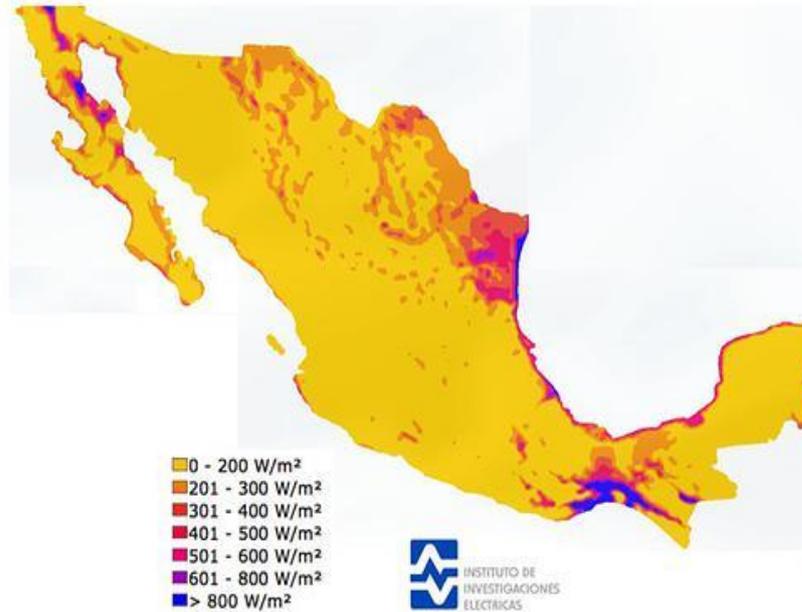
El Municipio de Reynosa está ubicado en la parte norte de Tamaulipas, se localiza a los 26°05' de latitud norte y a los 98°18' de longitud oeste, a una altitud de 38 metros sobre el nivel del mar. Colinda al Norte con los Estados Unidos de Norteamérica, a través del río Bravo; al Sur con el Municipio de Méndez; al Este con el de Río Bravo y al Oeste con el de Díaz Ordaz y el Estado de Nuevo León. Posee una extensión territorial de 3,156.34 kilómetros cuadrados que representan el 3.7 por ciento de la extensión del Estado.

Fig.-5.1 Ubicación con referencia a la frontera.



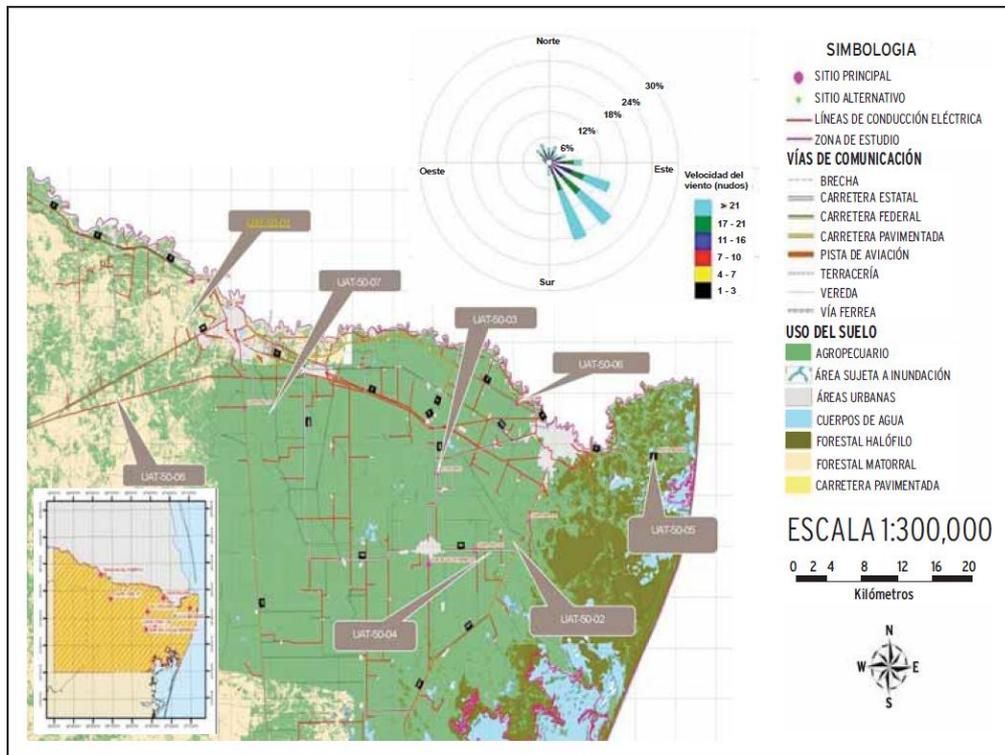
Fuente: Extracto de información de CFE

Fig.-5. 2 Potencial eólico a 80m de altura.



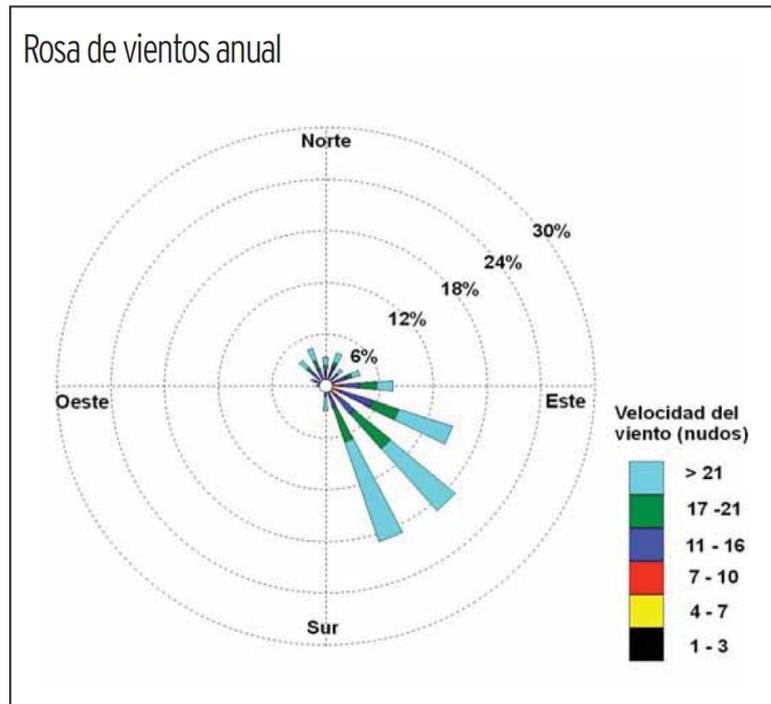
Fuente: Instituto de Investigaciones Eléctricas

Fig.-5. 3 Mapa de vías y de uso de suelo



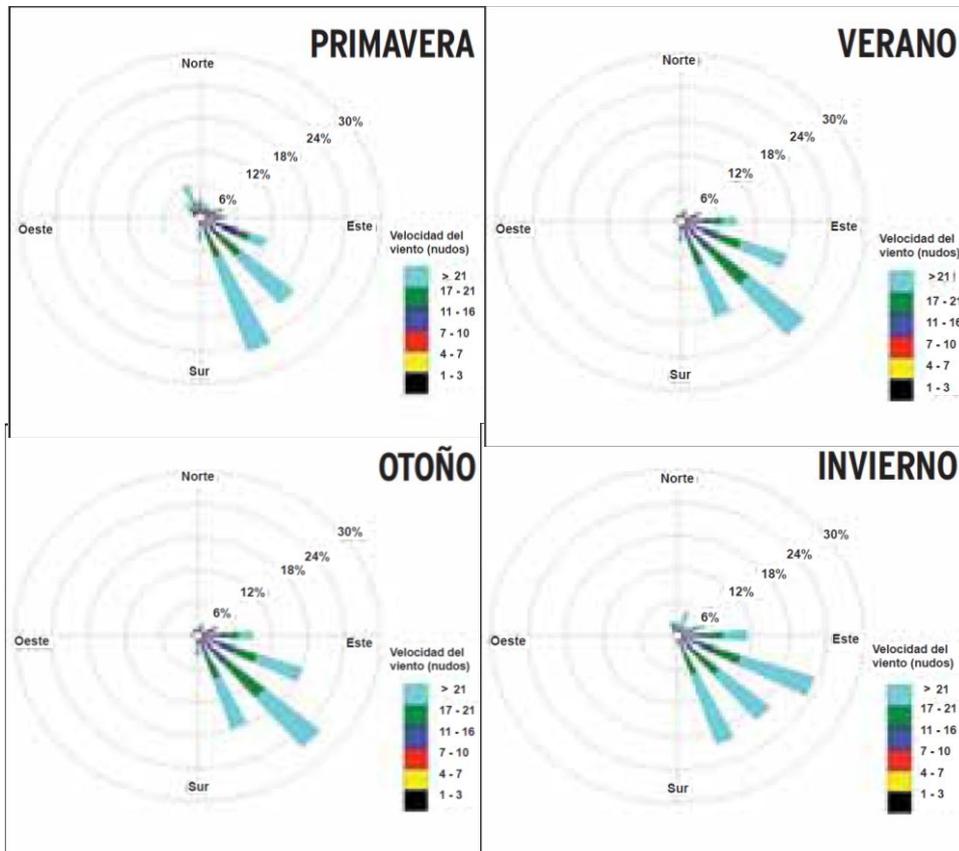
Fuente. Extracto de información de CFE

Fig.-5. 4 Rosa del viento anual en Reynosa, Tamaulipas.



Fuente. Extracto de información de CFE

Fig.-5.5 Rosa del viento por estación.



Fuente: Extracto de información de CFE

Calculo de la potencia de un aerogenerador de con un diámetro de 100m.

Del mapa de potencial eólico a 80 m de altura tenemos en la zona de Tamaulipas existe un potencial de 201 – 300 W/m².

Área del rotor:

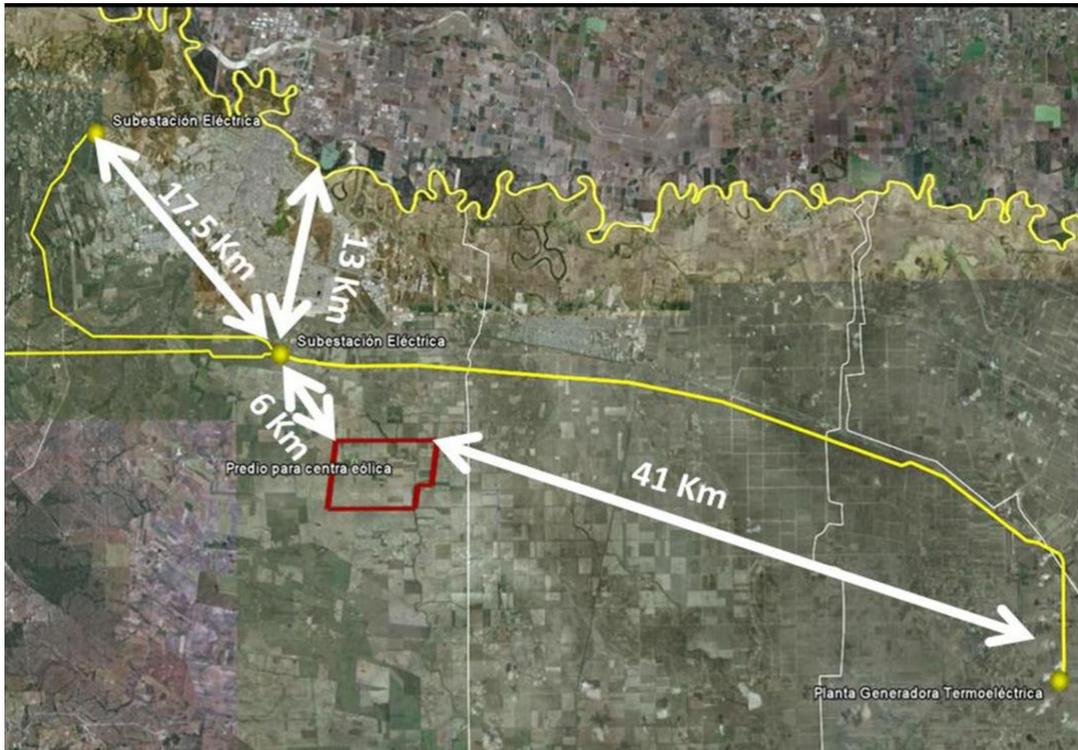
$$A = \pi \times r^2 = \pi \times 50^2 = 7853.98 \text{ m}^2$$

Potencia generada

$$250 \text{ W/m}^2 \times 7853.98 \text{ m}^2 = 1.963 \text{ MW}$$

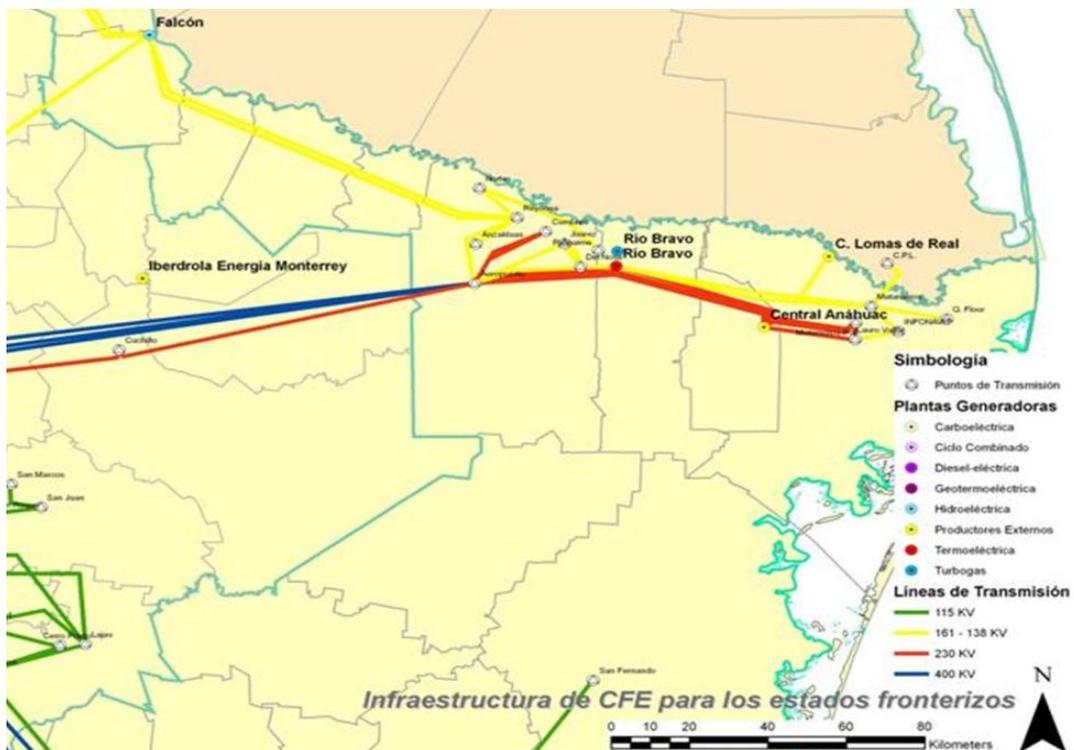
Consideraciones para la interconexión del parque eólico con el SEN.

Fig.-5. 6 Ubicación de la subestaciones de la compañía suministradora.



Fuente: Extracto de información de CFE

Fig.-5. 7 Infraestructura eléctrica existente en la zona.



Fuente: Extracto de información de CFE

Para la implementación de un parque eólico e interconectarlo a la red de distribución debe cumplir con la normatividad que rige el código de red y los permisos necesarios para conexión. Por lo que se realizaron los siguientes estudios para observar si está dentro de la normatividad y en el caso ser no ser así resolver la problemática que no lo permite.

Estudio para la interconexión de generadores eólicos a la red eléctrica de distribución.

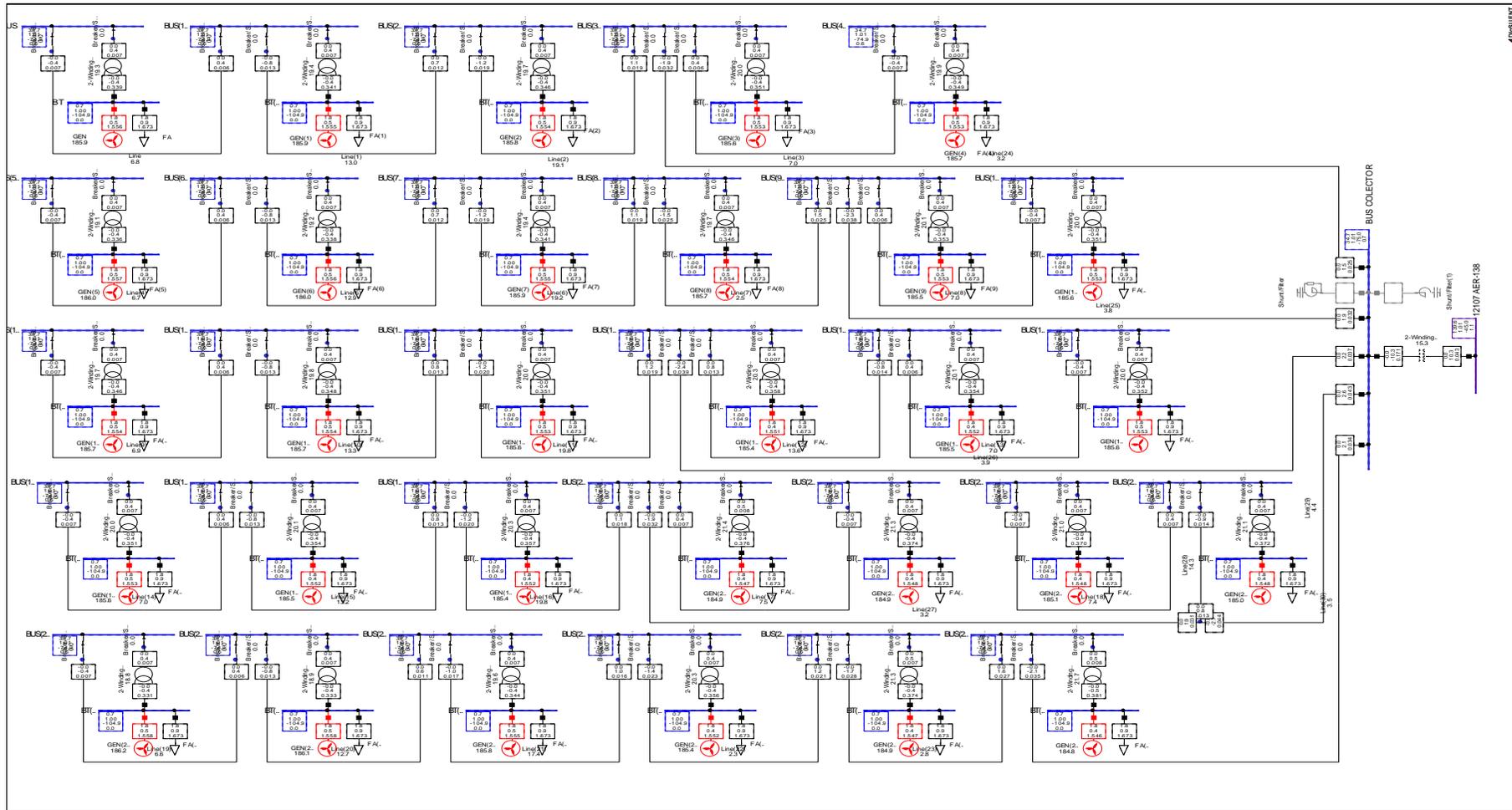


Fig-5.8 Diagrama de flujos de potencia del circuito original.

En la figura anterior se puede observar el circuito original simulando flujos de potencia para observar los niveles de tensión, corriente y potencia reactiva, la tensión se encuentran en niveles aceptables por el código de red, a 1.01 p.u. de igual manera se observa que el parque eólico requiere una compensación de 10.3 MVar.

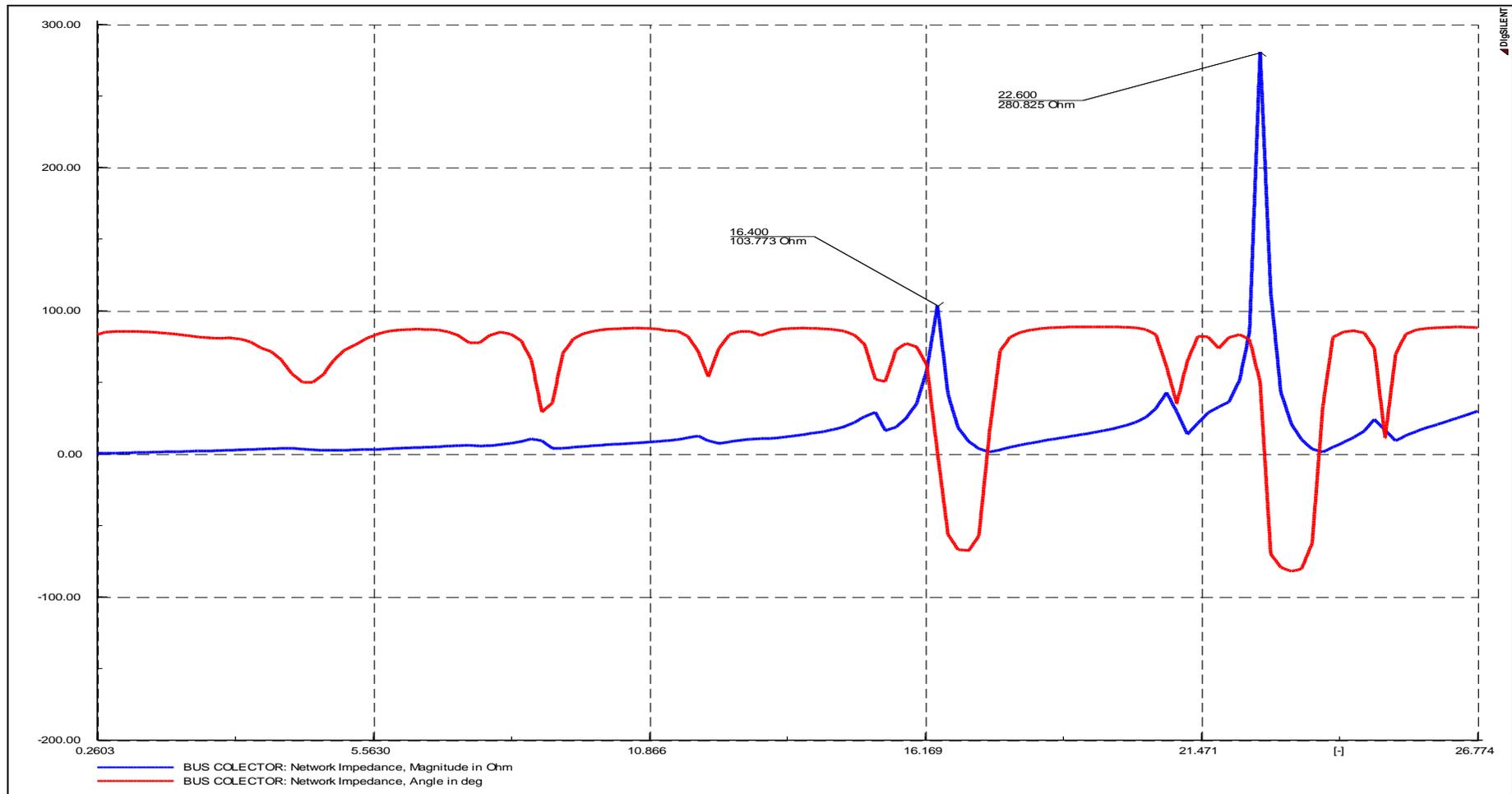


Fig.-5.10 Gráfica de barrido de frecuencia vista desde el bus colector del circuito original.

En la gráfica se puede observar que existen resonancias ya que como se ve está amplificando las corrientes armónicas cercanas a 16.5 p.u. y estas corrientes armónicas son pequeñas por lo que la amplificación es mínima y en este caso el efecto de la amplificación no se toma en cuenta ya que el nivel corrientes armónicas individual está dentro de los límites permitidos como se muestra a continuación.

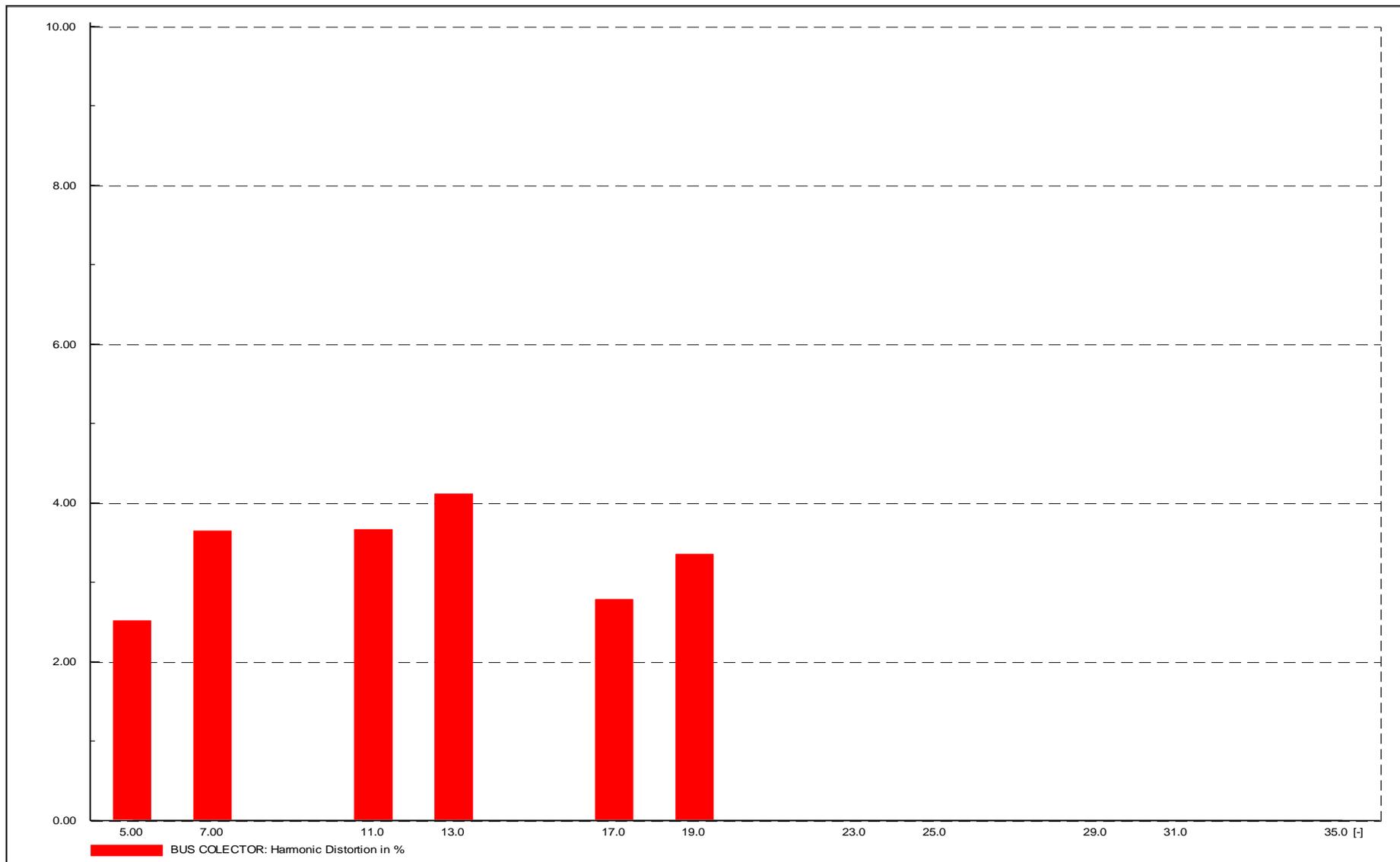


Fig-5.11 Grafica de niveles armónicos en el bus colector del circuito original.

En la siguiente imagen se observa las consecuencias de las corrientes armónicas en el sistema ya que impiden que la forma de onda sea puramente senoidal.

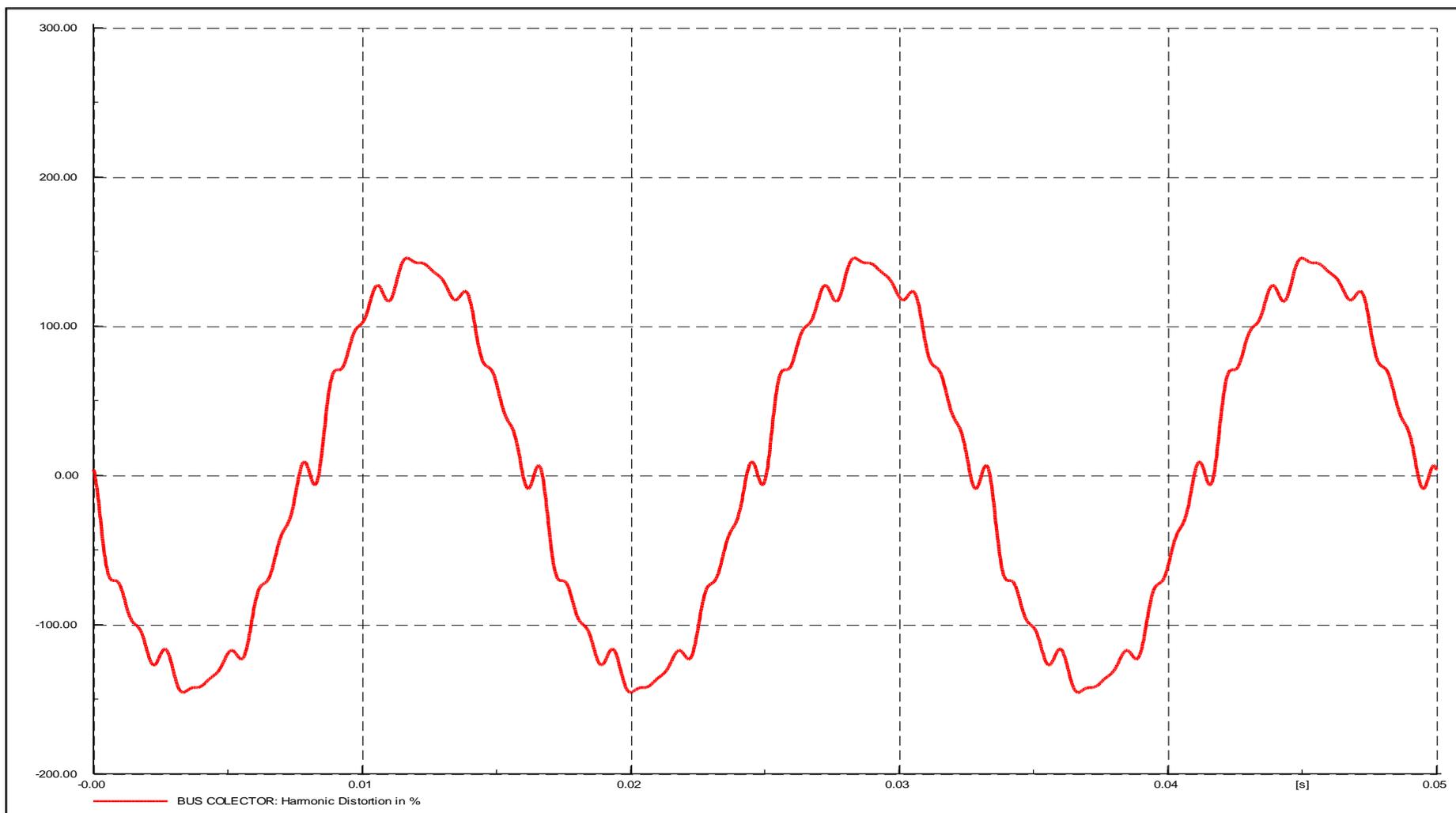


Fig.-5.13 Forma de onda de corriente vista desde el bus colector del circuito original.

Conclusiones del circuito original.

Al analizar los resultados de los estudios antes vistos se determinó que se necesita compensación de potencia reactiva de 10.3 MVAR en el bus de la barra colectora y reducir el nivel de distorsión armónica total.

Filtro pasa altas de 9 MVAR-34.5 kV sintonizado a 12.9 p.u.=N

$$1^{\circ} X_{EFF} = \frac{kV^2}{MVAR_f} = \frac{34.5^2}{9} = 132.25\Omega$$

$$2^{\circ} X_C = \frac{N^2}{N^2-1} (X_{EFF}) = \frac{12.9^2}{12.9^2-1} (132.25) = 133.049\Omega = 19.871 \mu F$$

$$3^{\circ} X_L = \frac{X_C}{N^2} = \frac{133.049}{12.9^2} = 0.799528\Omega = 2.1208 \text{ mH}$$

$$4^{\circ} Z_F = X_C - X_L = 133.049 - 0.799528 = 132.24947\Omega$$

$$5^{\circ} I_F = \frac{kV/\sqrt{3}}{Z_F} = 150.6137 \text{ A}$$

$$6^{\circ} V_{CN} = Z_F \times I_F = 133.049 \times 150.6137 = 20039.004 \text{ V}$$

$$7^{\circ} Q_{1\phi} = Z_F \times I_F^2 = 133.049 \times 150.6137^2 = 3.01814 \text{ MVAR}$$

SIMULACIONES CON UN FILTRO DE PASA ALTAS

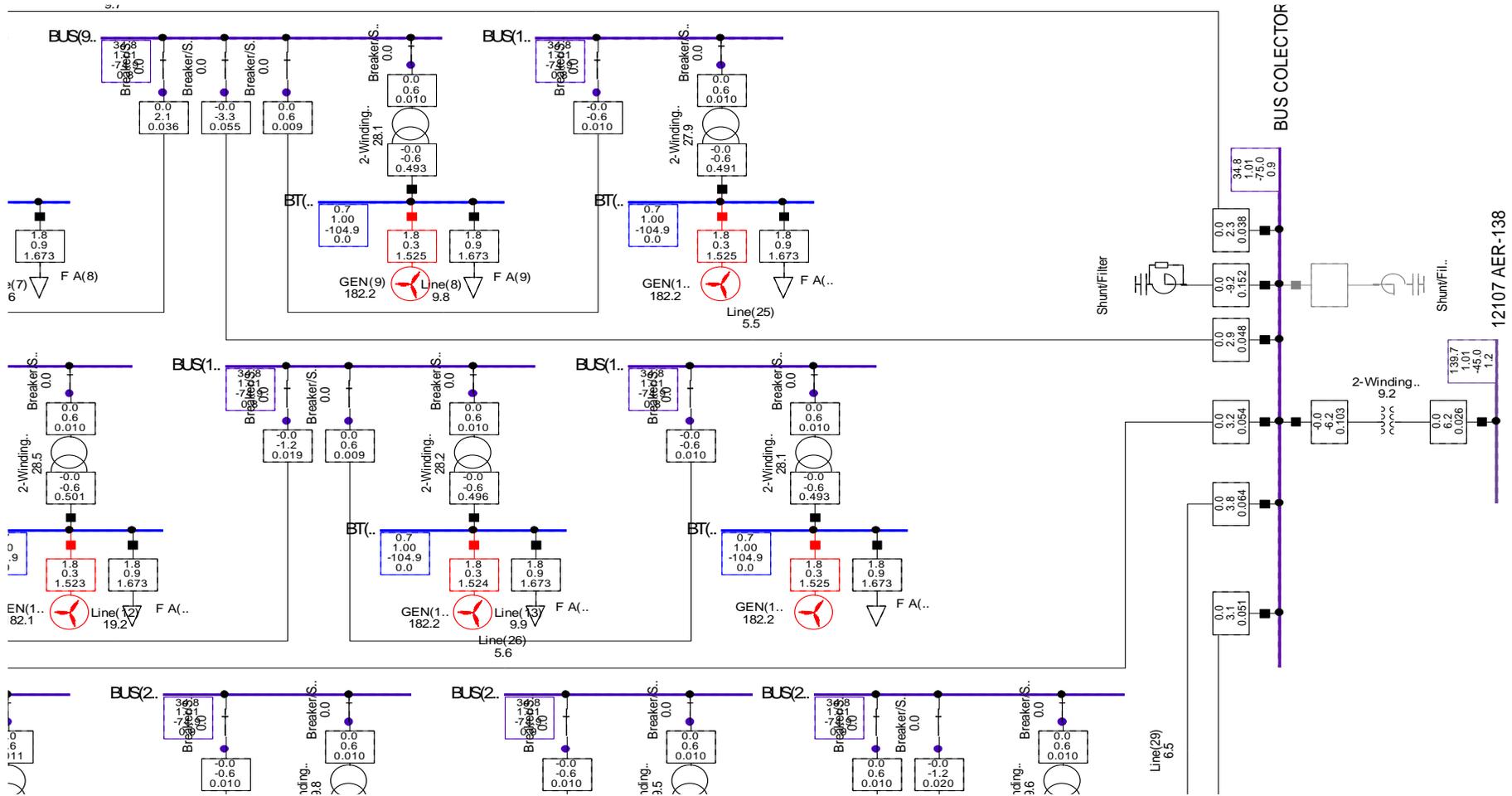


Fig.-5.14 Acercamiento al diagrama de flujos de potencia con el filtro pasa altas operando.

En la imagen anterior se observan básicamente los mismos valores de tensión 1.01 por lo que sigue dentro del código de red solo que en este caso al parque demanda menor cantidad de potencia reactiva 6.2 MVar.

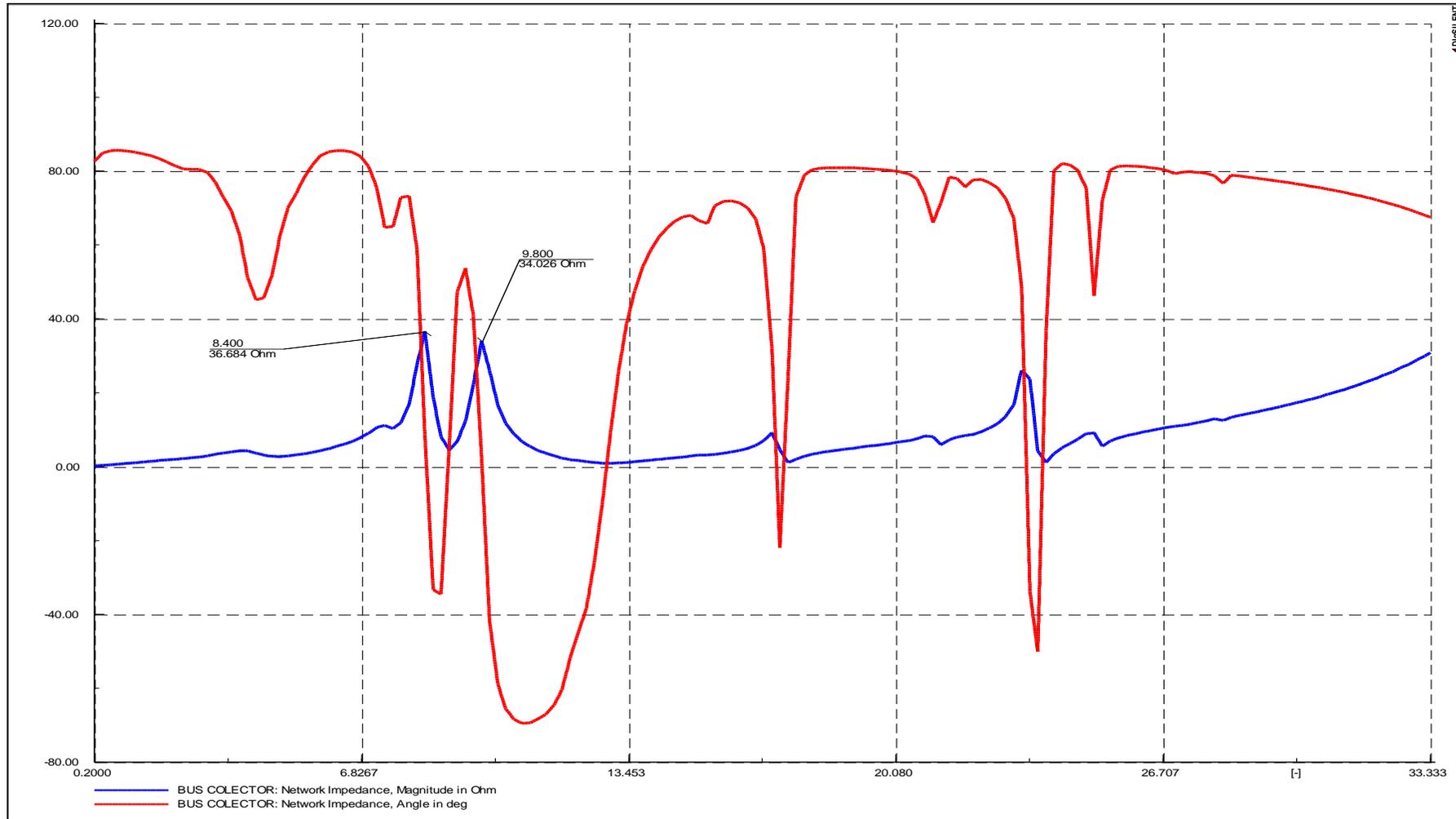


Fig.-5.15 Grafica de barrido de frecuencia vista desde el bus colector del circuito con el filtro pasa altas operando.

Como se observa hay una amplificación en 8.4 p.u. de la frecuencia fundamental, por lo que alcanza a amplificar un poco la 7° armónica la cual llega a 6.2% como se muestra en la siguiente imagen.

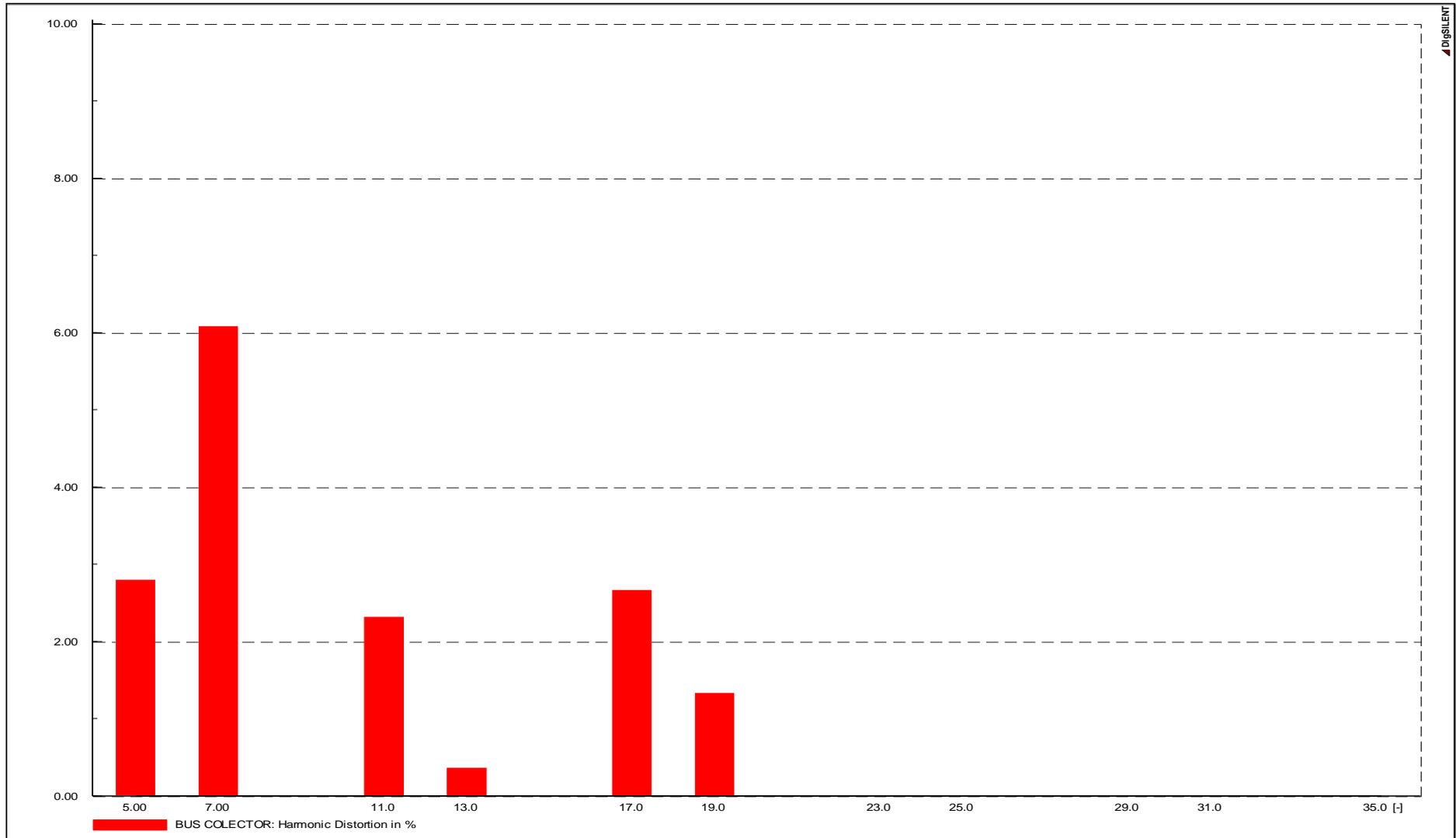


Fig.-5.16 Grafica de niveles armónicos en el bus colector del circuito con el filtro pasa altas operando.

Estudio para la interconexión de generadores eólicos a la red eléctrica de distribución.

Como muestra el análisis armónico el valor de la distorsión armónica total es de 7.7%, en el bus colector y en los buses de conexión con el transformador del generador es de 8.3% valor que esta fuera de los límites permitidos por el código, esto se debe en gran parte al alto nivel de la 7ª armónica, es por este motivo que se tiene que usar un filtro de sintonización sencilla sintonizado a 6.9 p.u. de la frecuencia fundamental para filtrar ese nivel de corriente armónica

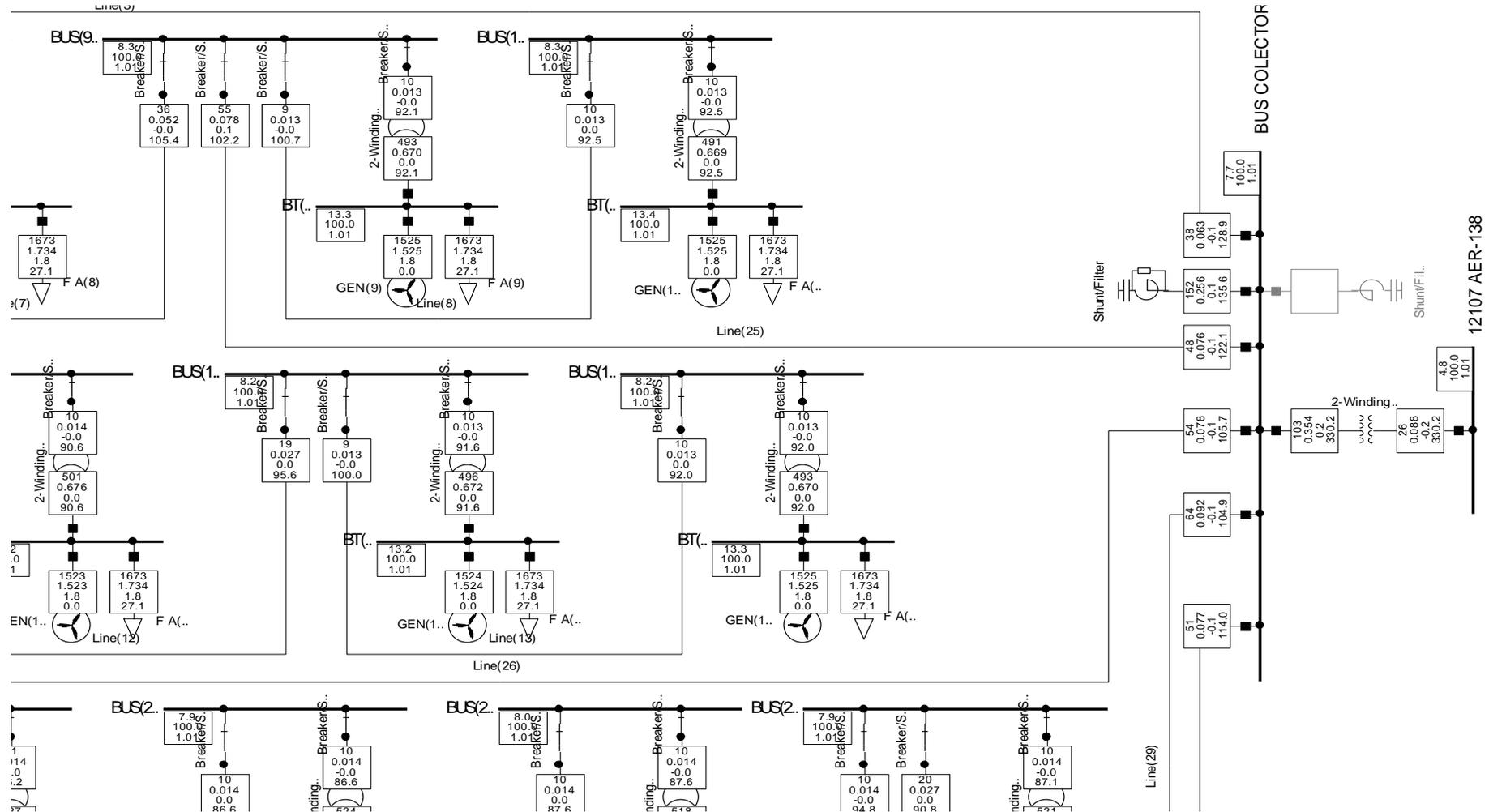


Fig.-5.17 Acercamiento al diagrama del análisis armónico en el circuito con el filtro pasa altas operando.

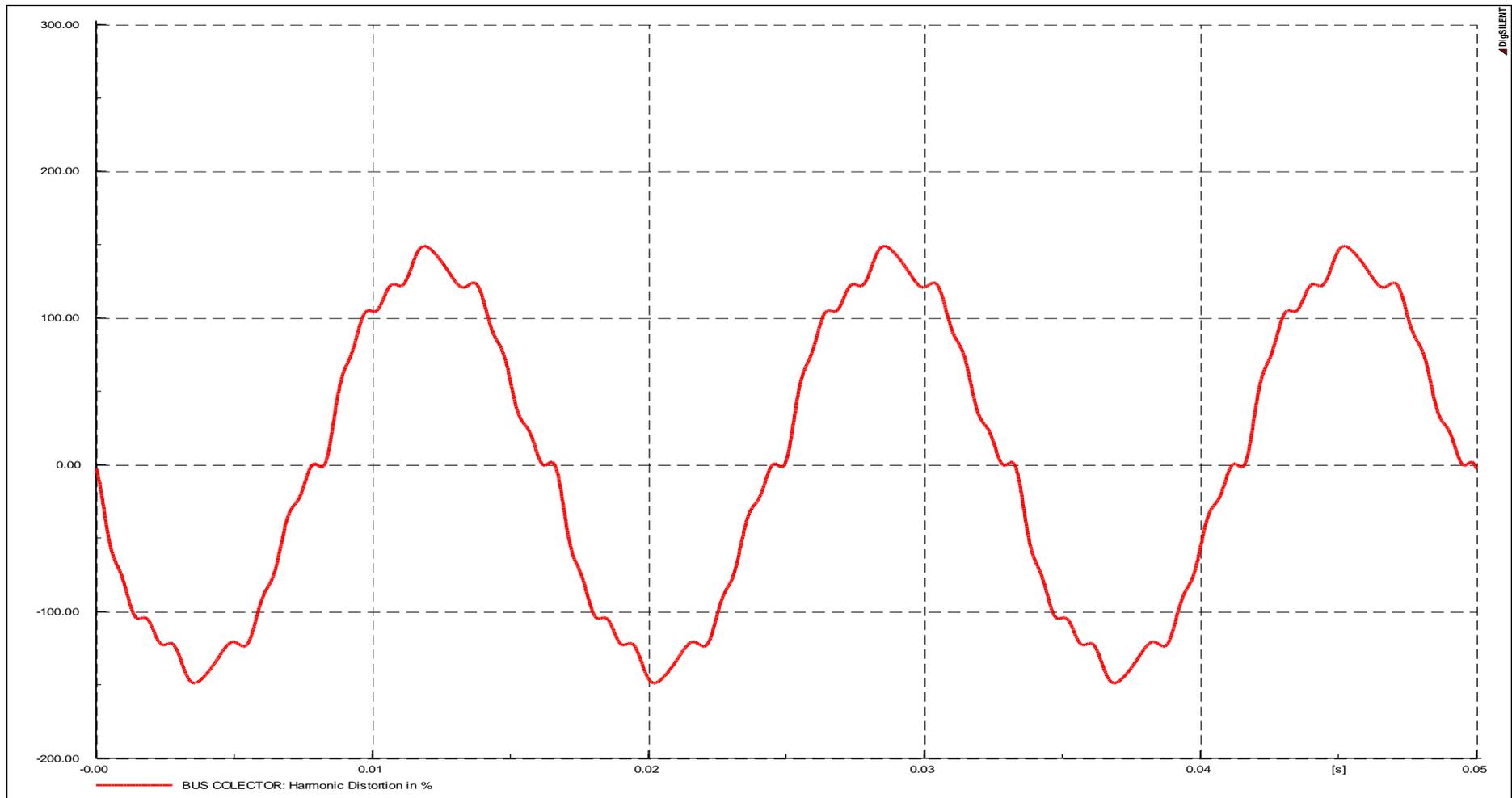


Fig.-5.18 Forma de onda de corriente vista desde el bus colector del circuito con filtro pasa altas operando.

En la imagen anterior se observa una forma de onda senoidal más limpia esto gracias a las corrientes armónicas que el filtro está absorbiendo lo cual nos da como resultado un porcentaje menor de distorsión armónica total y esto a su vez una onda más definida.

Conclusiones del circuito con el filtro pasa altas operando.

Se observa una gran mejoría en la operación del circuito especialmente hablando del porcentaje de nivel armónico total. Aunque aún no es suficiente para estar dentro del código de red debido a que existe una amplificación en la 7° armónica lo cual nos trae como consecuencia que el nivel armónico individual y total sobrepasen los límites permitidos. Por lo que es necesario un filtro de sintonización sencilla sintonizado a 6.9 p.u. de la frecuencia fundamental para reducir el porcentaje de la 7° armónica.

Por otra parte el sistema sigue requiriendo 6.3 MVAR de potencia reactiva los cuales se disminuirán con la implementación del filtro de sintonía sencilla.

Filtro de sintonización sencilla de 7° armónica de 5.3 MVAR sintonizado a 6.9 p.u.

$$1^{\circ} X_{EFF} = \frac{kV^2}{MVAR_f} = \frac{34.5^2}{5.3} = 224.5754 \Omega$$

$$2^{\circ} X_C = \frac{N^2}{N^2-1} (X_{EFF}) = \frac{6.9^2}{6.9^2-1} (224.5754) = 229.3935 \Omega = 11.563 \mu F$$

$$3^{\circ} X_L = \frac{X_C}{N^2} = \frac{229.3935}{6.9^2} = 4.8181 \Omega = 12.7806 \text{ mH}$$

$$4^{\circ} Z_F = X_C - X_L = 229.3935 - 4.8181 = 224.575 \Omega$$

$$5^{\circ} I_F = \frac{kV/\sqrt{3}}{Z_F} = \frac{34.5/\sqrt{3}}{224.575} = 88.69 \text{ A}$$

$$6^{\circ} V_{CN} = Z_F \times I_F = 229.3935 \times 88.69 = 20345.959 \text{ V}$$

$$7^{\circ} Q_{1\phi} = Z_F \times I_F^2 = 229.3935 \times 88.69^2 = 1.8043 \text{ MVAR}$$

En la siguiente imagen se observan los mismos valores de tensión 1.01, solo que en este caso al parque demanda menor cantidad de potencia reactiva 3.8 MVar.

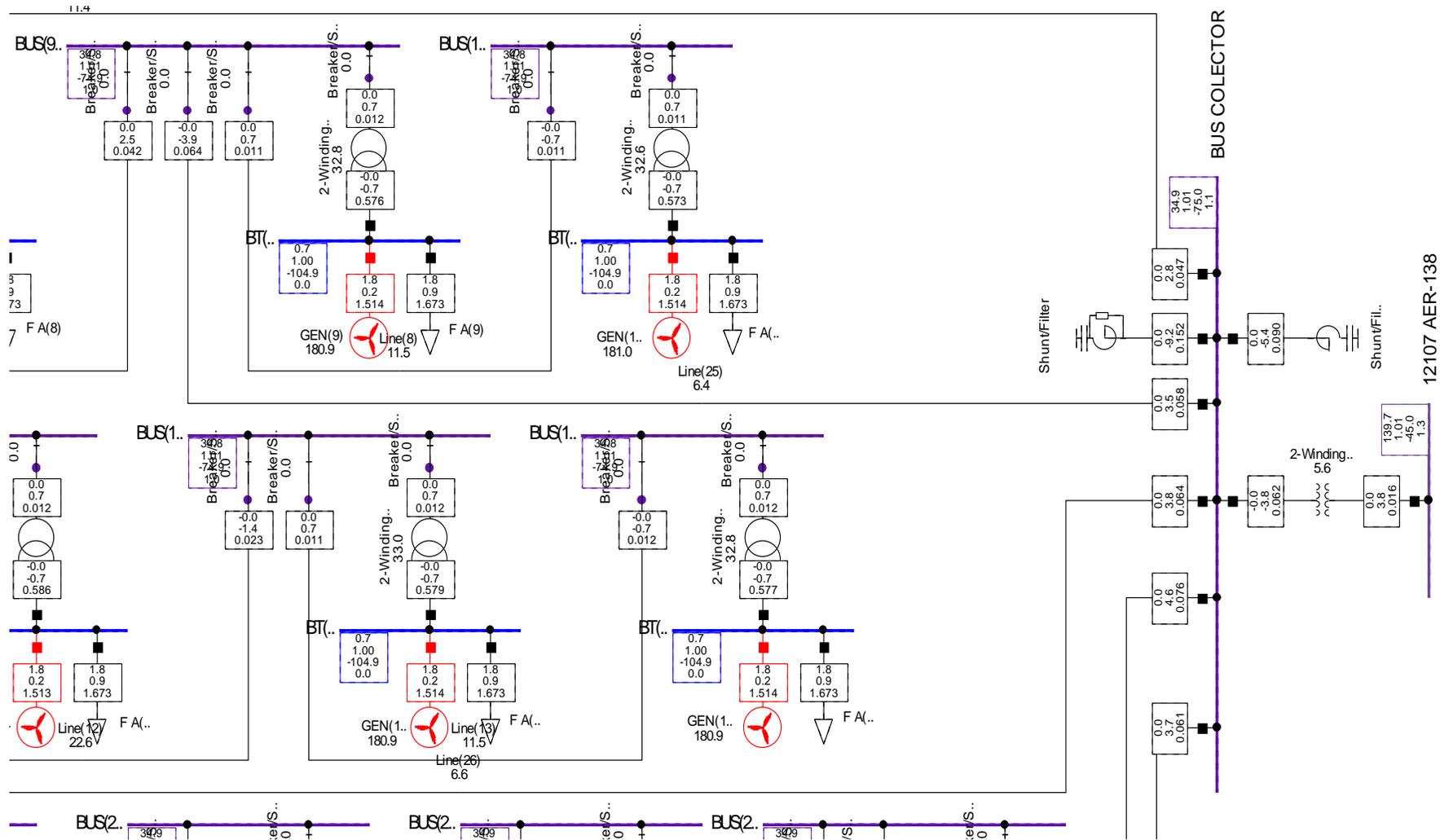


Fig.-5.19 Acercamiento al diagrama de flujos de potencia con el filtro pasa altas y de sintonización sencilla operando.

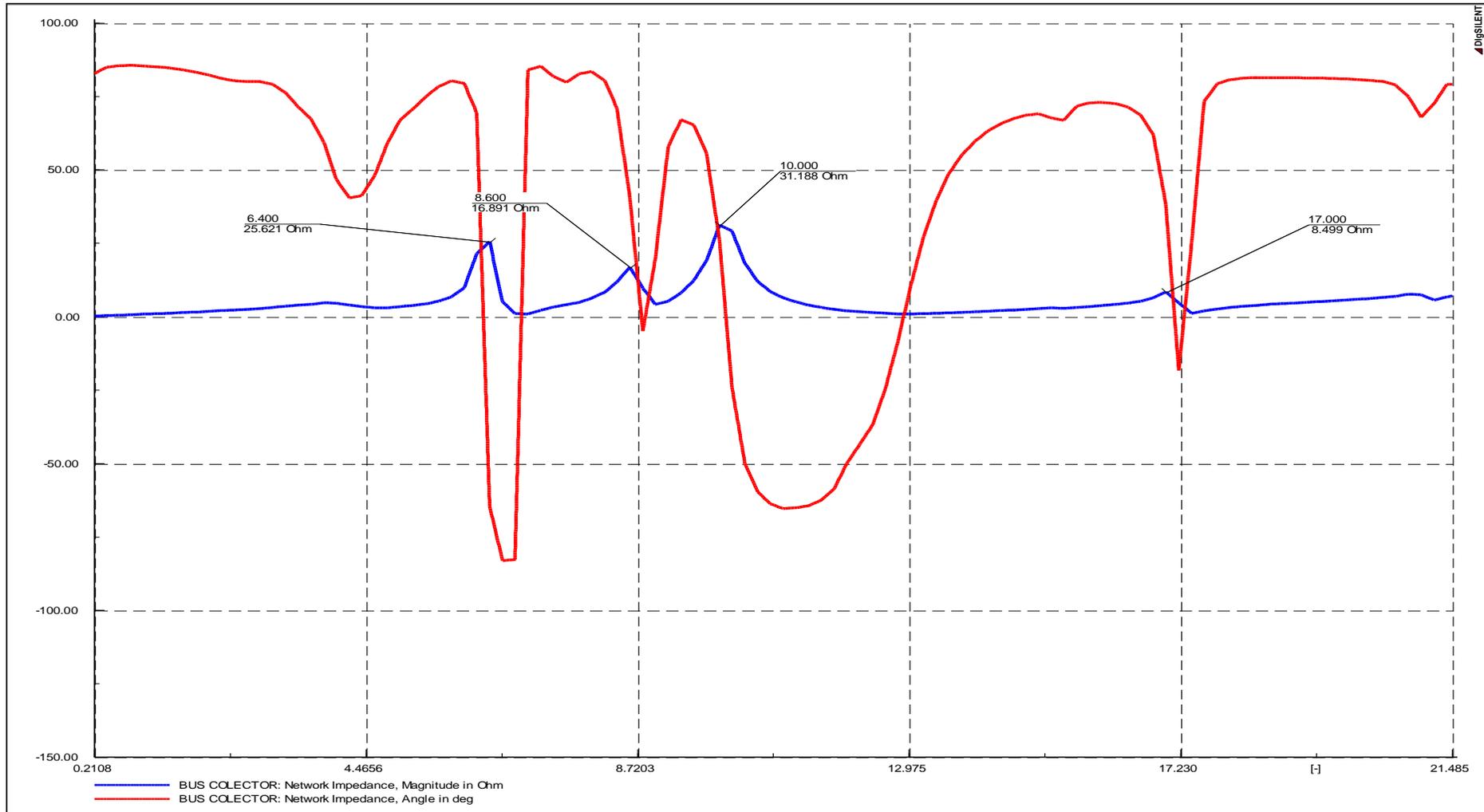


Fig.-5.20 Grafica de barrido de frecuencia vista desde el bus colector del circuito con el filtro pasa altas y de sintonización sencilla operando.

En la imagen anterior se observan pequeñas amplificaciones en 6.4 p.u., 8.6 p.u., 10 p.u y 17 p.u. pero al estar filtradas las corrientes armónicas que pudiesen haber amplificado no representan un problema para el sistema, como se muestra en la siguiente imagen.

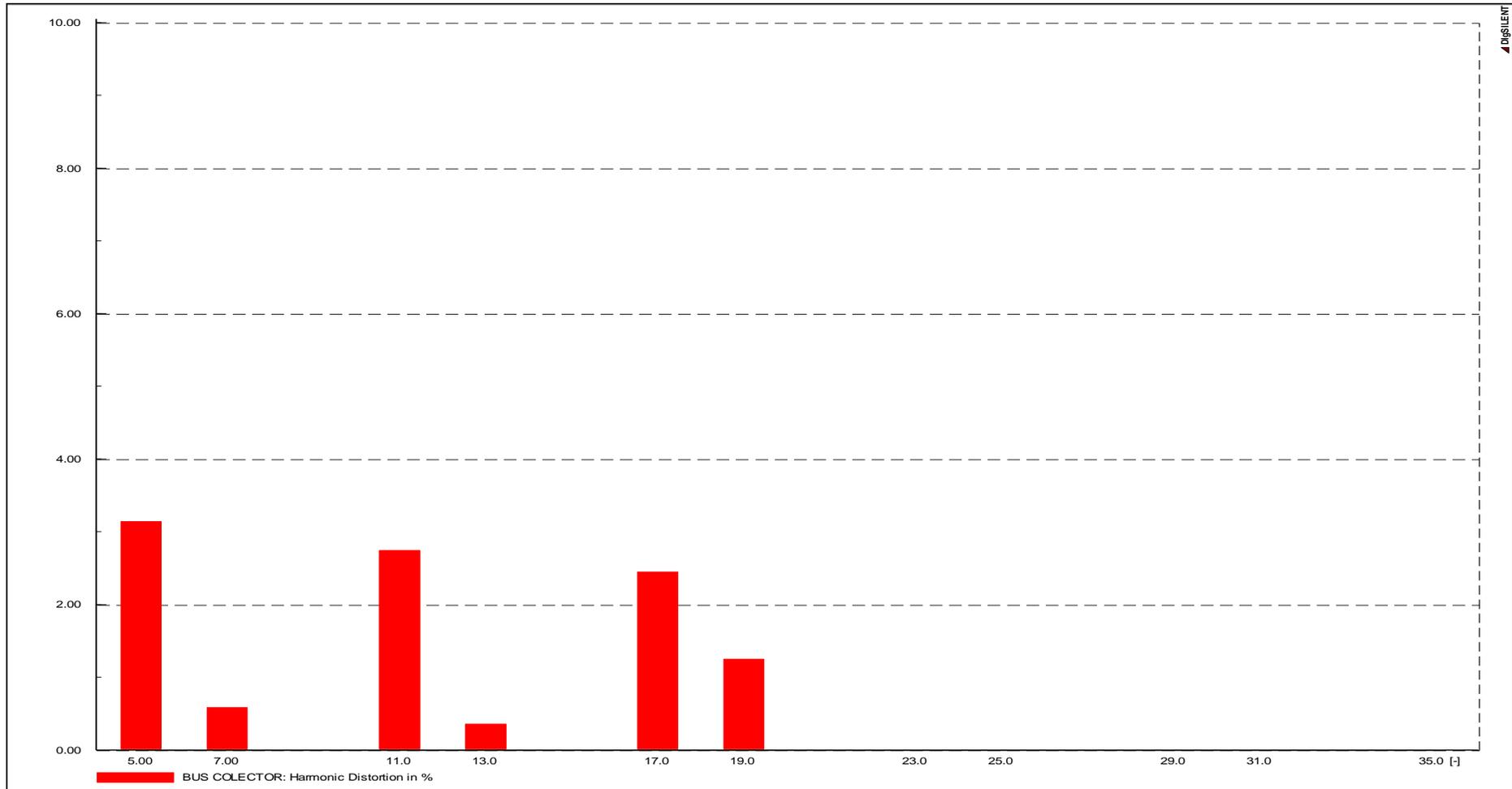


Fig.-5.21 Grafica de niveles armónicos en el bus colector del circuito con el filtro pasa altas y de sintonización sencilla operando.

En la imagen anterior se observan los valores de armónicos individuales todos dentro de los límites permitidos por el código de red gracias a los filtros instalados.

Estudio para la interconexión de generadores eólicos a la red eléctrica de distribución.

En la siguiente imagen observamos que el valor de distorsión armónica total es de 5% en el bus colector y 5.5% en los buses de conexión al transformador del generador lo cual nos indica que el sistema se encuentra dentro de los límites permitidos por el código de red.

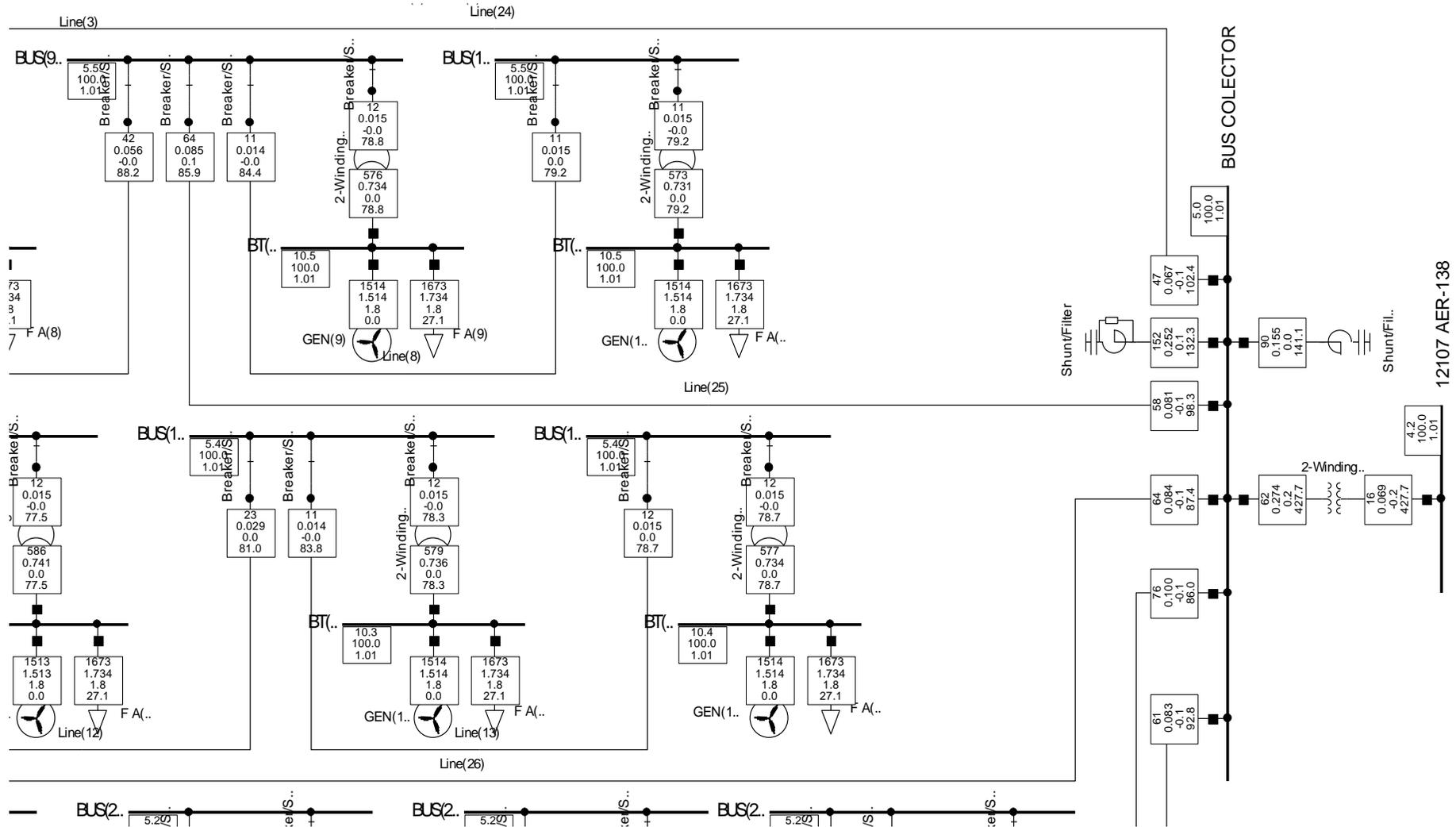


Fig.-5.22 Acercamiento al diagrama del análisis armónico en el circuito con el filtro pasa altas y de sintonización sencilla operando.

Finalmente se muestra a continuación la forma de onda resultante después de filtrar las corrientes armónicas a sus niveles permisibles.

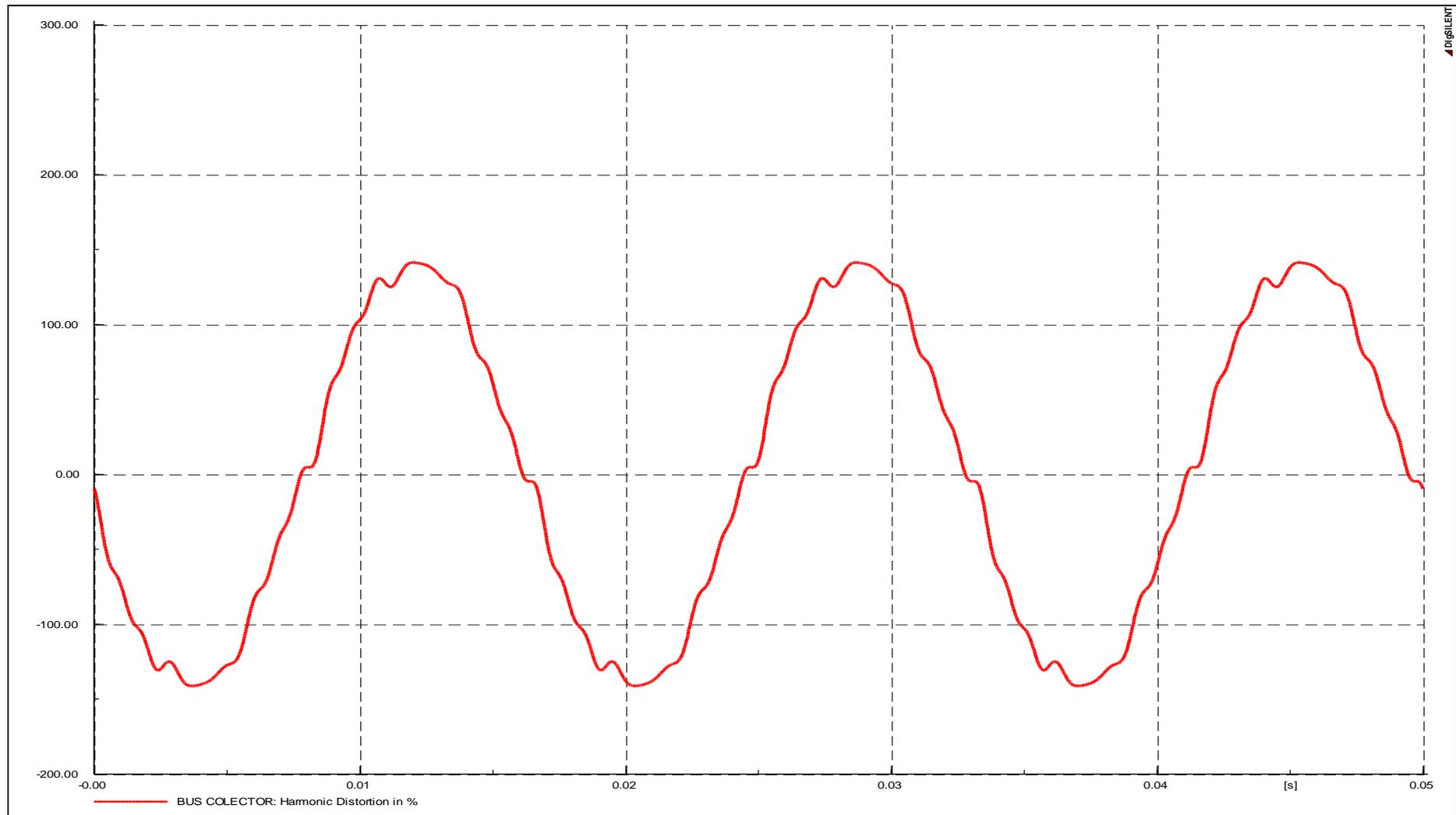


Fig.-5.23 Forma de onda de corriente vista desde el bus colector del circuito con filtro pasa altas y d sintonización sencilla operando.

Protecciones:

DIAGRAMA REPRESENTATIVO DE UBICACIÓN DE LAS PROTECCIONES EN EL PUNTO DE INTERCONEXION

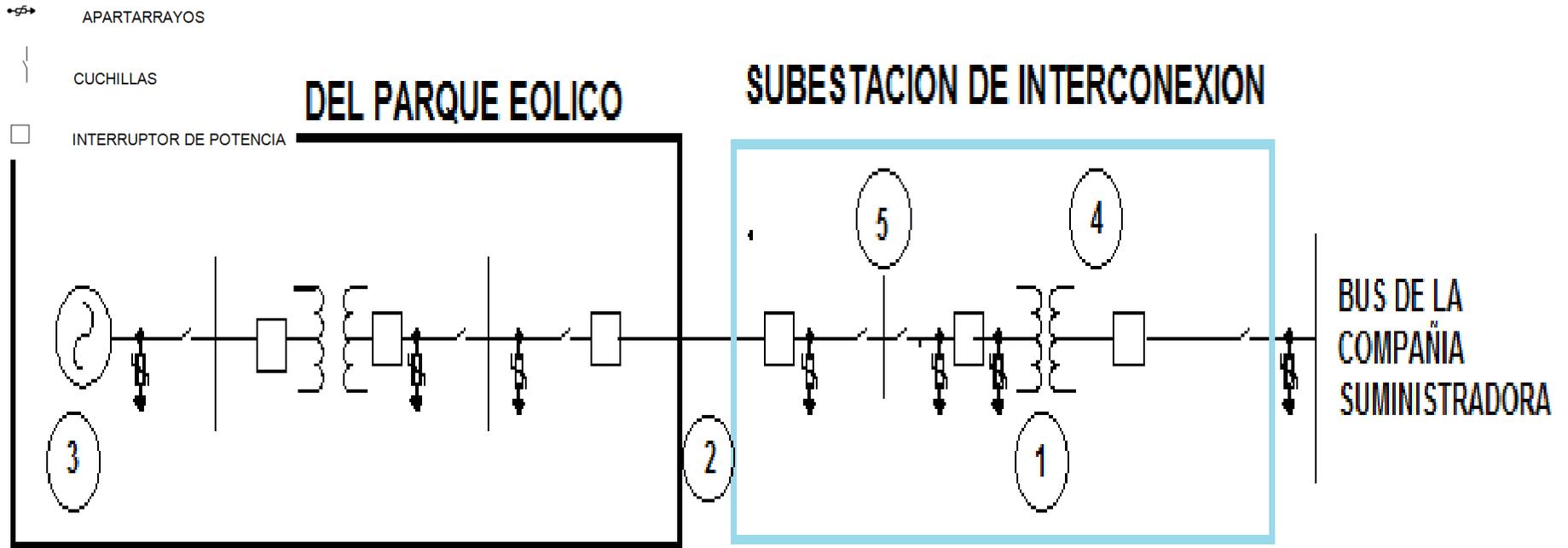


Fig.-5.24 Diagrama representativo de protecciones.

Equipo de protección general para todo el parque de generación, con opciones de sobrecorriente de fase a fase y monofásica, sobre y bajo voltaje, sobre y baja frecuencia

PROTECCIONES:

Se debe contar con un sistema de protección para el aerogenerador, grupo de aerogeneradores, transformador principal y auxiliar, líneas de transmisión de enlace, interruptores y de las barras principales.

El equipo requerido de protecciones para la subestación de interconexión y el tramo de línea con la que se interconectan al SEN (Sistema Eléctrico Nacional) deberá cumplir con las normatividades y sus ajustes serán verificados mediante pruebas.

Los permisionarios y la compañía suministradora deberán proteger sus instalaciones y equipos ante fallas internas y externas, evitando que sus fallas internas afecten los equipos y las personas ubicadas después del punto de interconexión, para lo cual deberán coordinarse las protecciones de ambos lados.

1. Protecciones de subestación y punto de interconexión.

Las protecciones para la subestación, transformador de potencia, líneas de enlace y equipos auxiliares deben estar montados en tableros de control y protección que cumplan con los requerimientos establecidos en la especificación V6700-62 así como los relevadores utilizados.

2. Protecciones para líneas de transmisión de enlace.

Los esquemas de protección de las líneas de transmisión de enlace deben cumplir con los requerimientos establecidos en la norma de referencia NRF-041-CFE Normalizados de protección para líneas de transmisión, debiendo aplicar relevadores que se encuentren aprobados.

Dependiendo del proyecto específico que se trate, la lista de protecciones será adecuada en común acuerdo con la compañía suministradora.

3. Protecciones para aerogeneradores.

Para la protección del aerogenerador se deben utilizar relevadores digitales, la alimentación a estos deberá ser redundante y de distintas baterías.

Los permisionarios deberán cumplir con las mejores prácticas de la industria, para proteger sus aerogeneradores ante fallas internas y externas, evitando que sus fallas internas que afecten los equipos ubicados después del punto de interconexión.

4. Registradores de disturbios.

El transformador de potencia principal y las líneas de enlace deben contar con registradores de disturbios los cuales deben tener la capacidad de almacenar en memoria la información relevante a una falla eléctrica con suficiente velocidad de respuesta.

5. Operación del parque de generación ante fallas externas y en el punto de interconexión.

El parque de generación deberá tener la capacidad de soportar fallas transitorias externas y en el punto de interconexión sin desconectarse del sistema eléctrico, debido al abatimiento de la tensión por la falla y su recuperación a un nivel estable de postfalla, manteniendo su equipo de compensación de potencia reactiva conectado.

Una vez liberada la falla, el sistema eléctrico se recupera en un 80% de la tensión en un tiempo de 1000ms del inicio de falla, con la participación de todos los elementos conectados al SE, ante esto el parque y los aerogeneradores no deben dispararse.

En condiciones de falla en el punto de interconexión y mientras se mantenga sin liberarse, los consumos de potencia activa por los aerogeneradores deberán ser mínimos, asimismo ser congruentes con la tecnología aplicada de aerogeneradores; los valores permitidos máximos se definirán para cada caso

Conclusiones.

Con este estudio se comprobó la viabilidad de los parques eólicos donde hay mucho potencial de aire que puede ser aprovechado, en este caso se estudió la zona de Reynosa Tamaulipas. Como referencia para la interconexión de parques eólicos a la red de distribución se debe tomar en cuenta el código de red el cual es proporcionado por la compañía suministradora.

Hay problemas que siempre van a estar presentes en un parque eólico solo que dependiendo de la constitución del sistema se presentan de diferente manera, como lo es la necesidad de potencia reactiva que demanda el parque eólico ya que los generadores asíncronos los cuales utiliza la demandan y otro problema son las corrientes armónicas que están presentes debido a los convertidores de 6 pulsos que se utilizan por lo que siempre va a ser necesario el filtrado de corrientes armónicas mediante filtros.

Previamente para la implementación de la generación por medio de aerogeneradores se deben hacer estudios por medio de programas de simulación donde se deberán presentar las condiciones a las cuales puede estar sujeto el parque y poder ver la implementación de alguna solución si es que el parque necesitara de un elemento auxiliar para soportar las contingencias en este caso se utilizó el simulador llamado DigSilent.

Para este parque eólico se tuvo que hacer un análisis armónico para observar las distorsiones armónicas presentes en el sistema, para poder determinar el orden de los filtros y la frecuencia de sintonía siempre cuidando que las corrientes armónicas mayores no se sintonicen provocando una resonancia, ya que esto resulta perjudicial para el sistema.

Recomendaciones:

- Utilizar conductores de potencia con una distancia lo más corta posible ya que además de ser menos costoso ayuda a mantener la resonancia alejada de los valores de corrientes armónicos más grandes evitando así una posible resonancia ya que los cables tienen un efecto capacitivo y al ser más largos este efecto se hace más grande recorriendo así las frecuencias de resonancia hacia la fundamental.
- Al utilizar filtros no sintonizarlos exactamente a la frecuencia de la corriente armónica es recomendable hacerlo un poco antes ya que como el sistema es dinámico las resonancias varían su frecuencia y al sintonizarlos un poco antes se logra un rango mayor para filtrar corrientes armónicas.
- Si al usar un filtro de segundo orden se observa una amplificación por resonancia en las primeras armónica impares como son la 5, 7, 9 es recomendable instalar otro filtro de sintonización sencilla para filtrar dicha armónica.
- Preferentemente interconectar los parques eólicos a buses robustos del sistema ya que como por ausencia o exceso de viento es común que entren o salgan aerogeneradores de funcionamiento lo cual si el bus no es lo suficientemente robusto habrá caídas de tensión o sobretensiones.
- Es recomendable usar las redes de distribución para interconectar los parques eólicos ya que al estar más cerca de las subestaciones y estas de las cargas existirán menos pérdidas y mayor aprovechamiento.

REFERENCIAS DE NORMAS Y LEYES

MX-J-098-ANCE-1999, Sistemas eléctricos de potencia-Suministro-Tensiones eléctricas normalizadas.

LSPA No. 68/2013 Listados de sistemas de protección aprobados.

CFE G0000-48 Medidores multifunción para sistemas eléctricos.

NFR-026-CFE Transformadores de potencial inductivos para sistemas con tensiones nominales de 13.8kV a 400kV.

NFR-027-CFE Transformadores de corriente para sistemas con tensiones nominales de 0.6kV a 400kV.

IEE 519-92 Recomendaciones Prácticas y Requerimientos de la IEEE para el Control de Armónicos en de la IEEE para el Control de Armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia

NMX-AA-166/1-SCFI-2012 Estaciones meteorológicas, climatológicas e hidroclimatológicas parte 1: especificaciones técnicas que deben cumplir los materiales e instrumentos de medición de las estaciones meteorológicas automáticas y convencionales.

IEEE C37-102 Guía para la protección del generador de corriente alterna.

LAERFTE- LEY PARA EL APROVECHAMIENTO DE ENERGÍAS RENOVABLES Y EL FINANCIAMIENTO DE LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA

ART 3 II, FRAC. II **Energías renovables.**- Aquellas reguladas por esta Ley, cuya fuente reside en fenómenos de la naturaleza, procesos o materiales susceptibles de ser transformados en energía aprovechable por la humanidad, que se regeneran naturalmente, por lo que se encuentran disponibles de forma continua o periódica, y que se enumeran a continuación:

- a) El viento;
- b) La radiación solar, en todas sus formas;
- c) El movimiento del agua en cauces naturales o artificiales;
- d) La energía oceánica en sus distintas formas, a saber: maremotriz, maremotérmica, de las olas, de las corrientes marinas y del gradiente de concentración de sal;
- e) El calor de los yacimientos geotérmicos;
- f) Los bioenergéticos, que determine la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos, y
- g) Aquellas otras que, en su caso, determine la Secretaría, cuya fuente cumpla con el primer párrafo de esta fracción;

ART 6, FRAC I Elaborar y coordinar la ejecución del Programa;

ART 11, FRAC IV Incluir la construcción de las obras de infraestructura eléctrica necesarias para que los proyectos de energías renovables se puedan interconectar con el Sistema Eléctrico Nacional.

Bibliografía

- (s.f.). Obtenido de Informe de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros: academica-e.unavarra.es/bitstream/handle/2454/6867/577975.pdf?
- (21 de Marzo de 2011). Obtenido de ABC, Color: <http://www.abc.com.py/edicion-impresa/suplementos/escolar/energia-convencional-y-no-convencional-234637.html>
- Centrales Electricas en Mexico*. (11 de Noviembre de 2011). Obtenido de Centrales Generadoras de Combustión Interna: <http://ahorroenergiaernestopj.blogspot.mx/2011/11/centrales-generadoras-de-combustion.html>
- CFE. (10 de 11 de 2014). *CFE*. Obtenido de http://www.cfe.gob.mx/ConoceCFE/1_AcercadeCFE/CFE_y_la_electricidad_en_Mexico/Paginas/CFEylaelectricidadMexico.aspx
- endesa educa*. (2014). Obtenido de ENEL: http://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/
- ENERCON*. (2015). Obtenido de Sistema de control: <http://www.enercon.de/es-es/sistema-de-control.htm>
- Energia Eolica*. (2014). Obtenido de <https://sites.google.com/site/energiaeolicasanpatricio3a/>
- eólica, C. d. (15 de Diciembre de 2000). *SEGURIDAD EN AERO GENERADORES*. Obtenido de <http://intranet2.minem.gob.pe/web/archivos/dge/publicaciones/uso/1/01/02/08/es/tour/wtrb/safety.htm>
- Equipo 2 FAE. (s.f.). *Termoelectricas*. Obtenido de <https://equipo2fae.wordpress.com/>
- ETESA. (2009). *Empresa de Transmision electrica, S.A*. Obtenido de <http://www.hidromet.com.pa/index.php>
- Feria de las energias renovables*. (s.f.). Obtenido de <http://www.feriaenergiasrenovables.com>
- Generacion de Energia*. (2 de 2013). Obtenido de <http://www.buenastareas.com/ensayos/Generacion-De-Enrgia/7598445.html>
- Gomez, Santiago. (28 de Abril de 2011). *El moviimiento se encuentra andando*. Obtenido de Energia Solar: <https://tecnoatocha.wordpress.com/energia-solar/>
- Goyeneche Guevara Martha. (s.f.). *ECOESTRATEGIA.COM*. Obtenido de <http://www.ecoestrategia.com/articulos/quienes/quienes.html>
- Harper, E. (2013). *ABC DE LAS ENERGIAS RENOVABLES EN LOS SISTEMAS ELECTRICOS*. Limusa.
- I. Sirabonian, N., & Rifel, A. (2004). *IE-10 PROTECCIONES*. <http://www.ing.unlp.edu.ar/sispot/Libros%202007/libros/ie-temas/ie-10/ie-10prt.htm>.
- Manwell, J. F., Mc Gowan, J., & Rogers, A. (2007). *Wind Energy Explained*. WILEY.
- Mur Amada, J., & D. d. (s.f.). *Curso de Energia Eolica*. Master Europeo en Energias Renovables y Eficiencia Energetica.

NMX-J-098- ANCE-2012. (2012). Proyectos de normas Mexicanas ANCE. En A. ASOCIACION DE NORMALIZACION Y CERTIFICACION, *NMX-J-098- ANCE-2012*.

Noriega Stefanova, E. (s.f.). *La protección contra rayos de las turbinas eólicas (página 2)*. Obtenido de <http://www.monografias.com/trabajos57/proteccion-turbinas-eolicas/proteccion-turbinas-eolicas2.shtml>

(s.f.). *Proteccion de Generadores*. <http://www.iae.org.ar/archivos/educ7.pdf>.

R, M. I. (s.f.). *Universidad Mayor de San Andres Facultas de Ingenieria, Carrera de Inenieria Electrica*. Obtenido de Texto de ELT 260 Maquinas Electricas de C. A. I.: <http://mecanica.umsa.edu.bo/Libros/Lea3.pdf>

RESOLUCIÓN POR LA QUE LA COMISIÓN REGULADORA DE ENERGÍA OTORGA A GAMMA SOLAR, S. DE R. L. DE C. V., PLANTA MEXTICACÁN, PERMISO PARA GENERAR ENERGÍA ELÉCTRICA BAJO LA MODALIDAD DE PEQUEÑA PRODUCCIÓN. (2014). En *RESOLUCIÓN Núm. RES/571/2014*. Mexico: CRE.

SE. (2012). *Secretaria de Economia*. Obtenido de Unidad de Inteligencia de Negocios: http://mim.promexico.gob.mx/work/sites/mim/resources/LocalContent/319/2/130718_FC_Energias_Renovables_ES.pdf

Secretaria de Energía. (2012). *Resolución por la que la Comisión Reguladora de Energía expide las Reglas Generales de Interconexión al Sistema Eléctrico Nacional para generadores o permisionarios con fuentes de energías renovables o cogeneración eficiente*. México.

SENER. (s.f.). Obtenido de <http://www.renovables.gob.mx/portal/Default.aspx?id=1653&lang=1>

Universidad Nacional MAyor de San Marcos. (s.f.). *Scrib - Tesis*. Obtenido de Energia renovable: <http://es.scribd.com/doc/244956618/Energia-Renovable#scribd>

Villatoro Martinez, B. J. (2009). *Teoria de diseño de filtros*. Universidad de San carlos de Guatemala.

APENDICE A

GLOSARIO

VIENTO: Corriente de aire que se produce en la atmósfera al variar la presión.

ENERGIA ELECTRICTICA: Energía que permite a los electrones liberarse de sus átomos y desplazarse a través de un material conductor.

GENERACIÓN DISTRIBUIDA: Consideran GD aquella que no es planificada, despachada o programada centralmente, con potencia menor a 50 o 100 MW y conectada usualmente a la red de distribución.

SUSTENTABILIDAD: Definida por el World Energy Council - WEC, como el equilibrio entre tres dimensiones principales: la seguridad energética, la equidad social, y la mitigación del impacto ambiental.

PARQUE EOLICO: Un parque eólico es una agrupación de aerogeneradores que transforman la energía eólica en energía eléctrica.

RED DE DISTRIBUCION: Es el conjunto de conductores con todos sus accesorios, sus elementos de sujeción, protección, etc., que une una fuente de energía con las receptoras o cargas.

SISTEMA ELECTRICO DE POTENCIA: Es el conjunto de conductores con todos sus accesorios, sus elementos de sujeción, protección, etc., que une una fuente de energía con las receptoras o cargas.

GENERADOR: Mecanismo capaz de transformar en electricidad otro tipo de energía mecánica, química, lumínica, etc).

PROTOCOLO DE KOITO: código de comunicación que usan todos los ordenadores de una misma red para entenderse entre sí / El Protocolo de Kioto sobre el cambio climático² es un protocolo de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), y un acuerdo internacional que tiene por objetivo reducir las emisiones de seis gases de efecto invernadero que causan el calentamiento global: dióxido de carbono (CO₂), gas metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O), además de tres gases industriales fluorados: hidrofluorocarburos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF₆), en un porcentaje aproximado de al menos un 5 %

PRODUCTOR INDEPENDIENTE: Un productor independiente de energía (IPP, siglas en inglés), también llamado generador no público (NUG, en inglés), es un productor de energía eléctrica que no es parte de un servicio público. Los servicios públicos compran energía de los IPP para cumplir con parte o toda su demanda de electricidad.

APENDICE B

RESEÑA DEL SOFTWARE UTILIZADO PARA EL ESTUDIO

Digsilent

Ingeniería Especializada S.A. es el representante exclusivo para Colombia del programa de computador DlgSILENT. Este programa basado en plataforma Windows, es una herramienta para simulación de sistemas de potencia avanzada, integrada y totalmente interactiva, dedicada al análisis de sistemas eléctricos de potencia, facilitando su estudio.

Este programa ha sido utilizado por varias de las grandes empresas del sector eléctrico desde hace varios años para el análisis de sus redes eléctricas con el fin de optimizar la operación y alcanzar los objetivos de planeamiento eléctrico y energético. Los resultados obtenidos por estas empresas han sido bastante satisfactorios, no sólo por tratarse de un paquete moderno y versátil

Las funciones del paquete tienen acceso a una base de datos común bien sea en el formato de archivo de caracteres ampliado (ANSII) o el formato propio de la base de datos con un sistema de administración integrada de casos.

DlgSILENT es a la vez, un paquete para el análisis de sistemas de potencia en gran escala y una herramienta poderosa de uso diario para resolver problemas de ingeniería eléctrica de rutina. Hoy en día, existen muchos otros paquetes comerciales capaces de enfrentar la mayoría de los problemas de análisis de sistemas de potencia. Sin embargo, estos paquetes difieren considerablemente del DlgSILENT en su integración, calidad de los resultados y su eficiencia de computación.

APENDICE C

CONDUCTORES UTILIZADOS PARA LA CONEXIÓN DEL PARQUE EOLICO

Mm	AWG o KCM
50	1/0
95	4/0
150	300
240	500
400	800

Tabla 1- Tabla de conversión mm-AWG o KCM

Nota: Los conductores calibre 4/0 AWG y 800 KCM no son de línea, son de fabricación especial, en el caso de que se presentara algún problema para su obtención, considerar el calibre superior inmediato.

APENDICE D

ESPECIFICACIONES TECNICAS DEL AEROGENERADOR

El aerogenerador **Vestas V100-1.8 MW** es una turbina de viento regulada con un rotor de tres aspas para capturar la energía del viento.

El aerogenerador V100-1.8 MW está equipado con un rotor de 100 metros de diámetro, consistente de 3 aspas y su correspondiente maza. Dependiendo de las condiciones del viento las aspas continuamente se cambian de posición para optimizar el ángulo de las mismas. Las aspas de 49 metros de longitud están fabricadas de carbón y fibra de vidrio soportadas en una vigueta de acero.

ROTOR	
Diámetro	100m
Área de barrido	7,850m²
Velocidad estática del rotor	14.9rpm
Velocidad rango de operación dinámica	9.3-16.6rpm
Dirección de rotación	Giro de reloj
Orientación	Arriba del viento
Inclinación	6°
Numero de aspas	3

Utiliza un sistema de control microprocesador llamado Optitip y el concepto de velocidad variable denominado **Vestas Converter System (VCS)**. Con estas características el aerogenerador puede operar el rotor a una velocidad variable, ayudando a mantener la potencia generada cerca de su valor nominal.

APENDICE E

ESPECIFICACIONES TECNICAS DEL AEROGENERADOR

(UNIDADES OCUPADAS: 30)

El generador es asíncrono con rotor devanado, el cual está conectado al Sistema Convertidor Vestas (VCS) vía el Sistema de Anillos Deslizantes. El generador es un equipo enfriado con un circuito de enfriamiento interno y externo. El circuito externo toma aire del Nacelle (Caseta donde se alojan los equipos) y lo extrae a través de la parte posterior del propio Nacelle.

El generador tiene 4 polos, está embobinado tanto su estator como su rotor. El estator está conectado es estrella en potencia baja y en delta en potencia alta. El rotor está conectado en estrella y está aislado de su flecha.

GENERADOR	
Tipo	Asíncrono con rotor devanado, anillos deslizantes y VCS
Potencia nominal	1.8MW
Potencia nominal aparente	1.86MVA (fp=1)
Frecuencia	60Hz.
Tension del generador	690Vca
Tension del convertidor	480Vac
Numero de polos	4
Tipo embobinado (estator / rotor)	Random/Forma
Conexión embobinado del estator	Estrella/delta
Eficiencia nominal del generador	Mayor del 97%
Factor de potencia	0.90-0.95
Limite de sobre velocidad (2 min.)	2,900rpm
Nivel de vibración	>ó= 1.8 mm/s
Peso	Aprox. 7,500kg.

APENDICE F

ESPECIFICACIONES TECNICAS DEL TRANSFORMADOR

(UNIDADES OCUPADAS: 30)

El transformador está localizado en un local separado del Nacelle con apartarrayos montados en el lado de alta tensión. Su embobinado es trifásico y su tipo es seco. El lado de alta tensión está conectado en delta con una tensión de 34.5 KV y en estrella el lado de baja con una tensión de 690 V y una derivación en 480 V.

TRANSFORMADOR	
Tipo	Seco
Tensión primaria	6 – 34.5kV
Potencia nominal aparente	2,100kVA
Tensión secundaria 1	690V
Potencia nominal 1a690 V	1,900kVA
Tensión secundaria 2	480V
Potencia nominal 2a480 V	200kVA
Frecuencia	50/60 Hz
Taps en alta tensión	+ - 2 x 2.5% (vac)
Clase de aislamiento	F

La salida de alta tensión del transformador va hacia la parte inferior del aerogenerador donde se localiza el seccionador que forma parte del sistema colector de la red de media tensión.

APENDICE G

ESPECIFICACIONES TECNICAS DEL SECCIONADOR

Los seccionadores serán de 3 ó de 4 vías, el de 3 vías tendrá una línea de entrada (0L), una línea de salida (1L) y una línea que conectará y protegerá al transformador (1V). El de 4 vías en lugar de una línea de salida tendrá dos.

Sus características serán las siguientes:

Tipo: Gabinete modular con aislamiento en SF6.

Configuración: Barra de alimentación de entrada Unidad 0L. Alimentador de salida con Interruptor desc. 1L. Para 3 vías 1 pieza, para 4 vías 2 piezas. Unidad con Interruptor y relevador de protección del transformador 1V.

Tensión nominal ----- 36 KV

Frecuencia nominal ----- 60 Hz

Nivel de aislamiento ----- 36 KV / 70 KV /170 KV

Instalación ----- Interior

Temperatura ambiente máxima ----- 40° C

Temperatura ambiente mínima ----- - 5° C

Máxima altitud sobre nivel del mar ----- 1,000 m

Las características de cada uno de sus módulos serán:

a) Barra de alimentación de entrada (0L).

Corriente nominal ----- 630 A

Bushings ----- 630 A tipo C atornillable

b) Alimentador de salida con interruptor desconectador (1L) (para 3 ó 4 vías).

Corriente nominal ----- 630 A

Capacidad de apertura. ----- 630 A

Intensidad de corto circuito de corta Duración (1 s) 20 KA

Capacidad de construcción del interruptor seccionador y del interruptor de tierras
----- 50 KA

Bushings ----- 630 A tipo C atornillable

c) Unidad con interruptor de potencia y relevador de protección del transformador (1V).

Corriente nominal ----- 630 A

Capacidad de apertura ----- 630 A

Intensidad de corto circuito de corta duración (1 s) 20 KA

Capacidad de construcción ----- 20 KA

Relevadores de protección ----- 50, 51, 51N

Bushings ----- 630 A tipo C atornillable