



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

PROGRAMA INSTITUCIONAL LICENCIATURA EN INGENIERÍA EN ENERGÍA Y
SUSTENTABILIDAD

MODELADO, DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN FILTRO PASIVO PARA LA
MITIGACIÓN DE LOS ARMÓNICOS PRODUCIDOS POR LA INTERCONEXIÓN DE
UN SISTEMA DE GENERACIÓN EÓLICO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

Ingeniero en Energía y Sustentabilidad

P R E S E N T A

César Alberto Valencia Barrera

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Antonio Ramos Paz



Morelia, Michoacán, Julio de 2022

Agradecimientos

A mi madre Felicitas Barrera Anaya y a mi abuela María Guadalupe Anaya Hernández por haberme brindado siempre el apoyo incondicional para lograr terminar mi carrera.

A mis tías María Trinidad Barrera Anaya y Rosa María Barrera Anaya por también haberme apoyado durante mi carrera.

A mi novia y amiga Victoria Montejo Álvaro quién me brindó mucho apoyo moral.

A los profesores José Luis Guillén y Enrique Ambriz Parra por ser los profesores que mostraron mayor constancia en nuestra carrera al igual de que fueron los que mostraron mayor disposición de ayudarme a mí y a mis compañeros siempre que teníamos alguna duda.

A mí asesor el Dr. Antonio Ramos Paz quién aceptó apoyarme en esta etapa final de la licenciatura.

A mis compañeros Francisco Ortiz Béjar y Víctor Isidro Vilchis que me apoyaron en numerosas ocasiones durante la carrera.

Dedicatoria

Dedicado a mi madre Felicitas Barrera Anaya y mi abuela materna María Guadalupe Anaya Hernández.

En este trabajo de tesis se inicia con un listado de todos los problemas de calidad de la energía eléctrica, sus causas, sus efectos, sus soluciones, así como la importancia de tener una buena calidad de la energía eléctrica. Posteriormente, se habla sobre las distintas configuraciones de sistemas eólicos más utilizados, su interconexión con la red, los elementos que los componen, así como los elementos y convertidores de electrónica de potencia empleados en la actualidad y todas las características relevantes sobre los armónicos.

El tema central de esta tesis, es el de construir un modelo computacional de un convertidor de electrónica de potencia en un sistema eólico mediante el software de simulación eléctrica ATPDraw, esto con el fin de simular y estudiar la forma en como la señal fundamental de voltaje es distorsionada, debido a las corrientes armónicas generadas por el convertidor de potencia y también simular cómo esta distorsión armónica puede ser mitigada o eliminada por filtros de armónicos, que también son incluidos en el modelo.

Para realizar el objetivo anterior, se determinó estudiar el convertidor de electrónica de potencia back-to-back de seis pulsos, el cual es de los más utilizados actualmente en aplicaciones eólicas. También se decidió emplear un filtro pasivo para mitigar los armónicos producidos por el convertidor, de tal forma que primero se calcularon mediante fórmulas los tipos de armónicos generados por el convertidor, así como la frecuencia y la magnitud de cada uno de estos armónicos. Después se fijó un valor para la capacitancia de los capacitores utilizados en el filtro estático y se calcularon los valores de las inductancias para cada uno de los inductores del filtro. Finalmente se procedió a construir el modelo computacional en ATPDraw para realizar dos simulaciones, la primera sin el filtro pasivo, con el fin de visualizar la distorsión armónica producida por los armónicos del convertidor, y la segunda simulación con el filtro armónico incluido en el modelo, con el fin de simular el grado de mitigación que realiza el filtro con los valores previamente calculados y poder determinar si este logra reducir la distorsión armónica hasta niveles aceptables por las normas mexicanas.

En los últimos años se ha incrementado el uso de cargas no lineales como convertidores de potencia que producen distorsión armónica y la tendencia es que se sigan utilizando cada vez más, de igual manera, el uso de cargas eléctricas cada vez más sensibles a la distorsión armónica se está incrementando, por esa razón, un proceso de filtrado de armónicos en los sistemas eléctricos es y será esencial para garantizar un suministro de electricidad confiable para las industrias, comercios y hogares.

Palabras clave: calidad, energía, convertidor, potencia, eólica.

This thesis begins with a list of all the electrical power quality problems, their causes, their effects, their solutions, as well as the importance of having a good quality of electrical power. Subsequently, it talks about the different configurations of the most widely used wind systems, their interconnection with the grid, the elements that compose them, as well as the elements and power electronics converters currently used and all the relevant characteristics regarding harmonics.

The central theme of this thesis is to build a computational model of a power electronic converter in a wind system using the ATPDraw electrical simulation software, this in order to simulate and study the way in which the fundamental voltage signal is distorted, due to the harmonic currents generated by the power converter and also to simulate how this harmonic distortion can be mitigated or eliminated by harmonic filters, that are also included in the model.

To achieve the previous objective, it was decided to study the six-pulse back-to-back power electronics converter, which is one of the most currently used in wind applications. It was also determined that a passive filter would be used to mitigate the harmonics produced by the converter, thus, the types of harmonics generated by the converter, as well as the frequency and magnitude of each of these harmonics, were first calculated using formulas. Then a value was set for the capacitance of the capacitors used in the static filter and the values of the inductances were calculated for each of the filter inductors. Finally, the computational model was built in ATPDraw to perform two simulations, the first without the passive filter, in order to visualize the harmonic distortion produced by the converter harmonics, and the second simulation with the harmonic filter included in the model with in order to simulate the degree of mitigation that the filter performs with the previously calculated values and to be able to determine if it manages to reduce harmonic distortion to levels acceptable by Mexican standards.

In recent years, the use of non-linear loads such as power converters that produce harmonic distortion has increased and the trend is that they continue to be used more and more, in the same way, the use of electrical loads that are increasingly sensitive to harmonic distortion is increasing, for that reason, a harmonic filtering process in electrical systems is and will be essential to guarantee a reliable supply of electricity for industries, businesses and homes.

Capítulo 1: Introducción	1
1.1. Introducción	1
1.2. Antecedentes	2
1.3. Objetivos	4
1.4. Justificación	4
1.5. Metodología	5
1.6. Descripción de los capítulos	5
Capítulo 2: Calidad de la Energía Eléctrica.....	7
2.1. Introducción	7
2.2 Calidad de la energía eléctrica	7
2.3. Problemas de calidad de la energía eléctrica.....	8
2.3.1. Caídas de voltaje	9
2.3.2 Sobrevoltajes momentáneos	10
2.3.3. Sobrevoltajes de larga duración.....	10
2.3.4. Subvoltajes de larga duración	11
2.3.5. Interrupciones	12
2.3.6. Desbalance de fases	13
2.3.7. Fluctuaciones de voltaje.....	14
2.3.8. Variaciones de frecuencia	15
2.3.9. Transitorios.....	16
2.3.10. Armónicos	17
2.3.11. Inter armónicos	19
2.3.12. Ruido eléctrico	20
2.3.13. Muecas en la tensión	21
2.3.14. Desplazamiento de corriente directa.....	22
2.4 Importancia y ventajas de una buena calidad de la energía.....	23
2.5. Conclusión del capítulo 2	24
Capítulo 3: Interconexión de sistemas eólicos y convertidores de electrónica de potencia.....	25
3.1. Introducción	25

3.2. Aerogeneradores.....	25
3.3. Subsistemas y componentes de un aerogenerador.....	27
3.4. Generación de energía eólica.....	29
3.5. Configuraciones de interconexión de aerogeneradores.....	30
3.6. Dispositivos de electrónica de potencia en sistemas de energía eólica	33
3.7. Sistema de electrónica de potencia trifásico back-to-back de 6 pulsos	39
3.8. Funciones de los convertidores de electrónica de potencia en los sistemas eólicos	42
3.9. Conclusión del capítulo 3	43
Capítulo 4: Aspectos fundamentales de los armónicos; su generación y su mitigación	45
4.1. Introducción	45
4.2. Tipos de armónicos	45
4.3. Serie de Fourier para análisis de la distorsión armónica	46
4.4. Espectro de armónicos.....	48
4.5. Generación de armónicos y cargas no lineales	49
4.6. Relaciones para la cuantificación de distorsión armónica	50
4.7. Estándares mexicanos sobre distorsión armónica.....	52
4.8. Soluciones generales para la mitigación de los armónicos.....	54
4.9. Generación y propagación de armónicos en el sistema eléctrico	57
4.10. Filtro pasivo en derivación sintonizado en serie	58
4.11. Conclusión del capítulo 4	59
Capítulo 5: Modelado y simulación del convertidor de potencia	61
5.1. Introducción	61
5.2. Cálculos para determinar los parámetros armónicos del convertidor de 6 pulsos	61
5.2.1. Cálculo de la magnitud de la corriente del convertidor a la frecuencia fundamental....	61
5.2.2. Cálculo para determinar las armónicas producidas por el convertidor	62
5.2.3. Cálculo de los valores RMS de las corrientes armónicas	62
5.2.4. Cálculo de los valores RMS de los voltajes armónicos	63
5.2.5. Cálculo de la Distorsión Armónica Individual de los voltajes armónicos	64
5.2.6. Calculo de la distorsión armónica total del voltaje	66
5.3. Modelado y simulación en ATPDraw	67
5.4. Elementos eléctricos que conforman el modelo de ATPDraw.....	68
5.5. Modelado y simulación del convertidor de potencia en el sistema	71
5.6. Conclusión del capítulo 5	88

Capítulo 6: Cálculo, modelado y simulación del filtro armónico pasivo	89
6.1. Introducción	89
6.2. Cálculo de los parámetros del filtro armónico pasivo.....	89
6.3. Modelado y simulación del convertidor de potencia y el filtro armónico pasivo.....	92
6.4. Conclusión del capítulo 6	110
Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones	111
7.1. Conclusiones.....	111
7.2. Recomendaciones para trabajos futuros	113
Bibliografía	115

Lista de figuras

Figura 2.1. Onda senoidal perfecta.	8
Figura 2.2. Caída de voltaje debida a una falla de corto circuito en el sistema	9
Figura 2.3. Forma de onda de un sobre voltaje momentáneo causado por una falla de línea a tierra. Fuente: IEEE Power and Energy Society. (2009).	10
Figura 2.4. Gráfica de un sobrevoltaje de larga duración	11
Figura 2.5. Gráfica de un subvoltaje de larga duración.....	12
Figura 2.6. Forma de onda de una interrupción de aproximadamente 0.17 segundos de duración.	13
Figura 2.7. Tres voltajes desbalanceados diferentes en magnitud y ángulo de fase.....	14
Figura 2.8. Fluctuaciones de voltaje causadas por la operación de un horno de arco.	15
Figura 2.9. Variaciones de frecuencia en una onda de voltaje	16
Figura 2.10. Transitorio oscilatorio causado por la energización de un banco de capacitores	17
Figura 2.11. Distorsión generada por los armónicos producidos por un variador de velocidad	19
Figura 2.12. Señal de voltaje distorsionada por inter armónicos	20
Figura 2.13. Distorsión en una señal senoidal provocada por ruido eléctrico	21
Figura 2.14. Muestras en la tensión causadas por un convertidor trifásico.	22
Figura 2.15. Señal alterna desplazada debido a la presencia de un voltaje de CD	23
Figura 3.1. Aerogenerador SG 5.8-170.....	26
Figura 3.2. Partes principales de un aerogenerador.	27
Figura 3.3. Subsistemas de un aerogenerador.....	29
Figura 3.4. Diagrama unifilar simplificado de la interconexión de un parque eólico.	30
Figura 3.5. Diagrama de interconexión de un aerogenerador que opera a velocidad fija del rotor.	31
Figura 3.6. Diagrama de interconexión de un aerogenerador que opera a velocidad variable con convertidor de frecuencia de escala parcial.	32
Figura 3.7. Clasificación de elementos de electrónica de potencia.	33
Figura 3.8. Símbolos de elementos utilizados en convertidores de electrónica de potencia.....	36
Figura 3.9. Clasificación básica de convertidores de potencia utilizados en aplicaciones eólicas....	37
Figura 3.10. a) Convertidor funcionando como rectificador. b) Convertidor funcionando como inversor.	38
Figura 3.11. Sistema de electrónica de potencia conectando una fuente de energía y una carga. .	39
Figura 3.12. Sistema de electrónica de potencia back-to-back de 6 pulsos conectado al sistema eléctrico.....	41
Figura 3.13. Convertidor trifásico back-to-back INGECONR WIND.	41
Figura 4.1. Distorsión armónica provocada por la suma de armónicos a la onda fundamental	47
Figura 4.2. Espectro de armónicos de un variador de velocidad PWM	48
Figura 4.3. Generación de armónicos.	50
Figura 4.4. Equipos para mitigar armónicos.....	54
Figura 4.5. Fotografía del interior de un filtro pasivo	56
Figura 4.6. Vista exterior de un filtro activo.....	57

Figura 4.7. Diagrama unifilar de un sistema eléctrico eólico conectado a la red	58
Figura 4.8. Funcionamiento básico de un filtro pasivo en derivación.	59
Figura 5.1. Interfaz gráfica de ATPDraw.	68
Figura 5.2. Fuente de voltaje en ATPDraw.	68
Figura 5.3. Fuente de corriente en ATPDraw.	69
Figura 5.4. Impedancia o resistencia en ATPDraw.	69
Figura 5.5. Probador de voltaje en ATPDraw.	69
Figura 5.6. Probador de corriente en ATPDraw.	70
Figura 5.7. Capacitor en ATPDraw.	70
Figura 5.8. Inductor en ATPDraw.	71
Figura 5.9. Modelo del sistema sin la carga no lineal.	72
Figura 5.10. Forma de onda del voltaje sin ningún armónico presente en el sistema.	73
Figura 5.11. Forma de onda de la corriente sin ningún armónico presente en el sistema.	73
Figura 5.12. Modelo del sistema con el armónico 5 incluido.	74
Figura 5.13. Forma de onda del voltaje con el armónico 5 presente.	74
Figura 5.14. Forma de onda de la corriente con el armónico 5 presente.	75
Figura 5.15. Modelo del sistema con los armónicos 5 y 7 incluidos.	75
Figura 5.16. Forma de onda del voltaje con los armónicos 5 y 7 presentes.	76
Figura 5.17. Forma de onda de la corriente con los armónicos 5 y 7 presentes.	76
Figura 5.18. Modelo del sistema con los armónicos 5, 7 y 11 incluidos.	77
Figura 5.19. Forma de onda del voltaje con los armónicos 5, 7 y 11 presentes.	77
Figura 5.20. Forma de onda de la corriente con los armónicos 5, 7 y 11 presentes.	77
Figura 5.21. Modelo del sistema con los armónicos 5 a la 17 incluidas.	78
Figura 5.22. Forma de onda del voltaje con los armónicos 5 al 17 presentes.	78
Figura 5.23. Forma de onda de la corriente con los armónicos 5 al 17 presentes.	79
Figura 5.24. Modelo del sistema con los armónicos 5 al 25 incluidos.	79
Figura 5.25. Forma de onda del voltaje con los armónicos 5 al 25 presentes.	80
Figura 5.26. Forma de onda de la corriente con los armónicos 5 al 25 presentes.	80
Figura 5.27. Modelo del sistema con los armónicos 5 al 35 incluidos.	81
Figura 5.28. Forma de onda del voltaje con los armónicos 5 al 35 presentes.	81
Figura 5.29. Forma de onda de la corriente con los armónicos 5 al 35 presentes.	81
Figura 5.30. Modelo del sistema con los armónicos 5 al 41 incluidos.	82
Figura 5.31. Forma de onda del voltaje con los armónicos 5 al 41 presentes.	82
Figura 5.32. Forma de onda de la corriente con los armónicos 5 al 41 presentes.	82
Figura 5.33. Modelo del sistema con los armónicos 5 al 49 incluidos.	83
Figura 5.34. Esquema de la parte del sistema eólico en estudio.	84
Figura 5.35. Forma de onda del voltaje con los armónicos 5 al 49 presentes.	84
Figura 5.36. Forma de onda del corriente con los armónicos 5 al 49 presentes.	85
Figura 5.37. Espectro de frecuencias de voltajes armónicos sin el filtro.	86
Figura 5.38. Espectro de frecuencias de voltajes expresados en porcentajes sin el filtro armónico.	87
Figura 5.39. Espectro de frecuencias de corrientes armónicas sin el filtro.	88
Figura 6.1. Serie inductor-capacitor-resistor para mitigar el armónico 5.	92

Figura 6.2. Forma de onda de la corriente cuando se mitiga el armónico 5.....	93
Figura 6.3. Forma de onda del voltaje cuando se mitiga el armónico 5.	93
Figura 6.4. Series inductor-capacitor-resistor para mitigar los armónicos 5 y 7.	94
Figura 6.5. Forma de onda de la corriente cuando se mitiga el armónico 5 y 7.....	94
Figura 6.6. Forma de onda del voltaje cuando se mitiga el armónico 5 y 7.....	94
Figura 6.7. Series inductor-capacitor-resistor para mitigar del armónico 5 al 11.	95
Figura 6.8. Forma de onda de la corriente cuando se mitigan los armónicos 5, 7 y 11.....	95
Figura 6.9. Forma de onda del voltaje cuando se mitigan los armónicos 5, 7 y 11.	95
Figura 6.10. Series inductor-capacitor-resistor para mitigar del armónico 5 al 13.	96
Figura 6.11. Forma de onda de la corriente cuando se mitiga del armónico 5 al 13.....	96
Figura 6.12. Forma de onda del voltaje cuando se mitiga del armónico 5 al 13.	96
Figura 6.13. Modelo del sistema para mitigar del armónico 5 al 17.....	97
Figura 6.14. Forma de onda de la corriente cuando se mitiga del armónico 5 al 17.....	97
Figura 6.15. Forma de onda del voltaje cuando se mitiga del armónico 5 al 17.	98
Figura 6.16. Series inductor-capacitor-resistor para mitigar del armónico 5 al 19.	98
Figura 6.17. Forma de onda de la corriente cuando se mitiga del armónico 5 al 19.....	99
Figura 6.18. Forma de onda del voltaje cuando se mitiga del armónico 5 al 19.	99
Figura 6.19. Series inductor-capacitor-resistor para mitigar del armónico 5 al 25.	100
Figura 6.20. Forma de onda de la corriente cuando se mitiga del armónico 5 al 25.....	100
Figura 6.21. Forma de onda del voltaje cuando se mitiga del armónico 5 al 25.	100
Figura 6.22. Series inductor-capacitor-resistor para mitigar del armónico 5 al 29.	101
Figura 6.23. Forma de onda de la corriente cuando se mitiga del armónico 5 al 29.....	101
Figura 6.24. Forma de onda del voltaje cuando se mitiga del armónico 5 al 29.	102
Figura 6.25. Series inductor-capacitor-resistor para mitigar del armónico 5 al 35.	102
Figura 6.26. Forma de onda de la corriente cuando se mitiga del armónico 5 al 35.....	103
Figura 6.27. Forma de onda del voltaje cuando se mitiga del armónico 5 al 35.	103
Figura 6.28. Series inductor-capacitor-resistor para mitigar del armónico 5 al 41.	104
Figura 6.29. Forma de onda de la corriente cuando se mitiga del armónico 5 al 41.....	104
Figura 6.30. Forma de onda del voltaje cuando se mitiga del armónico 5 al 41.	104
Figura 6.31. Series inductor-capacitor-resistor para mitigar del armónico 5 al 49.	105
Figura 6.32. Forma de onda de la corriente cuando se mitiga del armónico 5 al 49.....	105
Figura 6.33. Forma de onda del voltaje cuando se mitiga del armónico 5 al 49.	106
Figura 6.34. Espectro de frecuencias de corrientes armónicas con el filtro.	107
Figura 6.35. Espectro de frecuencias de voltajes armónicos con el filtro.....	108
Figura 6.36. Espectro de frecuencias de voltajes expresados en porcentajes cuando se aplica el filtro.....	109

Lista de tablas

Tabla 3.1. Datos eléctricos del convertidor back-to-back INGECON WIND.	42
Tabla 4.1. Tipos de armónicos.....	45
Tabla 4.2. Tipos de centrales eléctricas de acuerdo al código de red.....	53
Tabla 4.3. Valores máximos de distorsión individual para centrales tipo D.	53
Tabla 5.1. Valores RMS de las corrientes armónicas en el sistema	63
Tabla 5.2. Valores RMS de los voltajes armónicos en el sistema.....	64
Tabla 5.3. IHD de cada voltaje armónico.	65
Tabla 5.4. Comparación del IHD de los voltajes armónicos del convertidor con el IHD máximo permitido en el código de red.....	66
Tabla 6.1. Valores RMS de los voltajes y corrientes armónicos antes y después de aplicar el filtro.	106
Tabla 6.2. Comparación de valores de THD del voltaje.	110

Lista de símbolos y abreviaturas

A – Ampere
ASD – Adjustable Speed Drive (Variador de Velocidad)
BJT – Bipolar Junction Transistor (Transistor de Unión Bipolar)
CA – Corriente Alterna
CD – Corriente Directa
CFE – Comisión Federal de Electricidad
DOF – Diario Oficial de la Federación
DFIG – Doubly Feed Induction Generator (Generador de Inducción Doblemente Alimentado)
GTO – Gate Turn-Off Thyristor (Tiristor de bloqueo por puerta)
Hz – Hertz
IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers
IHD – Individual Harmonic Distortion (Distorsión Armónica Individual)
IGCT – Integrated Gate-Commutated Thyristor (Tiristor Controlado por Puerta Integrada)
KHz – Kilo Hertz
kW – Kilowatt
Metal-Óxido Semiconductor
MHz – Mega Hertz
MOSFET – Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor (Transistor de Efecto de Campo)
Ms – Mili segundos
MW – Megawatt
PLC – Programmable Logic Controller (Controlador Lógico Programable)
Pu – Por unidad
PWM – Pulse Width Modulation (Modulación de Ancho de Pulso)
RMS – Root Mean Square (Raíz Cuadrática Media)
SCIG – Squirrel Cage Induction Generator (Generador de Inducción Jaula de Ardilla)
SCR – Silicon Controlled Rectifier (Rectificador Controlado de Silicio)
SEN – Sistema Eléctrico Nacional
SLG – Single Line-to-Ground (De línea a tierra)
SMPS – Switched Mode Power Supply (Fuente de Alimentación Conmutada)
SSPC – Solid State Power Controller (Controlador de Potencia de Estado Solido)
SVC – Static Var Compensator (Compensador Estático de Var)
TVSS – Transient Voltage Suppressors (Supresores de Voltaje Transitorios)
TDD – Total Demand Distortion (Distorsión de la Demanda Total)
THD – Total Harmonic Distortion (Distorsión Armónica Total)
UPS – Uninterruptible Power Supply (Sistema de Alimentación Ininterrumpida)
V – Volt
VFD – Variable Frequency Drive (Variador de frecuencia)

1.1. Introducción

La energía en todas sus formas siempre ha sido de vital importancia para el desarrollo de las primeras y grandes civilizaciones. Entre estas formas de energía que han sido útiles a la humanidad a lo largo de la historia, encontramos por ejemplo la energía eólica, que era empleada para mover embarcaciones de vela o para hacer girar un molino para moler granos o bombear agua. También se empleaba la energía hidráulica, agua cuya energía cinética originada por la acción de la gravedad era usada para mover un mecanismo para moler granos, al igual que el viento.

Más recientemente, en la civilización moderna, a finales del siglo XIX fue cuando se empezó a utilizar la energía del viento para generar electricidad, ya que a finales de ese siglo se crearon las primeras turbinas eólicas, las cuales eran de muy poca potencia y generaban corriente directa. Fue hasta hace unas cuantas décadas atrás, en la década de los 1970's, cuando los grandes avances en la tecnología permitieron la utilización de turbinas eólicas de mayor potencia para generación de electricidad en sistemas de corriente alterna y para fines comerciales.

En los últimos veinte años, la energía eólica ha tenido un crecimiento exponencial, convirtiéndose en una de las primeras fuentes de generación de energía junto con la energía solar y los combustibles fósiles. Todo este crecimiento exponencial de la energía eólica no hubiera sido posible gracias a los avances en ciertas ramas de la ingeniería eléctrica, como en la electrónica de potencia, que debido a los avances tecnológicos y disminución de costos en los convertidores de electrónica de potencia se permitió regular, transformar y "adecuar" la energía eléctrica generada por los aerogeneradores, para que de esa forma las turbinas eólicas pudieran ser más eficientes para transformar en electricidad la mayor cantidad de energía posible contenida en el viento.

Sin embargo, a razón del uso cada vez más frecuente de convertidores de electrónica de potencia a nivel residencial, comercial e industrial, incluyendo a las energías renovables, la calidad de la energía eléctrica producida por sistemas de energía renovable como los sistemas eólicos ha ido disminuyendo originando diversos fenómenos y problemas eléctricos entre los cuales se encuentran los armónicos, los cuales son considerados por muchos ingenieros como el problema de calidad de la energía que más efectos negativos ocasiona y que son el problema que en esta tesis se trata de resolver.

Los armónicos son generados por cargas no lineales, entre dichas cargas se encuentran los convertidores de electrónica de potencia, los cuales conmutan la señal de corriente de entrada y la modifican, es este proceso de conmutación el que genera armónicos, los cuales ocasionan que la forma de onda de la corriente y voltaje fundamental se distorsione.

Los armónicos son básicamente corrientes y voltajes cuya frecuencia es múltiplo de la fundamental y que al combinarse con la onda fundamental la distorsionan o la alteran, ocasionando principalmente problemas como calentamiento, mal funcionamiento, ineficiencia y daños en

equipos eléctricos y dispositivos electrónicos, además de pérdidas económicas a las industrias y empresas.

Es por la razón anterior que, en este proyecto de tesis, se describen los problemas de calidad eléctrica de forma general, aunque con un enfoque mucho mayor en los armónicos el cual es el problema a resolver. También, entre los puntos más importantes de esta investigación, se habla de las ventajas de contar con una buena calidad de la energía en los sistemas eléctricos, las configuraciones de generación e interconexión de los sistemas eólicos, los tipos de elementos y dispositivos de electrónica de potencia utilizados en la energía eólica, los tipos de armónicos que estos convertidores de potencia pueden producir, así como también se realiza el modelado y simulación de un convertidor de potencia típico utilizado en los sistemas eólicos. Además, como punto principal se propone el diseño de un filtro estático utilizando la herramienta computacional llamada ATPDraw, esto con el fin de mitigar o reducir los armónicos generados por los convertidores de los sistemas eólicos hasta niveles aceptables mencionados en la normativa mexicana.

1.2. Antecedentes

Actualmente, la energía eólica se está convirtiendo en una de las fuentes más importantes para la generación eléctrica. La media de potencia de las turbinas eólicas instaladas hoy en día ronda los 2.5 MW, aunque también se instalan turbinas con potencias mayores desde 4 MW hasta los 6 MW. Prácticamente, todas estas turbinas que son instaladas en las grandes centrales eólicas operan con un sistema de rotor a velocidad variable, esto con el fin de aprovechar la mayor cantidad de energía contenida en el viento. Todo lo anterior ha sido posible gracias a décadas de investigación sobre como interconectar turbinas eólicas a sistemas de potencia de corriente alterna.

Primeramente, en 1888, en Estados Unidos se crea la primera turbina eólica con una potencia de 12 KW que generaba electricidad en corriente directa, durante las siguientes décadas a ese año la generación eléctrica mediante turbinas eólicas era para hacer funcionar pequeños motores y cargar baterías en aplicaciones aisladas. Sin embargo, en las primeras décadas del siglo XX, los sistemas de potencia en corriente alterna, se impusieron sobre los sistemas de transmisión de corriente directa debido a que en los sistemas de transmisión de C.A. existen menos pérdidas de energía cuando esta se transmite a grandes distancias, son más prácticos y más baratos (Manwell, McGowan, Rogers, 2009).

Fue por la razón anterior, que en las primeras décadas del siglo XX los sistemas de transmisión de potencia eran de C.A., aunque prácticamente no era posible conectar las turbinas eólicas de C.D. a estas nuevas líneas de transmisión. Fue en 1939 cuando se conecta la primera turbina eólica a la red de transmisión en Estados Unidos, esta turbina usaba un generador síncrono pero para poder conectarse a la red, el rotor operaba a una velocidad fija, lo cual quiere decir que la velocidad del rotor siempre es la misma sin importar que la velocidad del viento aumente, la gran desventaja de esto era que la turbina desaprovechaba gran cantidad de energía contenida en el viento cuando estos eran altos, sin embargo, el rotor al funcionar a velocidad de giro fija, la frecuencia eléctrica

que producía era constante de tal forma que se podía interconectar con la red (Manwell, McGowan, Rogers, 2009; Patel, 1999).

Durante la crisis del petróleo, en la década de los 1970's, gobiernos de varios países del mundo como Estados Unidos, Reino Unido y Alemania empezaron a mostrar un mayor interés en financiar programas para desarrollar a la energía eólica ya que los precios del petróleo aumentarían a niveles históricos, entonces lo que se buscaba era tener otras fuentes de energía alterna y fue durante esta década que las primeras turbinas con propósitos comerciales y con operación del rotor a velocidad variable empezaron a ser conectadas a la red eléctrica (Manwell, McGowan, Rogers, 2009; Patel, 1999).

Una turbina eólica cuyo rotor opera a velocidad variable es una turbina que logrará captar y proveer la mayor cantidad de energía cinética que hay en el viento, ya que la velocidad de giro del rotor va cambiando a medida que cambia la velocidad del viento, es decir si la velocidad del viento aumenta también lo hará la velocidad del rotor, y si la velocidad del viento disminuye también lo hará la velocidad del rotor, pudiendo el rotor funcionar en un rango más amplio de velocidades del viento y tener una mayor producción anual de energía.

Las turbinas eólicas con operación a velocidad variable interconectadas a la red fueron posibles gracias a que en esa misma década de 1970 se comenzaron a utilizar junto con dispositivos de electrónica de potencia. Estos primeros dispositivos de potencia eran puentes de diodos empleados para rectificar la frecuencia variable producida por el generador y rectificadores controlados de silicio (SCR), los cuales se usaban en un inversor para cambiar la potencia en C.D. rectificada en potencia en C.A. sincronizada con la red.

Los convertidores de electrónica de potencia permitieron sincronizar con la red a las turbinas de velocidad variable y hacerlas más eficientes, sin embargo, el uso de estos convertidores y debido al proceso de conmutación que utilizan para modificar la frecuencia o magnitud de la onda de voltaje creó un nuevo problema, el cual es la distorsión de la onda fundamental debido a la producción de corrientes armónicas. Sin embargo, para combatir este nuevo problema relacionado con la calidad de la energía eléctrica, se crearon nuevos dispositivos llamados filtros los cuales permiten eliminar o mitigar la distorsión en la forma de onda producida por los armónicos y tener una calidad de onda que se encuentre dentro de los límites aceptables para poder ser utilizada sin mayores problemas.

Debido a que la tendencia es seguir utilizando aerogeneradores de velocidad variable en las centrales eólicas, y por lo tanto convertidores de electrónica de potencia para poder conectar y sincronizar estos aerogeneradores a la red, los problemas relacionados con una mala calidad de la energía originados por los armónicos persistirán, por esa razón será fundamental que siempre exista algún proceso de filtrado de armónicos antes de que la energía generada por las turbinas se inyecte a la red y de esa forma garantizar una buena calidad en la energía eléctrica en el suministro.

1.3. Objetivos

Objetivo general

Diseñar, calcular y modelar en ATPDraw un filtro armónico pasivo, para mitigar la distorsión armónica en el voltaje y corriente causada por un convertidor de potencia de un sistema eólico hasta niveles aceptables de acuerdo al Código de Red.

Objetivos específicos

- Determinar y calcular las componentes armónicas y sus magnitudes del convertidor de potencia eólico seleccionado.
- Construir el modelo del sistema eólico y el convertidor de potencia mediante el programa ATPDraw, para simular el comportamiento de la corriente y el voltaje.
- Diseñar y calcular los valores de un filtro armónico estático.
- Modelar y simular el sistema eólico junto con el convertidor de potencia y el filtro armónico estático.
- Comparar los valores de la distorsión de la corriente y voltaje obtenidos con el modelo en ATPDraw, con los valores máximos permisibles en el Código de Red.

1.4. Justificación

El tema principal de esta tesis es relevante y con mucho futuro ya que como sabemos los combustibles fósiles en algunas décadas dejarán de ser la fuente principal de energía para el mundo, debido a que los sistemas de generación de energías renovables serán los utilizados para generar la energía que necesitamos para realizar nuestras actividades cotidianas y para los procesos industriales y comerciales. Los sistemas de energías renovables, entre ellos, los sistemas eólicos, emplean dispositivos de electrónica de potencia para poder convertir o cambiar la frecuencia o voltaje producido por estos, para que de esa forma se pueda realizar la interconexión a la red eléctrica, pero al realizar ese proceso de conversión de la energía generada se producen los armónicos, los cuales si no son filtrados o mitigados antes de inyectarse en la red de transmisión, pueden transportarse a través de la red eléctrica y producir problemas en máquinas eléctricas usadas en la industria o en aparatos electrónicos usados en oficinas a cientos o miles de kilómetros de donde se generaron, pudiendo causar problemas de pérdida de la producción o pérdidas de datos importantes con altos costos para las industrias o empresas. Es por esta razón que una buena calidad de la energía eléctrica es y será fundamental para el desarrollo de los procesos industriales y comerciales, así como para garantizar la confiabilidad y la continuidad de la red eléctrica. Pero debido a que cada año que pasa existen más sistemas de energía eólica y por lo tanto más convertidores de potencia conectados a la red, los procesos de filtrado y mitigación de armónicos se convertirán en una actividad imprescindible y necesaria a realizar para asegurar un buen

suministro de energía eléctrica confiable para los procesos de los comercios, industrias, red eléctrica y usuarios finales en general.

1.5. Metodología

Para la realización de esta tesis se hizo una revisión bibliográfica para indagar y determinar qué tipos de convertidores de electrónica de potencia son los que se están empleando actualmente junto con sistemas de energía eólica para la generación eléctrica en centrales eólicas, así como también los filtros armónicos más empleados en la actualidad para mitigar armónicos y de esa manera elegir un tipo de cada uno para poder estudiarlos mediante modelado y simulación computacional.

Una vez que se definió el tipo de convertidor de potencia a analizar, se calculó mediante ecuaciones ya establecidas los tipos de armónicos que produce el convertidor seleccionado, así como las magnitudes de estos, la distorsión armónica total, la distorsión armónica individual, etc. También se calcularon por medio de ecuaciones, los valores de inductancia, capacitancia y resistencia que el filtro armónico diseñado debe de tener para poder mitigar cada una de las armónicas generadas por el convertidor de potencia.

Después, mediante el software ATPDraw primero se procedió a realizar la construcción del modelo computacional solo del sistema eólico y del convertidor de potencia que es la carga no lineal que produce armónicos, esto con el fin de simular y visualizar la distorsión que los armónicos generados por el convertidor, producen sobre la onda de corriente y voltaje fundamentales del sistema.

Por último, a ese mismo modelo se le agregaron los filtros armónicos con sus respectivos valores de inductancia, capacitancia y resistencia previamente calculados, para de esa forma poder simular y comprobar en qué grado, los filtros armónicos, ayudaron a mitigar los armónicos existentes en el sistema eléctrico y comprobar si los niveles de distorsión armónica total se lograron reducir hasta niveles permisibles indicados por el Código de Red.

1.6. Descripción de los capítulos

Capítulo 2

En el segundo capítulo se presenta lo que es el concepto de calidad de la energía eléctrica, se mencionan todos los problemas de calidad de la energía eléctrica, así como sus causas, efectos y soluciones y se menciona también la importancia y ventajas de tener una buena calidad eléctrica en los sistemas eléctricos.

Capítulo 3

En el tercer capítulo se describe lo que son los sistemas eólicos (aerogeneradores), sus componentes y subsistemas principales, así como la configuración de interconexión con la red más utilizada hoy

en día en centrales eólicas. También se enlistan y describen brevemente todos los elementos y convertidores de electrónica de potencia empleados actualmente en la generación de energía eólica y se especifica el tipo de convertidor de potencia que se va a modelar y simular.

Capítulo 4

En el cuarto capítulo se habla más específicamente de los armónicos incluyendo sus características fundamentales, la forma en que se generan y propagan en los sistemas eléctricos, las formas y relaciones para cuantificarlos, los estándares mexicanos para regularlos y los dispositivos eléctricos y electrónicos para mitigarlos. También se determina el tipo de filtro armónico que se van a modelar, calcular y simular.

Capítulo 5

En el capítulo quinto se realizan todos los cálculos necesarios para determinar, los tipos de armónicos producidos por el convertidor seleccionado, las magnitudes de las corrientes y voltajes armónicos, el nivel de Distorsión Armónica Total del voltaje, la Distorsión Armónica Individual que aporta cada armónico además se describe el proceso de modelado y simulación en ATPDraw del sistema eólico y el convertidor de potencia.

Capítulo 6

En el capítulo seis se llevan a cabo los cálculos necesarios para determinar los parámetros y valores del filtro armónico que se diseñará y modelará, así como también se realiza el modelado y simulación del sistema eólico, el convertidor de potencia (carga no lineal) y el filtro armónico estático.

Capítulo 7

En el último capítulo se resumen las conclusiones de los resultados y simulaciones obtenidas en la tesis. También se enlistan una serie de recomendaciones sobre como estudiar correctamente los armónicos en sistemas eléctricos.

Capítulo 2: Calidad de la Energía Eléctrica

2.1. Introducción

El tema principal de este trabajo de tesis es el de la mitigación de armónicos en un sistema eólico, por lo tanto, si se habla de armónicos se tiene que hablar también de calidad de la energía eléctrica. Es por eso que en el presente capítulo se da el concepto de calidad de la energía eléctrica, de igual manera se mencionan y describen brevemente todos los problemas de calidad eléctrica que se pueden encontrar en los sistemas eléctricos modernos, al mismo tiempo que se habla de las causas más comunes que los originan, los efectos que producen en los voltajes y corrientes fundamentales y las soluciones generales a estos problemas eléctricos. También, mediante gráficas extraídas de la bibliografía, se ilustran los efectos que estos problemas y perturbaciones eléctricos inducen sobre las señales de voltaje y corriente nominales y fundamentales del sistema. Al final se explican brevemente las ventajas de tener buenos parámetros de calidad de la energía en los sistemas eléctricos.

2.2 Calidad de la energía eléctrica

El término calidad de la energía eléctrica describe el grado de “pureza” de una onda o señal de voltaje o corriente. La calidad de la energía eléctrica puede encontrarse en distintos grados o niveles dentro de un sistema eléctrico. Una señal de corriente o voltaje es “pura” cuando es una onda sinusoidal perfecta a la frecuencia fundamental de 60 Hz, en este caso se dice que esa señal de voltaje o corriente tiene una buena calidad. Por el contrario, si esa señal no es una onda sinusoidal perfecta (que contenga distorsión o varíe en su magnitud de forma irregular con el tiempo o en su frecuencia), se dice que esa señal tiene una mala calidad de la energía.

La calidad de la energía eléctrica puede variar un poco en su significado dependiendo desde que perspectiva se vea. Por ejemplo, para la compañía suministradora de electricidad, una buena calidad de la energía involucra generar y transmitir una señal de onda de corriente o voltaje sin desviación y con una frecuencia a 60 Hz. Por otra parte, para el usuario final una buena calidad de la energía representa recibir y consumir una señal dentro de estándares eléctricos aceptables de tal forma que las cargas o los equipos puedan operar de forma óptima y que estos no vean reducida su vida útil. Aunque también, el usuario final es responsable de la calidad de la energía, ya que en realidad la mayoría de los problemas de calidad de la energía son causados y se generan del lado del consumidor final. En la Figura 2.1 se muestra una onda sinusoidal perfecta, esta onda representa una señal de voltaje o corriente sin problemas de calidad de la energía.

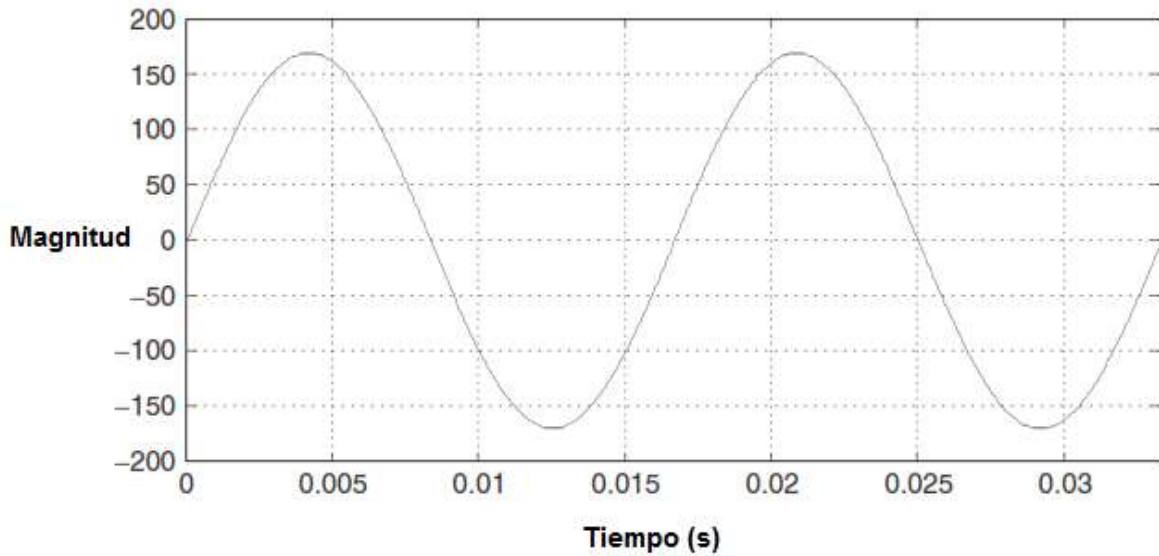


Figura 2.1. Onda senoidal perfecta.

2.3. Problemas de calidad de la energía eléctrica

Los problemas de calidad de la energía eléctrica son todas aquellas alteraciones, desviaciones y variaciones que una onda sinusoidal de corriente o voltaje puede sufrir en su magnitud RMS, frecuencia, periodo y ángulo de fases nominales debido a la operación normal de ciertas cargas eléctricas o electrónicas, fenómenos electromagnéticos, fenómenos meteorológicos, daños en los sistemas eléctricos, etc. Los problemas de calidad de la energía son los siguientes:

- Caídas de voltaje
- Sobrevoltajes momentáneos
- Sobrevoltajes de larga duración
- Subvoltajes de larga duración
- Interrupciones
- Desbalance de fases
- Fluctuaciones de voltaje
- Variaciones de frecuencia
- Transitorios
- Armónicos
- Inter armónicos
- Ruido eléctrico
- Muecas en la tensión
- Desplazamiento de corriente directa

2.3.1. Caídas de voltaje

Conocidas en inglés como “Voltage sags/dips” son variaciones de voltaje de corta duración en la cual el valor de voltaje RMS a la frecuencia fundamental de 60 Hz disminuye entre 10 y 90 por ciento de su valor nominal. La duración de las caídas de voltaje es de más de 0.0083 segundos (medio ciclo) hasta 1 minuto. Las caídas de voltaje son el problema de calidad de la energía más común (Kennedy, 2000, p. 34).

Estas caídas de voltaje de corta duración pueden clasificarse como instantáneas si duran entre 0.5 y 30 ciclos (0.0083 segundos a 0.5 segundos), momentáneas si duran entre 30 ciclos y 180 ciclos (0.5 segundos a 3 segundos), y temporales si duran entre 3 segundos y 1 minuto (IEEE Power and Energy Society, 2009). En la Figura 2.2 se observa el efecto típico que una caída de tensión provoca a una señal de voltaje.

Causas: Las caídas de voltaje son normalmente causadas por el encendido de grandes cargas como motores industriales y hornos de arco, aunque también están muy relacionadas con fallas en los sistemas de transmisión, estas fallas pueden ocurrir por descargas atmosféricas, mal funcionamiento de aislantes en las líneas de transmisión, contacto de las líneas de transmisión con objetos como árboles, etc. Al producirse estas fallas, los reconectores o interruptores de circuito abren y cierran el circuito para restaurar el voltaje. El tiempo que tardan los reconectores en arreglar la falla es el tiempo en que se producen las caídas de voltaje.

Efectos: Las caídas de voltaje provocan una disminución en el voltaje requerido por cargas y equipos tales como equipos electrónicos y motores, esta disminución causa que los equipos y máquinas fallen, funcionen mal, se dañen o en el caso de motores que se paren.

Soluciones: Las soluciones más comunes a las caídas de voltaje es el uso de dispositivos de protección como: sistemas de alimentación ininterrumpida (UPS) y reguladores o acondicionadores de voltaje para mantener el nivel de voltaje en niveles óptimos en caso de un evento de caída de voltaje.

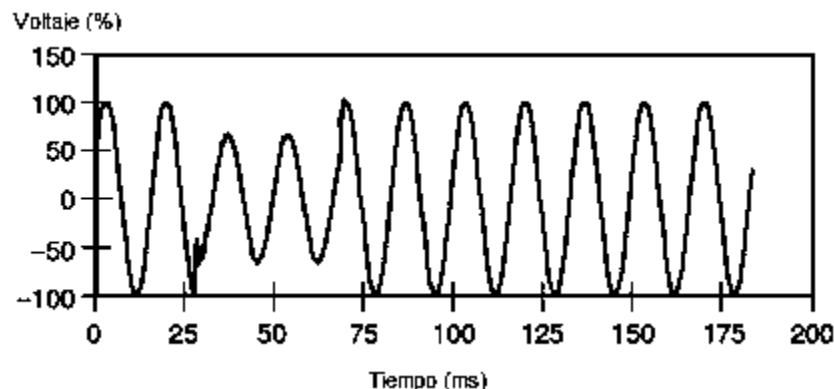


Figura 2.2. Caída de voltaje debida a una falla de corto circuito en el sistema. Fuente: Dugan, McGranaghan, Santoso, Beaty. (2004).

2.3.2 Sobrevoltajes momentáneos

Conocidos en inglés como “swells”, son variaciones de voltaje de corta duración caracterizados por un aumento del 110 por ciento o más del valor RMS del voltaje nominal a la frecuencia fundamental. Su duración va desde medio ciclo hasta 1 minuto. Los sobrevoltajes también al igual que las caídas de voltaje pueden clasificarse en eventos de corta duración instantáneos, momentáneos y temporales. En la Figura 2.3 se observa el efecto que causa un sobrevoltaje típico sobre la señal de voltaje.

Causas: Los sobrevoltajes momentáneos son causados por fallas en el sistema eléctrico como por ejemplo fallas de una línea a tierra (SLG), estas fallas pueden ser debidas al contacto de una línea viva con un objeto como un árbol o a descargas atmosféricas. Los sobrevoltajes también pueden ser ocasionados por operaciones de conmutación como el apagado de grandes cargas o bancos capacitores.

Efectos: Las sobretensiones momentáneas principalmente ocasionan en los equipos sobrecalentamiento, mal funcionamiento, reducción de la vida útil hasta la destrucción de estos.

Soluciones: Entre las soluciones de las sobretensiones normalmente se encuentran equipos de prevención, como pararrayos para descargas atmosféricas y más comúnmente dispositivos de protección contra sobretensiones (DPS) o supresores de picos que limitan el exceso de voltaje inducido a los equipos por un sobrevoltaje.

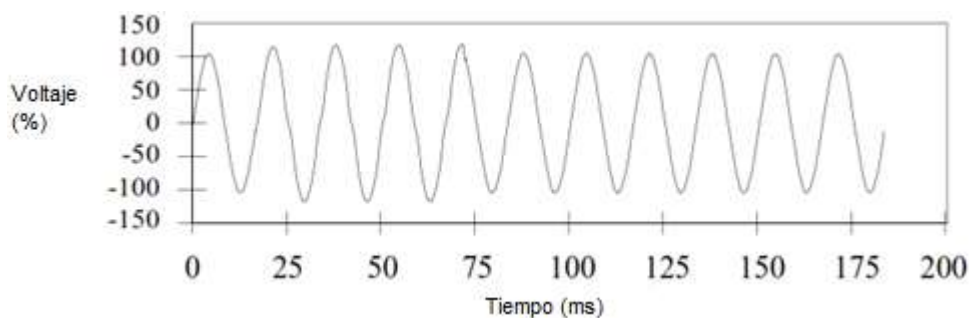


Figura 2.3. Forma de onda de un sobre voltaje momentáneo causado por una falla de línea a tierra. Fuente: IEEE Power and Energy Society. (2009).

2.3.3. Sobrevoltajes de larga duración

Son variaciones de voltaje de larga duración a la frecuencia del sistema en los que el valor de voltaje RMS sobrepasa el 110% del valor nominal, con la diferencia que estos sobrevoltajes duran más de 1 minuto. En la Figura 2.4 se observa una gráfica en donde el valor RMS del voltaje aumenta a más de 110% y se mantiene así por un periodo mayor a 1 minuto hasta que se reestablece de nuevo.

Causas: Normalmente son causados por operaciones de conmutación, como apagado de grandes cargas como motores o encendido de bancos de capacitores, aunque también pueden ser causados

por errores humanos, como mala configuración de los taps de un transformador y mala regulación de voltaje en el sistema eléctrico.

Efectos: Los sobrevoltajes de larga duración causan fallas y mal funcionamiento de equipos electrónicos y máquinas eléctricas (como motores), degradación del aislamiento de equipos y en el peor de los casos destrucción de equipos electrónicos y reducción de vida útil de equipos (como transformadores o motores).

Soluciones: Al igual que con los sobrevoltajes momentáneos, también se pueden utilizar dispositivos de protección contra sobretensiones (DPS), para proteger a los equipos contra voltajes excesivos. De igual forma también se emplean inductores cuando existen condiciones de baja carga.

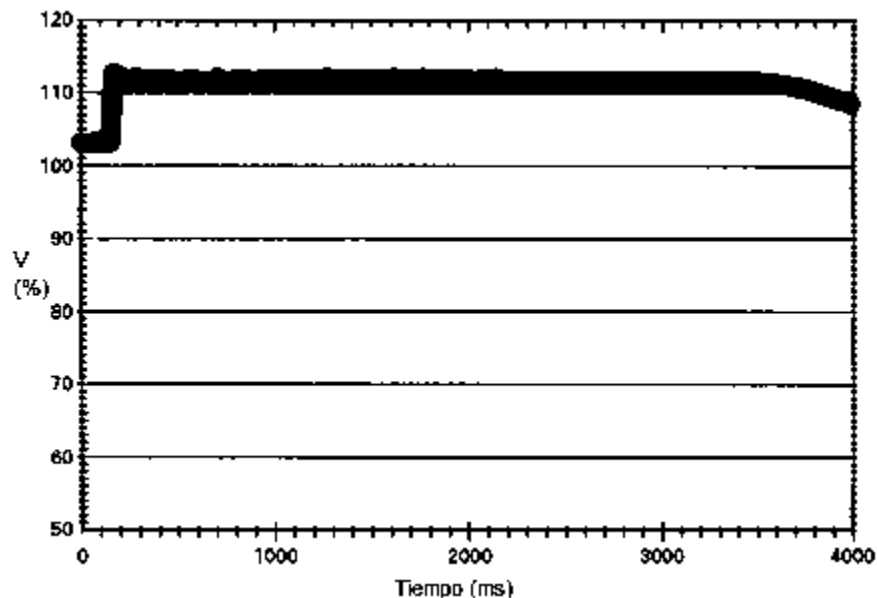


Figura 2.4. Gráfica de un sobrevoltaje de larga duración. Fuente: Kennedy. (2000).

2.3.4. Subvoltajes de larga duración

Son variaciones de voltaje en el que el valor de voltaje RMS cae a menos del 90% del valor nominal a la frecuencia fundamental y que tienen una duración mayor a 1 minuto. En la Figura 2.5 se muestra la forma de onda originada por un subvoltaje mayor a un minuto.

Causas: Generalmente son originados por operaciones de conmutación como por ejemplo el encendido de grandes cargas o el apagado de bancos de capacitores. Asimismo, pueden ser ocasionados por el fallo o pérdida de una línea de transmisión de cierta región o deliberadamente causados por la compañía suministradora de energía para reducir la carga, cuando los circuitos están sobrecargados o existen condiciones de exceso de carga.

Efectos: Los sub voltajes pueden causar que las revoluciones de los motores disminuyan o que la intensidad luminosa de los focos se atenúe, o incluso el apagado de ciertos equipos sensibles a las variaciones de voltaje.

Soluciones: Entre las soluciones se encuentran dispositivos de regulación de voltaje que reestablecen el voltaje a niveles normales como acondicionadores de línea.

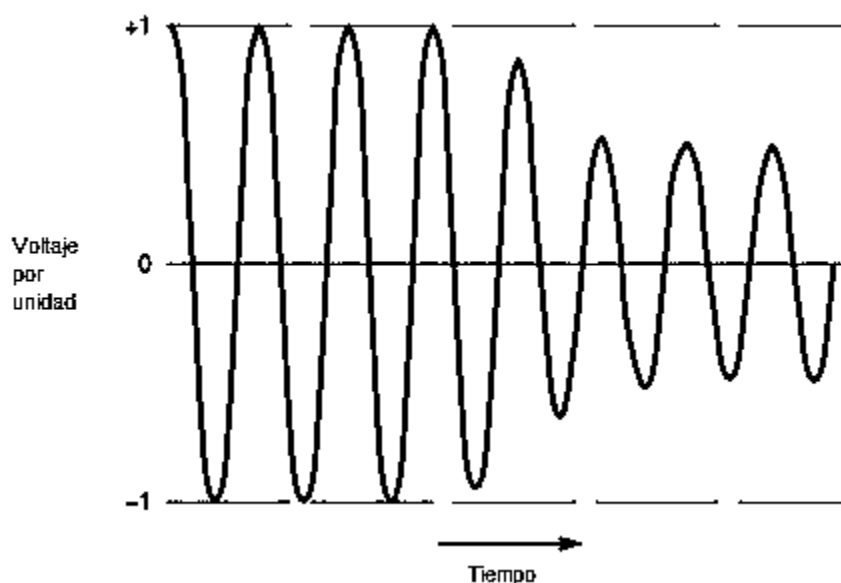


Figura 2.5. Gráfica de un subvoltaje de larga duración. Fuente: Kennedy. (2000).

2.3.5. Interrupciones

Es la caída casi total del voltaje en una o más fases en el que este disminuye a menos del 10% de su valor nominal. El estándar IEEE 1159-1995 establece que estas, de acuerdo a su duración, se clasifican en interrupciones momentáneas (entre 0.0083 segundos y 3 segundos), temporales (3 segundos a 1 minuto) y sostenidas o de larga duración (mayores a 1 minuto). En la Figura 2.6 se observa el efecto en la forma de onda de una interrupción momentánea.

Causas: Las causas de las interrupciones normalmente son accidentes que dañan y causan fallos en las líneas de transmisión y distribución como por ejemplo descargas atmosféricas, golpes de animales, árboles o automóviles contra las líneas de transmisión y malas condiciones atmosféricas como fuertes vientos o exceso de hielo o nieve sobre las líneas, aunque también pueden ser provocados por fusibles quemados, disparo de interruptores o incluso la interrupción del servicio por parte de la CFE.

Efectos: Pueden provocar que los equipos electrónicos y máquinas eléctricas se paren o dejen de funcionar afectando los procesos en oficinas e industrias y de esta forma causar pérdida de datos o pérdida de la producción en una industria, lo que conlleva a grandes pérdidas económicas a las empresas ya que interrupciones incluso de medio segundo pueden tardar horas en ser restablecidas.

Soluciones: Las soluciones incluyen dispositivos de suministro de energía como fuentes de alimentación ininterrumpida (UPS) o equipos motor-generador que entran en funcionamiento cuando una interrupción ocurre para proveer energía a los equipos y máquinas.

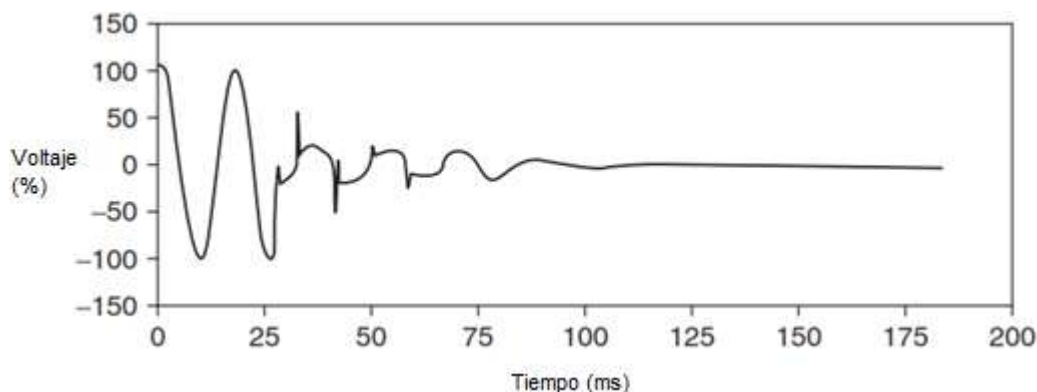


Figura 2.6. Forma de onda de una interrupción de aproximadamente 0.17 segundos de duración. Fuente: Kusko & Thompson (2007).

2.3.6. Desbalance de fases

El desbalanceo de voltaje ocurre cuando las tres fases de voltaje en un sistema trifásico varían en magnitud y en su ángulo de fase, el cual, en un sistema trifásico balanceado debe de ser de 120° entre cada fase de voltaje. Se dice que el sistema trifásico está desbalanceado cuando existe este problema. La Figura 2.7 muestra tres señales cuyas magnitudes y ángulos de fase no son iguales.

Causas: la principal causa del desbalance de voltajes es la presencia de cargas monofásicas en un sistema trifásico, aunque también puede deberse a un malfuncionamiento de bancos capacitores, cargas mal distribuidas, contactos deteriorados o conexiones sueltas debido a la falta de mantenimiento.

Efectos: el desbalanceo de voltaje produce principalmente sobrecalentamiento, fallos y malfuncionamiento en motores, transformadores o cualquier carga trifásica, ya que por ejemplo en los motores, provoca que estos consuman más corriente aumentando las pérdidas de energía. También el desbalance de voltajes genera que corrientes desbalanceadas circulen por el conductor neutro.

Soluciones: las soluciones pueden consistir en evitar integrar cargas monofásicas en un sistema trifásico, así como también proporcionar mantenimiento preventivo a bancos capacitores que pudieran generar desbalanceo debido a algún fallo en estos, aunque la principal solución consiste en realizar un balance de cargas para que la energía suministrada por cada fase alimente a cada carga adecuadamente.

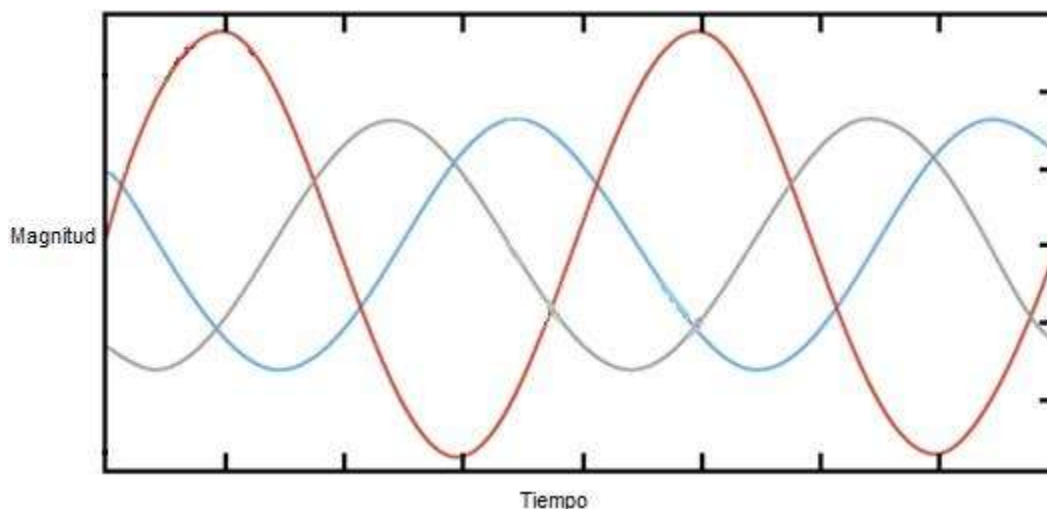


Figura 2.7. Tres voltajes desbalanceados diferentes en magnitud y ángulo de fase. Fuente: <https://cauk.tv/articles/power-quality-issues-voltage-and-phase-balancing/>.

2.3.7. Fluctuaciones de voltaje

Son variaciones de voltaje en las que la magnitud de este oscila entre un 105% y un 95% de su valor nominal. Las fluctuaciones de voltaje causan el efecto conocido como “flicker”, que es el “parpadeo” que estas fluctuaciones producen en ciertas cargas como lámparas. El flicker es un fenómeno de baja frecuencia, ya que puede ser percibido por el ojo humano. A diferencia de las caídas de tensión y sobrevoltajes momentáneos, las fluctuaciones de voltaje y el flicker ocurren de forma sistemática e intermitente. En la Figura 2.8 se observa la forma de onda típica cuando hay fluctuaciones de tensión presentes.

Causas: la mayor fuente de las fluctuaciones de voltaje se debe a la presencia de cargas cuyo consumo de corriente cambie o varíe de manera muy rápida como, por ejemplo, hornos y soldadoras de arco eléctrico.

Efectos: el efecto más común que causan las fluctuaciones de voltaje es el parpadeo de equipos de iluminación que puede causar irritación o malestar en algunas personas, este efecto es conocido como “flicker”. También pueden causar malfuncionamiento en equipos muy sensibles a las variaciones de tensión.

Soluciones: para eliminar las fluctuaciones de voltaje en equipos que las producen se utilizan principalmente compensadores estáticos de potencia reactiva (SVC), estos equipos son muy utilizados y muy importantes en la industria minera y siderúrgica ya que permiten entregar una potencia de mejor calidad. También se utilizan acondicionadores de línea o reguladores de voltaje para mantener un voltaje estable y regulado.

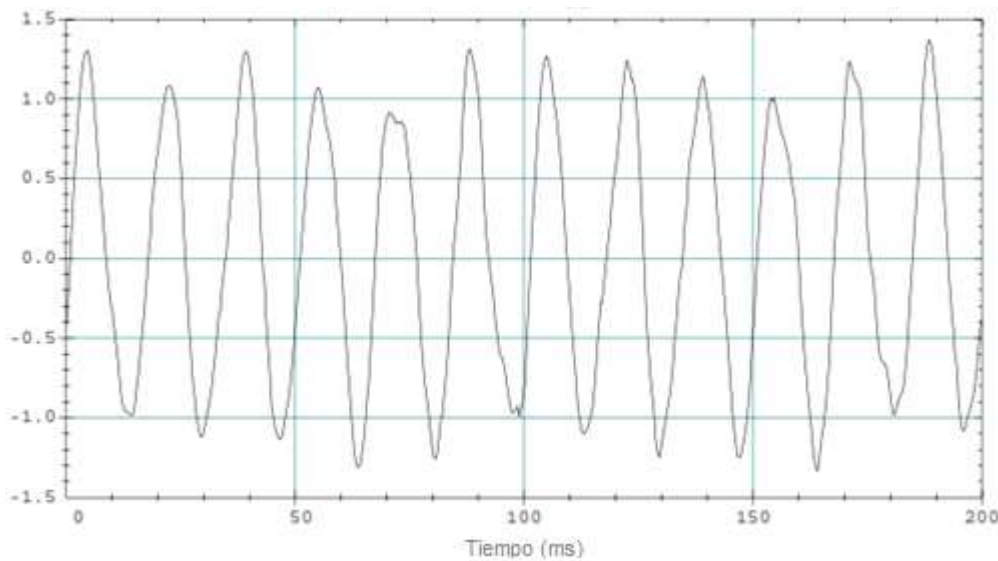


Figura 2.8. Fluctuaciones de voltaje causadas por la operación de un horno de arco. Fuente: IEEE Power and Energy Society. (2009).

2.3.8. Variaciones de frecuencia

Son desviaciones y alteraciones sobre el valor nominal o fundamental de la frecuencia que en nuestro país se considera de 60 Hz, en los que la frecuencia puede aumentar o disminuir. En la Figura 2.9 se muestra la variación de la frecuencia de una señal de voltaje en la que la frecuencia aumenta por lo que el periodo de la onda disminuye al ser estos dos parámetros inversamente proporcionales.

Causas: Las variaciones de frecuencia normalmente son ocasionadas por variaciones entre la generación y la carga, es decir, cuando la generación de energía es mayor al consumo (carga) se produce un aumento en la frecuencia del sistema y cuando la carga es mayor a la generación se produce una disminución en la frecuencia. Estos desequilibrios entre generación y carga que originan variaciones en la frecuencia pueden ser debidos a situaciones como cuando una gran parte de la carga es desconectada, cuando existe una pobre fuente de alimentación en el sistema, cuando una parte de la generación es desconectada y fallas en el sistema de potencia.

Efectos: Las variaciones de frecuencia afectan principalmente a motores ya que un aumento en la frecuencia nominal del motor puede provocar que estos giren más rápido, consuman más corriente, se sobrecalienten y disminuyan su vida útil, o, por el contrario, una disminución en la frecuencia nominal de un motor puede generar que este funcione de forma ineficaz.

Soluciones: Las soluciones comprenden dispositivos llamados variadores de frecuencia o sistemas de regulación de frecuencia los cuales se encargan de mantener la frecuencia en niveles óptimos, disminuyéndola o aumentándola para mantenerla en su valor nominal. los variadores de frecuencia se sitúan entre la fuente de alimentación (generador) y los motores protegiendo a estos últimos de alteraciones en esta y mejorando su eficiencia.

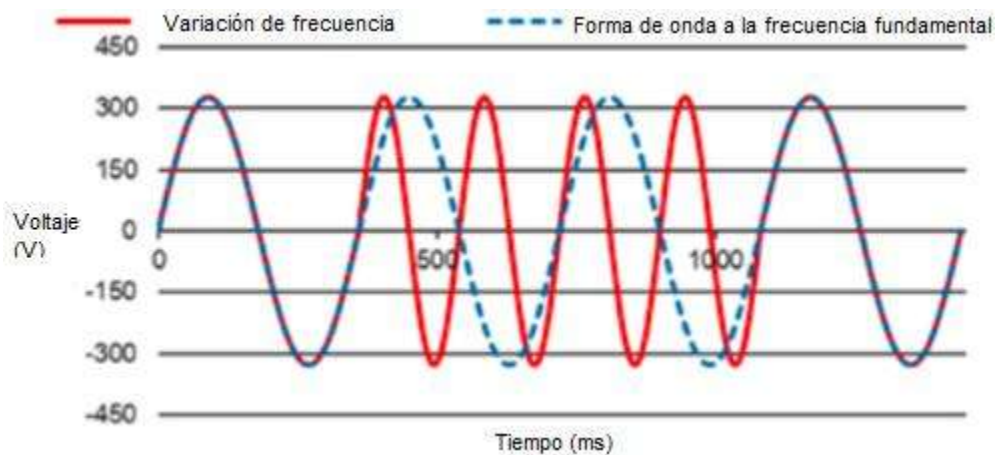


Figura 2.9. Variaciones de frecuencia en una onda de voltaje. Fuente: PQ BARCON (2021)

2.3.9. Transitorios

Son incrementos y decrementos repentinos y discontinuos de corta duración de la forma de onda del voltaje o de la corriente y pueden tener polaridad tanto positiva como negativa.

Los parámetros que identifican a los transitorios son su frecuencia, amplitud máxima de onda, la duración de subida y bajada y el tiempo en que se restablece el voltaje o corriente al nivel normal.

Existen dos tipos: impulsivos y oscilatorios. Ambos producen cambios repentinos en la frecuencia del estado estable. La diferencia entre ambos se encuentra en que los transitorios impulsivos son bajadas o subidas repentinas del voltaje o corriente en una sola polaridad ya sea positiva o negativa y los transitorios oscilatorios son caídas y aumentos alternados que ocurren en ambas polaridades de la señal (positiva y negativa). otra diferencia entre ambos está en que los transitorios oscilatorios no se disipan tan rápido como los impulsivos. En la Figura 2.10 se observa el efecto provocado por un transitorio oscilatorio.

Causas: los transitorios impulsivos son generados en gran medida por descargas atmosféricas, aunque también son producto de descargas electrostáticas, conmutación de cargas y encendido de capacitores principalmente. Los transitorios oscilatorios ocurren cuando se genera resonancia ya sea por un rayo o por transitorios impulsivos generados por capacitores, encendido de bancos capacitores, conmutación de líneas del sistema de potencia, energización de transformadores y conmutación de cargas inductivas como motores.

Efectos: los transitorios producen efectos muy dañinos principalmente a equipos electrónicos como chips de computadoras generando ya sea desde la pérdida de datos importantes hasta la destrucción de los chips.

Soluciones: para contrarrestar los efectos producidos por los transitorios impulsivos se emplean supresores de sobrevoltajes transitorios (Transient Voltage Surge Supressors o TVSS por sus siglas en inglés) y dispositivos de protección contra sobretensiones (SPD), acciones como eliminación de

electricidad electrostática y uso de pararrayos conocidos en inglés como “surge arresters”, colocados en las torres de las líneas de transmisión contra posibles descargas atmosféricas.

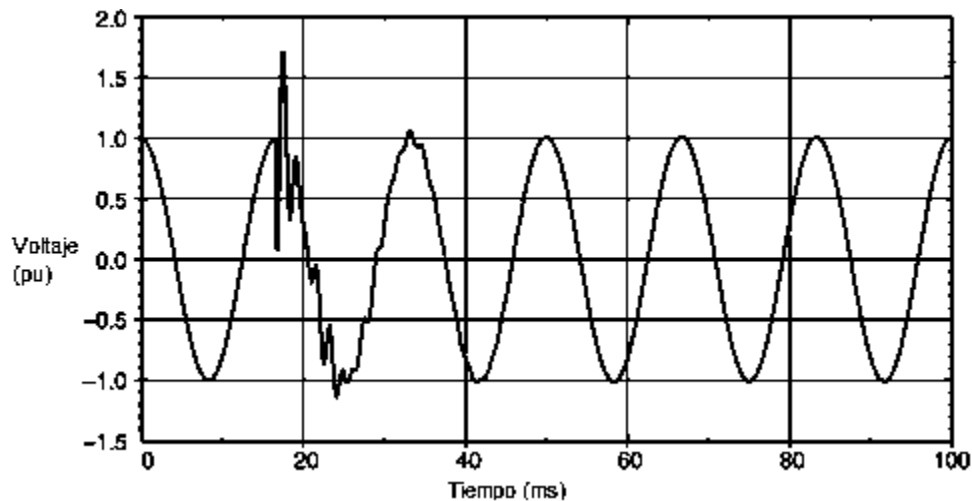


Figura 2.10. Transitorio oscilatorio causado por la energización de un banco de capacitores. Fuente: Dugan, McGranaghan, Santos, Beaty. (2004).

2.3.10. Armónicos

Los armónicos son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental de la onda de voltaje o corriente. Estos múltiplos pueden ser dos, tres, cuatro, cinco, seis, etc., veces la frecuencia de la fundamental. Los armónicos se agregan o combinan con la onda fundamental de corriente o voltaje y la distorsionan disminuyendo así la “calidad” de la onda. Los armónicos causan distorsión en la forma de onda y suceden en el estado estable. De acuerdo a Kennedy (2000), los armónicos son la mayor causa de distorsión de la forma de onda sinusoidal.

Los armónicos tienen nombre, frecuencia y secuencia (Fluke and Philips, s/f). Por ejemplo, la frecuencia fundamental de la onda sinusoidal de corriente o voltaje es 60 Hz y tiene secuencia positiva, la segunda armónica es dos veces la frecuencia fundamental (120 Hz) y tiene secuencia negativa, la tercera armónica es tres veces la frecuencia fundamental, es decir, 180 Hz y es de secuencia cero, la cuarta armónica es cuatro veces la frecuencia fundamental, o sea 240 Hz y es de secuencia positiva, la quinta armónica es cinco veces la frecuencia de la fundamental, es decir 300 Hz y tiene secuencia negativa, etc. La Figura 2.11 muestra la distorsión causada por un variador de velocidad a una señal de corriente.

Causas: la principal fuente de armónicos en los sistemas eléctricos es debido a las *cargas no lineales*, este tipo de cargas absorben corriente de una forma intermitente y discontinua durante cada ciclo o su impedancia no es constante durante cada ciclo lo que provoca que la forma de onda se distorsione. Entre las cargas no lineales podemos encontrar dispositivos como:

- Sistemas de electrónica de potencia
 - Convertidores Inversores

- Convertidor Rectificadores
 - Rectificadores Controlados de Silicio (SCR)
 - Fuentes Conmutadas (SMPS)
 - Drives de Motor (PWM)
 - Convertidores Estáticos de Potencia (SPC)
 - Fuentes de Alimentación Ininterrumpida (UPS)
 - Dispositivos de Velocidad Ajustable (ASD) o Variador de Velocidad
 - Cicloconvertidores
 - Compensadores Estáticos de Potencia Reactiva (SVC)
 - Controladores de Potencia Estado Sólido (SSPC)
 - Balastros electrónicos
 - Controladores de fase de CA
- Dispositivos de arco, hornos de arco

Como se puede observar en la clasificación anterior, prácticamente casi todas las fuentes que generan armónicos son dispositivos de electrónica de potencia y de los cuales de acuerdo al *IEEE 519-2014 (Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems)*, los convertidores estáticos de potencia (SPC) son las cargas no lineales más utilizadas en la industria. Cabe mencionar también que cada carga no lineal generará un tipo o porcentaje específico de distorsión en la forma de onda.

Efectos: los armónicos producen efectos nocivos en máquinas eléctricas y dispositivos eléctricos y electrónicos como, por ejemplo:

- Motores: torque reducido, calentamiento, ineficiencia y pérdidas, vibraciones y reducción de vida útil.
- Transformadores: pérdidas en el hierro, ruido, calentamiento, daño a aislamiento y reducción de vida útil.
- Conductores eléctricos: calentamiento, aumento de resistividad y pérdidas de energía.
- Capacitores: calentamiento, daños a capacitores, corto circuitos, fallas en protecciones de bancos capacitores y resonancia.
- Protecciones eléctricas: saltos anticipados de interruptores y malfuncionamiento.
- Equipos electrónicos: mal funcionamiento o daño a equipos sensibles.
- Instrumentos de medición: mediciones erróneas de corrientes, voltajes o potencia.
- Sistemas de transmisión y distribución: transmisión de armónicos sobre sistemas eléctricos y afectación a otros usuarios finales.

Soluciones: para la mitigación de armónicos se emplean diversos dispositivos que ayudan a eliminar ya sea un armónico en particular o un grupo de ellos. Entre estos dispositivos están filtros estáticos, dinámicos o híbridos conectados en sus distintas configuraciones, transformadores como por

ejemplo transformadores zigzag, y reactores. Ya que cada carga no lineal puede inyectar a la red un tipo o conjunto de armónicos específicos cada solución será única y se seleccionará y dimensionará el filtro de acuerdo al problema que se tenga.

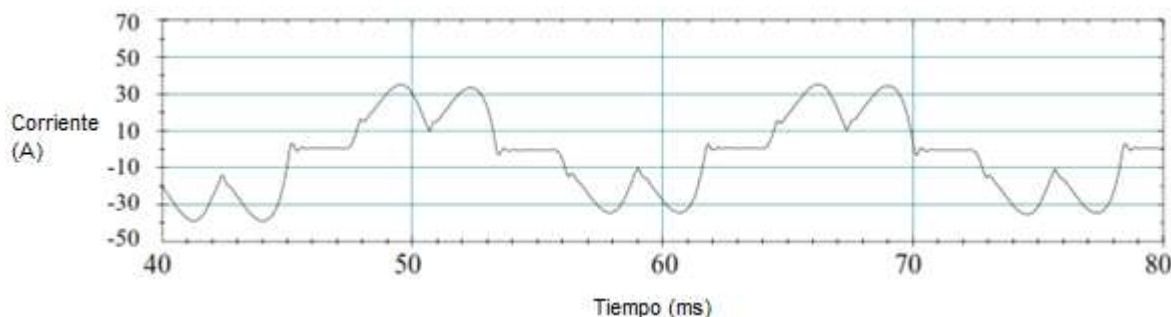


Figura 2.11. Distorsión generada por los armónicos producidos por un variador de velocidad. Fuente: IEEE Power and Energy Society. (2009).

2.3.11. Inter armónicos

Los inter armónicos son voltajes o corrientes cuyas frecuencias son múltiplos no enteros de la frecuencia fundamental de voltaje o corriente, ellos se suman a la onda fundamental y la distorsionan. Por ejemplo, los inter armónicos pueden ser 1.6, 3.4, 6.5, etc. veces la frecuencia fundamental. Los inter armónicos al igual que los armónicos causan distorsión en la forma de onda tal como se aprecia en la Figura 2.12.

Causas: el origen principal de los inter armónicos es la conversión de frecuencia debida a convertidores estáticos de frecuencia (SFC), dispositivos de velocidad ajustable (ASD), variadores de frecuencia (VFD) y a los ciclo convertidores. Estos últimos, modifican la frecuencia suministrada a grandes motores lineales aumentándola o disminuyéndola. Los inter armónicos también pueden ser causados por dispositivos que generan arco y hornos y motores de inducción.

Efectos: afectan principalmente a las comunicaciones por líneas eléctricas (PLC) y provocan fluctuaciones de voltaje que a su vez generan flicker en iluminación fluorescente y monitores.

Soluciones: para mitigar los inter armónicos en los sistemas de potencia principalmente se utilizan filtros, así como acondicionadores de línea y sistemas de alimentación ininterrumpida (UPS).

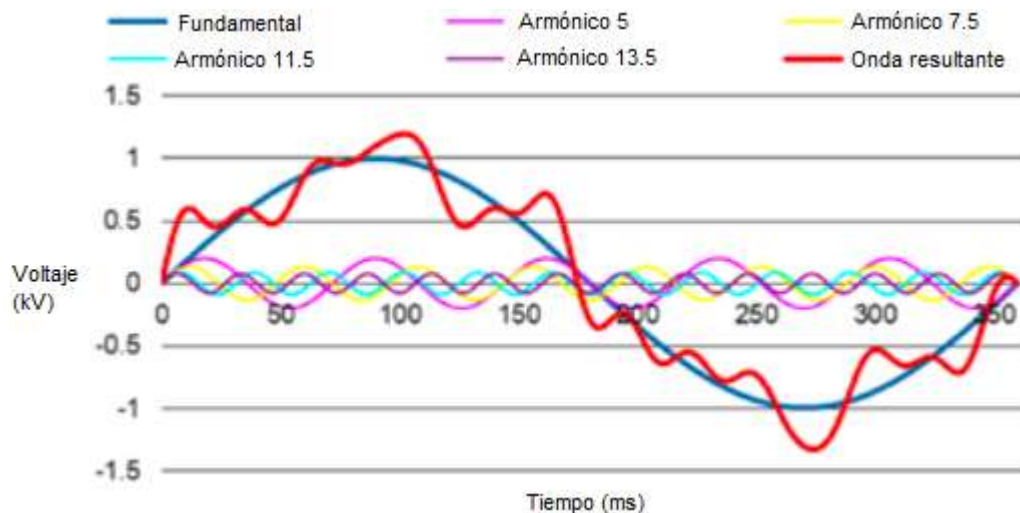


Figura 2.12. Señal de voltaje distorsionada por inter armónicos. Fuente: PQ BARCON 2021.

2.3.12. Ruido eléctrico

Es un problema de calidad de energía que genera distorsión en la forma de onda y que sucede en el estado estable. Son señales indeseables de ondas de voltaje o corriente de alta frecuencia (aunque menores de 200 kHz) que se superponen a la onda fundamental. El ruido puede encontrarse en los conductores de fase o neutros. El ruido eléctrico también causa distorsión en la forma de onda tal como se muestra en la Figura 2.13.

Causas: el ruido eléctrico es originado por interferencia electromagnética causada por estaciones de radio o televisión, dispositivos de electrónica de potencia, dispositivos de velocidad ajustable (ASD), rectificadores de estado sólido, conmutación de fuentes de alimentación, líneas cercanas de alto voltaje, soldadores de arco y circuitos de control, además de que un pobre sistema de tierras puede hacer que los problemas por ruido eléctrico empeoren ya que el ruido no se podría llevar a tierra adecuadamente.

Efectos: el ruido puede afectar dispositivos electrónicos como computadoras o equipos de telecomunicaciones, provocando pérdidas de datos, malfuncionamiento, o incluso dañando los componentes de estos equipos.

Soluciones: para eliminar o mitigar los efectos producidos por el ruido se pueden realizar diversas acciones como, por ejemplo: alejar los equipos sensibles a la interferencia electromagnética, alejar las fuentes de interferencia electromagnética lejos de los equipos lo suficiente para que no causen efectos en estos, instalar filtros de ruido, mejorar el sistema de tierras, blindar el cableado para que este no sea afectado por la interferencia, blindar los equipos sensibles e instalar anillos anticorona para atenuar los campos eléctricos producidos por líneas de alto voltaje que puedan afectar a otros conductores.

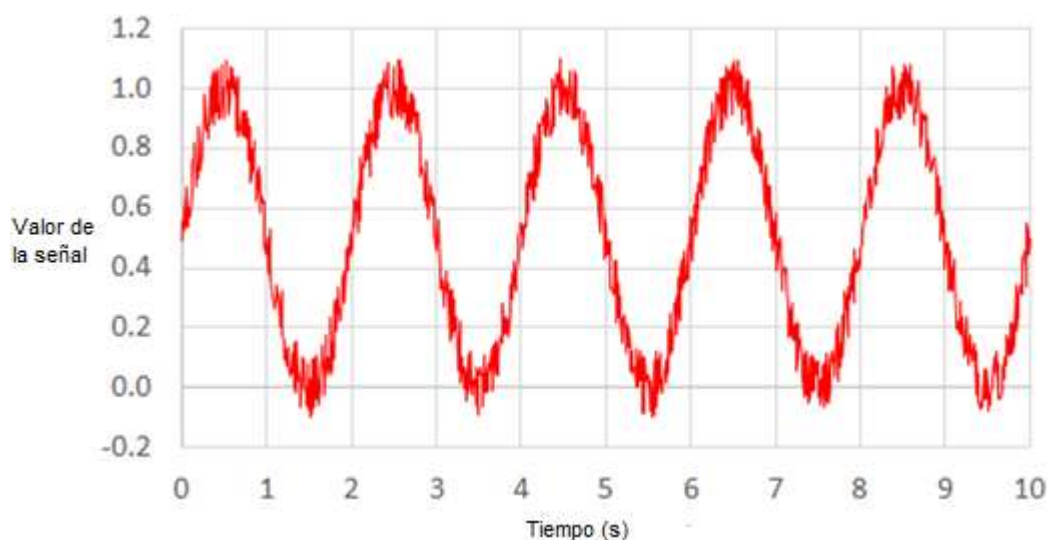


Figura 2.13. Distorsión en una señal senoidal provocada por ruido eléctrico (Fuente: <https://www.sciencebuddies.org/teacher-resources/lesson-plans/analog-vs-digital-signals>).

2.3.13. Muestras en la tensión

Es un problema de distorsión de la forma de onda que sucede en el estado estable. Conocidas en inglés como “notching”, son alteraciones y perturbaciones en el voltaje que ocurren de forma periódica y repetitiva, y que provocan “hendiduras” en la forma de onda del voltaje. En la Figura 2.14 se observan muescas en la tensión sobre una señal de voltaje producidas por un rectificador trifásico.

Causas: las muescas en la tensión son producidas por dispositivos de electrónica de potencia, dispositivos de velocidad regulable (ASD) y por dimmers o atenuadores de luz.

Efectos: generalmente causan malfuncionamiento de equipos electrónicos como computadoras y pérdida de datos.

Soluciones: se pueden emplear equipos de filtrado, reactancias inductivas, sistemas de alimentación ininterrumpida (UPS) o simplemente aislar las cargas sensibles.

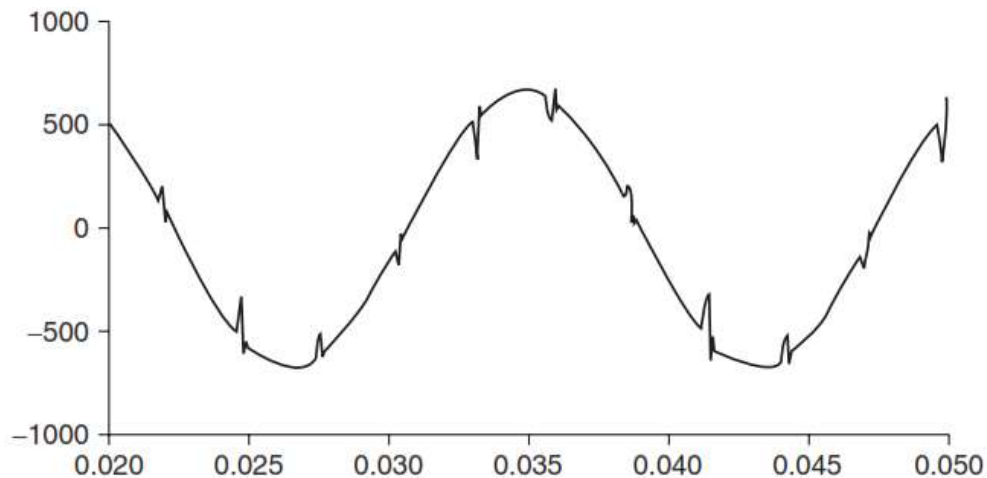


Figura 2.14. Muestras en la tensión causadas por un convertidor trifásico. Fuente: Kusko & Thompson. (2007).

2.3.14. Desplazamiento de corriente directa

Es un fenómeno de distorsión de la forma de onda que ocurre en el estado estable, en inglés conocido como “DC Offset”, son voltajes o corrientes de corriente directa en los sistemas de potencia de corriente alterna (Pq Barcón, 2021). En la Figura 2.15 se muestra una señal de voltaje alterno desplazada por la presencia de un voltaje de CD (línea punteada).

Causas: el DC offset es generado por perturbaciones geomagnéticas, por fallas de fuentes de alimentación de CA/CD en el sistema y rectificación de media onda.

Efectos: normalmente causan saturación en transformadores provocando que estos se sobrecalienten y disminuyan su vida útil. También puede afectar a los conductores de puesta a tierra y otros conductores eléctricos causando que estos se deterioren por erosión electrolítica.

Soluciones: la solución más simple es remplazar el equipo que está fallando. Es recomendable tener equipos modulares que se puedan reemplazar fácilmente.

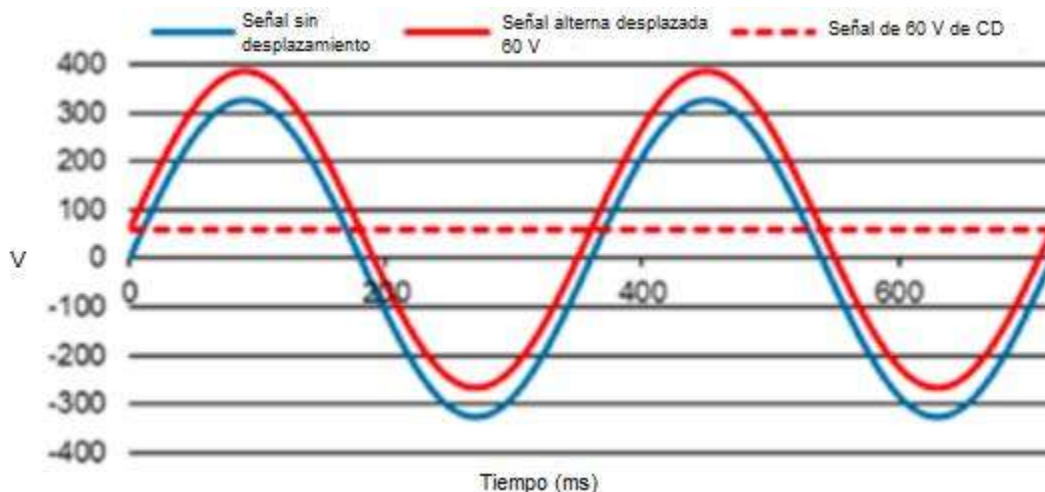


Figura 2.15. Señal alterna desplazada debido a la presencia de un voltaje de CD. Fuente: PQ BARCON 2021.

2.4 Importancia y ventajas de una buena calidad de la energía

La calidad de la energía eléctrica en las últimas décadas se ha convertido en una de las áreas más importantes dentro de la ingeniería eléctrica debido al aumento de cargas sensibles y causas de problemas de calidad de energía como convertidores de electrónica de potencia. En la actualidad, prácticamente todos los procesos industriales u operaciones en oficinas dependen de máquinas eléctricas y equipos electrónicos que para funcionar correctamente requieren que la señal de voltaje o corriente se encuentre dentro de los parámetros establecidos por los estándares.

Al existir condiciones de una buena calidad de la energía ya sea del lado de la compañía suministradora y en la parte del sistema de los usuarios las ventajas son que se evitan importantes efectos negativos causados por problemas en la calidad de la energía tales como:

- Pérdida de datos importantes en las empresas.
- Reducción de vida útil de equipos electrónicos.
- Pérdida de producción en las industrias.
- Ineficiencia en máquinas industriales.
- Destrucción de equipos electrónicos.
- Daño y reducción de vida útil a máquinas eléctricas industriales.
- Pérdidas económicas a empresas e industrias.
- Pérdidas de energía y por lo tanto pérdidas económicas al aumentar costos energéticos.
- Ineficiencia energética en los procesos industriales.
- Falta de confiabilidad y seguridad entre compañía suministradora y usuarios finales.
- Evitar multas por incumplimiento del código de red en industrias.

Por lo tanto, al haber mencionado las grandes desventajas que causan los problemas de calidad de la energía, se puede decir que tener estos problemas es inconcebible ya que pueden comprometer las finanzas de las empresas e industrias, y por ello, tener una buena calidad en la energía eléctrica se ha convertido en básico dentro de la industria eléctrica y a tal grado que cuando se diseña un sistema eléctrico desde un inicio se deben considerar posibles problemas de calidad de la energía que se pueden presentar al interconectarse a la red (Singh, Chandra, Al-Haddad, 2015).

2.5. Conclusión del capítulo 2

Al haber concluido el capítulo dos y haber repasado los distintos problemas o perturbaciones de la calidad de la energía eléctrica, se puede notar que los efectos negativos y daños que estos problemas eléctricos causan sobre los sistemas eléctricos pueden llegar a ser graves para dichos sistemas y todos los equipos y máquinas conectados a ellos, es por esa razón que, las principales soluciones a esos problemas eléctricos son la implementación de equipos especiales para acondicionar las señales de voltaje y corriente y mitigar los problemas de calidad eléctrica.

Capítulo 3: Interconexión de sistemas eólicos y convertidores de electrónica de potencia

3.1. Introducción

En este capítulo se mencionan de forma general las partes de los aerogeneradores que en esta tesis también se les llama sistemas eólicos, ya que están conformados por un conjunto de subsistemas y elementos que se encargan de transformar la energía eólica en eléctrica. También es este capítulo, se describe brevemente la configuración de interconexión de los aerogeneradores con la red eléctrica que es más utilizada actualmente en la energía eólica y la cual se emplea junto con el tipo de convertidor que se va a modelar y simular, así como los elementos y convertidores de potencia que existen actualmente en aplicaciones eólicas. Es muy importante conocer los tipos de configuraciones de interconexión de sistemas eólicos y los convertidores de potencia que se usan hoy en día en la energía eólica, ya que es esa relación la que propicia que problemas de calidad eléctrica como los armónicos se originen en las centrales eléctricas de generación eólicas actuales.

3.2. Aerogeneradores

Un aerogenerador o turbina eólica es una máquina que genera electricidad mediante un proceso de captación de la energía cinética del viento por medio de palas de diseño aerodinámico, de tal forma que cuando el viento pasa a través de ellas se crea un efecto de sustentación aerodinámica similar a lo que pasa en los aviones. Estas palas forman parte de un rotor que a su vez está unido a un eje de baja velocidad, al girar las palas y el rotor crean un torque en el eje de baja velocidad que también lo hace girar, a continuación, una caja multiplicadora de cambios aumenta las revoluciones por minuto del eje de baja velocidad con la finalidad de hacer girar a un eje de alta velocidad a suficientes revoluciones por minuto para que el generador eléctrico que está conectado al eje de alta velocidad pueda producir potencia útil. La Figura 3.1 muestra una fotografía de un aerogenerador de la marca Siemens-Gamesa modelo SG 5.8-170 con una potencia nominal de 5.8 MW, diámetro del rotor de 170 m y una altura de 165 m hasta el rotor.



Figura 3.1. Aerogenerador SG 5.8-170. Fuente: siemensgamesa.com.

Actualmente, los generadores eólicos principalmente se emplean en grandes centrales eólicas alrededor del mundo produciendo electricidad con fines comerciales, la potencia de estas turbinas instaladas en parque eólicos ronda entre 1.5 MW y 6 MW. Se puede decir que un aerogenerador es la parte central de central eólica. En la Figura 3.2 se muestra un esquema de las principales partes de un aerogenerador de eje horizontal convencional.

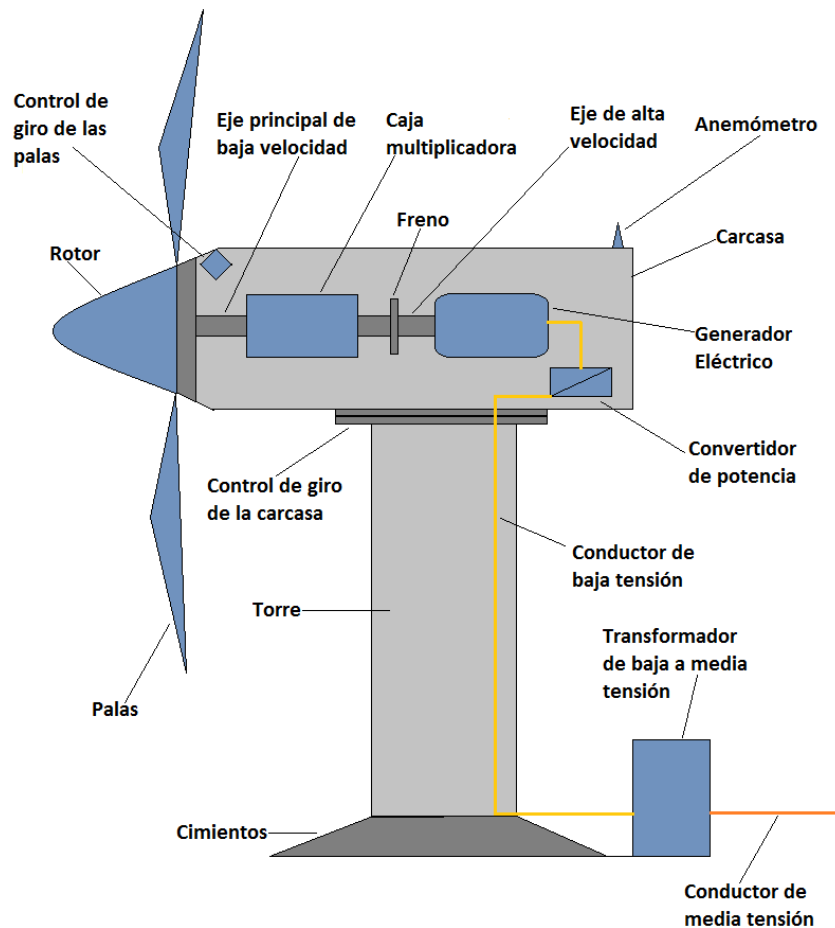


Figura 3.2. Partes principales de un aerogenerador.

3.3. Subsistemas y componentes de un aerogenerador

Un aerogenerador en sí es un sistema conformado por diferentes componentes o subsistemas eléctricos, mecánicos y electrónicos que en conjunto realizan un proceso de conversión de energía cinética-mecánica-eléctrica (Carta et al., 2009). La Figura 3.3 muestra un esquema de un aerogenerador en donde se indican todos los subsistemas que lo conforman. Todos los subsistemas de una turbina eólica se explican brevemente a continuación.

- Subsistema de captación eólica: es el encargado de recolectar la energía cinética del viento y transformarla y transmitirla a energía mecánica de rotación al subsistema de transmisión. Está conformado por el rotor que a su vez se conforma por las palas y el buje.
- Subsistema de transmisión mecánica: principalmente está compuesto por los ejes de baja y alta velocidad y una caja de cambios. La caja de cambios es el elemento más importante ya que es la encargada de aumentar la baja cantidad de revoluciones del eje de baja velocidad a una cantidad alta de revoluciones de giro al eje de alta velocidad para hacer operar al

generador eléctrico de forma adecuada. Otros componentes de este subsistema son el freno, los acoplamientos, y los cojinetes.

- Subsistema de generación eléctrica: es el encargado de transformar la energía mecánica transmitida por los ejes a energía eléctrica y su elemento principal es el generador eléctrico.
- Subsistema de adecuación de la potencia generada: este subsistema puede decirse que es parte del aerogenerador desde hace apenas unas dos décadas y está integrado por el convertidor de electrónica de potencia el cual se encarga principalmente de modificar la frecuencia variable de la potencia generada a un nivel de frecuencia constante para la interconexión con la red. El convertidor de potencia, como se verá más adelante, puede realizar otras funciones muy importantes, entre las que se encuentra el control de la potencia generada por el aerogenerador, por lo tanto, puede decirse que el convertidor también pudiera ser parte del subsistema de control de la turbina.
- Subsistema de orientación de la turbina: su función es la de alinear la góndola y el rotor de la turbina con la dirección dominante del viento para extraer la mayor cantidad de energía. Se compone de un motor para hacer girar la góndola y a veces de frenos para mantenerla fija. El subsistema de orientación se apoya de sensores que le indican en todo momento la dirección del viento.
- Subsistema de control de la turbina: este subsistema es de gran importancia, ya que involucra todos los aspectos relacionados con el control de la turbina como, por ejemplo, el control de la orientación del rotor con respecto a la dirección del viento, control de la energía producida por el generador, el control del ángulo de las palas, etc.
 - Este subsistema lo conforman sensores, circuitos eléctricos y microprocesadores y su función principal es la de garantizar que la turbina genere una mayor cantidad de energía y que funcione de forma segura y óptima.
- Subsistema de protección: está conformado por la góndola o carcasa y es el encargado de proteger componentes tales como el generador eléctrico, la caja de cambios, los ejes de alta y baja velocidad, etc.
- Subsistema de soporte: está compuesto por la torre y los cimientos y su función es la de sostener la góndola con todos los elementos en su interior y los conectados a esta como es el rotor, palas, generador, etc.

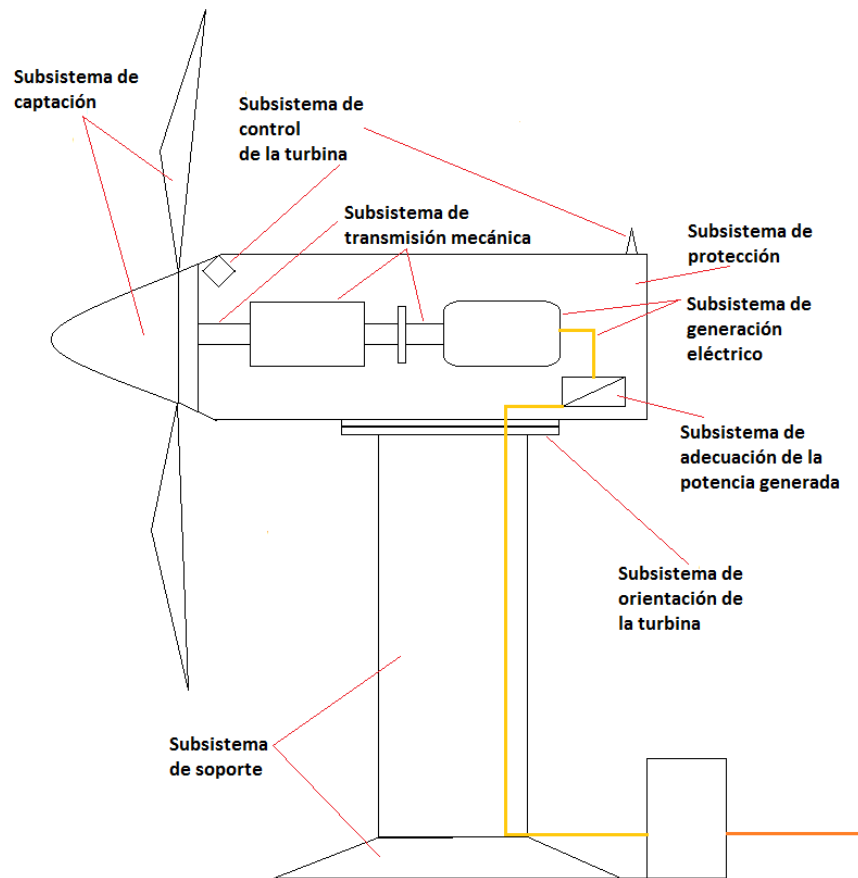


Figura 3.3. Subsistemas de un aerogenerador.

3.4. Generación de energía eólica

De manera general, el proceso de generación de energía de un aerogenerador, su recolección dentro del parque y su consiguiente inyección a la red es el siguiente: el generador de la turbina eólica genera energía trifásica en baja tensión (menos de 1000 V), después esa energía en baja tensión se aumenta a media tensión (entre 20 kV a 35 kV) mediante un transformador elevador montado ya sea a un lado de la torre del aerogenerador o dentro de este, ya que la tensión en el circuito interior del parque se recolecta en media tensión para disminuir pérdidas, después esa energía en media tensión se hace pasar por los transformadores elevadores que se encuentran en la subestación eléctrica para aumentarla a alta tensión para que finalmente vaya a las líneas de transmisión eléctrica (Villarrubia, 2013). En la Figura 3.4 se muestra un diagrama unifilar simplificado de los componentes principales en el proceso de generación e interconexión de un parque eólico.

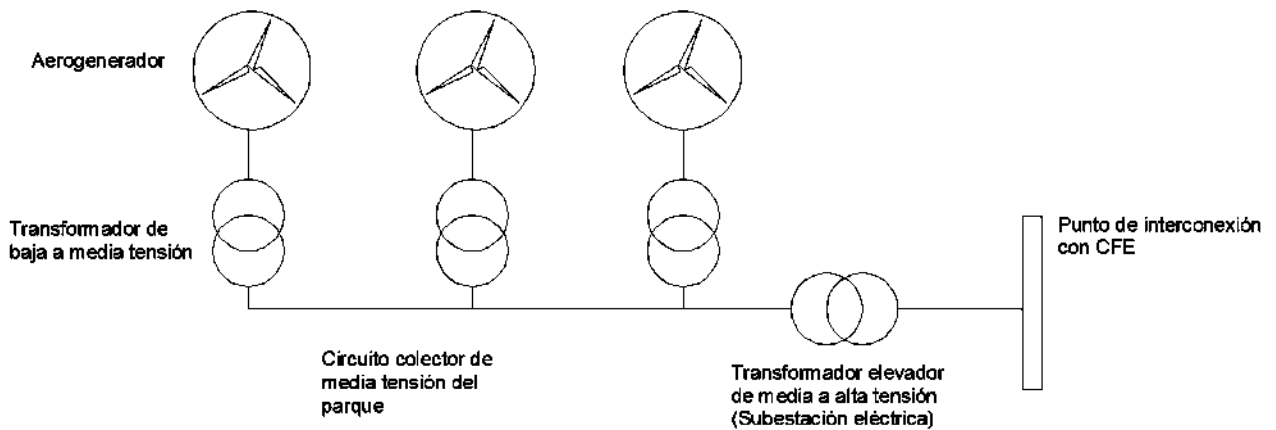


Figura 3.4. Diagrama unifilar simplificado de la interconexión de un parque eólico.

3.5. Configuraciones de interconexión de aerogeneradores

Hasta hoy en día existen varios tipos de configuraciones y arreglos mediante los cuales se pueden interconectar los aerogeneradores con la red eléctrica. Estas configuraciones de interconexión de aerogeneradores con la red están diferenciadas y determinadas principalmente por la velocidad del rotor a la que operan, la cual puede ser velocidad fija o velocidad variable y también por el tipo de generador eléctrico que emplean.

Generalmente, la velocidad del rotor a la que operan determinará si se usan convertidores de electrónica de potencia, aunque en realidad todas las subcategorías de turbinas que operan a velocidad de rotor variable utilizan convertidores de electrónica de potencia, las cuales son las cargas no lineales que producen distorsión armónica, la cual se debe de eliminar e impedir que llegue a la red de transmisión eléctrica. De acuerdo a la velocidad del rotor a la que operan, las dos grandes categorías en las que se clasifican los aerogeneradores son:

- A. *Aerogeneradores cuyo rotor opera a velocidad del rotor fija*
- B. *Aerogeneradores cuyo rotor opera a velocidad del rotor variable*

A. Aerogeneradores cuyo rotor opera a velocidad del rotor fija:

En este tipo de configuración la velocidad del rotor se mantiene fija (o casi fija con poco de variación permisible) y se mantiene así en relación con la frecuencia de la red. Operar el rotor de un aerogenerador a velocidad fija tiene grandes desventajas ya que este solo puede generar potencia a un rango muy particular y reducido de velocidades del viento y de esa forma se disminuye en gran medida la cantidad de energía eléctrica producida. Además, operar el rotor velocidad fija cuando la velocidad del viento aumenta, hace que el esfuerzo aumente en los componentes mecánicos, lo que puede causar fluctuaciones de voltaje en la red. Es por estas razones que la operación a velocidad

fija fue la configuración dominante durante la década de los años 1990's, sin embargo, en la actualidad prácticamente ya no es empleada (Ackerman, 2005).

Comúnmente, los aerogeneradores velocidad fija emplean generadores de inducción de jaula de ardilla (SCIG) conectados directamente a la red. También utilizan arrancadores suaves para limitar las corrientes de arranque y bancos capacitores para suministrar potencia reactiva al generador. En la Figura 3.5 se muestra un esquema de la configuración de este tipo de aerogenerador.

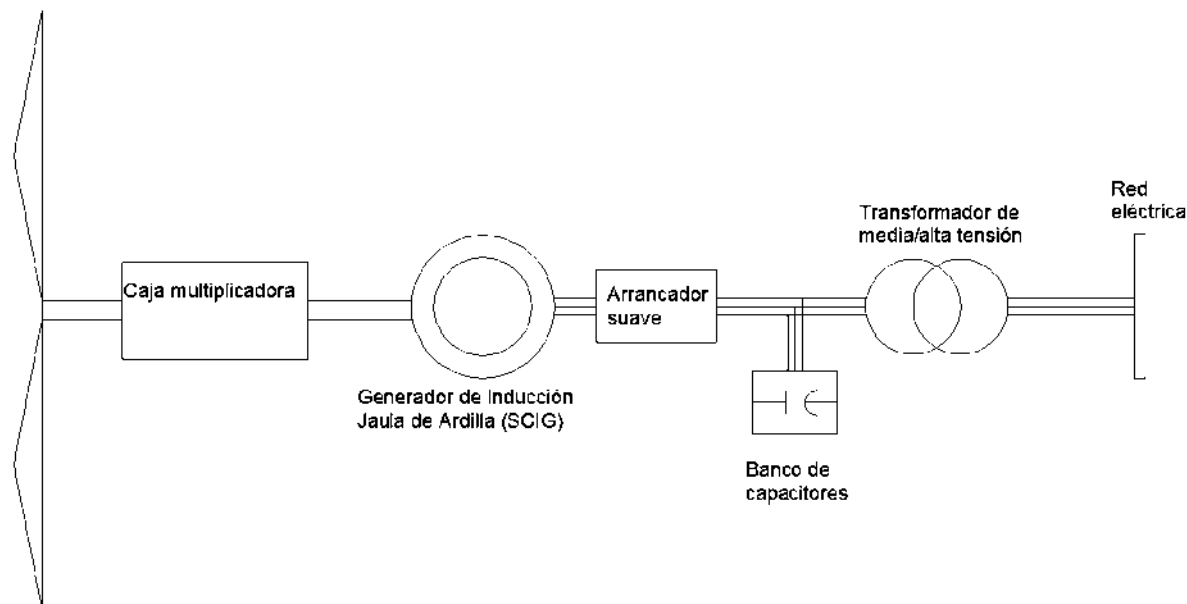


Figura 3.5. Diagrama de interconexión de un aerogenerador que opera a velocidad fija del rotor.

B. Aerogenerador cuyo rotor opera a velocidad del rotor variable:

Este tipo de categoría es muy amplia y en general, en este tipo de configuraciones se pueden emplear generadores de inducción (ya sea rotor jaula de ardilla o rotor devanado) y generadores síncronos con imanes permanentes o excitación externa. También se pueden utilizar diferentes tipos de convertidores, y se pueden realizar diferentes combinaciones entre estos. En la operación a velocidad variable es fundamental el uso de convertidores de electrónica de potencia para realizar la interconexión.

En este tipo de operación, la velocidad del rotor puede variar de acuerdo a la variación de la velocidad del viento, permitiendo al rotor trabajar en un rango mucho más amplio de velocidades eólicas y de esta manera extraer una mayor cantidad de energía que el rotor a velocidad fija. En este tipo de operación, la frecuencia de la potencia producida por el aerogenerador fluctúa a medida que la velocidad del viento y el rotor están variando constantemente, es por esta razón que, para conectar los generadores de velocidad del rotor variable, se emplean convertidores de electrónica de potencia para poder transformar la frecuencia variable del generador en constante y así poder realizar la interconexión y sincronización del aerogenerador con la red.

Aunque, la operación con rotor a velocidad variable tiene ciertas desventajas como que emplea más componentes que la operación a velocidad fija o que genera corrientes armónicas debido a los convertidores de potencia, el rotor a velocidad variable, al extraer una mayor cantidad de energía del viento, este tipo de desventajas sobre el rotor a velocidad fija se justifican. Es por esta razón que la configuración a velocidad variable es la que se ha estado utilizando mayormente en las últimas dos décadas y la tendencia es que se siga utilizando. Debido a que existen diferentes configuraciones que operan a velocidad variable del rotor, solo se explicará la forma de interconexión en la que se emplea el tipo de convertidor de potencia que se modelará y simulará en esta tesis. Esta configuración de interconexión es la más común utilizada hoy en día en las centrales eléctricas eólicas y se explica a continuación.

Operación a velocidad variable y convertidor de frecuencia de escala parcial: En este tipo de configuración la potencia de deslizamiento o del rotor consumida por la resistencia del generador puede ser recuperada mediante la utilización de un generador de inducción de rotor devanado doblemente alimentado y un convertidor de potencia de escala o capacidad parcial (de 1/3 de la potencia nominal del generador) acoplado al rotor del generador. Además, el convertidor CA/CD/CA tiene la función de suministrar potencia reactiva al generador y establecer una interconexión más segura con la red eléctrica. Este arreglo permite al generador trabajar en un rango variado de velocidades por encima y por debajo de la velocidad síncrona (velocidad sub síncrona y súper síncrona) y de esa forma extraer más energía que otras configuraciones de interconexión de velocidad variable. Sin embargo, este diseño tiene las desventajas de ser más caro y más complejo que las demás (Chakraborty et al., 2013). En la Figura 3.6 se observa un esquema de la configuración en cuestión.

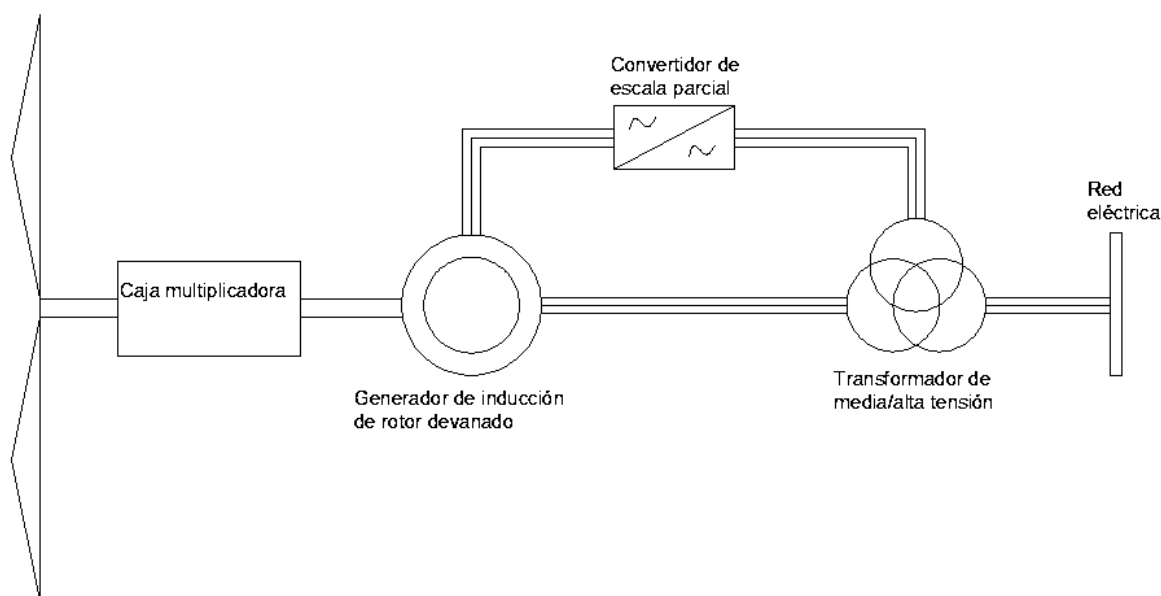


Figura 3.6. Diagrama de interconexión de un aerogenerador que opera a velocidad variable con convertidor de frecuencia de escala parcial.

3.6. Dispositivos de electrónica de potencia en sistemas de energía eólica

En las últimas décadas, el uso de dispositivos de electrónica de potencia para aplicaciones eólicas se ha venido incrementando de forma notable, esto principalmente debido a la caída de los precios de estos dispositivos y a los avances tecnológicos. Actualmente, existe una variedad de dispositivos de electrónica de potencia utilizados en la energía eólica, aunque antes de mencionarlos, es importante explicar lo que es un elemento de electrónica de potencia, un convertidor de electrónica de potencia y un sistema de electrónica de potencia.

Se referirá a elemento de electrónica de potencia, a una parte que conforma un convertidor de electrónica de potencia. Por ejemplo, elementos de electrónica de potencia pueden ser diodos, tiristores o transistores. A un convertidor de electrónica de potencia nos referiremos como una parte que conforma un sistema de electrónica de potencia, por ejemplo, estos convertidores pueden ser tanto rectificadores como inversores. Por último, dispositivo de electrónica de potencia, se usará para referirse a elementos, convertidores y sistemas de electrónica de potencia en general. En la práctica, son los elementos de electrónica de potencia como transistores o diodos y que componen los convertidores de potencia como rectificadores, los que dan origen a los armónicos y por consecuencia la distorsión armónica de la componente fundamental de la corriente y posteriormente del voltaje.

En la Figura 3.7 se muestra una clasificación de los elementos básicos de electrónica de potencia más comunes utilizados hoy en día convertidores de electrónica de potencia usados en la energía eólica y después se da una descripción general de estos. En la Figura 3.8 se muestran los símbolos de los elementos de potencia mencionados a continuación.

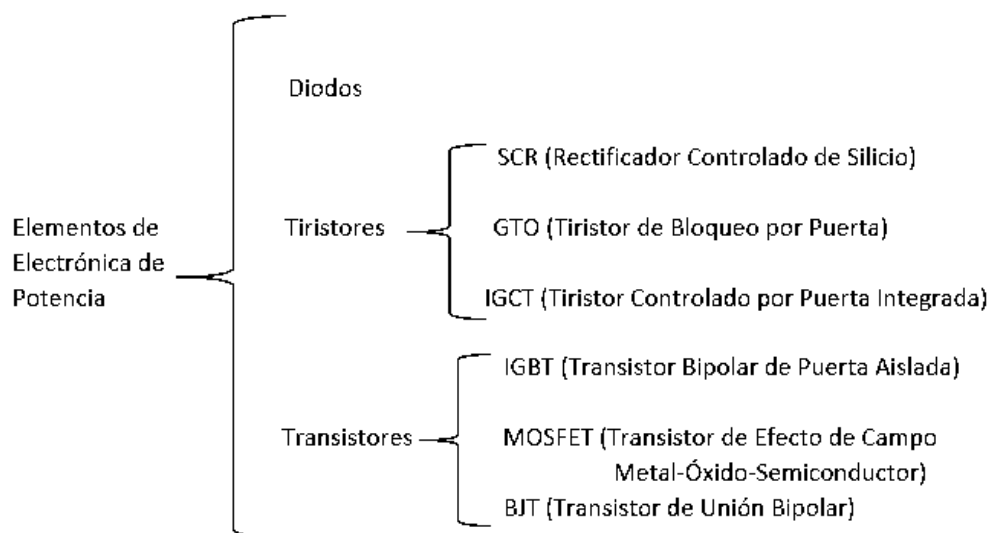


Figura 3.7. Clasificación de elementos de electrónica de potencia.

Diodo: es un dispositivo compuesto de dos terminales; ánodo y cátodo, es utilizado como interruptor en aplicaciones de potencia. Es un dispositivo en el cual sus estados de conducción y no conducción no se pueden controlar, sino que son las corrientes y voltajes externos al diodo las que determinan su estado de conducción o no conducción. En condiciones ideales, la corriente en un diodo fluye del ánodo al cátodo cuando el voltaje entre estos dos es positivo (ánodo con polaridad positiva y cátodo con polaridad negativa). Se dice que el diodo es el elemento de electrónica de potencia más simple (Rashid, 2004).

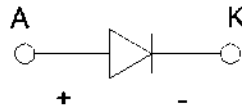
Tiristores: los tiristores son una familia de interruptores de potencia que tienen tres terminales; ánodo, cátodo y compuerta. Los tiristores también pueden ser conocidos como rectificadores controlados o SCR. El estado de conducción en un tiristor puede ser activado aplicando una señal de corriente en la compuerta de este cuando el voltaje del ánodo al cátodo sea positivo. Se dice que un tiristor es un interruptor semi controlado ya que una vez que se aplica la señal en su compuerta, esta, ya no se puede controlar más. La capacidad de potencia que manejan los tiristores es la más alta entre todos los elementos de electrónica de potencia manejando voltajes hasta los 5 kV y corrientes hasta los 3000 A, sin embargo, sus velocidades de conmutación son muy lentas comprendiendo hasta 1 kHz. Los tiristores más usados en aplicaciones eólicas son los siguientes:

- *Rectificador Controlado de Silicio (SCR):* los SCR son tiristores; interruptores de potencia semi controlados de tres terminales (ánodo, cátodo y compuerta) que una vez aplicada la señal en su terminal de control (compuerta) cuando el voltaje del ánodo al cátodo sea positivo, este se empezará a comportar como un diodo.
- *Tiristor de bloqueo por puerta (GTO):* es un interruptor de potencia de tres terminales; ánodo, cátodo y compuerta. El GTO funciona de forma similar al SCR ya que su estado de conducción se puede activar (desbloquear) al aplicar una corriente positiva en la compuerta (cuando el voltaje del ánodo al cátodo sea positivo), solo que, a diferencia del SCR, el GTO puede desactivarse de su estado de conducción al aplicar una corriente negativa en su compuerta (terminal de control) por medio de un transistor bipolar.
- *Tiristor Controlado por Puerta Integrada (IGCT):* es un interruptor de potencia totalmente controlable, al igual que el GTO, el IGCT puede activarse o desactivarse aplicando una señal de corriente en su compuerta, pero la diferencia está en que el IGCT ya tiene integrada la electrónica de control de bloqueo o desbloqueo en la compuerta. Se puede decir que el IGCT es la derivación o evolución del GTO ya que en todos los aspectos como potencia que maneja o velocidad de conmutación lo supera, por esa razón se está empleando cada vez más en aplicaciones de conversión de energía eólica.

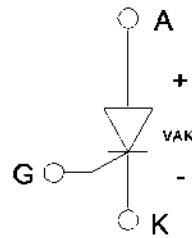
Transistores: los transistores de potencia son dispositivos electrónicos que se utilizan como interruptores, tienen tres terminales; base, emisor y colector. Son dispositivos en los que su activación o desactivación es totalmente controlable y de acuerdo a las capas de material de las que está hecho, pueden ser transistores npn o pnp. Los transistores de potencia más comunes en aplicaciones eólicas son los siguientes:

- *Transistor Bipolar de Puerta Aislada (IGBT)*: es un interruptor de potencia que es totalmente controlable. Solo puede conducir corriente en una sola dirección y está compuesto por tres terminales; compuerta, colector y emisor. El proceso de conmutación o control (activar o desactivar el dispositivo) se realiza aplicando una señal en su terminal de control la cual es la compuerta. Los IGBT son dispositivos que tienen velocidades de conmutación mayores a los BJT, pero no mayores que las de los MOSFET. Sus velocidades de conmutación superan los 20 kHz y la capacidad de los voltajes que manejan es menor que la de los GTO y SCR, pero mayor que los que manejan los MOSFET y los BJT. Se dice que los IGBT son dispositivos híbridos ya que combinan ciertas características de los MOSFET y los BJT en su construcción. Actualmente los IGBT son de los elementos de potencia más utilizados en aplicaciones eólicas de conmutación.
- *Transistor de Efecto de Campo Metal-Óxido-Semiconductor (MOSFET)*: es un dispositivo completamente controlable que básicamente está conformado por tres terminales; drenador, compuerta y fuente, su terminal de control es la fuente y las terminales por donde fluye la potencia son el drenador y la fuente. A diferencia de otros elementos como el BJT, el IGCT, el GTO y el SCR que se controlan aplicando una señal de corriente en su terminal de control, el MOSFET es un dispositivo controlado por voltaje ya que para activar su estado de conducción es necesario aplicar un voltaje entre la compuerta y la fuente. Los MOSFET son elementos que manejan una baja potencia, sin embargo, sus velocidades de conmutación son muy altas abarcando desde 100 kHz hasta 1 MHz.
- *Transistor de Unión Bipolar (BJT)*: es un dispositivo semiconductor controlable que en aplicaciones eólicas es utilizado como interruptor para conmutación y está compuesto por tres terminales; base, emisor y colector, en el que la base es la terminal de control y el emisor y el colector son las terminales por donde fluye la potencia. Dependiendo de las capas de material semiconductor de que estén compuestos, los transistores BJT pueden ser tipo npn y pnp. Su velocidad de conmutación ronda aproximadamente entre 1 y 10 kHz y la capacidad de potencia que maneja es media comparado con los demás elementos de potencia.

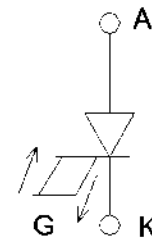
Diodo



Tiristor/SCR



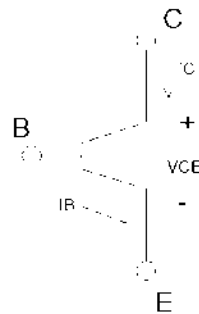
GTO



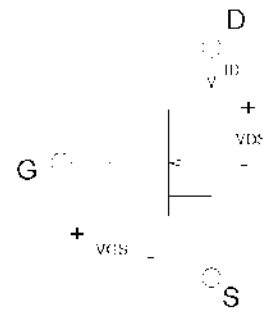
IGCT



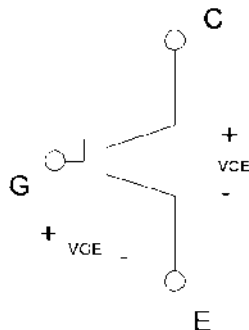
BJT (NPN)



MOSFET (canal n)



IGBT



Donde:
A= Ánodo
K= Cátodo
G= Compuerta

E=Emisor
C=Colector
B=Base
D=Drenador
S=Fuente

Figura 3.8. Símbolos de elementos utilizados en convertidores de electrónica de potencia.

Los elementos básicos de potencia mencionados anteriormente forman parte de los convertidores de potencia utilizados en aplicaciones eólicas. Básicamente, los convertidores de potencia utilizados en la industria eólica son rectificadores e inversores, estos dispositivos se clasifican y se describen brevemente en la Figura 3.9.

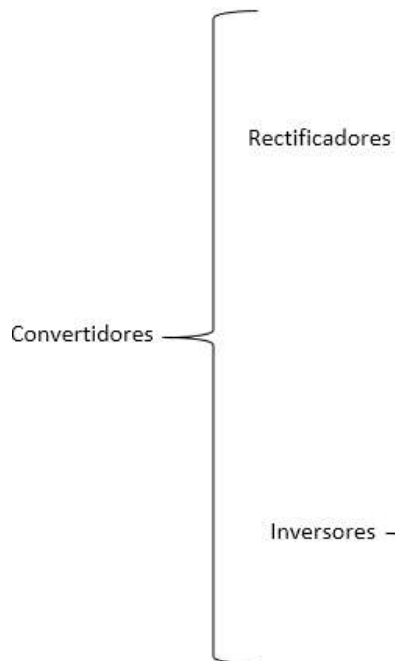


Figura 3.9. Clasificación básica de convertidores de potencia utilizados en aplicaciones eólicas.

El *Convertidor de potencia* es un dispositivo electrónico que modifica o transforma los valores de magnitud, frecuencia o tipo de corriente, voltaje o potencia de entrada en otros distintos de salida. Los convertidores son etapas individuales de conversión en los sistemas de electrónica de potencia, ya que un sistema de electrónica de potencia puede estar compuesto de dos o más convertidores. Los convertidores a su vez están formados por elementos de electrónica de potencia como por ejemplo diodos, tiristores o transistores de potencia.

De acuerdo al tipo de polaridad de la potencia de entrada y de salida que transforman, los convertidores pueden ser de cuatro tipos: CD/CD, CA/CD (Rectificador), CD/CA (inversor), CA/CA, sin embargo, los rectificadores e inversores son los convertidores de uso fundamental en los sistemas eólicos.

El *rectificador* es un convertidor de potencia que transforma la potencia de entrada de corriente alterna (CA) en potencia de salida en corriente directa (CD). En la energía eólica, la potencia de entrada en CA normalmente viene directamente del aerogenerador. Respecto al *Inversor* es un convertidor de potencia que transforma potencia de entrada de CD a potencia de salida en CA. En la energía eólica, la potencia de entrada en CD en un inversor puede provenir de un rectificador principalmente, siendo el inversor la fuente de potencia de CA hacia la red.

En la Figura 3.10 a) cuando la potencia de la fuente en la entrada es en CA y la salida de la potencia es en CD el convertidor funciona como rectificador (Mohan et al., 2009). En la Figura 3.10 b) cuando la potencia de entrada es en CD y su salida es en CA el convertidor funciona como Inversor, siendo este tipo de convertidor inversor el utilizado por ejemplo en sistemas fotovoltaicos. No obstante, en los sistemas eólicos se utilizan sistemas de electrónica de potencia compuestos por al menos dos convertidores (etapas de conversión).

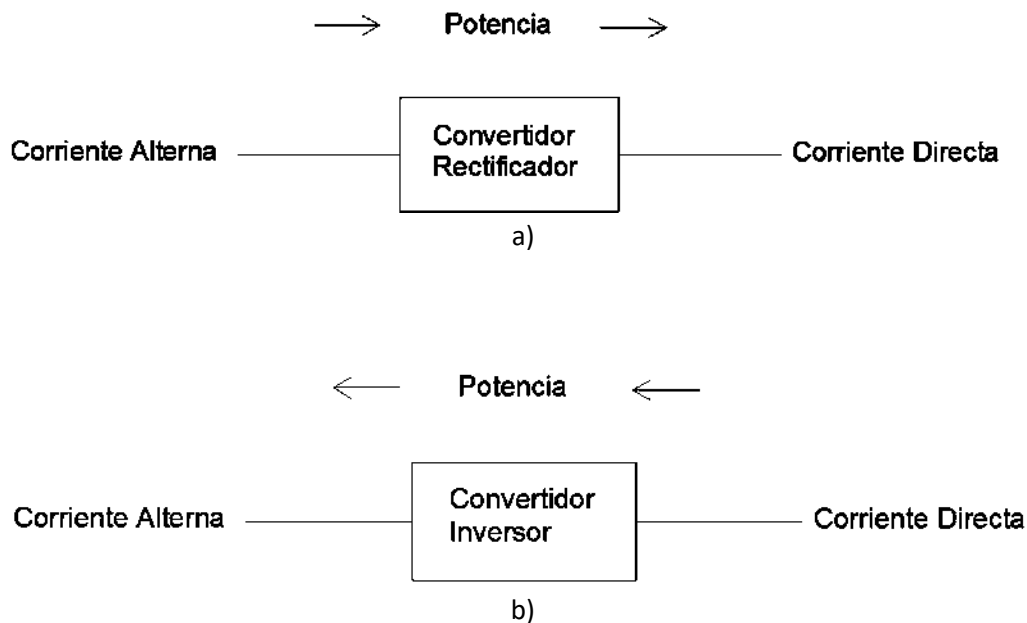


Figura 3.10. a) Convertidor funcionando como rectificador. b) Convertidor funcionando como inversor.

Existe otra clasificación de acuerdo a la cantidad de potencia que maneja u opera el convertidor, los convertidores dentro de esta clasificación se denominan *convertidores de potencia de escala parcial* y *convertidores de potencia de escala completa*. Los convertidores de escala parcial solo utilizan o dejan pasar aproximadamente un tercio (alrededor de un 30%) de la potencia total producida por el aerogenerador y tienen la desventaja de no permitir desacoplar el generador de la red al cien por ciento, estos se utilizan principalmente con generadores de inducción de rotor devanado (doblemente alimentados) en configuraciones con resistencia variable adicional en el rotor y control de deslizamiento variante. Dentro de los convertidores de escala parcial se pueden incluir los convertidores CA/CD/CA back-to-back PWM. Por su parte, los convertidores de escala completa están configurados para manejar el 100% de la potencia total producida por el aerogenerador, además estos convertidores son el enlace entre el aerogenerador y la red (Chakraborty et al., 2013).

En el caso de los *sistemas de electrónica de potencia*, estos están compuestos por al menos dos convertidores de potencia y elementos de almacenamiento de energía como inductores o capacitores. Los sistemas de potencia se encargan por medio de los elementos que los componen, de modificar la potencia de entrada de la fuente en potencia de salida con características diferentes a la de la entrada, por ejemplo, la salida en un sistema de potencia puede ser potencia en C.A. o C.D. con frecuencia constante o ajustable y la magnitud de la tensión de salida puede ser constante, aumentada o reducida en comparación con la de la entrada, sin embargo, en los sistemas de electrónica de potencia utilizados en la energía eólica, su salida de potencia será con frecuencia constante y voltaje constante para así poder realizar la interconexión con la red eléctrica de transmisión.

En la Figura 3.11 se muestra un sistema de electrónica de potencia básico conectado a una fuente y a una carga y que consta de dos etapas de conversión (dos convertidores) y un elemento de almacenamiento (inductor o capacitor). Un sistema de electrónica de potencia como el mostrado en esta figura es tal como comúnmente se usan en los sistemas eólicos, por lo general, en energía eólica, el convertidor 1 es un rectificador y el convertidor 2 es un inversor.

Cabe mencionar que los convertidores de potencia antes mencionados y que se utilizan en aplicaciones eólicas, son cargas eléctricas no lineales, por lo tanto, todos ellos funcionando en condiciones normales o nominales generan corrientes armónicas que se pueden propagar por el sistema si estas no son mitigadas. También es importante decir que en general los armónicos son generados por la forma de conmutación utilizada por los elementos de electrónica de potencia de los convertidores de potencia.

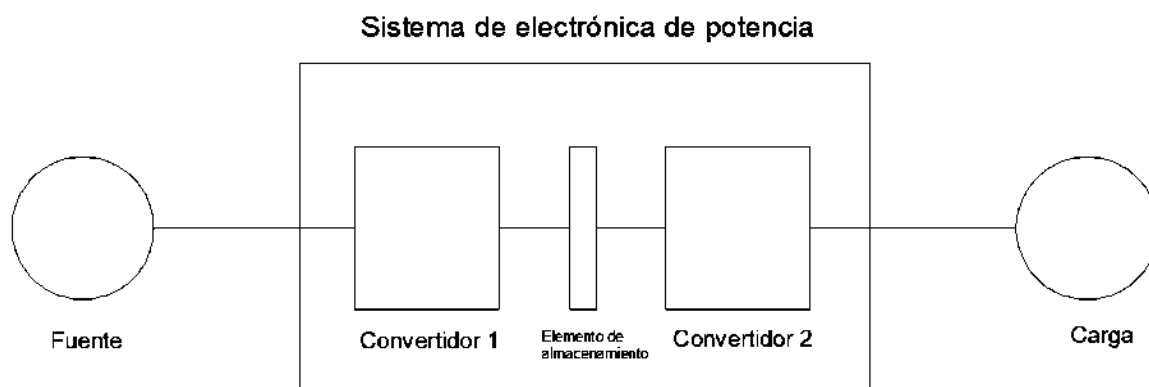


Figura 3.11. Sistema de electrónica de potencia conectando una fuente de energía y una carga.

3.7. Sistema de electrónica de potencia trifásico back-to-back de 6 pulsos

Una parte muy importante de un sistema eólico para poder funcionar y transmitir la energía al sistema de transmisión eléctrico, son los sistemas de electrónica de potencia, los cuales, anteriormente se dijo que podían estar compuestos de diferentes elementos semiconductores de potencia y convertidores de potencia. En esta tesis, se eligió modelar un sistema de electrónica de potencia llamado back-to-back AC/DC/AC de 6 pulsos el cual es uno de los más utilizados hoy en día en sistemas de potencia de energía eólica y que representa la carga no lineal que produce corrientes armónicas que alteran los parámetros de la señal fundamental de corriente y voltaje distorsionándolas.

El sistema de electrónica de potencia que se modelará en esta tesis está conformado de dos convertidores de potencia PWM trifásicos bidireccionales idénticos conectados entre sí por un capacitor de enlace de voltaje en CD y controlados cada uno de forma independiente (Hansen et al., 2002). Cada convertidor está compuesto de seis Transistores Bipolares de Puerta Aislada (IGBT). El

convertidor que se encuentra del lado del generador es un rectificador y el convertidor que se encuentra del lado de la red es un inversor. El sistema de potencia back-to-back son un par de convertidores de escala parcial, esto significa que por ambos convertidores solo pasa alrededor de $\frac{1}{3}$ de la potencia total producida por el generador. Este sistema de potencia es más utilizado en conjunto con generadores de rotor devanado doblemente alimentados en el que los devanados del estator del generador se encuentran conectados directamente a la red eléctrica por medio de los transformadores de media a alta tensión de la subestación eléctrica del parque y el convertidor del lado del generador está conectado al rotor del generador.

El rectificador, aparte de recibir la potencia en CA de generador eléctrica y convertirla en potencia de CD, puede realizar la importante tarea de desacoplar y controlar la potencia real y reactiva controlando y suministrando corrientes de frecuencia variable en el rotor eliminando la compensación de reactiva. Estas corrientes de frecuencia no constante se inyectan también para igualar la diferencia entre la frecuencia eléctrica y mecánica del rotor, el constante cambio en la velocidad del viento puede provocar que el deslizamiento cambie también la frecuencia de las corrientes en el rotor. Mientras tanto, el Inversor se encarga de recibir la potencia en CD rectificada por el convertidor rectificador y convertirla a potencia en CA, además de realizar la interfaz entre el generador y la red, proveer la demanda de potencia reactiva y mantener el voltaje de enlace de CD entre el rectificador y el inversor constante, controlando la potencia que pasa a través de él (Ackerman, 2005).

Ambos convertidores son controlados y conmutados con PWM, la cual es una técnica o esquema de control que se puede emplear en muchos dispositivos electrónicos incluyendo los convertidores de potencia. En el PWM, la magnitud y el tiempo en el que la señal está encendida (ancho de pulso o ciclo de trabajo) se pueden hacer variar mientras la frecuencia de conmutación del convertidor se mantiene constante, esto con el fin de modificar o controlar la señal de voltaje o corriente de salida o para modificar la cantidad de potencia que se entrega a la salida.

Este sistema de electrónica de potencia que se va a modelar está formado por dos convertidores de 6 pulsos; un inversor de 6 pulsos y un rectificador de 6 pulsos, sin embargo, a la hora de estudiarlo, se tomará como un solo convertidor de 6 pulsos ya que ambos están conectados en cascada. En la Figura 3.13 se muestra el esquema simplificado de la conexión entre el sistema back-to-back de 6 pulsos con el sistema eólico. El capacitor de enlace de CD permite también que ambos convertidores se puedan controlar de forma independiente. El back-to-back es bidireccional porque la potencia puede fluir desde el rotor del generador pasando por el convertido hacia la red (en velocidad súper síncrona del generador) y viceversa, desde la red hacia el rotor (en una velocidad subsíncrona del generador), en todo momento, la operación del generador eléctrico es controlada por el convertidor de potencia.

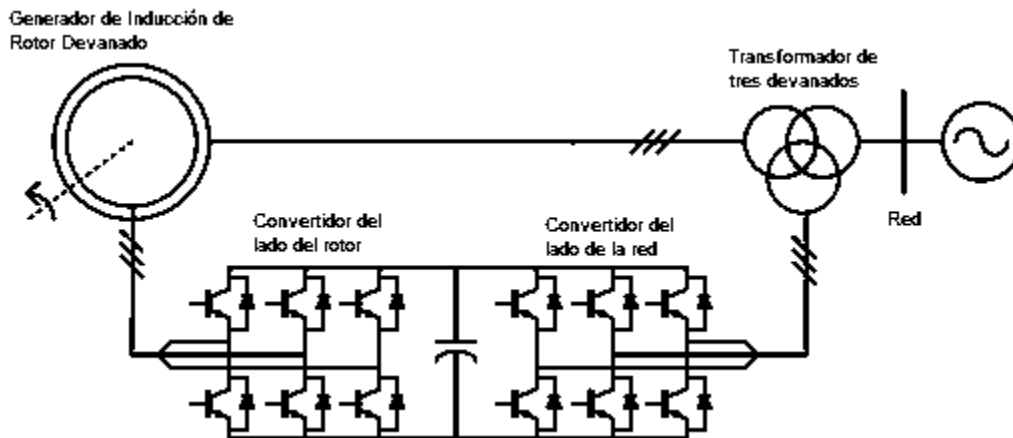


Figura 3.12. Sistema de electrónica de potencia back-to-back de 6 pulsos conectado al sistema eléctrico. Fuente: Chakraborty, Simoes, Kramer (2013).

Para poder estudiar los armónicos que son generados por un sistema de electrónica de potencia o convertidor de potencia, se tomarán datos reales de la ficha técnica de un convertidor común que actualmente esté disponible en el mercado. El nombre de la marca que se eligió para obtener sus datos se llama Ingeteam, esto simplemente debido a que los datos eléctricos de la marca de este convertidor están disponibles al público y de igual manera son útiles para el modelo que se va a realizar. En La Figura 3.14 se muestra el sistema de electrónica de potencia back-to-back trifásico INGECON^R WIND de INGETEAM para turbinas con generadores de inducción doblemente alimentados (DFIG) y conformado por Transistores Bipolares de Puerta Aislada (IGBT). Los datos eléctricos de este convertidor se muestran en la Tabla 3.1.



Figura 3.13. Convertidor trifásico back-to-back INGECONR WIND. Fuente: INGETEAM.

Tabla 3.1. Datos eléctricos del convertidor back-to-back INGECON WIND.

Potencia nominal	3.6 MW
Frecuencia	60 Hz
Voltaje de salida	690 V
Rango de voltaje de la red	$\pm 10\%$

La magnitud de la corriente RMS nominal que el convertidor maneja se calculará más adelante. Esa magnitud de corriente que se calculará será el valor de la corriente a la frecuencia fundamental de 60 Hz ($h=1$) y el cual dicho valor se utilizará en el modelo que se realizará.

3.8. Funciones de los convertidores de electrónica de potencia en los sistemas eólicos

Como se mencionó en secciones anteriores, los convertidores de electrónica de potencia actuales son capaces de realizar a cabo una variedad de tareas esenciales para el correcto funcionamiento de los sistemas eólicos prácticamente en todas sus configuraciones. Posiblemente, la función más importante que realizan los convertidores de potencia es la de modificar la frecuencia y el voltaje de la potencia de salida del aerogenerador en turbinas eólicas que operan a velocidad variable del rotor, esto es así porque para realizar la interconexión de un aerogenerador (y cualquier generador eléctrico en general) es necesario cumplir con una serie de requisitos los cuales son:

- La frecuencia de la potencia de salida del aerogenerador y la frecuencia de la red deben de ser iguales.
- La magnitud del voltaje de salida del aerogenerador y el voltaje de la red deben ser iguales.
- La secuencia de fases del voltaje trifásico de salida del aerogenerador debe coincidir con la secuencia de fases del voltaje trifásico de la red.
- El ángulo de fase del voltaje de salida del aerogenerador es igual al ángulo de fase del voltaje de la red.

En base a los requisitos de interconexión previamente mencionados, los convertidores de potencia en los sistemas eólicos de potencia, comúnmente realizan al menos los dos primeros enlistados. Sin embargo, en forma general, otras funciones fundamentales que realizan los convertidores de potencia en las diversas configuraciones de sistemas eólicos son:

- Aumentar la cantidad de energía producida por el aerogenerador.
- Controlar el flujo de potencia real y reactiva de la red al aerogenerador y viceversa.
- Suministrar potencia reactiva al aerogenerador.
- Realizar un control del voltaje de salida del aerogenerador.
- Reducir la corriente de arranque cuando aerogenerador es interconectado.
- Evitar algunos problemas de calidad de la energía como transitorios, fluctuaciones de voltaje y caídas de voltaje debidas a las excesivas corrientes de arranque.

- Proteger a la caja multiplicadora de las variaciones de la velocidad del viento.
- Permitir la eliminación de la caja multiplicadora en algunas configuraciones.
- Limitar la potencia de corto circuito.
- Mejorar la estabilidad de la red eléctrica.
- Actuar como enlace entre el aerogenerador y la red.
- Desacoplar el aerogenerador de la red.
- Rastrear el punto de potencia máxima en la velocidad del viento para una mayor producción de potencia.

3.9. Conclusión del capítulo 3

Los elementos y convertidores de electrónica de potencia se encuentran presentes prácticamente en todos los parques eólicos modernos. El uso de convertidores de potencia implementados en aerogeneradores para extraer una mayor cantidad de energía del viento, mejoró sustancialmente la eficiencia y la energía total extraída de estas máquinas, pero a la vez generó nuevos problemas, uno de estos problemas son los armónicos. Es evidente que debido a la cantidad y la importancia de las tareas que los convertidores de potencia realizan hoy en día en las centrales eólicas, el uso de estos es imprescindible.

Capítulo 4: Aspectos fundamentales de los armónicos; su generación y su mitigación

4.1. Introducción

En el presente capítulo se habla más a detalle sobre los armónicos; sus características básicas, las cargas eléctricas que los generan, los distintos equipos para mitigarlos, la manera en cómo se propagan por el sistema y las relaciones para cuantificarlos. Además de que en este capítulo se especifica el tipo de filtro armónico que se modelará y se estudiará en esta tesis, también se precisan los niveles máximos de distorsión armónica que se mencionan en el código de red, los cuales se intentará no rebasar una vez que el filtro armónico haya sido implementado en el sistema para reducir la distorsión armónica.

4.2. Tipos de armónicos

En la Tabla 4.1 se muestra una lista de los primeros veinticinco armónicos, así como su frecuencia y su número armónico. Usualmente, las armónicas de orden más alto (por encima de la 25^{ta} armónica hasta la 50^{ma} armónica, dependiendo del sistema) son despreciables para el análisis del sistema de potencia (Dugan et al., 2004, p. 170).

Tabla 4.1. Tipos de armónicos.

Nombre del armónico	Frecuencia	Orden o número armónico	Nombre del armónico	Frecuencia	Orden o número armónico
Componente fundamental	60 Hz	h = 1	14 ^{to} armónico	840 Hz	h = 14
2 ^{do} armónico	120 Hz	h = 2	15 ^{to} armónico	900 Hz	h = 15
3 ^{er} armónico	180 Hz	h = 3	16 ^{to} armónico	960 Hz	h = 16
4 ^{to} armónico	240 Hz	h = 4	17 ^{mo} armónico	1020 Hz	h = 17
5 ^{to} armónico	300 Hz	h = 5	18 ^{vo} armónico	1080 Hz	h = 18
6 ^{to} armónico	360 Hz	h = 6	19 ^{no} armónico	1140 Hz	h = 19
7 ^{mo} armónico	420 Hz	h = 7	20 ^{mo} armónico	1200 Hz	h = 20
8 ^{vo} armónico	480 Hz	h = 8	21 ^{ero} armónico	1260 Hz	h = 21
9 ^{no} armónico	540 Hz	h = 9	22 ^{do} armónico	1320 Hz	h = 22
10 ^{mo} armónico	600 Hz	h = 10	23 ^{er} armónico	1380 Hz	h = 23
11 ^{er} armónico	660 Hz	h = 11	24 ^{to} armónico	1440 Hz	h = 24
12 ^{do} armónico	720 Hz	h = 12	25 ^{to} armónico	1500 Hz	h = 25
13 ^{er} armónico	780 Hz	h = 13			

Como se mencionó, las armónicas mostradas en la anterior tabla son las más significativas y las que causan efectos negativos mayores en los sistemas eléctricos. De esas veinticinco armónicas las más

nocivas son las llamadas *armónicas triples* las cuales son múltiplos de la triple armónica con número armónico $h= 3, 6, 9, 15, 21$. En secciones posteriores se determinarán los tipos de armónicos que la carga no lineal que se va a estudiar genera.

4.3. Serie de Fourier para análisis de la distorsión armónica

En los circuitos eléctricos de corriente alterna sin distorsión armónica, donde el voltaje y corriente tienen una forma senoidal pura, ambas cantidades pueden representarse mediante las siguientes expresiones:

$$v(t) = V \text{ sen } (\omega t) \quad (4.1)$$

$$i(t) = I \text{ sen } (\omega t \pm \phi) \quad (4.2)$$

Dónde: ω es velocidad angular de la señal senoidal periódica, ϕ es la diferencia en el ángulo de fase entre el voltaje y la corriente, V es la magnitud del voltaje e I es la magnitud de la corriente. Sin embargo, en sistemas eléctricos donde existe la presencia de armónicos y las señales fundamentales de corriente y voltaje contengan distorsión armónica, las ecuaciones anteriores no podrían representar la corriente y el voltaje distorsionados, para tal caso, se debe de utilizar la Serie de Fourier.

La Serie de Fourier es una expresión matemática trigonométrica que sirve como herramienta para analizar funciones periódicas no senoidales distorsionadas. Establece que cualquier forma de onda periódica no senoidal puede representarse o descomponerse como una suma infinita de ondas senoidales mediante funciones senoidales. El hecho anterior se puede mostrar gráficamente mediante Figura 4.1 en la que una señal distorsionada se puede descomponer en la frecuencia fundamental y todas las demás funciones senoidales que la integran.

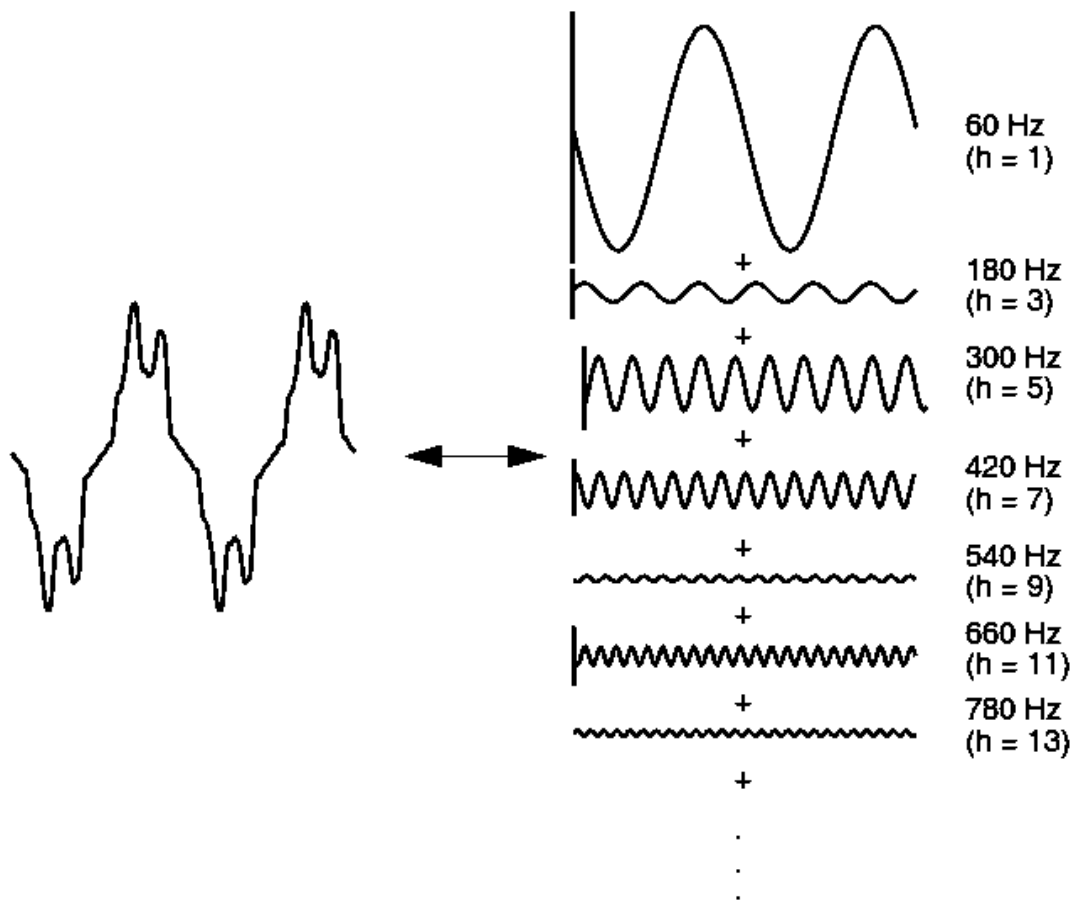


Figura 4.1. Distorsión armónica provocada por la suma de armónicos a la onda fundamental. Fuente: Sankaran (2002).

A la letra h en la imagen anterior se le conoce como número u orden armónico y se refiere al número que es múltiplo de la frecuencia fundamental, por ejemplo, $h=1$ hace referencia a la frecuencia fundamental (60 Hz), $h=2$ significa que es dos veces la frecuencia fundamental o sea $2 \times 60 \text{ Hz} = 120 \text{ Hz}$, $h=3$ significa que es tres veces la frecuencia fundamental o $3 \times 60 \text{ Hz} = 180 \text{ Hz}$ y así sucesivamente. A todas las señales donde h es mayor que 1 se les conoce como *Armónicos*. La señal distorsionada de la imagen anterior puede se puede representar mediante la serie de Fourier como:

$$v(t) = V_0 + V_1 \text{sen}(\omega t) + V_2 \text{sen}(2\omega t) + V_3 \text{sen}(3\omega t) + \dots + V_n \text{sen}(n\omega t) + V_{n+1} \text{sen}((n+1)\omega t) + \dots \quad (4.3)$$

En la ecuación anterior V_0 representa al componente de CD de la onda, cada uno de los términos de la ecuación representan a la onda fundamental y a cada una de los armónicos, por ejemplo, $V_1 \text{sen}(\omega t)$ representa a la onda fundamental de 60 Hz, $V_2 \text{sen}(2\omega t)$ representa al segundo armónico de 120 Hz ($h=2$), $V_3 \text{sen}(3\omega t)$ representa al tercer armónico de 180 Hz ($h=3$) y así

sucesivamente. V_1, V_2, V_3, V_n representan los valores picos de cada armónico (senoide). La onda distorsionada tiene la misma frecuencia ($h=1=60\text{Hz}$) que la onda o señal fundamental. El análisis de Fourier aplicado a la tensión y corriente distorsionadas consiste en calcular la magnitud y fase de la fundamental y de cada una de las armónicas (Barcón, Guerrero, Martínez, 2012). La serie de Fourier en el análisis real de sistemas eléctricos sirve para identificar cuales armónicos están presentes en cualquier sistema eléctrico y así poder tratarlos.

4.4. Espectro de armónicos

El espectro de armónicos se refiere a todo el rango o conjunto de armónicos (múltiplos de la frecuencia fundamental) que una onda distorsionada puede contener los cuales son representados en una gráfica de barras llamada histograma. Las magnitudes de los valores RMS de cada uno de los voltajes y corrientes armónicos que integran la onda distorsionada son representados en barras en donde cada magnitud RMS de cada armónico se expresa en porcentaje o en volts o amperes respecto del valor de la magnitud de la onda fundamental. Así, el valor RMS de la componente fundamental ($h=1$) tomaría un valor de 100% y los armónicos un valor porcentual o en volts o amperes en relación a la magnitud de la componente fundamental.

La Figura 4.2 es un histograma que representa un espectro de armónicos en donde en el eje de las abscisas se representan las frecuencias armónicas que una onda distorsionada de corriente contiene, y en el eje de las ordenadas se expresa la magnitud, en este caso en amperes, de cada una de estas frecuencias armónicas respecto a la magnitud de la onda fundamental que representa el 100%.

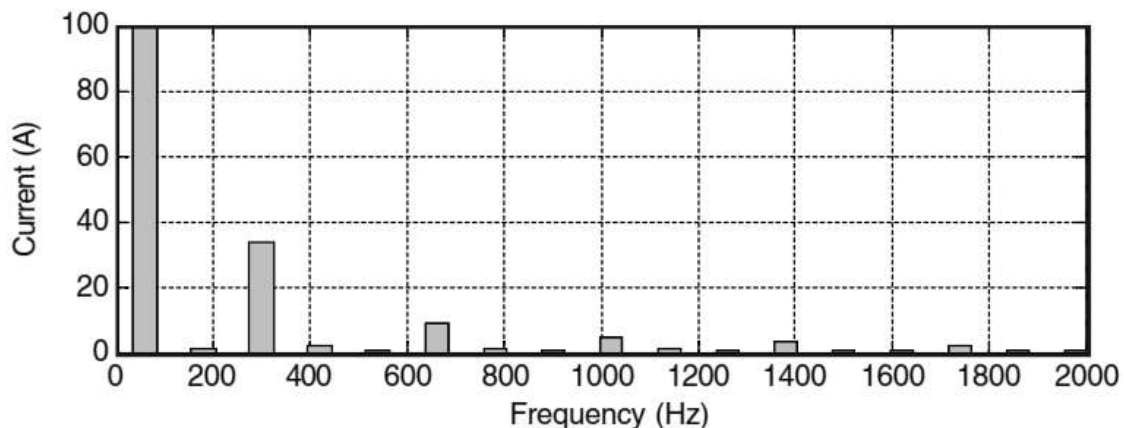


Figura 4.2. Espectro de armónicos de un variador de velocidad PWM. Fuente: Dugan, et al. (2004).

4.5. Generación de armónicos y cargas no lineales

Una carga no lineal es aquella en la que la magnitud de corriente que absorbe no es lineal o proporcional a la magnitud de voltaje que se le aplica provocando que la corriente se distorsione. Por ejemplo, en la Figura 4.3 se puede observar como a una carga no lineal, en este caso una resistencia no lineal se le aplica un voltaje senoidal, en el momento en el que la corriente senoidal fluye a través de la carga no lineal se generan corrientes armónicas, esto debido a la forma en como este tipo de cargas absorben corriente y voltaje de una manera no proporcional. El tipo de corrientes armónicas, sus magnitudes RMS y la distorsión total sobre la onda fundamental de corriente va a depender mucho de la forma en como la carga no lineal conmute la corriente que se le aplica, aunque generalmente en cualquier sistema eléctrico donde existan cargas que rectifiquen la corriente alterna a directa habrá distorsión armónica.

En base a lo anterior, en cualquier sistema de potencia, lo que las cargas no lineales generan, son corrientes armónicas, no obstante, los voltajes armónicos se producen cuando las corrientes armónicas distorsionadas interactúan con la impedancia del sistema eléctrico. En este caso, la magnitud de los voltajes armónicos y la distorsión total del voltaje dependerá mucho de la impedancia del sistema. Este hecho puede representarse por medio de la ley de Ohm como:

$$V_a = I_a Z \quad (4.4)$$

Donde V_a es el voltaje que contiene armónicos, I_a es la corriente distorsionada generada por las cargas no lineales y Z es la impedancia del sistema.

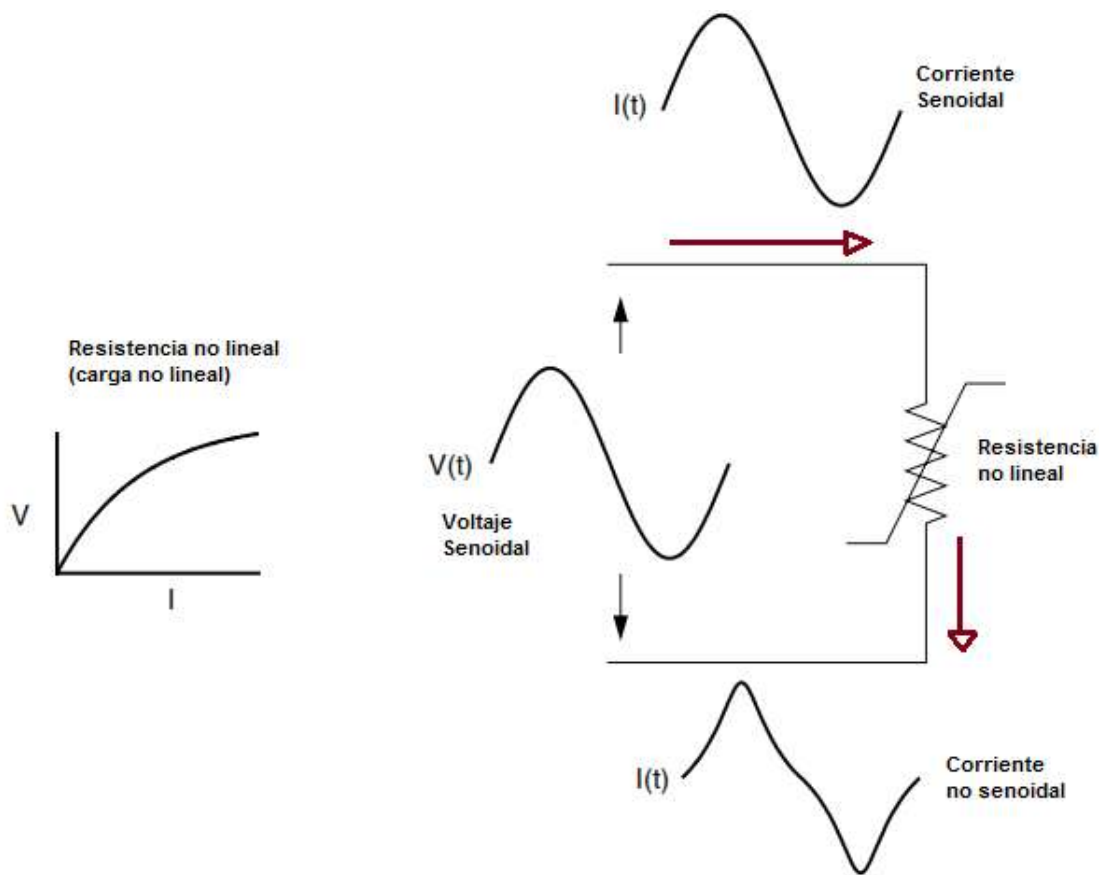


Figura 4.3. Generación de armónicos.

4.6. Relaciones para la cuantificación de distorsión armónica

- **Distorsión Armónica Individual (IHD)**

Es la relación del valor RMS de una armónica particular entre el valor RMS de la componente fundamental y se calcula como:

$$IHD_h = \frac{I_h}{I_1} \quad (4.5)$$

Donde I_h es el valor RMS de una componente armónica en particular, I_1 es el valor RMS de la señal fundamental de 60 Hz y el subíndice h se refiere al orden o tipo de armónico en cuestión. Este método de cuantificar los armónicos es conocido como *distorsión armónica basada en la fundamental* y es el utilizado por el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) en los Estados Unidos (Sankaran, 2002).

En ecuación anterior la letra I en la parte derecha de la igualdad hace referencia a la corriente, sin embargo, el concepto de IHD sirve tanto para calcular la distorsión armónica individual de la corriente como para el voltaje, entonces, para calcular el IHD del voltaje la ecuación simplemente sería:

$$IHD_h = \frac{V_h}{V_1} \quad (4.6)$$

Donde V_h es el voltaje RMS de cualquier armónica y V_1 es el valor RMS del voltaje en la frecuencia fundamental.

- **Distorsión Armónica Total (THD)**

Es una relación matemática que permite calcular la cantidad de distorsión total que contiene una señal distorsionada respecto de la onda fundamental como un porcentaje de esta última y se calcula como sigue:

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h=\infty} V_h^2}}{V_1} 100 = \frac{\sqrt{(V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots + V_\infty^2)}}{V_1} 100 = \frac{V_H}{V_1} 100 \quad (4.7)$$

Donde V_1 es la magnitud de voltaje de la onda fundamental, V_h es la magnitud del voltaje RMS de cada una de las armónicas desde la segunda armónica ($h = 2$) hasta $h = \infty$, y V_H es la raíz cuadrada de la sumatoria de los cuadrados de las magnitudes RMS de cada una de las armónicas desde la segunda armónica hasta $h = \infty$.

De igual manera, la relación anterior se aplica también para la corriente y se le llama distorsión armónica total respecto a la componente fundamental, esto último porque el denominador de la expresión es la componente fundamental de la onda distorsionada ya que también existe la distorsión armónica total respecto al valor eficaz (RMS), donde el denominador V de la siguiente expresión se refiere al valor eficaz o RMS de la fundamental (Barcón, Guerrero y Martínez 2012).

Estas dos relaciones para expresar la distorsión armónica serán las que se utilicen en esta tesis para estudiar la distorsión armónica generada por el convertidor de potencia.

- **Distorsión de Demanda Total (TDD)**

Es la relación de la raíz cuadrada de la sumatoria de los cuadrados de las magnitudes de cada una de las armónicas (valor RMS del contenido armónico) entre la corriente máxima de carga (corriente de carga de demanda máxima) de la señal fundamental y se expresa como:

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h=\infty} I_h^2}}{I_L} \quad (4.8)$$

Donde el valor de h va desde 2 (segunda armónica) hasta por lo menos 25 (vigésimo quinta armónica). El TDD se expresa como un porcentaje de la corriente máxima de carga y se utiliza para dar un valor más confiable que el THD cuando las magnitudes de cada uno de los armónicos que componen una señal distorsionada son muy pequeñas.

4.7. Estándares mexicanos sobre distorsión armónica

Aunque en México actualmente no existe como tal una norma sobre calidad de la energía eléctrica, si existe un documento que determina los valores máximos permisibles de distorsión armónica en centrales de generación y en centros de carga, este documento es las *Disposiciones Administrativas de Carácter General que Establecen los Criterios de Eficiencia, Calidad, Confiabilidad, Continuidad, Seguridad y Sustentabilidad de Sistema Eléctrico Nacional: Código de Red* y el cual fue publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 8 de abril del 2016.

El Código de Red es el documento más importante en México que regula y establece los requerimientos mínimos para operar de forma segura, confiable y continua el Sistema Eléctrico Nacional (SEN), para que, de esta forma, todos los participantes de la industria eléctrica, como centrales de generación (privadas y públicas) y centros de carga (usuarios como industrias en media y alta tensión) puedan disponer de un suministro de eléctrico de calidad.

Por lo anterior, los valores finales de THD que se calcularán una vez que el filtro armónico pasivo sea aplicado en el modelo que se construirá en ATPDraw, se compararán con los valores de distorsión máxima permisible que se indican en el Código de Red esto con la finalidad de comprobar si el filtro armónico mitiga los armónicos generados por el convertidor hasta un nivel de distorsión aceptable.

La carga no lineal que se va a modelar (convertidor de potencia), es una carga que se encontraría en un sistema eólico de potencia o en una central eólica de generación eléctrica, por lo tanto, los valores con los que se va a comparar el THD calculado una vez que se aplique el filtro de armónicos serán los *valores de distorsión máxima permisible para centrales electricas de generación* que se muestran en el *Manual Regulatorio de Requerimientos Técnicos para la Interconexión de Centrales Eléctricas al Sistema Eléctrico Nacional* del Código de Red.

Estos valores de distorsión máxima permitida se enlistan para cada tipo de central eléctrica, las cuales el Código de Red las clasifica de acuerdo a su capacidad de potencia instalada como central eléctrica tipo A,B,C y D que se muestran a continuación en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Tipos de centrales eléctricas de acuerdo al código de red.

Áreas síncronas	Central Eléctrica tipo A	Central Eléctrica tipo B	Central Eléctrica tipo C	Central Eléctrica tipo D
Sistema Interconectado Nacional	$P < 500 \text{ kW}$	$500 \text{ kW} \leq P < 10 \text{ MW}$	$10 \text{ MW} \leq P < 30 \text{ MW}$	$P \geq 30 \text{ MW}$
Sistema Baja California	$P < 500 \text{ kW}$	$500 \text{ kW} \leq P < 5 \text{ MW}$	$5 \text{ MW} \leq P < 20 \text{ MW}$	$P \geq 20 \text{ MW}$
Sistema Baja California Sur	$P < 500 \text{ kW}$	$500 \text{ kW} \leq P < 3 \text{ MW}$	$3 \text{ MW} \leq P < 10 \text{ MW}$	$P \geq 10 \text{ MW}$
Sistema Interconectado Mulegé	$P < 500 \text{ kW}$	$500 \text{ kW} \leq P < 1 \text{ MW}$	$1 \text{ MW} \leq P < 3 \text{ MW}$	$P \geq 3 \text{ MW}$

En esta tesis se supondrá que el convertidor que se va a modelar como carga no lineal se encuentra en una central eléctrica eólica tipo D que está interconectada al Sistema Interconectado Nacional, esto simplemente para tener patrones de comparación más lógicos ya que actualmente la gran mayoría de las centrales eléctricas eólicas en México son tipo D, o sea, con capacidad instalada mayor a 30 MW, por lo tanto, los requerimientos mínimos de distorsión armónica que debe cumplir una central eólica de este tipo de acuerdo al código de red son los que se enlistan a continuación:

- El valor de THD de la tensión no debe de ser mayor al 3% considerando hasta la 50ª armónica.
- Los valores de la Distorsión Armónica Individual (IHD) de la tensión no deben de sobrepasar los que se muestran en la tabla 4.3.

Tabla 4.3. Valores máximos de distorsión individual para centrales tipo D.

Orden de la armónica	Nivel de armónica (% de la tensión fundamental)	Orden de la armónica	Nivel de armónica (% de la tensión fundamental)
5	2.00	29	0.70
7	2.00	31	0.66
11	1.50	35	0.58
13	1.50	37	0.55
17	1.20	41	0.50
19	1.07	43	0.47
23	0.89	47	0.43
25	0.82	49	0.42

4.8. Soluciones generales para la mitigación de los armónicos

El usuario final o la empresa generadora pueden realizar ciertas acciones para mitigar armónicas. Por ejemplo, en el caso del usuario final, ya sea residencial, comercial o industrial, este puede mandar construir una buena instalación eléctrica mediante un correcto sistema de puesta a tierra o reemplazar equipos viejos que generen mucha distorsión armónica por equipos nuevos y en el caso de la empresa suministradora de energía puede por ejemplo operar de forma adecuada sus transformadores para que estos no operen con valores por encima de su curva de saturación. A pesar de las acciones anteriores, la forma más efectiva para mitigar los armónicos es la de instalar equipos que los mitiguen directamente. Una clasificación y descripción general de estos equipos se da a continuación en la Figura 4.4.

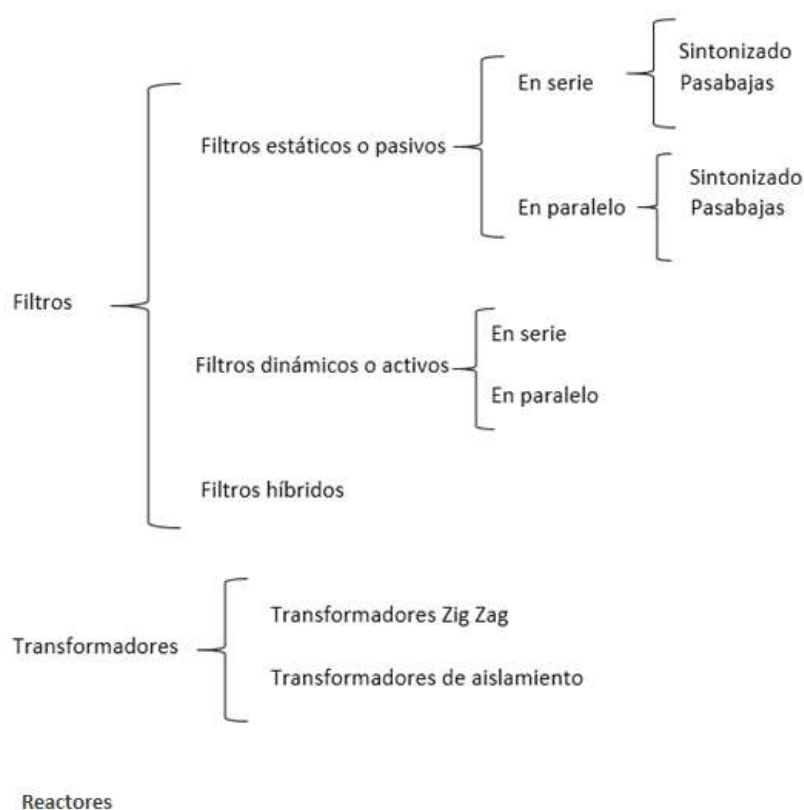


Figura 4.4. Equipos para mitigar armónicos.

Los filtros son dispositivos que mitigan o reducen corrientes armónicas producidos por cargas no lineales. Los filtros se clasifican en dos grandes grupos; los filtros estáticos o pasivos y los filtros dinámicos o activos. Los *filtros pasivos* son aquellos compuestos por elementos eléctricos pasivos como inductores y capacitores, en este tipo de filtros el valor de inductancia y capacitancia de los inductores y capacitores que lo componen no cambia, se mantiene fijo en todo momento. Los filtros pasivos pueden ser de dos tipos; en serie o en paralelo, son en *serie* cuando los inductores y

capacitores que componen al filtro se conectan en paralelo entre ellos pero en serie con la carga o con el sistema y son en *paralelo o en derivación* cuando los inductores y capacitores que lo conforman se conectan en serie entre ellos pero en paralelo con la carga o con el sistema.

Respecto a su funcionamiento, la diferencia entre los filtros pasivos en serie y en paralelo, es que los que están conectados en serie con la carga proporcionan un camino de alta impedancia para las corrientes armónicas bloqueándolas impidiendo que entren al sistema o se propaguen a las demás cargas y equipos, en cambio, los filtros conectados en paralelo con la carga proporcionan un camino de baja impedancia para que las corrientes armónicas circulen por el y no se propaguen al sistema.

Tanto los filtros pasivos en serie como los filtros pasivos en paralelo pueden ser sintonizados o pasabajas. Se dice que un filtro pasivo en serie o en paralelo es *sintonizado* cuando este solo está formado por un solo par inductor-capacitor para mitigar solo una armónica particular y se dice que es *pasabajas* cuando está formado por varios pares inductor-capacitor para eliminar diferentes tipos de armónicas a la vez. Los filtros activos también pueden conectarse en serie o en paralelo con el sistema eléctrico o con la carga no lineal, ellos son mucho más complejos y caros que los filtros pasivos pero son mucho más eficientes ya que pueden mitigar una o varias armónicas y a la vez resolver otros problemas de calidad de energía si son programados para eso. Los filtros activos se emplean en sistemas eléctricos donde el espectro de armónicas presentes varían constantemente (Barcón, Guerrero y Martínez 2012).

En la Figura 4.5 se muestra una fotografía de un filtro pasivo, en su interior se puede ver como este está conformado por numerosos capacitores e inductores. En este caso los capacitores se encuentran en la parte de abajo y los inductores en la parte media del filtro además de que se alcanzan a apreciar las conexiones entre ellos y con protecciones eléctricas que están en la parte de arriba. Un filtro pasivo conformado por capacitores e inductores como este es como el que se modelará en ATPDraw en los próximos capítulos.



Figura 4.5. Fotografía del interior de un filtro pasivo. Fuente: www.indiamart.com.

La Figura 4.6 muestra una fotografía de la parte exterior (gabinete) de un filtro activo de la marca PQ Barcón. Los filtros híbridos son una combinación de filtros estáticos con filtros activos que se pueden usar para resolver varios problemas como mitigación de armónicos o corrección del factor de potencia. Los transformadores Zigzag son configuraciones especiales de transformadores que se conectan de tal manera que puedan cancelar las armónicas triples que se añaden en los conductores neutros de los sistemas eléctricos. Los transformadores de aislamiento conectados en conexión delta-estrella son capaces de atrapar las corrientes armónicas triples en su devanado primario delta y hacerlas circular ahí hasta que estas se disipan en forma de calor, aislando así al sistema eléctrico de las armónicas.



Figura 4.6. Vista exterior de un filtro activo. Fuente: www.pqbarcon.com.

4.9. Generación y propagación de armónicos en el sistema eléctrico

En la Figura 4.7 se muestra un diagrama unifilar simplificado de los elementos principales que conforman un sistema eólico así como su conexión con la red y los usuarios finales. En este diagrama se aprecia que no hay ningún filtro armónico conectado a este. Bajo estas condiciones y en caso de que no se conecte ningún filtro al sistema, primero la potencia es producida por los aerogeneradores en baja tensión y a una frecuencia fundamental de 60 Hz, después esta potencia fluye a través del convertidor el cual es el equipo que genera las armónicas (carga no lineal), después estas armónicas fluyen por el circuito colector del parque eólico hasta llegar a los transformadores de media a alta tensión que se encuentran en la subestación eléctrica del parque para luego llegar hasta el punto de interconexión con la CFE, es a partir de este punto de interconexión donde las armónicas circulan por el sistema de transmisión eléctrica pasando por los puntos de acoplamiento común y subestaciones de distribución para de esa manera llegar hasta las cargas de los consumidores finales.

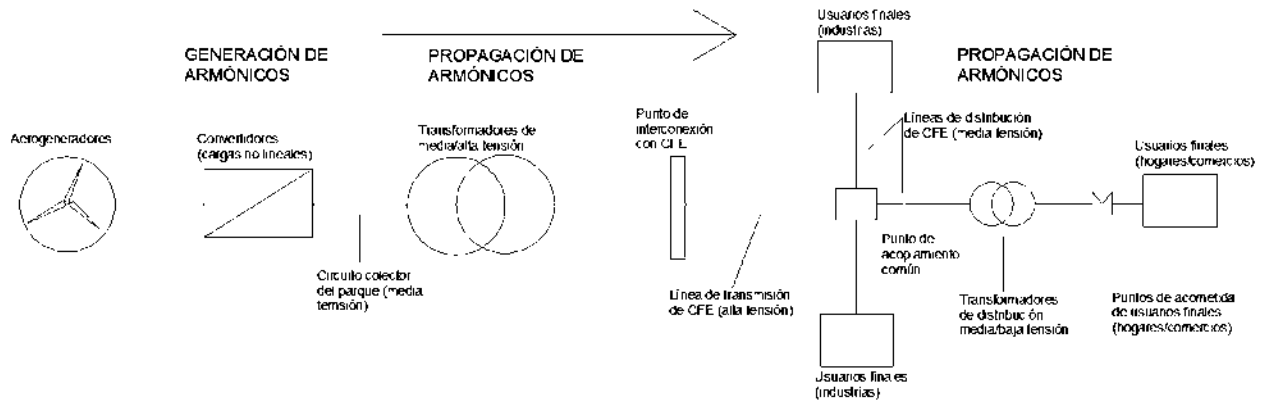


Figura 4.7. Diagrama unifilar de un sistema eléctrico eólico conectado a la red.

4.10. Filtro pasivo en derivación sintonizado en serie

Para este trabajo de tesis se eligió emplear un filtro pasivo en paralelo o derivación del subtipo sintonizado en serie ya que son los más utilizados actualmente en la industria y además son de diseño simple y económico. Los filtros pasivos en derivación sintonizados en serie están compuestos por elementos eléctricos pasivos como inductores y capacitores conectados en series entre estos y en paralelo con la carga.

Su forma de funcionamiento es el de proporcionar un camino de baja impedancia menor a la impedancia del sistema para las corrientes armónicas que van a ser filtradas para que de esta forma las armónicas circulen por el filtro y sean desviadas a tierra y así evitar que estas circulen por el sistema eléctrico y por otras cargas.

El filtro que se dimensionará es sintonizado porque para cada frecuencia armónica se calculará un valor de inductancia y capacitancia para poder mitigarla y es multisección porque estará formado por muchas secciones de capacitores e inductores conectados en serie para mitigar cada frecuencia armónica.

En la Figura 4.8 se observa un circuito equivalente del filtro pasivo que se dimensionará conectado en paralelo con el convertidor. Como el filtro que se dimensionará estará compuesto por varios capacitores e inductores para filtrar distintas armónicas, en el circuito equivalente se muestra un solo inductor (L) que representa a todos los inductores que compondrán al filtro, así como también se muestra un solo capacitor (C) que representa a los capacitores que compondrán a este. En el diagrama, I es la corriente a la salida del aerogenerador y que circula por el convertidor, I_h son las corrientes armónicas que salen del convertidor y que posteriormente fluyen por el filtro, e I_s es la corriente ya filtrada y que sigue su camino por el sistema eléctrico del parque eólico y después al sistema de transmisión y distribución hasta las cargas finales. Aunque se piense que los filtros de armónicos se instalen cerca del punto de acoplamiento común, en la práctica se conectan lo más cercano a la carga que genera los armónicos, en este caso, el convertidor.

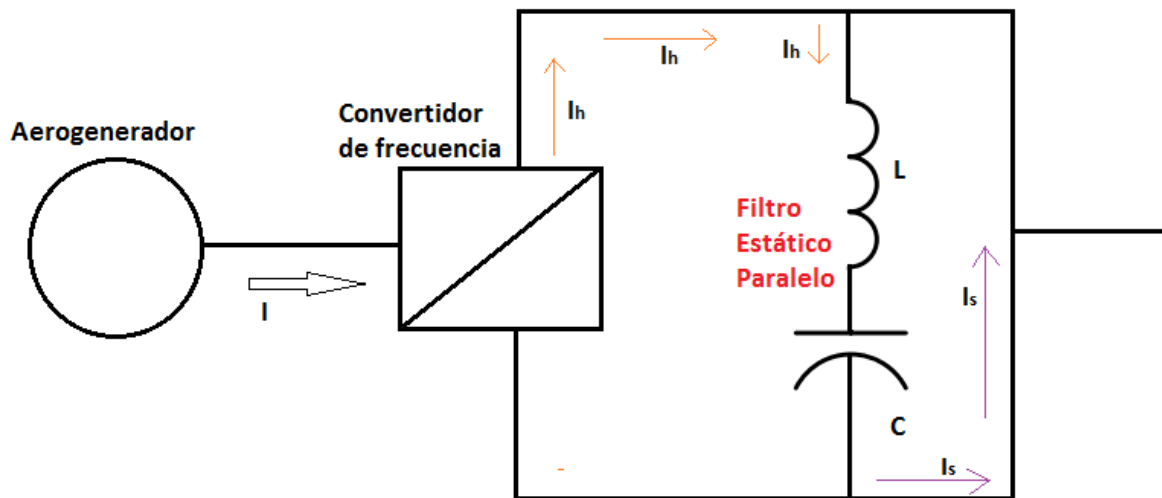


Figura 4.8. Funcionamiento básico de un filtro pasivo en derivación.

4.11. Conclusión del capítulo 4

La cuantificación de los armónicos mediante las ecuaciones antes presentadas, es esencial para conocer el nivel de distorsión armónica presente en el sistema. Conocer las cargas que los generan y la forma en cómo se propagan por los sistemas eléctricos, nos dará las herramientas para analizarlos de una mejor manera, proponer las mejores soluciones para mitigarlos y poder localizar en que parte de los sistemas eléctricos se producen.

Capítulo 5: Modelado y simulación del convertidor de potencia

5.1. Introducción

En el presente capítulo se realizan todos los cálculos necesarios para determinar los tipos de armónicos producidos por el convertidor de potencia que se está estudiando, así como también se calculan los valores RMS de los armónicos y la distorsión armónica total del voltaje presente en el sistema. Se realiza el modelado del sistema y de la carga no lineal (convertidor de potencia) en ATPDraw y se simulan los efectos que los armónicos generados por el convertidor ocasionan en las formas fundamentales de voltaje y corriente. Tales simulaciones se hacen paso a paso, agregando cada uno de los armónicos al sistema y realizando la simulación, esto con la finalidad de observar los posibles diferentes efectos que cada uno de las corrientes armónicas genera en el sistema eléctrico eólico, mostrando solo las formas de onda más significativas. Cabe mencionar que en este punto todavía no se incluirá el filtro armónico pasivo.

5.2. Cálculos para determinar los parámetros armónicos del convertidor de 6 pulsos

En esta sección, mediante ecuaciones prácticas, se determinará el orden de los armónicos que produce el convertidor de potencia seleccionado, las magnitudes de las corrientes armónicas que produce, la distorsión armónica individual del voltaje (IHD) y la distorsión armónica total del voltaje del convertidor (THD), esto con el fin de comparar estos valores calculados con los valores máximos permisibles que se incluyen en la sección 8.5 del *manual regulatorio de requerimientos técnicos para la interconexión de centrales eléctricas al sistema eléctrico nacional* del Código de Red y el cual, el THD del voltaje no debe de ser mayor al 3% para centrales eléctricas tipo D.

En la sección 3.7 se determinó el convertidor de potencia comercial a estudiar, también, de acuerdo a su ficha técnica se determinaron los datos eléctricos necesarios para el modelado de dicho convertidor y el cálculo de diseño del filtro, los cuales son: potencia nominal = 3.6 MW, Frecuencia = 60 Hz, Voltaje RMS de Salida = 690 V.

5.2.1. Cálculo de la magnitud de la corriente del convertidor a la frecuencia fundamental

Esta se calcula por medio de la ecuación:

$$I_1 = \frac{P}{\sqrt{3} V} \quad (5.1)$$

Sustituyendo valores tenemos que la magnitud de la corriente a la frecuencia fundamental es:

$$I_1 = \frac{3.6 \times 10^6}{\sqrt{3} \cdot 690} = 3,012.2623 \text{ A}$$

Esta magnitud de corriente a la frecuencia fundamental de 60 Hz es el valor de la corriente RMS nominal que el convertidor elegido maneja para este estudio.

5.2.2. Cálculo para determinar las armónicas producidas por el convertidor

Aunque el convertidor back-to-back está conformado por dos convertidores (rectificador e inversor) de 6 pulsos, se toma como si fuera un solo convertidor ya que en el back-to-back rectificador e inversor están conectados en cascada. Por lo anterior, tenemos que para calcular las armónicas generadas por un convertidor de 6 pulsos se utiliza la ecuación:

$$h_c = n \cdot q \pm 1 \quad (5.2)$$

Dónde h_c es cada una de las armónicas u órdenes armónicos que genera el convertidor, $n = 1, 2, 3, \dots$, y q es igual al número de pulsos del convertidor que en este caso es 6.

Al sustituir valores y realizar los cálculos tenemos que las armónicas producidas por el convertidor de 6 pulsos son: la quinta, la séptima, la onceava, la treceava, la diecisieteava, la décimo novena, la vigésimo tercera, vigésimo quinta, vigésimo novena, trigésimo primera, trigésimo quinta, trigésimo séptima, cuadragésimo primera, cuadragésimo tercera, cuadragésimo séptima, y cuadragésimo novena armónicas ($h=5, h=7, h=11, h=13, h=17, h=19, h=23, h=25, h=29, h=31, h=35, h=37, h=41, h=43, h=47$ y $h=49$).

Aunque los efectos provocados por armónicos mayores al 25 se consideran mínimos y despreciables, en esta tesis se tomará en cuenta hasta el armónico 50 ya que el código de red establece que así debe de considerarse para centrales eléctricas de generación a pesar de que eso implique diseñar un filtro mucho más robusto en tamaño, más costoso de fabricar y más caro de mantener.

5.2.3. Cálculo de los valores RMS de las corrientes armónicas

Este cálculo se realiza mediante la ecuación:

$$I_h = \frac{I_1}{h} \quad (5.3)$$

Donde I_1 es la magnitud RMS de la corriente a la frecuencia fundamental de 60 Hz y h es el número u orden armónico. Sustituyendo valores para cada una de los números armónicos presentes en el sistema tenemos que los valores RMS de cada corriente armónica son los que se muestran en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1. Valores RMS de las corrientes armónicas en el sistema

Orden de corriente armónica	Valor RMS de la corriente armónica	Orden de corriente armónica	Valor RMS de la corriente armónica
I_5	602.4525 A	I_{29}	103.8711 A
I_7	430.3232 A	I_{31}	97.1698 A
I_{11}	273.8420 A	I_{35}	86.0646 A
I_{13}	231.7125 A	I_{37}	81.4125 A
I_{17}	177.1919 A	I_{41}	73.4698 A
I_{19}	158.5401 A	I_{43}	70.0526 A
I_{23}	130.9679 A	I_{47}	64.0907 A
I_{25}	120.4905 A	I_{49}	61.4747 A

Los anteriores valores de las magnitudes en amperes de cada una de las corrientes armónicas se utilizarán para modelar la carga no lineal, ya que estas corrientes calculadas serán las que el convertidor de 6 pulsos genere.

5.2.4. Cálculo de los valores RMS de los voltajes armónicos

En esta sección se determinará el valor en volts de cada uno de los armónicos generados por el convertidor de potencia utilizando la siguiente ecuación que se mostró en la sección 4.5.

$$V_a = I_a Z$$

Donde V_a es la magnitud del voltaje de un determinado orden armónico (ejemplo: $h=5$, $h=7$, etc.). I_a es el valor de la corriente RMS en amperes de un determinado armónico y Z es la impedancia del sistema eléctrico, ya que como se dijo en la sección 4.5, los voltajes armónicos son generados cuando las corrientes armónicas fluyen a través del sistema eléctrico y estos interactúan con la oposición natural del sistema.

Sin embargo, en esta tesis se están estudiando los armónicos generados por un convertidor de electrónica de potencia utilizado en aerogeneradores, lo cual quiere decir que la ubicación ideal y correcta de un filtro pasivo de armónicos instalado en una central eólica estaría conectado justo después del convertidor de potencia, esto para filtrar y mitigar los armónicos producidos por el convertidor antes de que esos armónicos lleguen a cada uno de los transformadores de pedestal elevadores que se encuentran en la base de cada uno de los aerogeneradores y de esta forma también evitar que esos armónicos se distribuyan a través del circuito interior del parque eólico.

En base a lo anterior, el valor de *impedancia* Z que se tomará en cuenta en esta tesis será la impedancia del conductor eléctrico que conecta el convertidor de potencia con el filtro de armónicos, pero debido a que el fabricante no dispone de datos de la Impedancia del conductor del aerogenerador se supondrá una impedancia de $Z = 0.1 \text{ Ohm}$, ya que aunque el nivel de impedancia del sistema sea bajo o alto y en presencia de corrientes armónicas, siempre se generarán voltajes armónicos.

A partir de lo anterior se pueden calcular los voltajes RMS armónicos para cada corriente armónica generada por el convertidor con la ecuación 4.4. Las magnitudes RMS de cada voltaje armónico presente en el sistema se muestran en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2. Valores RMS de los voltajes armónicos en el sistema.

Orden del voltaje armónico	Valor RMS del voltaje armónico	Orden del voltaje armónico	Valor RMS del voltaje armónico
V_5	60.2453 V	V_{29}	10.3871 V
V_7	43.0323 V	V_{31}	9.717 V
V_{11}	27.3842 V	V_{35}	8.6065 V
V_{13}	23.1713 V	V_{37}	8.1413 V
V_{17}	17.7192 V	V_{41}	7.347 V
V_{19}	15.8540 V	V_{43}	7.0053 V
V_{23}	13.0968 V	V_{47}	6.4091 V
V_{25}	12.0491 V	V_{49}	6.1475 V

Un filtro pasivo de armónicos bien podría instalarse en la subestación eléctrica elevadora del parque eólico, pero eso sería catastrófico y muy dañino para los transformadores, conductores neutro y dispositivos de protección termo magnética que se encuentran en el interior del sistema eléctrico del parque eólico.

5.2.5. Cálculo de la Distorsión Armónica Individual de los voltajes armónicos

En esta sección se pretende conocer el porcentaje de la distorsión armónica individual de cada una de las tensiones de los armónicos presentes y compararlas con los valores límite que se indican en el código de red.

El cálculo se realiza mediante la ecuación

$$IHD_h = \frac{V_h}{V_1} 100 \quad (5.5)$$

Donde el subíndice h se refiere al orden del armónico, V_h es la magnitud del voltaje de un determinado armónico y V_1 es la magnitud del voltaje de la onda fundamental.

Si sustituimos valores para cada armónico generado por el convertidor de potencia tenemos que el IHD de cada voltaje armónico es como se muestra en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3. IHD de cada voltaje armónico.

Orden o número armónico de cada IHD	IHD de cada voltaje armónico	Orden o número armónico de cada IHD	IHD de cada voltaje armónico
IHD₅	8.73%	IHD₂₉	1.51%
IHD₇	6.24%	IHD₃₁	1.41%
IHD₁₁	3.97%	IHD₃₅	1.25%
IHD₁₃	3.36%	IHD₃₇	1.18%
IHD₁₇	2.57%	IHD₄₁	1.06%
IHD₁₉	2.3%	IHD₄₃	1.02%
IHD₂₃	1.9%	IHD₄₇	0.93%
IHD₂₅	1.75%	IHD₄₉	0.89%

La Distorsión Armónica Individual indica la contribución de cada frecuencia armónica a la forma resultante distorsionada (Sankaran, 2002). Por ejemplo, el resultado de IHD₅ es igual a 8.73%, esto quiere decir que la 5^{ta} armónica representa un 8.73% del voltaje fundamental y además ese porcentaje es lo que contribuye a la distorsión total de la fundamental.

En la siguiente tabla se realiza una comparación de los valores de porcentaje límite del IHD del voltaje que indica el código de red con los valores en porcentaje del IHD del voltaje obtenidos en esta sección. En esta tabla se puede observar claramente que todos los valores de IHD del voltaje generados por los armónicos del convertidor sobrepasan a los valores máximos aceptables de IHD del voltaje que se indican en el código de red para centrales tipo C y D.

Tabla 5.4. Comparación del IHD de los voltajes armónicos del convertidor con el IHD máximo permitido en el código de red.

Número u orden armónico	Nivel de armónica (% de la Tensión fundamental)	IHD del voltaje calculado
h₅	2 %	8.73%
h₇	2 %	6.24%
h₁₁	1.5 %	3.97%
h₁₃	1.5 %	3.36%
h₁₇	1.2 %	2.57%
h₁₉	1.07 %	2.3%
h₂₃	0.89 %	1.9%
h₂₅	0.82 %	1.75%
h₂₉	0.7 %	1.51%
h₃₁	0.66 %	1.41%
h₃₅	0.58 %	1.25%
h₃₇	0.55 %	1.18%
h₄₁	0.5 %	1.06%
h₄₃	0.47 %	1.02%
h₄₇	0.43 %	0.93%
h₄₉	0.42 %	0.89%

5.2.6. Calculo de la distorsión armónica total del voltaje

El objetivo de este cálculo es el de conocer la distorsión total de la onda de voltaje que las corrientes armónicas producidas por el convertidor generan una vez que estas interactúan con la impedancia del sistema.

El valor de THD del voltaje se puede calcular con la misma ecuación con la que se calculó el THD de la corriente, sin embargo, como ya conocemos la Distorsión Armónica Individual (IHD) que cada voltaje aporta, el THD del voltaje también se puede calcular como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los valores de IHD del voltaje de cada armónica:

$$THD_v = \sqrt{(IHD_5^2 + IHD_7^2 + IHD_{11}^2 + \dots + IHD_n^2)} \quad (5.6)$$

Sustituyendo valores tenemos que la Distorsión Armónica Total del Voltaje es:

$$THD_v = \sqrt{(8.73^2 + 6.24^2 + 3.97^2 + 3.36^2 + 2.57^2 + 2.3^2 + 1.9^2 + 1.75^2 + 1.51^2 + 1.41^2 + 1.25^2 + 1.18^2 + 1.06^2 + 1.02^2 + 0.93^2 + 0.89^2)}$$

$$THD_v = 13.1115\%$$

Este valor de THD del voltaje es el que se intentará reducir hasta un valor aceptable como lo indica el código de red una vez que se calcule y diseñe el filtro armónico pasivo. Si comparamos el resultado anterior del THD del voltaje con el valor máximo permitido de THD_v para centrales tipo C y D el cual es igual a 3%, podemos observar que la Distorsión Armónica Total THD que produce el convertidor que se está estudiando sobrepasa el límite por un margen amplio.

5.3. Modelado y simulación en ATPDraw

Un modelo computacional es una representación, recreación o construcción (modelado) de un sistema físico real por medio de herramientas de software en el cual se toman las variables físicas necesarias más importantes para representarlo. La simulación por otra parte trata de reproducir y poner a prueba las variables del modelo para observar su comportamiento y obtener conclusiones que nos puedan ayudar a proponer soluciones.

Como se mencionó en la introducción de esta tesis, el programa computacional que se usará para crear el modelo computacional del convertidor de potencia, del sistema eléctrico, y del filtro armónico pasivo y simular su comportamiento es ATPDraw.

ATPDraw es un software con el cual se pueden construir circuitos o sistemas eléctricos gráficamente tanto monofásicos como trifásicos seleccionando una variedad de elementos eléctricos de menús o ventanas para después unirlos entre ellos con líneas que representan nodos o conductores. A cada elemento se le dan valores y se agregan medidores al sistema para poderlo simular y ver los resultados. En la Figura 5.1 se muestra la interfaz de la versión de ATPDraw que se utilizará. ATPDraw es un software disponible para Windows por lo tanto el programa tiene el diseño estándar (de ventana) de Windows.

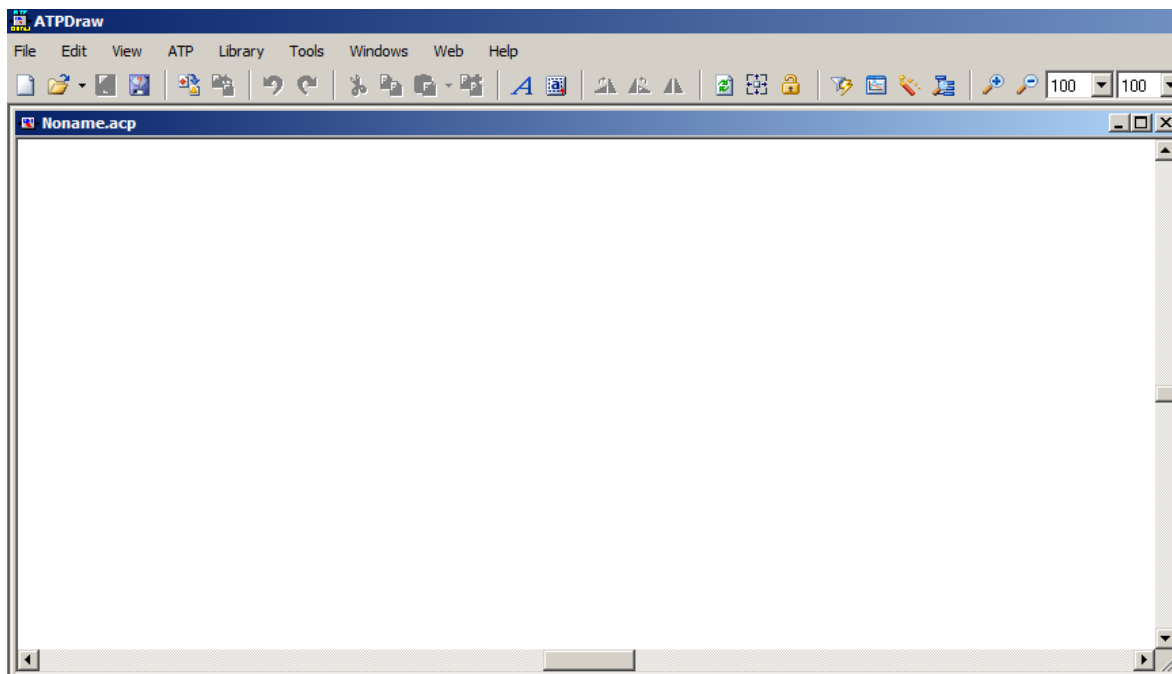


Figura 5.1. Interfaz gráfica de ATPDraw.

5.4. Elementos eléctricos que conforman el modelo de ATPDraw

En esta sección se especificarán los elementos que se incluirán en nuestro modelo los cuales serán los siguientes:

Fuente de voltaje: este elemento representa el voltaje alterno nominal a la salida de generador del aerogenerador a la frecuencia fundamental y que se encuentra también en la entrada y salida del convertidor de potencia.

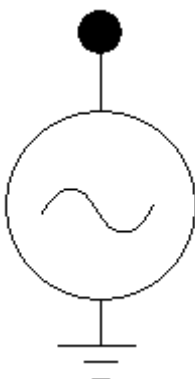


Figura 5.2. Fuente de voltaje en ATPDraw.

Fuente de corriente: este elemento representa la magnitud de la corriente nominal del convertidor la frecuencia fundamental. También representa la magnitud y frecuencia de cada una de las corrientes armónicas producidas por el convertidor de potencia.

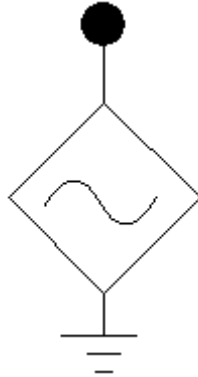


Figura 5.3. Fuente de corriente en ATPDraw.

Impedancia: Este elemento representa la impedancia del sistema por donde circulan las corrientes armónicas generadas por el convertidor que en esta tesis sería la impedancia de un conductor eléctrico y su símbolo es el de un simple resistor. También el símbolo de resistor va a representar la resistencia eléctrica natural de los inductores del filtro pasivo.



Figura 5.4. Impedancia o resistencia en ATPDraw.

Probador de voltaje: este elemento representa a un medidor de voltaje o voltímetro y es necesario incluirlo para poder almacenar las variables eléctricas del circuito.



Figura 5.5. Probador de voltaje en ATPDraw.

Probador de corriente: este elemento representa un medidor de corriente o amperímetro y permite almacenar las variables de la corriente del circuito.

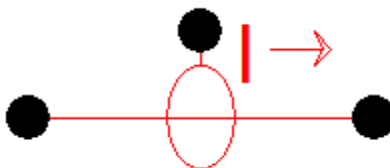


Figura 5.6. Probador de corriente en ATPDraw.

Capacitor: este elemento representará a cada uno de los valores de capacitancia de cada capacitor que conforma el filtro pasivo. Este elemento se obtiene del menú de ramas lineales en ATP.

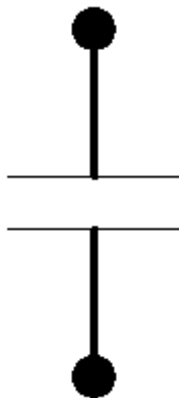


Figura 5.7. Capacitor en ATPDraw.

Inductor: este elemento representará a los valores de inductancia de cada uno de los inductores que conforman el filtro pasivo. Este elemento se obtiene del menú de ramas lineales en ATP. Este elemento también se hubiera usado para representar la inductancia del sistema en caso de que en el modelo se hubieran considerado cargas inductivas como motores o transformadores.



Figura 5.8. Inductor en ATPDraw.

5.5. Modelado y simulación del convertidor de potencia en el sistema

En esta sección, mediante ATPDraw, se construirá el modelo computacional del convertidor de electrónica de potencia, del sistema eléctrico considerado y la distorsión armónica generada por el convertidor, así como sus efectos sobre las señales fundamentales de corriente y voltaje. En este primer modelo no se incluirá el filtro armónico, esto con el fin de poder observar el impacto que tienen las corrientes armónicas sobre la corriente y voltaje fundamentales.

Cuando se realiza un modelo computacional para el estudio de los armónicos hay que preguntarse dos cosas; primero hasta qué punto del sistema incluir en el modelo y segundo decidir si el sistema debe de ser monofásico o trifásico. Para el modelo que se realizará en esta tesis la extensión del sistema eólico que se considerará incluir será desde el generador eléctrico del transformador, pasando por el convertidor hasta antes de la entrada del transformador de pedestal elevador. Si en el modelo del sistema se incluyeran cargas como motores o transformadores entonces se tendría que incluir un inductor que representara una inductancia del sistema ya que los motores y transformadores son cargas inductivas. También cabe mencionar que el modelo que se realizará será de una sola fase ya que, en general construir un modelo monofásico del sistema resulta ser más práctico y suficiente para poder estudiar los armónicos.

Generalmente cuando se modelan cargas no lineales, se hace representando a la carga no lineal como un grupo de fuentes de corriente conectadas en paralelo con el sistema, en el que cada fuente de corriente representará una determinada corriente armónica con su respectiva magnitud.

El proceso que se utilizará para modelar los armónicos generados por el convertidor y el efecto que causan en la señal fundamental se explicará a continuación, incluyendo primero en el modelo la señal fundamental de corriente y voltaje sin ningún armónico para después ir incluyendo en el modelo los armónicos generados en el sistema eólico por el convertidor, esto con el fin de poder observar los efectos que va produciendo cada armónico sobre las señales fundamentales del sistema.

1) Primero se construirá el modelo del sistema incluyendo solo el voltaje y la corriente fundamentales sin la carga no lineal y sin el filtro esto con el fin de observar como es onda senoidal cuando no existen perturbaciones en el sistema. Los elementos que se usarán para esta primera etapa del modelo son una fuente de voltaje (de frecuencia fundamental), una fuente de corriente (de frecuencia fundamental), una resistencia (impedancia del sistema), un probador de voltaje y un probador de corriente.

2) Una vez seleccionados los elementos a utilizar, estos se unen manualmente con el mouse terminal con terminal para construir el sistema aterrizando la fuente de voltaje y la fuente de corriente para cerrar el circuito. Esta primera etapa del modelo sin la carga no lineal (convertidor) y sin el filtro armónico pasivo es como se muestra a continuación en la Figura 5.9.

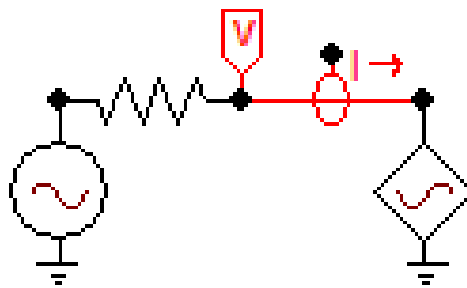


Figura 5.9. Modelo del sistema sin la carga no lineal.

3) Después de haber unido los elementos y haber construido el circuito ahora se especifican los parámetros eléctricos a cada uno de estos. Los parámetros eléctricos como magnitud de corriente o voltaje, frecuencia, número de fases, etc., pueden ser modificados, entonces, a cada elemento de nuestro modelo se le especifican los valores eléctricos que fueron previamente calculados en secciones anteriores.

4) Una vez especificados los valores eléctricos a cada elemento ahora se determina el tiempo máximo de la simulación. Esto es muy importante de hacer ya que si no se hace la simulación no podrá correr o no se podrá llevar a cabo. En nuestro modelo se especificará un tiempo máximo de simulación de $T_{max} = 0.1333$ s.

5) Una vez ya especificados los valores eléctricos de cada elemento y el tiempo máximo de simulación, el modelo está listo para correr. Para “correr” la simulación se hace con la opción “run ATP” para correr el programa. Una vez hecho esto se pueden observar los resultados de la simulación utilizando las opciones “run plot” y “plot” que están incluidas en los menús de ATP. Los resultados resultados de las simulaciones serían las gráficas con las formas de onda de corriente y voltaje así como sus magnitudes.

A continuación, en las Figuras 5.10 y 5.11 se muestran las formas de onda del voltaje y de la corriente respectivamente. Estos resultados pertenecen a la simulación y al modelo del sistema eólico

construido sin ninguna armónica presente el cual se muestra en la Figura 5.9. El propósito de simular primero el sistema eléctrico eólico sin considerar ningun armónico es el de mostrar y comprobar que las formas de onda del voltaje y corriente son perfectas cuando no se tiene ningún armónico presente en el sistema eléctrico.

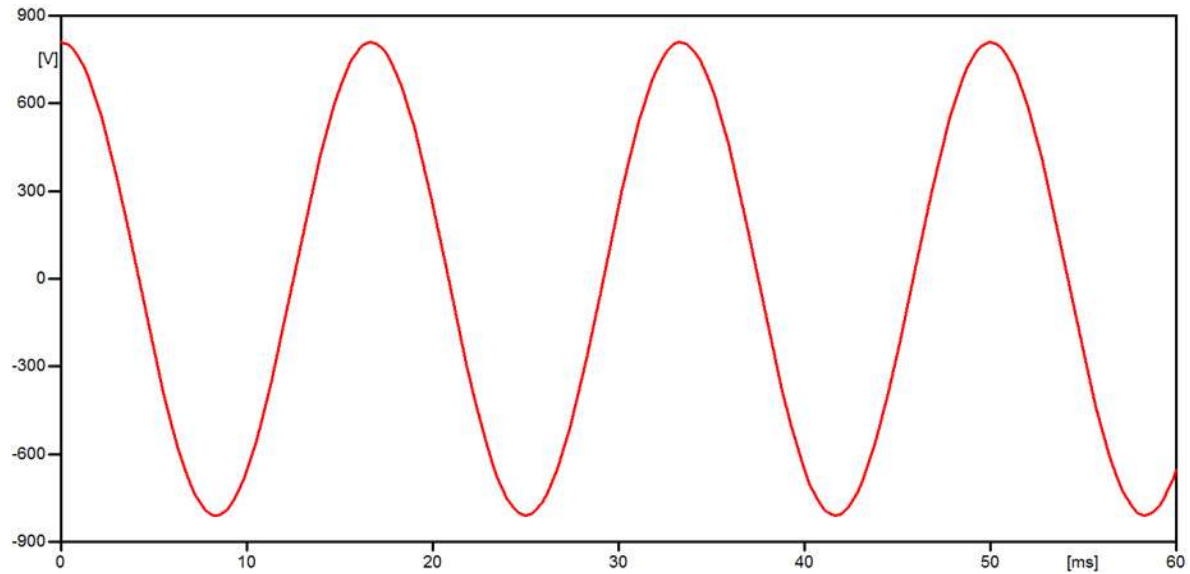


Figura 5.10. Forma de onda del voltaje sin ningún armónico presente en el sistema.

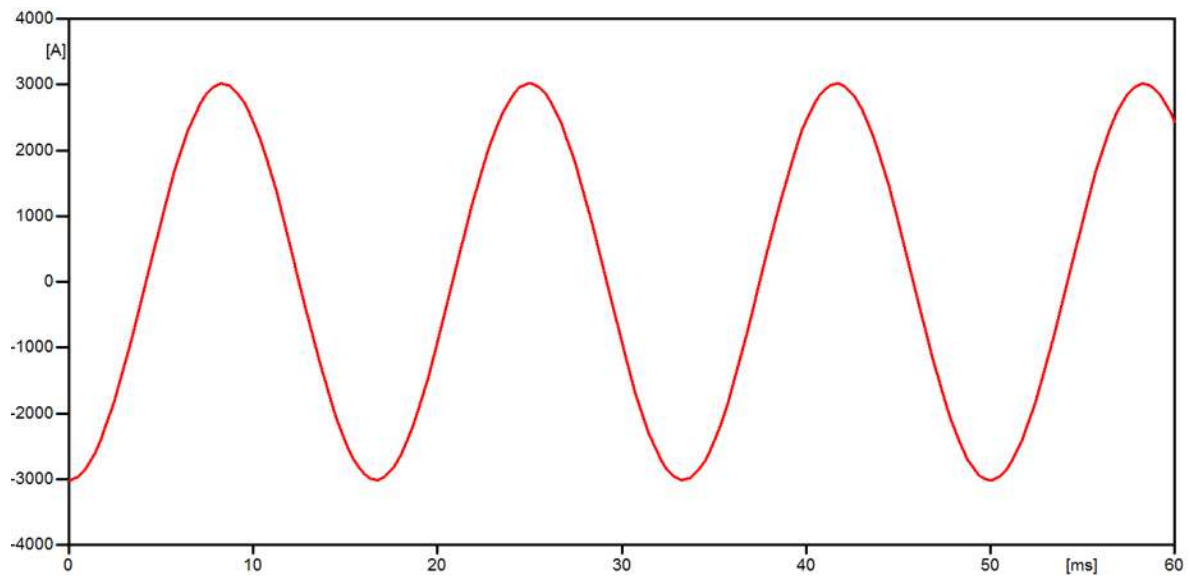


Figura 5.11. Forma de onda de la corriente sin ningún armónico presente en el sistema.

A partir de aquí, todas las simulaciones del sistema que se hagan incluirán a los armónicos definidos en el capítulo anterior. Al modelo del sistema de la Figura 5.9 se le agregarán los armónicos que genera el convertidor de potencia hasta el armónico 49. Solo se mostrarán las gráficas de las formas

de onda más significativas, así como sus respectivos modelos del sistema, de acuerdo al efecto que cada armónico vaya generando sobre las ondas fundamentales de voltaje y corriente.

La Figura 5.12 muestra el modelo del sistema eólico con el quinto armónico incluido. Como se ha dicho, en ATPDraw cada uno de los armónicos se representa como una fuente de corriente conectada en paralelo con el sistema. En este caso, la quinta armónica se identifica con un número cinco debajo de la fuente de corriente que representa armónica en cuestión.

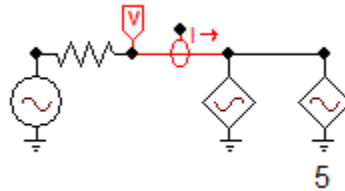


Figura 5.12. Modelo del sistema con el armónico 5 incluido.

Los resultados de las formas de onda del voltaje y corriente de las simulaciones del sistema eólico con el quinto armónico incluido son los que se muestran en las Figuras 5.13 y 5.14. Se observa que con solo agregar el 5^{to} armónico al sistema eléctrico eólico ya hay una alteración visible en la forma de onda de las señales de corriente y voltaje fundamentales y también se puede observar que la alteración es más sobresaliente en la forma de onda de la corriente que en la de voltaje.

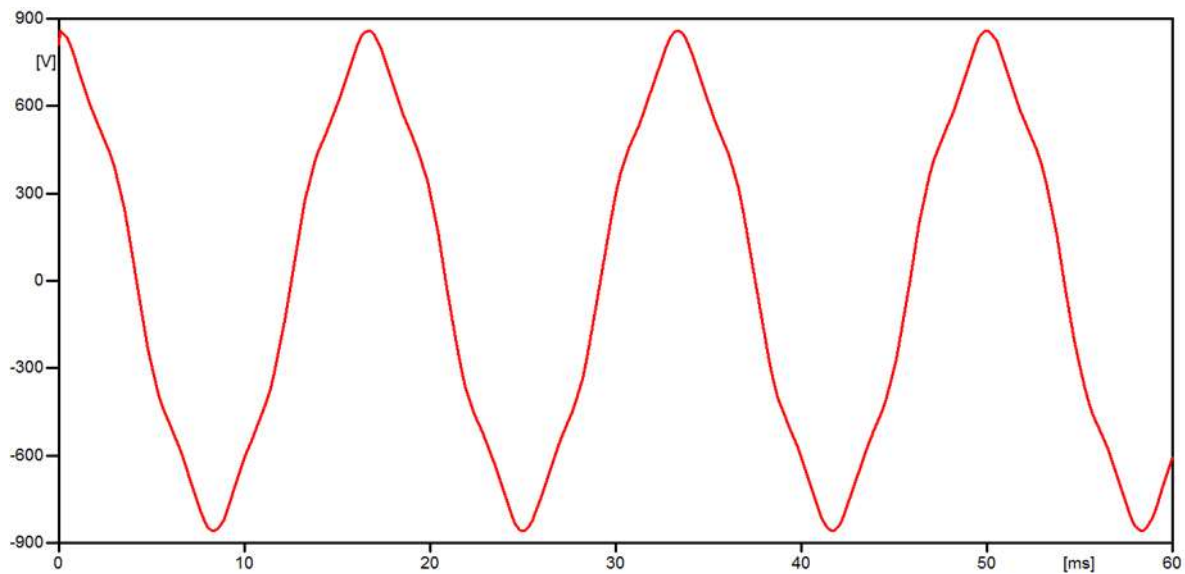


Figura 5.13. Forma de onda del voltaje con el armónico 5 presente.

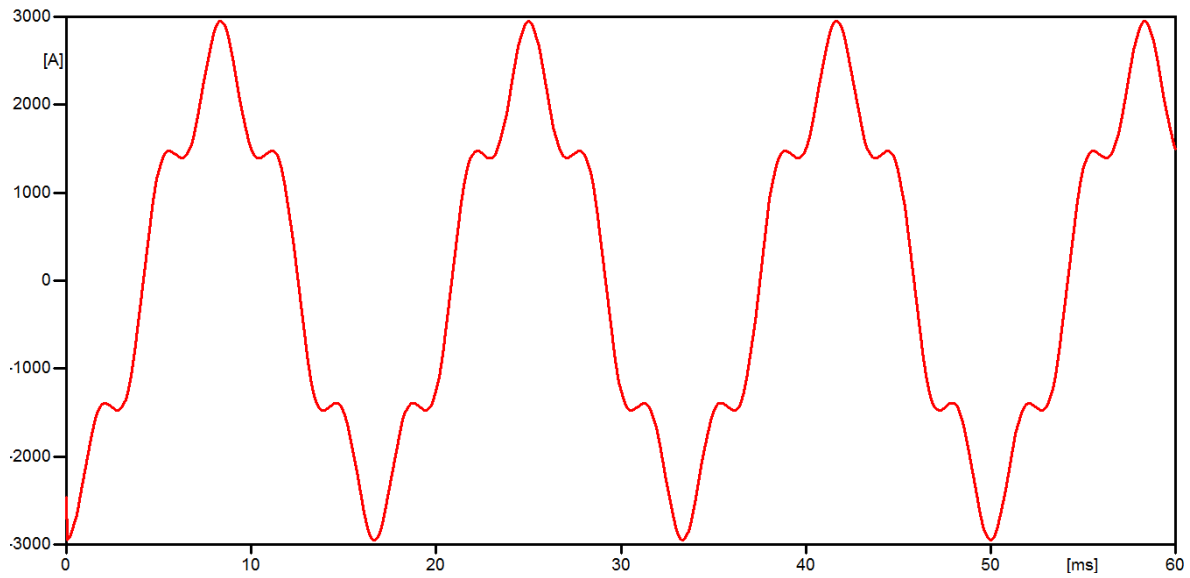


Figura 5.14. Forma de onda de la corriente con el armónico 5 presente.

Ahora se procede a agregar el 5^{to} y 7^{mo} armónicos al sistema eólico. En la Figura 5.15 se muestra el modelo del sistema con los dos armónicos mencionados. En las Figuras 5.16 y 5.17 se observan las formas de onda del voltaje y de la corriente cuando se les suman los armónicos quinto y séptimo. Nótese que ambas formas de onda se alteran y distorsionan más, aunque la forma de onda de corriente es la que presenta un mayor grado de distorsión hasta el momento.

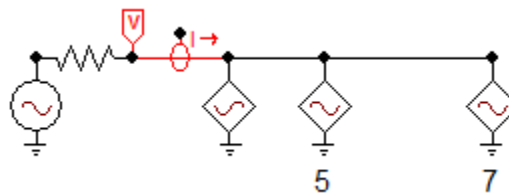


Figura 5.15. Modelo del sistema con los armónicos 5 y 7 incluidos.

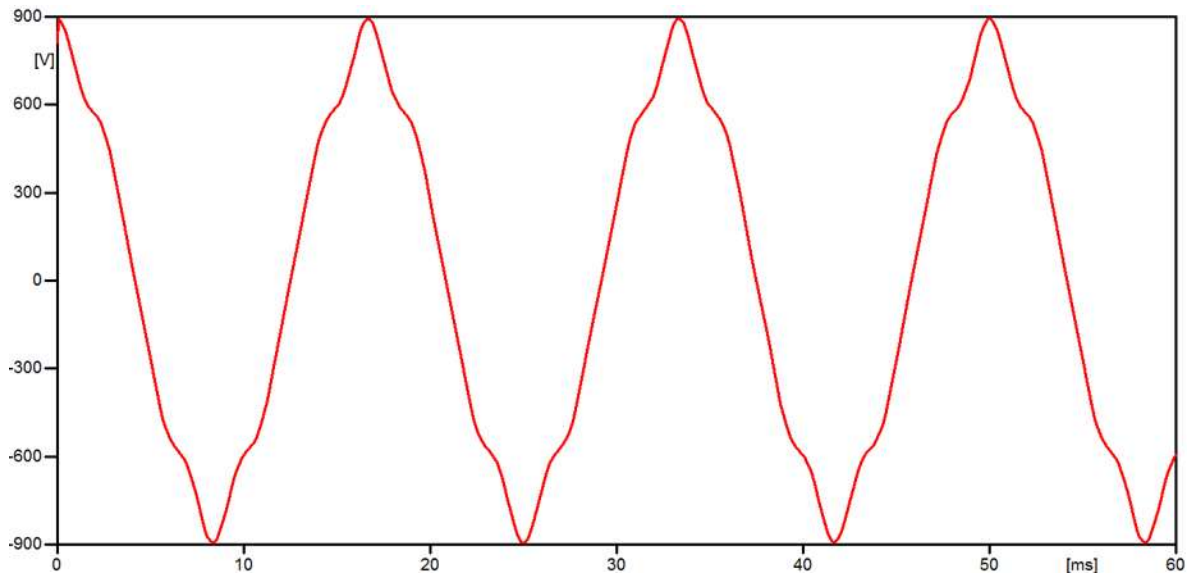


Figura 5.16. Forma de onda del voltaje con los armónicos 5 y 7 presentes.

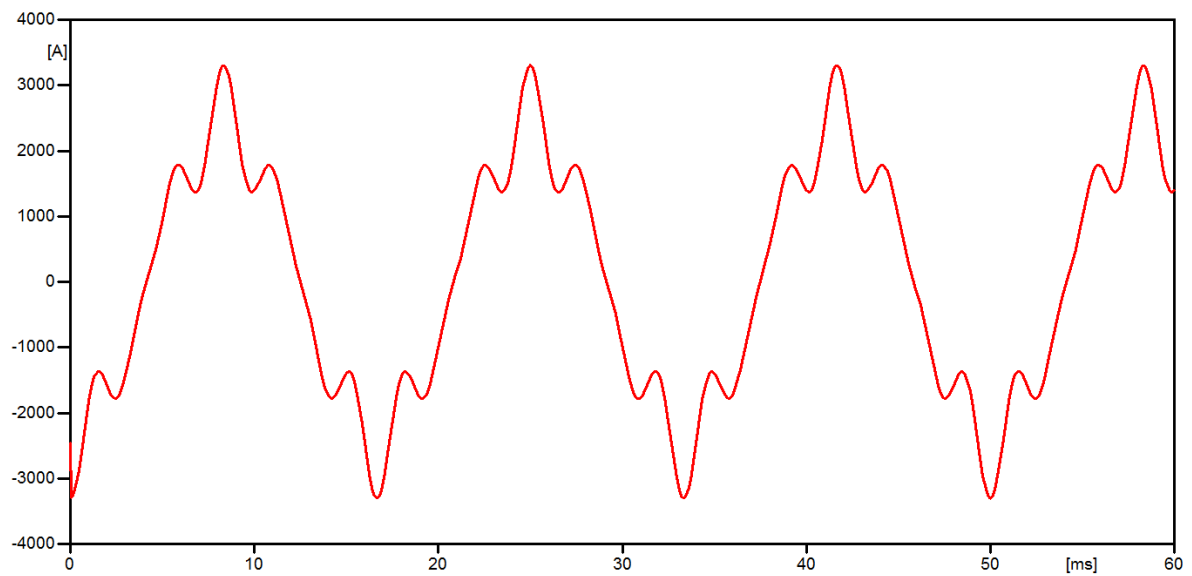


Figura 5.17. Forma de onda de la corriente con los armónicos 5 y 7 presentes.

Ahora se agrega también el armónico 11 junto con la armónico 5 y 7. El modelo del sistema con estos armónicos es como se observa en la Figura 5.18. Las formas de onda de la corriente y el voltaje con estos armónicos presentes se muestran en las Figuras 5.19 y 5.20 respectivamente. Se observa

que ambas formas de onda se distorsionan un poco más y la magnitud RMS de la corriente aumentó significativamente.

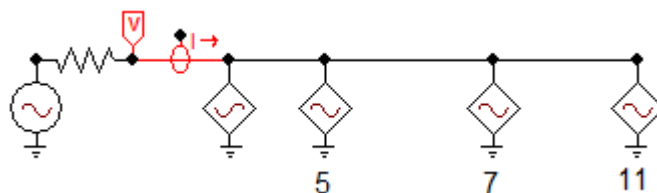


Figura 5.18. Modelo del sistema con los armónicos 5, 7 y 11 incluidos.

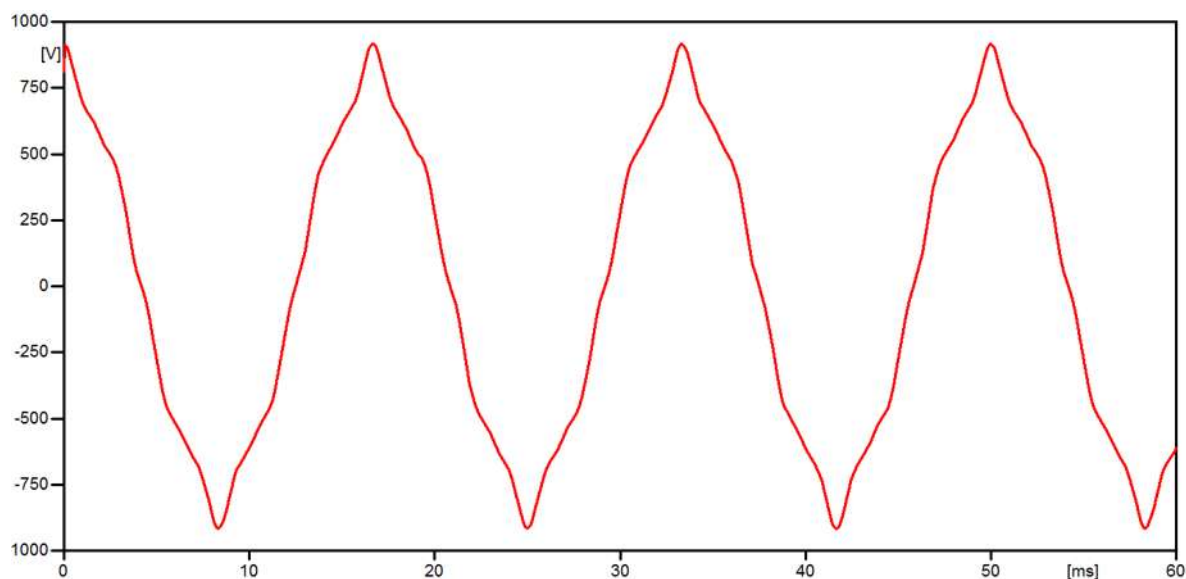


Figura 5.19. Forma de onda del voltaje con los armónicos 5, 7 y 11 presentes.

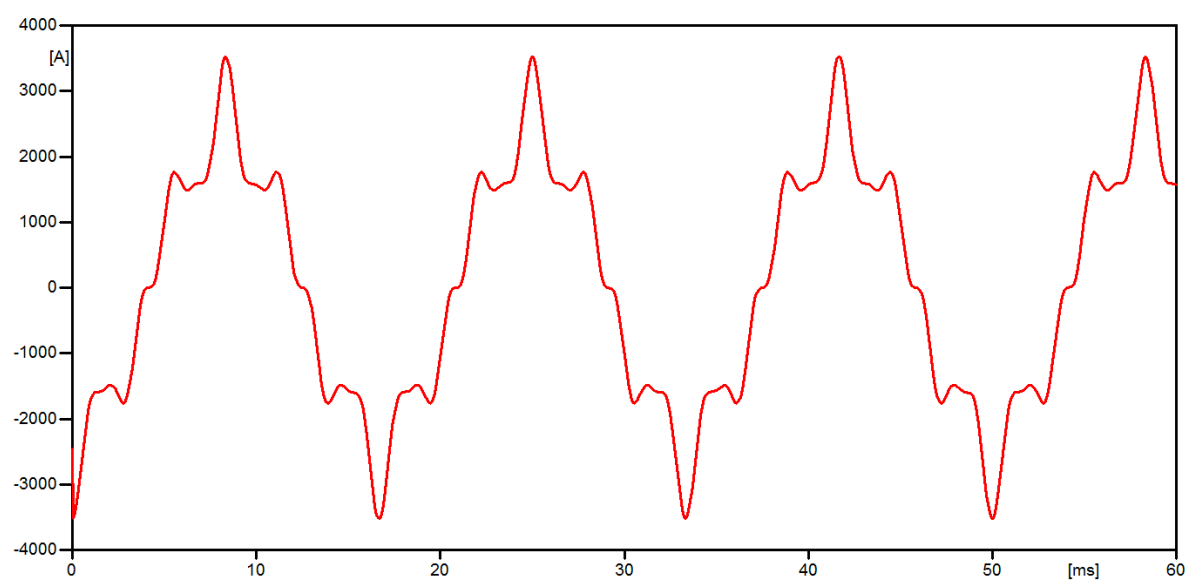


Figura 5.20. Forma de onda de la corriente con los armónicos 5, 7 y 11 presentes.

El modelo de la carga no lineal y el sistema eólico con los armónicos del quinto al décimo séptimo se observa en la Figura 5.21. Las formas de onda se muestran en las Figuras 5.22 y 5.23. Esta vez se puede ver que ambas formas de onda se alteran aún más y que los valores RMS de ambas cantidades aumentan todavía más con respecto al modelo donde se incluye hasta la armónico 13.

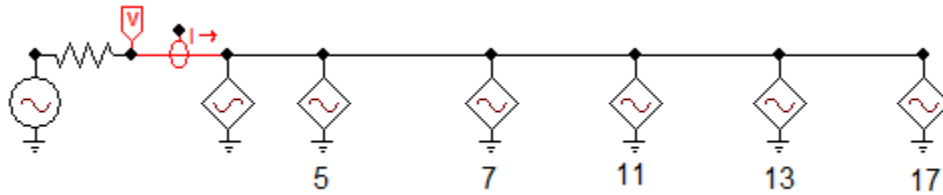


Figura 5.21. Modelo del sistema con los armónicos 5 a la 17 incluidas.

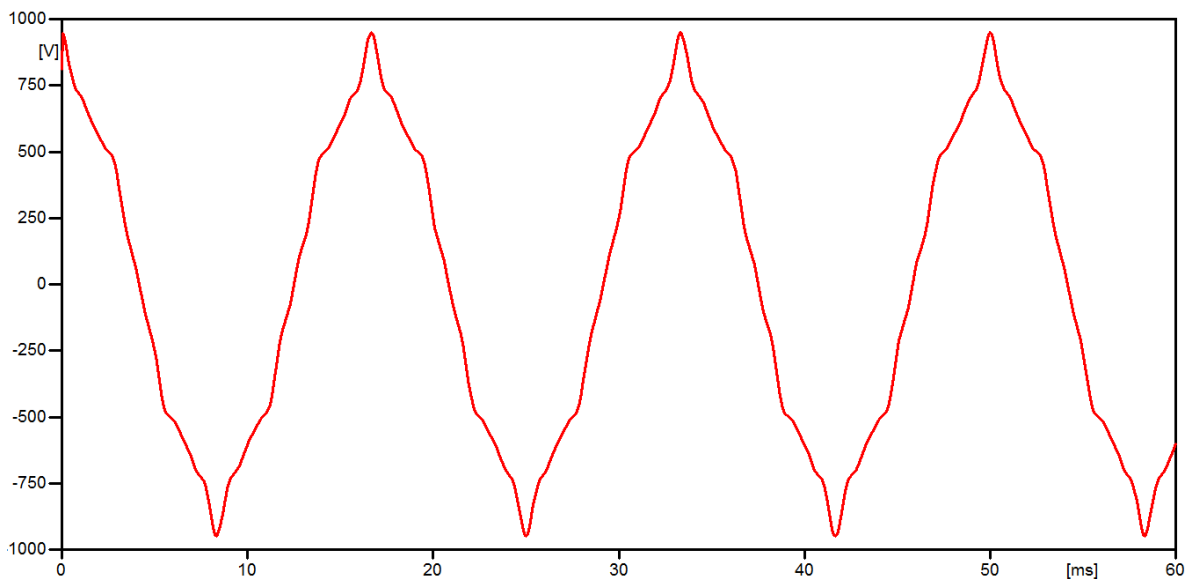


Figura 5.22. Forma de onda del voltaje con los armónicos 5 al 17 presentes.

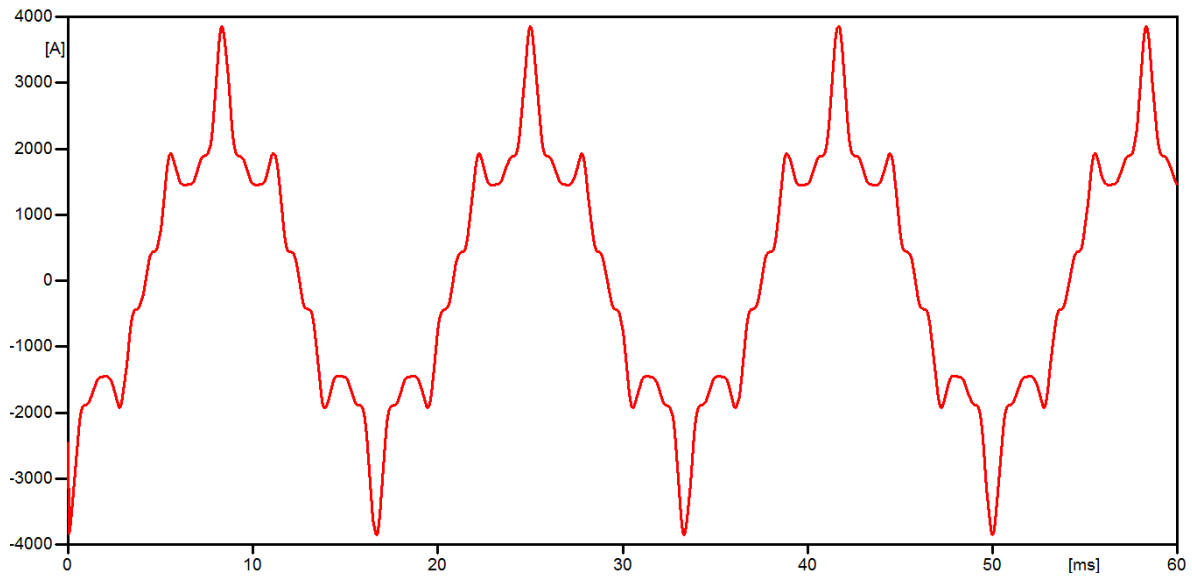


Figura 5.23. Forma de onda de la corriente con los armónicos 5 al 17 presentes.

El modelo del sistema eólico y la carga no lineal con los armónicos quinto al vigécimo quinto se muestra en la Figura 5.24 y las formas de onda del voltaje y la corriente de este modelo se observan en las Figuras 5.25 y 5.26 respectivamente. De acuerdo a muchos varios autores es hasta la armónica veinticinco que se produce la mayor cantidad de distorsión a las ondas de voltaje y corriente.

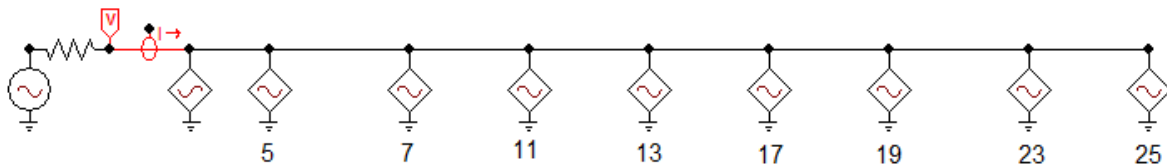


Figura 5.24 Modelo del sistema con los armónicos 5 al 25 incluidos.

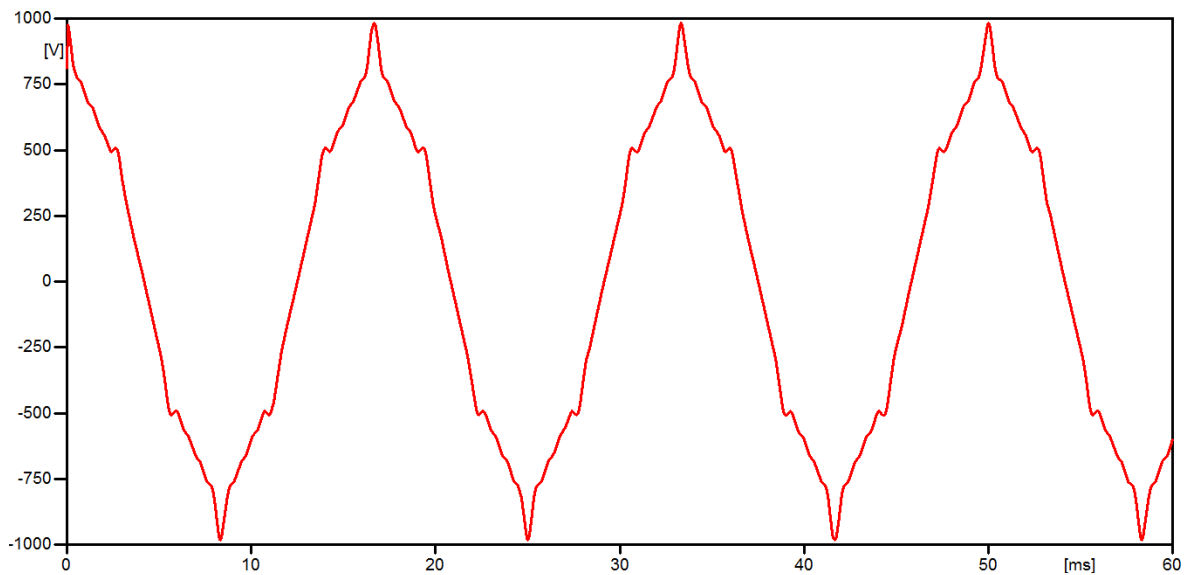


Figura 5.25. Forma de onda del voltaje con los armónicos 5 al 25 presentes.

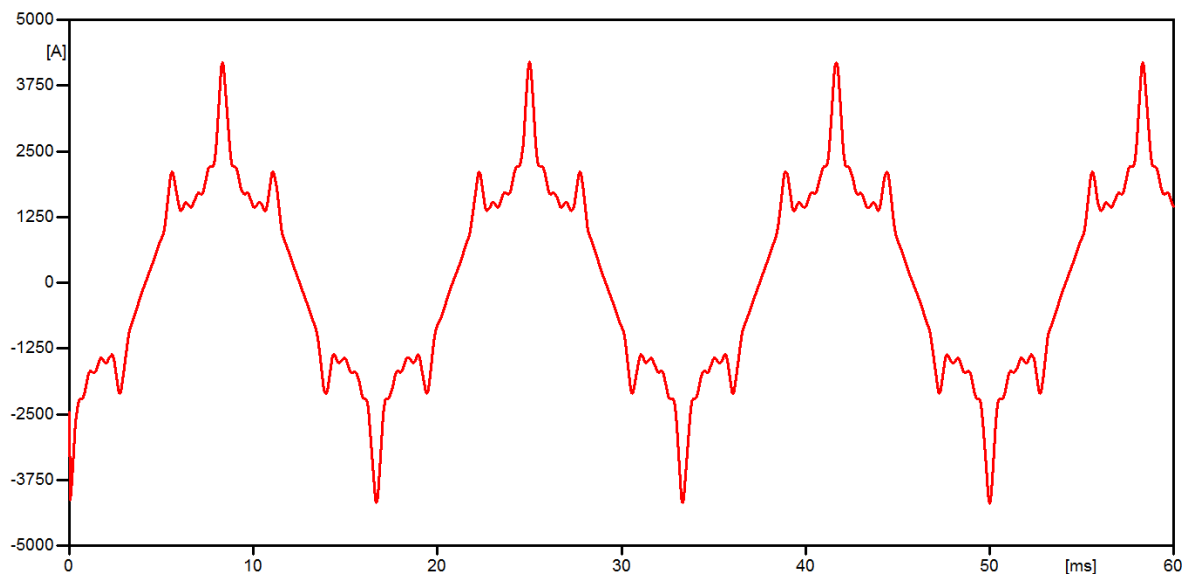


Figura 5.26. Forma de onda de la corriente con los armónicos 5 al 25 presentes.

De esta misma manera se prosigue a añadir cada uno de los armónicos del convertidor al sistema eléctrico eólico. Los modelos del sistema con los demás armónicos incluidos y los resultados de las simulaciones de las formas de onda de los voltajes y corrientes se presentan a continuación. Se observará que a partir de aquí a medida que se vayan agregando más armónicos ya no habrá un cambio significativo en la magnitud y forma de onda del voltaje y corriente.

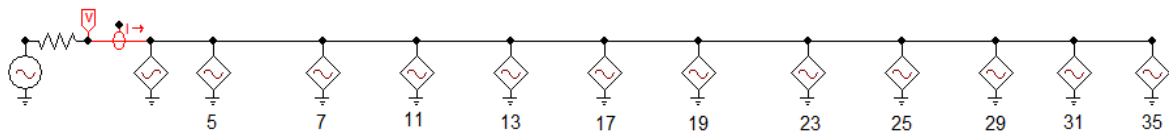


Figura 5.27. Modelo del sistema con los armónicos 5 al 35 incluidos.

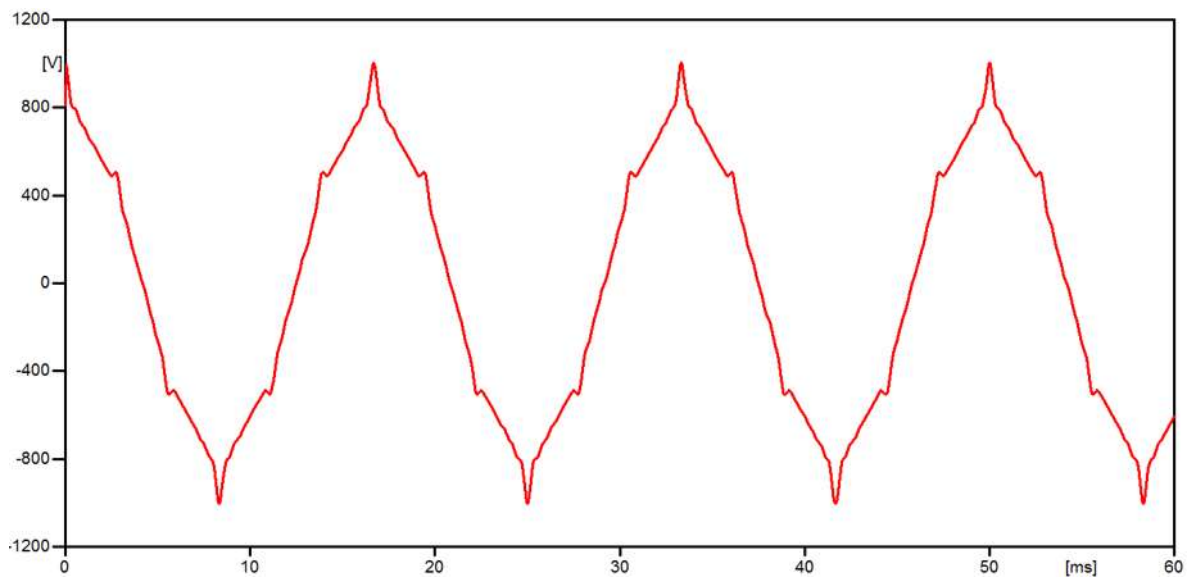


Figura 5.28. Forma de onda del voltaje con los armónicos 5 al 35 presentes.

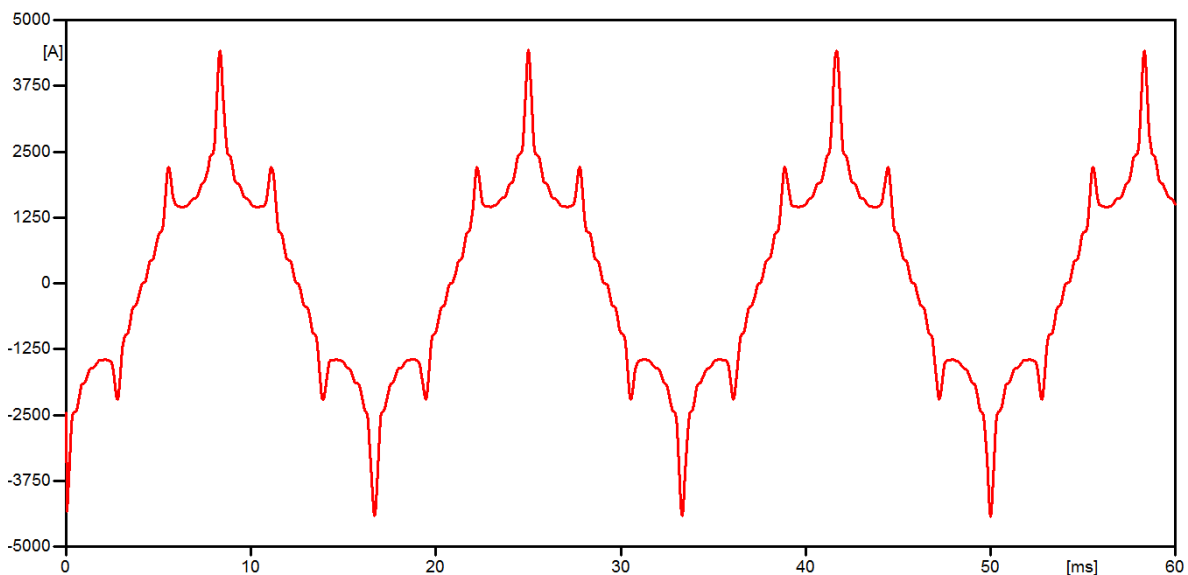


Figura 5.29. Forma de onda de la corriente con los armónicos 5 al 35 presentes.

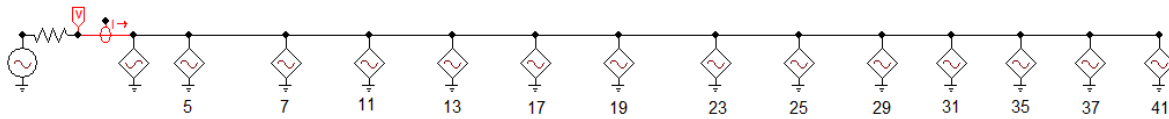


Figura 5.30. Modelo del sistema con los armónicos 5 al 41 incluidos.

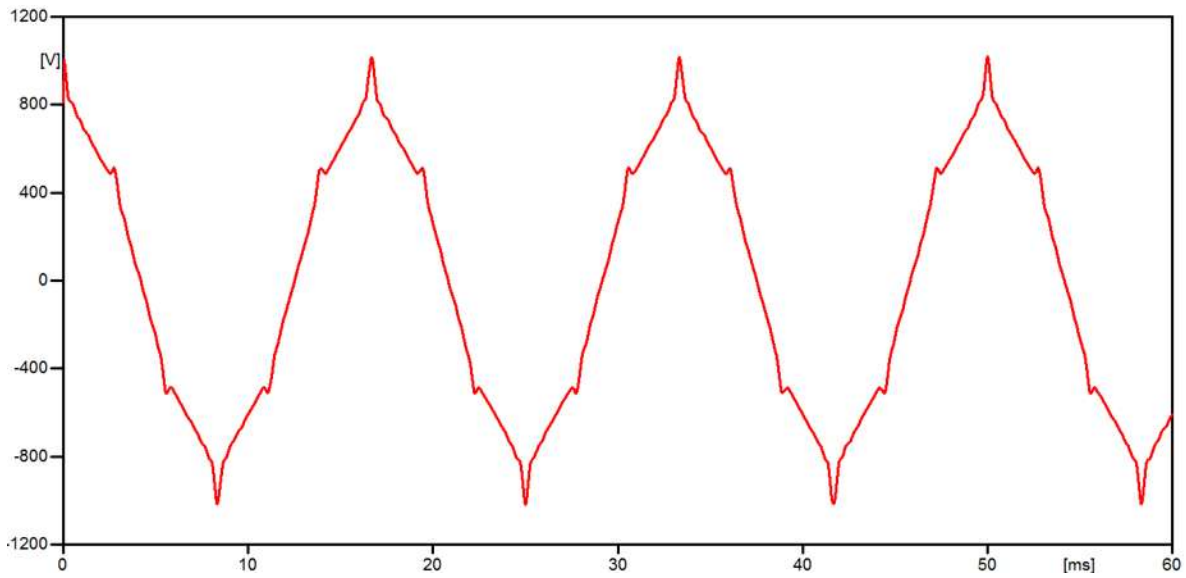


Figura 5.31. Forma de onda del voltaje con los armónicos 5 al 41 presentes.

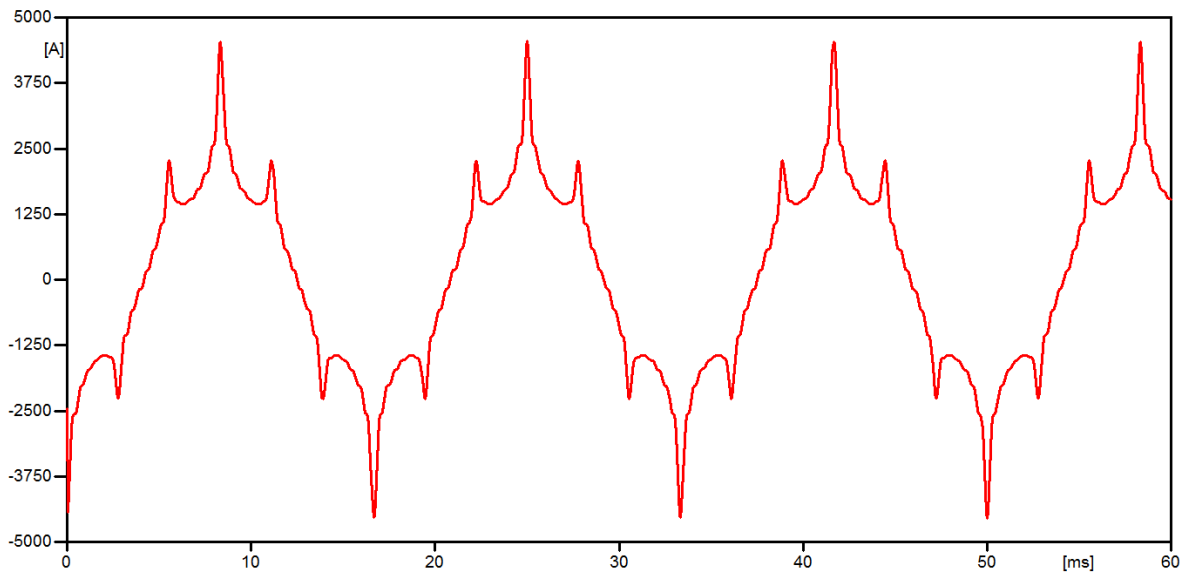


Figura 5.32. Forma de onda de la corriente con los armónicos 5 al 41 presentes.

Finalmente, en la Figura 5.33 se muestra el modelo del sistema eólico y la carga no lineal completo con la armónico 5 hasta el 49 conectadas en paralelo. El modelo de dicha figura representa el sistema eólico que se está estudiando, el cual está integrado por el voltaje y corriente nominales a

la salida del generador eléctrico de la turbina eólica, la impedancia del conductor eléctrico que va desde la salida del convertidor hasta la entrada del transformador de pedestal elevador y todas las armónicos producidas por el convertidor de potencia hasta el 49. En la Figura 5.34 se muestra un esquema del sistema eólico (aerogenerador) que se está estudiando y representando en ATPDraw encerrado en líneas rojas. Hasta este punto todavía no se está incluyendo ningún filtro armónico en el sistema.

También, en las Figuras 5.35 y 5.36 se muestran las formas de onda resultantes del voltaje y corriente respectivamente. Estas formas de onda representan la distorsión armónica total que el convertidor eólico de potencia de seis pulsos produce sobre las ondas fundamentales del voltaje y corriente del generador eléctrico del sistema eólico. En estas formas de onda finales se puede ver que una vez añadido todos los armónicos al sistema, la forma de onda de corriente se distorsionó más que la forma de onda del voltaje. También se observa que los valores RMS tanto del voltaje y corriente distorsionadas aumentaron mucho más respecto a los valores nominales iniciales que tenían antes de que se agregaran armónicos al sistema.

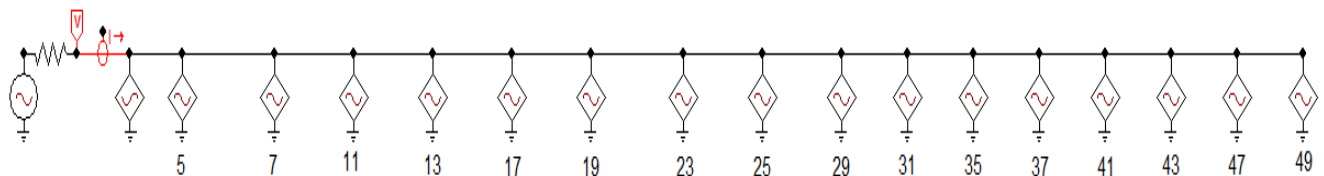


Figura 5.33. Modelo del sistema con los armónicos 5 al 49 incluidos.

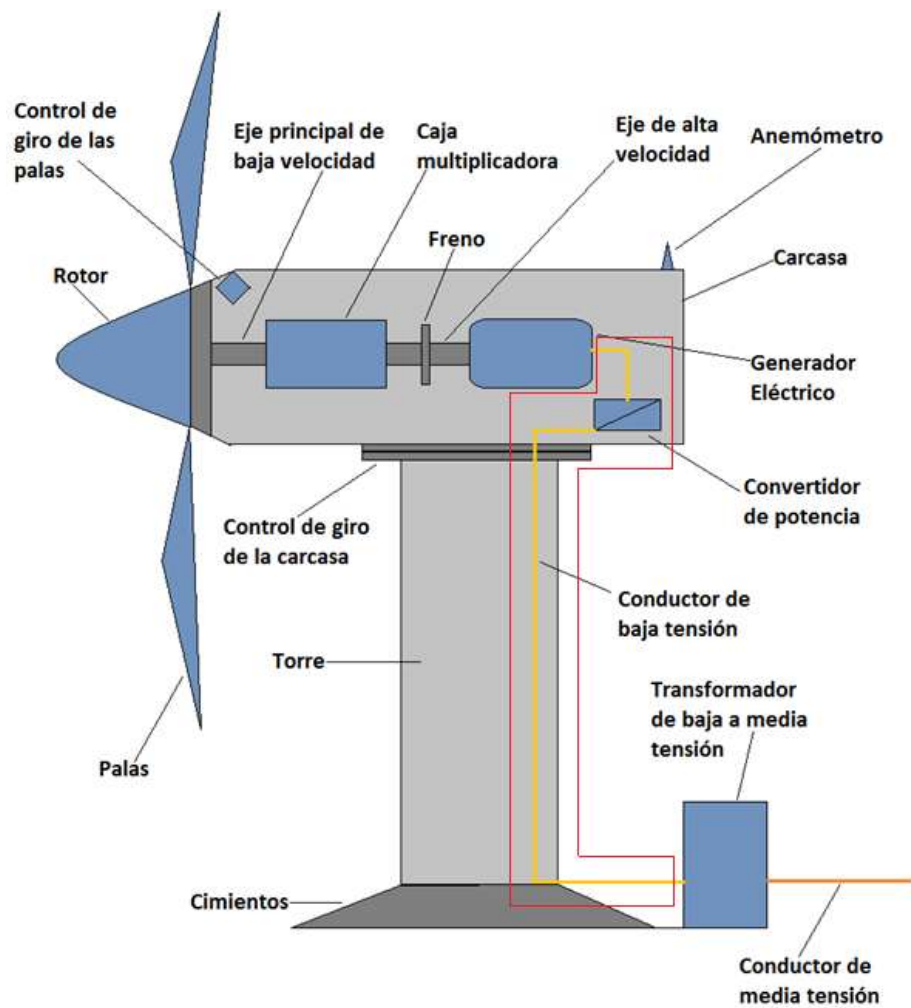


Figura 5.34. Esquema de la parte del sistema eólico en estudio.

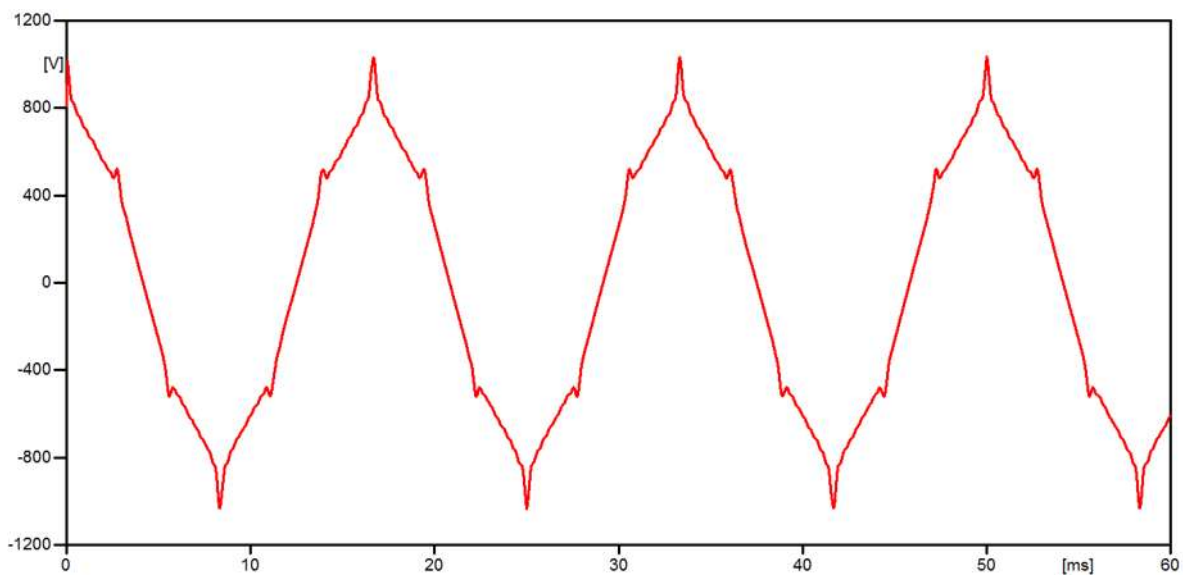


Figura 5.35. Forma de onda del voltaje con los armónicos 5 al 49 presentes.

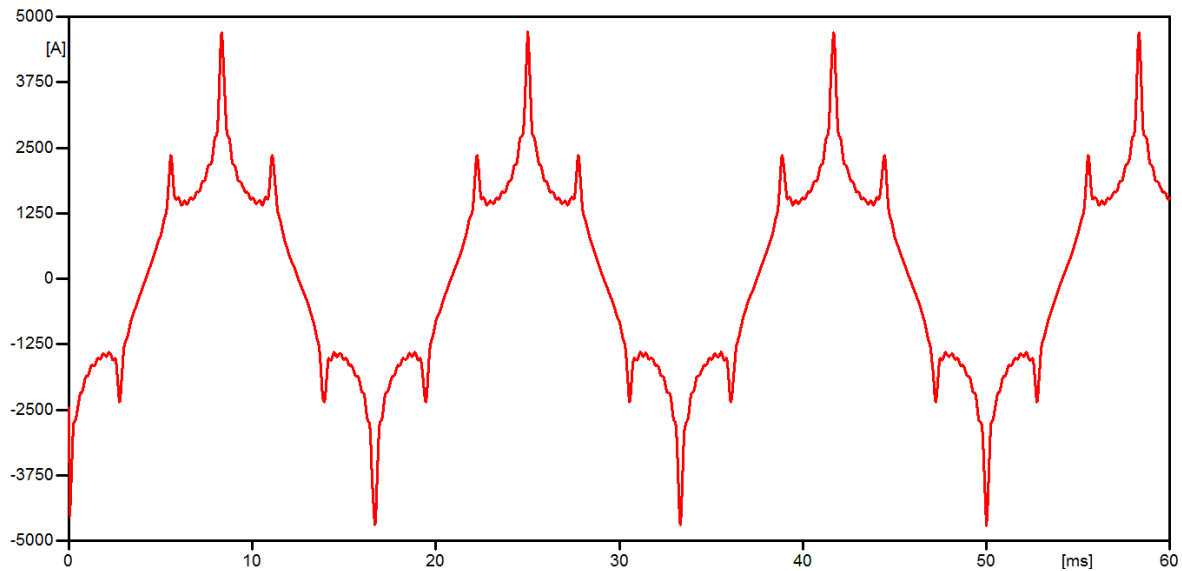


Figura 5.36. Forma de onda del corriente con los armónicos 5 al 49 presentes.

Las Figuras 5.37 y 5.39 muestran los espectros de frecuencias de los voltajes y corrientes armónicos respectivamente. En ellos se compara el valor RMS de cada voltaje y corriente armónico en volts y amperes con los valores RMS del voltaje y la corriente a la frecuencia fundamental. En ambas gráficas se puede apreciar que cada uno de los voltajes y corrientes armónicos proporciona una buena cantidad de volts y amperes a las magnitudes fundamentales, aunque, sin embargo, en el caso del espectro de frecuencias de la corriente se puede observar que las corrientes armónicas proporcionan una mayor magnitud a la magnitud fundamental de corriente que lo que los voltajes armónicos proporcionan a la magnitud de voltaje fundamental.

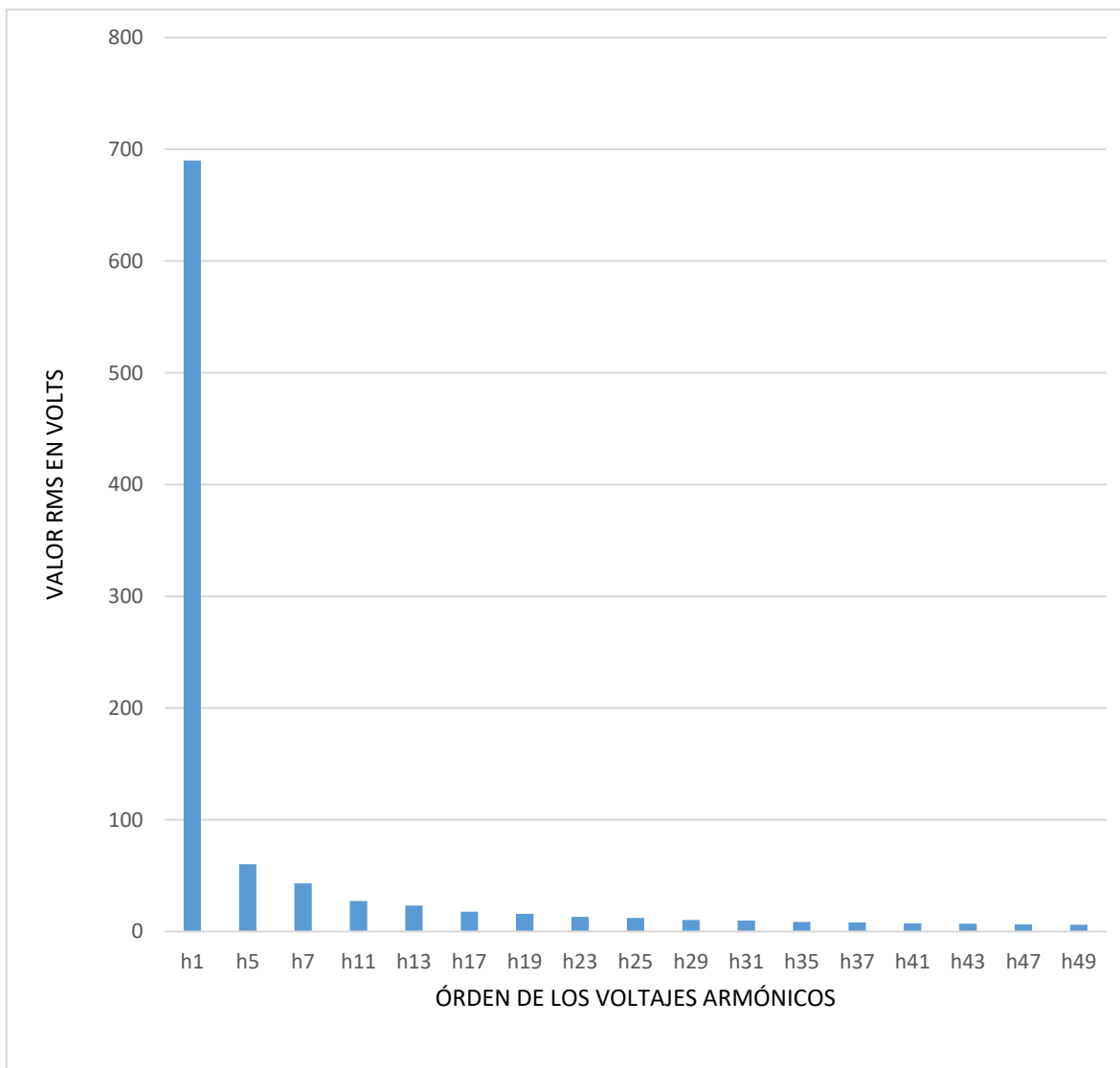


Figura 5.37. Espectro de frecuencias de voltajes armónicos sin el filtro.

La Figura 6.38 siguiente también es un espectro de frecuencias, solo que en este caso se comparan en valor porcentual cada uno de los voltajes armónicos con la componente fundamental. En este histograma, la componente fundamental representa el 100%, mientras que cada uno de los valores porcentuales de cada voltaje armónico representa el porcentaje de distorsión que cada uno de ellos aporta a la onda total distorsionada del voltaje de la Figura 5.35.

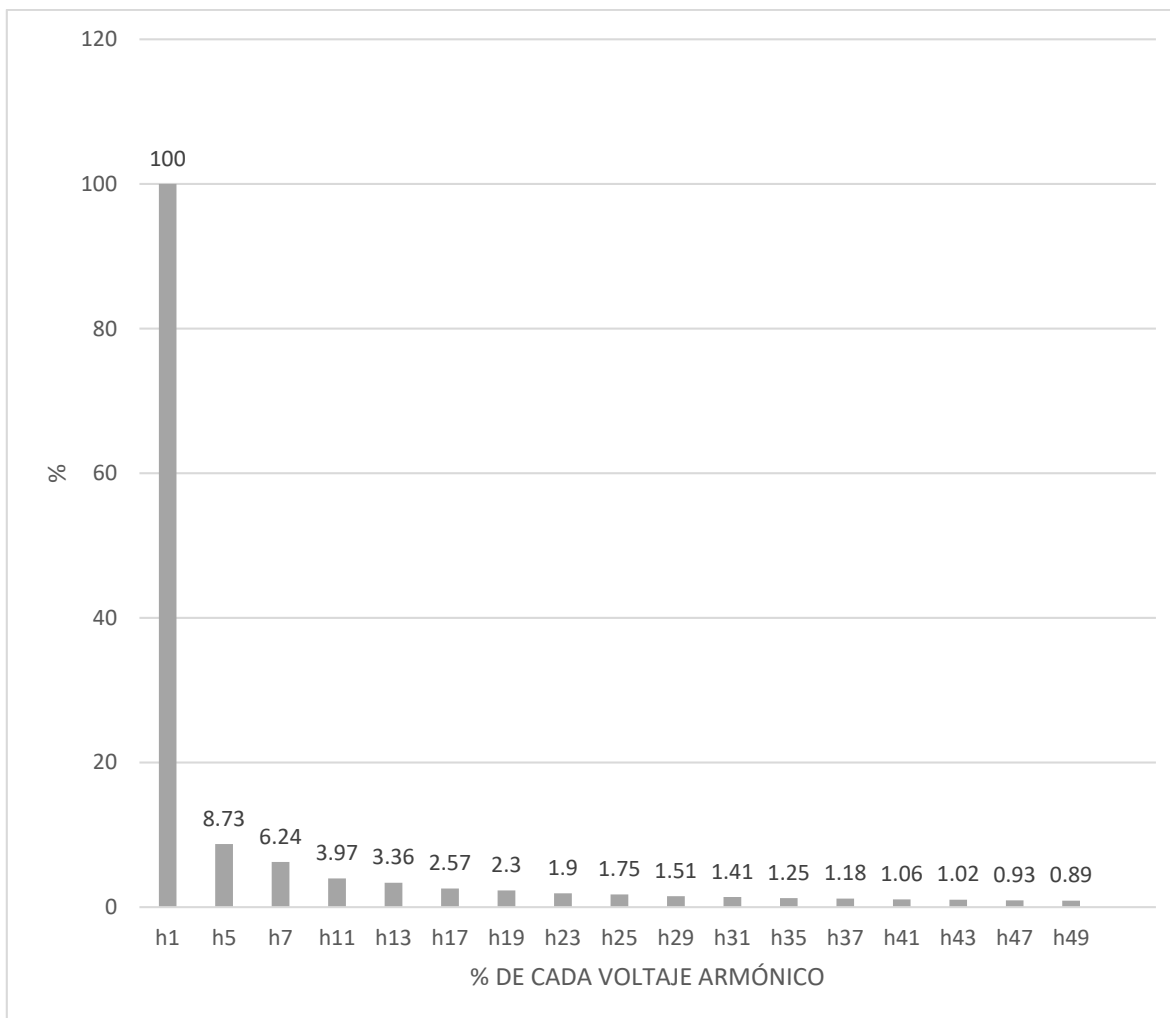


Figura 5.38. Espectro de frecuencias de voltajes expresados en porcentajes sin el filtro armónico.

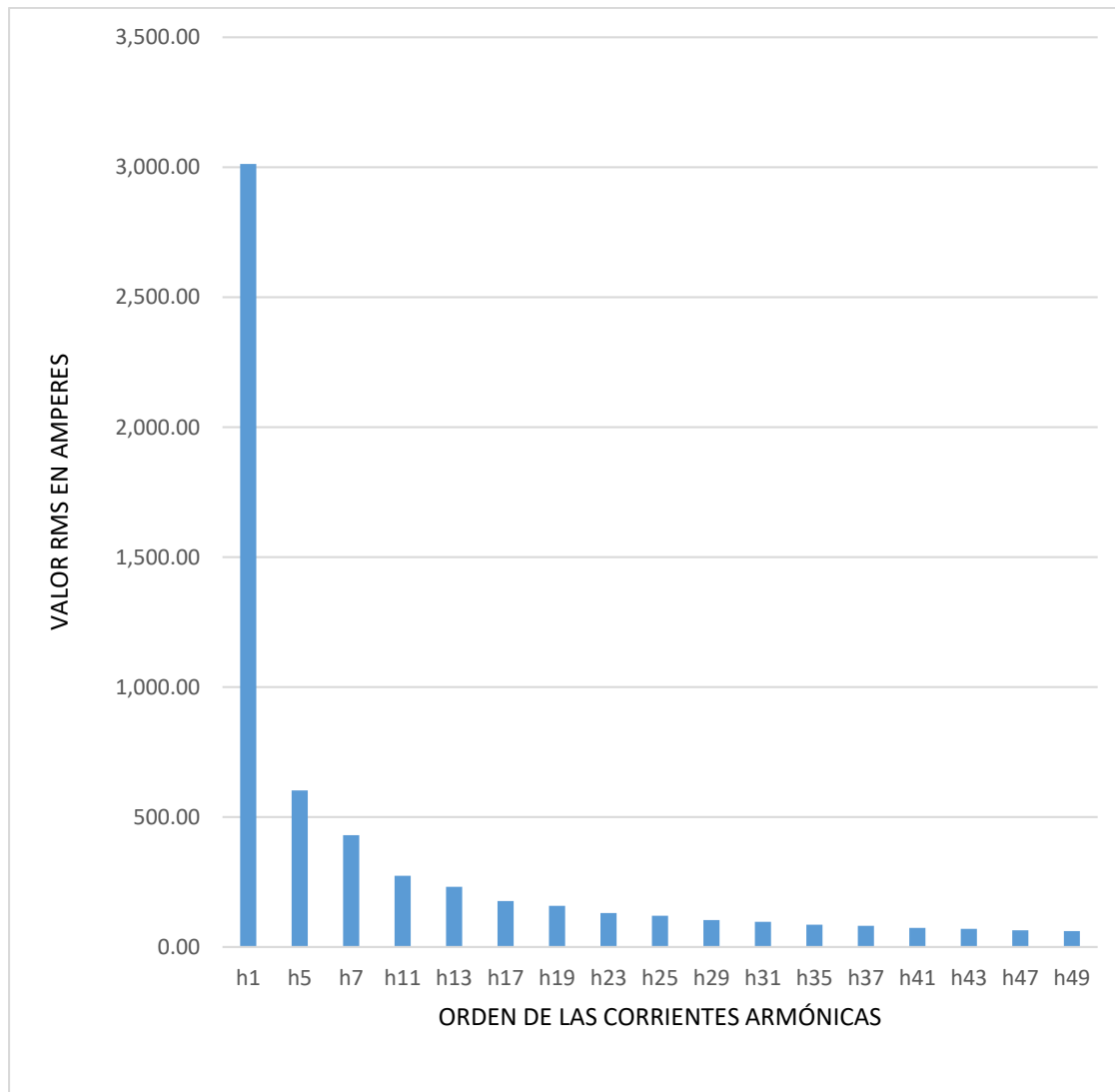


Figura 5.39. Espectro de frecuencias de corrientes armónicas sin el filtro.

5.6. Conclusión del capítulo 5

En este capítulo, mediante las formas de onda que cada armónico generaba, se demostró que la distorsión armónica originada por convertidores de electrónica de potencia en aplicaciones eólicas puede alterar bastante las formas de onda fundamentales de corriente y voltaje. También se comprobó que un modelo simple de una sola fase y delimitando de forma correcta la parte del sistema eléctrico que se va a estudiar, se pueden obtener resultados satisfactorios de las formas de onda del voltaje y de la corriente.

Capítulo 6: Cálculo, modelado y simulación del filtro armónico pasivo

6.1. Introducción

En el presente capítulo se realizarán los cálculos necesarios para calcular los valores y parámetros del filtro armónico que se incluirá en ATPDraw para mitigar los armónicos. También se presentarán las ecuaciones para dichos cálculos y se simulará el sistema eólico con el filtro armónico pasivo incluido. Esto con el objetivo principal de observar si el filtro armónico diseñado mitiga las armónicas presentes, así como la distorsión armónica total del voltaje y corriente fundamentales generadas por el convertidor de potencia. Además de que se comparará la Distorsión Armónica Total (THD) en el sistema ya con el filtro armónico incluido con los niveles máximos permisibles de Distorsión Armónica Total mencionados en el Código de Red, esto con el fin de concluir si el filtro armónico logra eliminar la distorsión armónica hasta niveles aceptables para la normativa mexicana.

6.2. Cálculo de los parámetros del filtro armónico pasivo

Como se había mencionado en capítulos anteriores, un filtro armónico estático o pasivo se compone de elementos pasivos como son capacitores e inductores conectados en series entre ellos, por lo tanto, el cálculo de los parámetros del filtro pasivo consistirá en calcular los valores de capacitancia e inductancia de cada uno de los capacitores e inductores que componen al filtro, una resistencia que representará a la resistividad natural del cobre que compone a cada uno de los inductores, además de un valor conocido como factor de calidad y un valor de reactancia, todo esto mediante ecuaciones ya definidas en la bibliografía.

Las ecuaciones para calcular los parámetros del filtro que se va a diseñar y modelar son las siguientes:

$$C = \frac{Q_c}{2\pi f V^2} \quad (6.1)$$

Donde C es el valor de capacitancia en Farads (F) de cada uno de los capacitores que componen el filtro, Q_c es la potencia reactiva de los capacitores que conforman el filtro que en este caso se fijó que sería de 1×10^6 var, f es la frecuencia fundamental del sistema que en este caso es de 60 Hz y V es el valor de la magnitud del voltaje a la frecuencia fundamental el cual en secciones anteriores se determinó que sería de 690 V.

$$X_c = \frac{1}{2\pi fhC} \quad (6.2)$$

Donde X_c es la reactancia capacitiva de los capacitores; esto es la resistencia u oposición de los capacitores al paso de la corriente eléctrica alterna medida en Ohms, f es el valor de frecuencia fundamental del sistema de 60 Hz, h es el número u orden del armónico que se pretenda mitigar y C es el valor de capacitancia de los capacitores calculado con la ecuación 6.1.

El mismo valor de reactancia capacitiva X_c que se calcule para cada armónico con la ecuación 6.2 se tomará como valor de reactancia inductiva X_L para calcular la Inductancia L de los inductores del filtro y la resistencia R de los inductores del filtro.

$$L = X_L^2 C \quad (6.3)$$

Donde L es el valor de inductancia en Henrys (H) de cada uno de los inductores que componen el filtro.

$$R = \frac{X_L}{Q} \quad (6.4)$$

Donde la resistencia R representa las pérdidas en el cobre del inductor ya que este disipa calor al paso de la corriente y Q es el factor de calidad del inductor (Kusko & Thompson, 2007). El factor de calidad Q de un inductor es una medida de su eficiencia ya que esta es igual a la razón de su reactancia inductiva X_L en ohms entre la resistencia R en ohms del inductor. Q también se puede definir como la energía almacenada por ciclo entre la energía disipada por ciclo y por esa razón es un número adimensional. Para esta tesis el factor de calidad Q se fijará con un valor de 50 ya que ese valor es un número común en los filtros pasivos actuales.

Habiendo introducido las relaciones matemáticas para calcular el filtro pasivo entonces se procede a calcular los valores de la primer serie inductiva-capacitiva y resistiva para mitigar el 5^{to} armónico.

1. Cálculo de la capacitancia C . Para este cálculo el valor de la potencia reactiva del capacitor se fijará en 1×10^6 var entonces:

$$C = \frac{Q_c}{2\pi f V^2} = \frac{1 \times 10^6 \text{ var}}{2\pi (60 \text{ Hz}) (690)^2} = 0.00557148159 \text{ F} = 5,571.48159 \mu\text{F}$$

El valor de la capacitancia C de los capacitores se expresará en micro Farads (μF) ya que al momento de ingresar los valores en ATPDraw, los valores de capacitancia deben ingresarse al programa en ese orden de magnitud para que la simulación sea correcta.

También se debe mencionar que el valor de capacitancia C previamente calculado será el mismo para cada uno de los capacitores que componen el filtro ya que se pretende fijar un valor único de capacitancia, por lo que para cada serie inductor-capacitor-resistor solo cambiará el valor de inductancia L de cada inductor y el valor de resistencia R de cada inductor. Los valores de reactancia capacitiva X_c y reactancia inductiva X_L también cambiarán para cada serie inductor-capacitor-resistor ya que este valor, aunque depende del valor de capacitancia C también depende de la frecuencia f de cada armónico que se pretenda mitigar.

2. Cálculo de la reactancia capacitiva X_c

$$X_c = \frac{1}{2\pi fhC} = X_c = \frac{1}{2\pi(60 \text{ Hz})(5)(0.00557148159 \text{ F})} = 0.0952199998 \Omega$$

3. Cálculo de la inductancia L

Se determinó que para este filtro $X_c = X_L$ por lo tanto el valor de inductancia del inductor para mitigar la 5^{to} armónico es:

$$L = X_L^2 C = (0.0952199998 \Omega)^2 (0.00557148159 \text{ F}) = 0.00005051577894 \text{ H} \\ = 0.05051577894 \text{ mH}$$

En el caso del valor de inductancia, esta se representa en mili Henrys (mH) ya en ATPDraw la inductancia se debe de expresar en ese orden de magnitud para que la simulación sea correcta.

4. Cálculo de la resistencia R

$$R = \frac{X_L}{Q} = \frac{0.0952199998 \Omega}{50} = 0.0019044 \Omega$$

A diferencia del valor de capacitancia e inductancia, el valor de resistencia en ATPDraw se especifica en Ω .

Para el cálculo de los valores de reactancia, inductancia y resistencia de todas las demás series capacitor-inductor-resistor se realiza el mismo cálculo que el anterior. Los resultados de los cálculos de los parámetros del filtro armónico pasivo para mitigar cada una de las armónicas se ingresarán directamente en el modelo en ATPDraw.

6.3. Modelado y simulación del convertidor de potencia y el filtro armónico pasivo

En esta sección se realiza el modelado y simulación del sistema eólico, la carga no lineal y filtro armónico pasivo. Se añadirán todas las series inductor-capacitor-resistor al modelo del sistema de ATPDraw construido previamente. Los inductores, capacitores y resistores de cada serie estarán conectados en serie entre ellos y en paralelo con la carga o el sistema. Al igual que cuando se simuló el efecto sobre la forma de onda a medida que se le agregaba cada armónico, cuando se agregue el filtro pasivo, se mostrará el efecto y grado de mitigación de la distorsión a medida que se le vaya agregando cada etapa filtradora, se mostrarán los modelos y formas de onda más significativas.

Se procede entonces a conectar la primera serie inductor-capacitor-resistor para mitigar la 5^{to} armónico. En la Figura 6.1 se muestra el modelo del sistema eólico, los armónicos producidos por el convertidor de potencia y la serie inductor-capacitor-resistor para mitigar la 5^{to} armónico. A medida que se vaya agregando cada serie también se van ingresando los valores de inductancia, capacitancia y resistencia calculados en la sección anterior. Como se había mencionado, el valor de inductancia se ingresa en mili Henrys, el de capacitancia en micro Farads y el de resistencia en Ohms, esto para que ATPDraw corra la simulación de forma correcta.

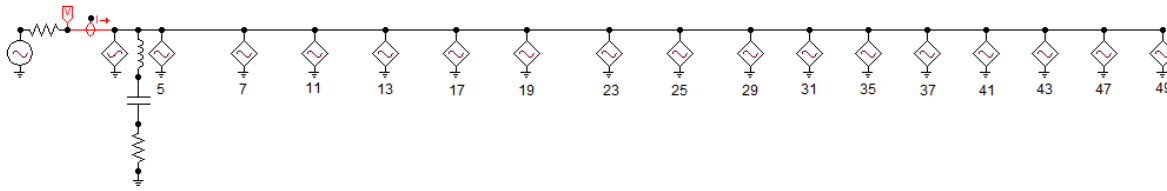


Figura 6.1. Serie inductor-capacitor-resistor para mitigar el armónico 5.

Se prosigue a realizar las respectivas simulaciones. Los resultados de las simulaciones para mitigar el armónico 5 se muestran en las Figuras 6.2 y 6.3. La Figura 6.2 muestra la forma de onda de corriente una vez que el filtro para mitigar el 5^{to} armónico es añadido al modelo del sistema y a la carga no lineal. A su vez, la Figura 6.3 muestra la forma de onda de voltaje cuando se agrega la primera serie para reducir el 5^{to} armónico. Nótese como ambas formas de onda inmediatamente cambian y disminuyen su distorsión con respecto a la forma de onda de las Figuras 5.35 y 5.36 del capítulo anterior una vez que se agrega la primera serie inductor-capacitor-resistor.

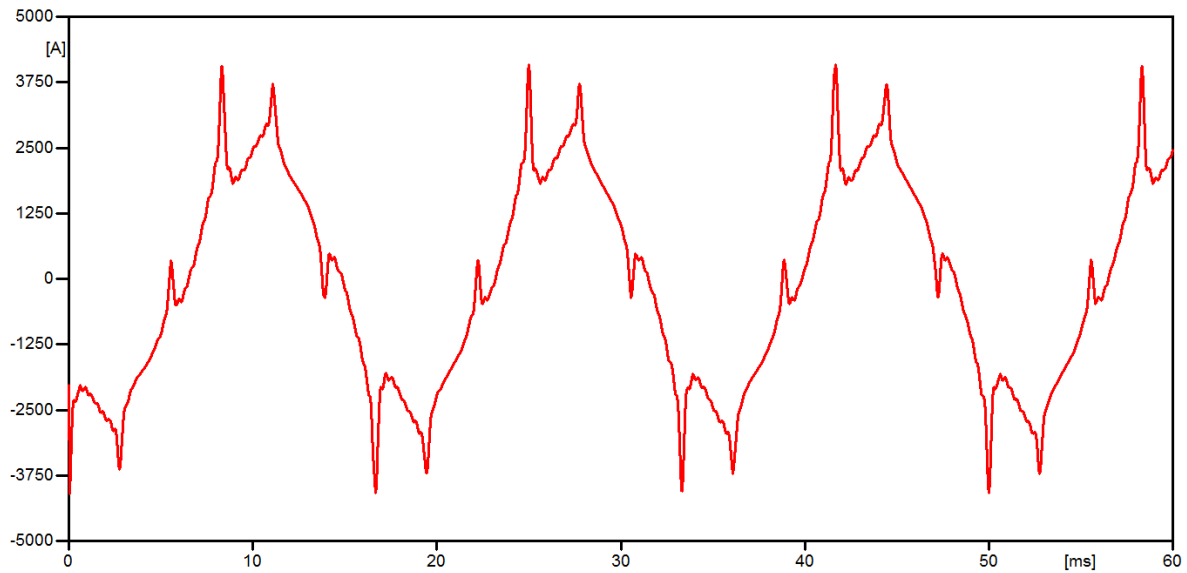


Figura 6.2. Forma de onda de la corriente cuando se mitiga el armónico 5.

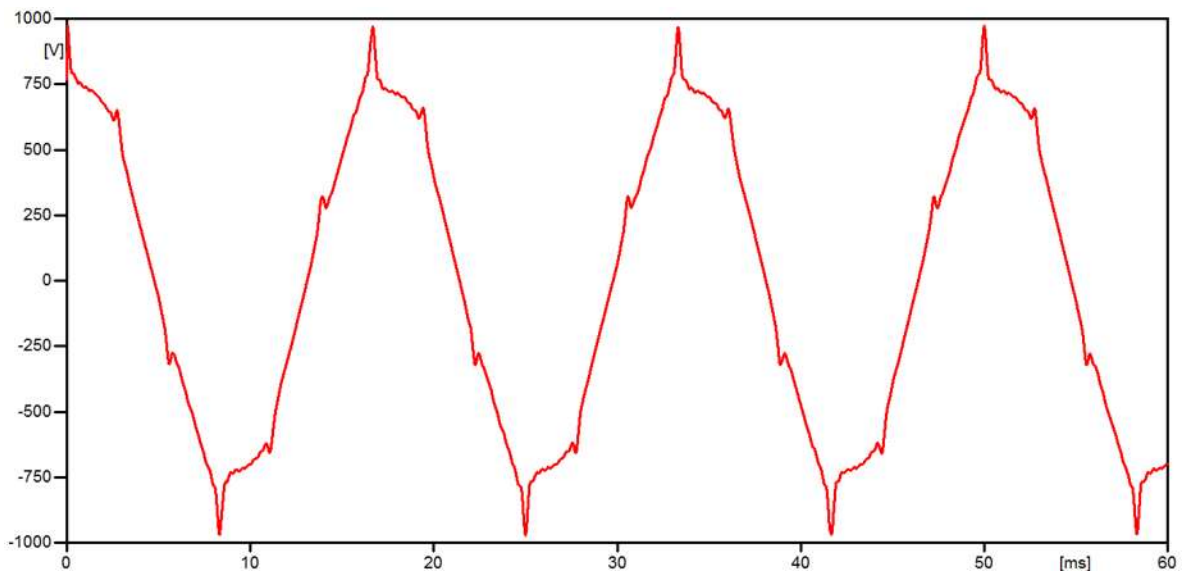


Figura 6.3. Forma de onda del voltaje cuando se mitiga el armónico 5.

En el siguiente modelo del sistema se añaden las series inductor-capacitor-resistor para mitigar los armónicos 5 y 7. En las Figuras 6.5 y 6.6 se observan las simulaciones de las formas de onda de la corriente y el voltaje respectivamente. Se puede notar que con solo agregar dos series RCL la distorsión en ambas ondas disminuye significativamente al igual que los valores RMS de ambas señales.

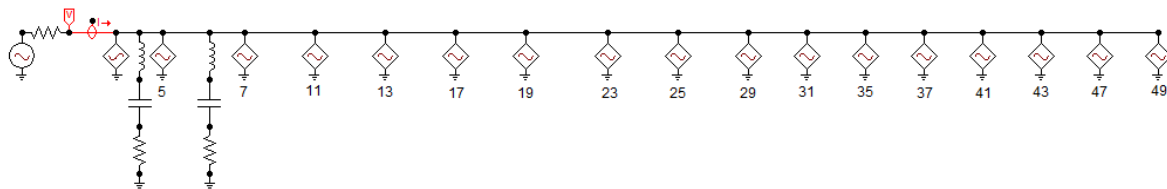


Figura 6.4. Series inductor-capacitor-resistor para mitigar los armónicos 5 y 7.

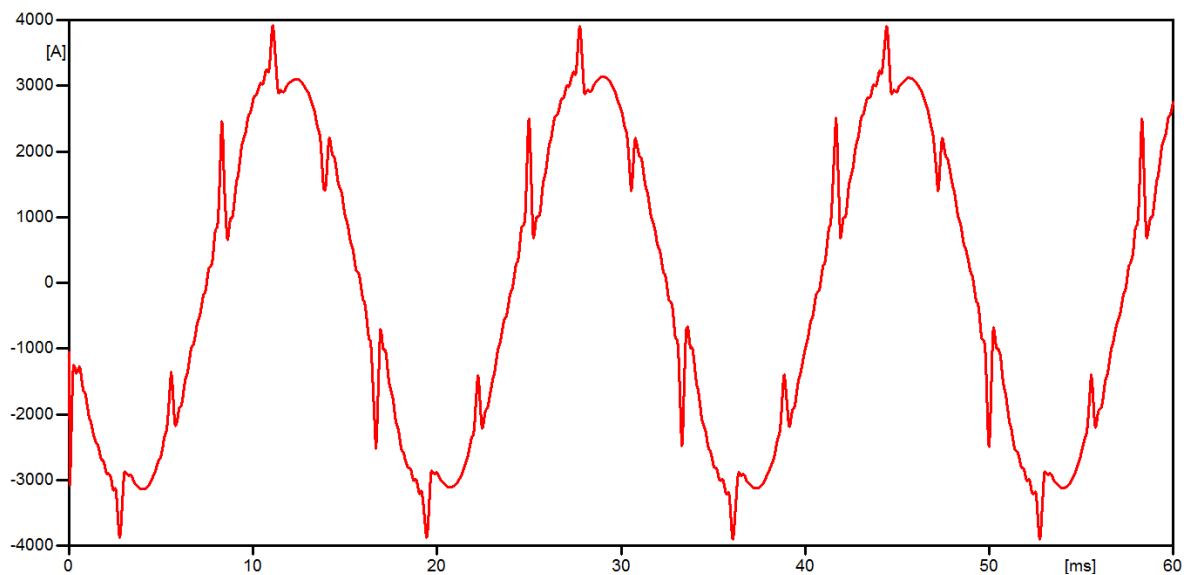


Figura 6.5. Forma de onda de la corriente cuando se mitiga el armónico 5 y 7.

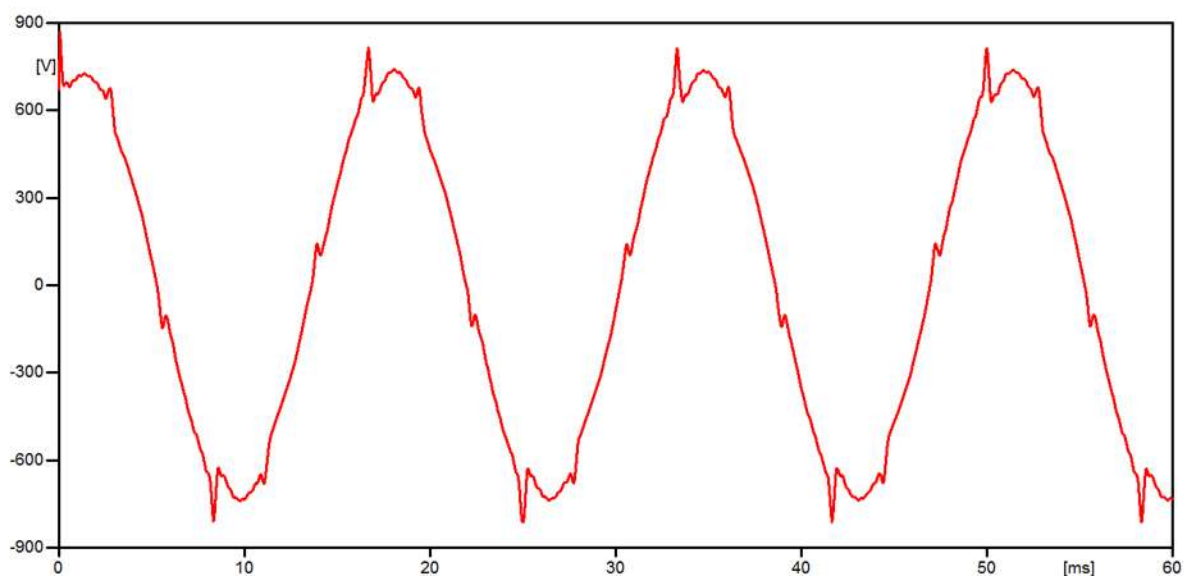


Figura 6.6. Forma de onda del voltaje cuando se mitiga el armónico 5 y 7.

El siguiente modelo del sistema de la Figura 6.7 se agregan las series RCL para mitigar las armónicas 5, 7 y 11. Se observa que la distorsión total en ambas ondas disminuye solo un poco más, además el valor RMS de la onda del voltaje disminuye mucho más que el de la corriente.

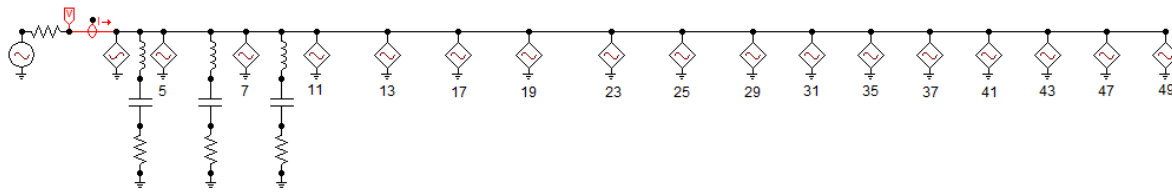


Figura 6.7. Series inductor-capacitor-resistor para mitigar del armónico 5 al 11.

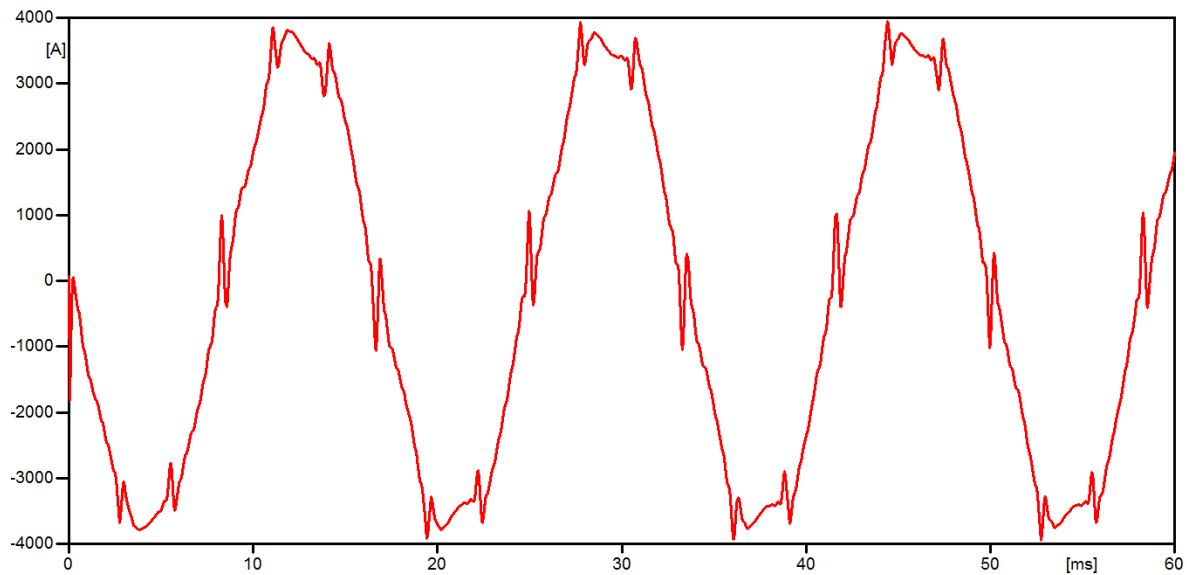


Figura 6.8. Forma de onda de la corriente cuando se mitigan los armónicos 5, 7 y 11.

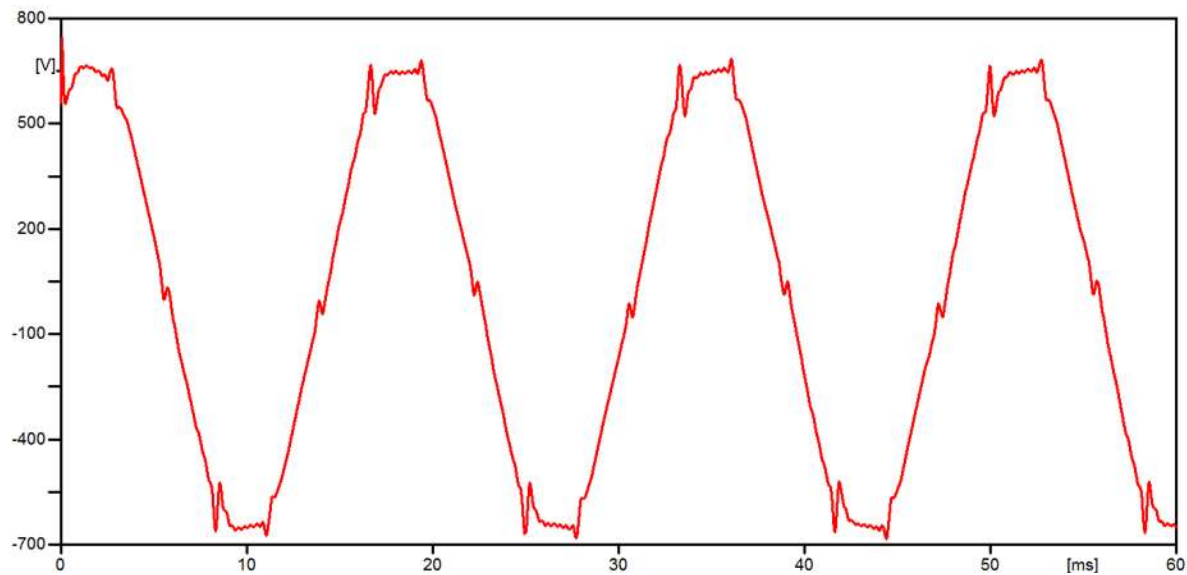


Figura 6.9. Forma de onda del voltaje cuando se mitigan los armónicos 5, 7 y 11.

En el siguiente modelo del sistema se añaden las series RCL para mitigar los armónicos 5 a la 13. Las simulaciones de ambas formas de onda se muestran en las Figuras 6.11 y 6.12.

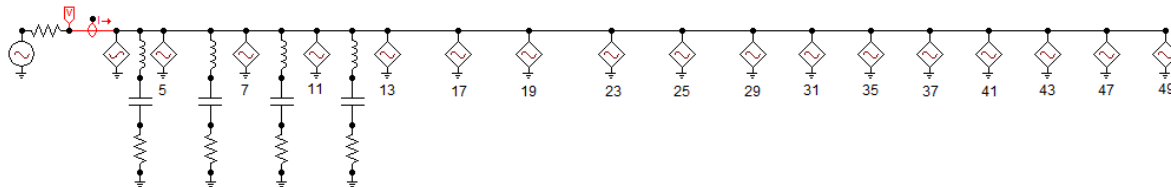


Figura 6.10. Series inductor-capacitor-resistor para mitigar del armónico 5 al 13.

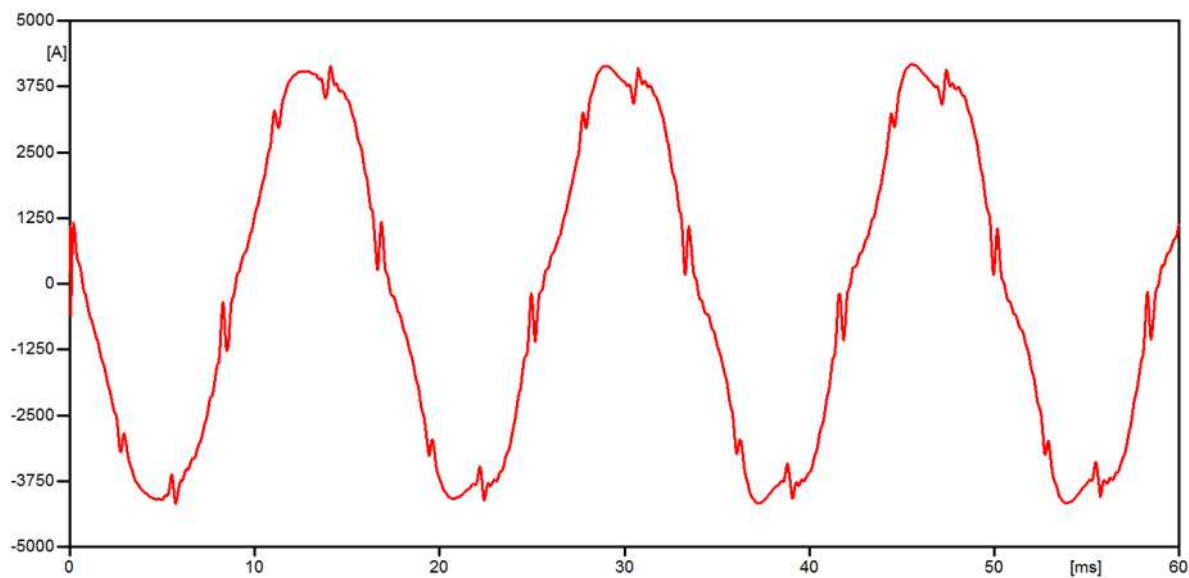


Figura 6.11. Forma de onda de la corriente cuando se mitiga del armónico 5 al 13.

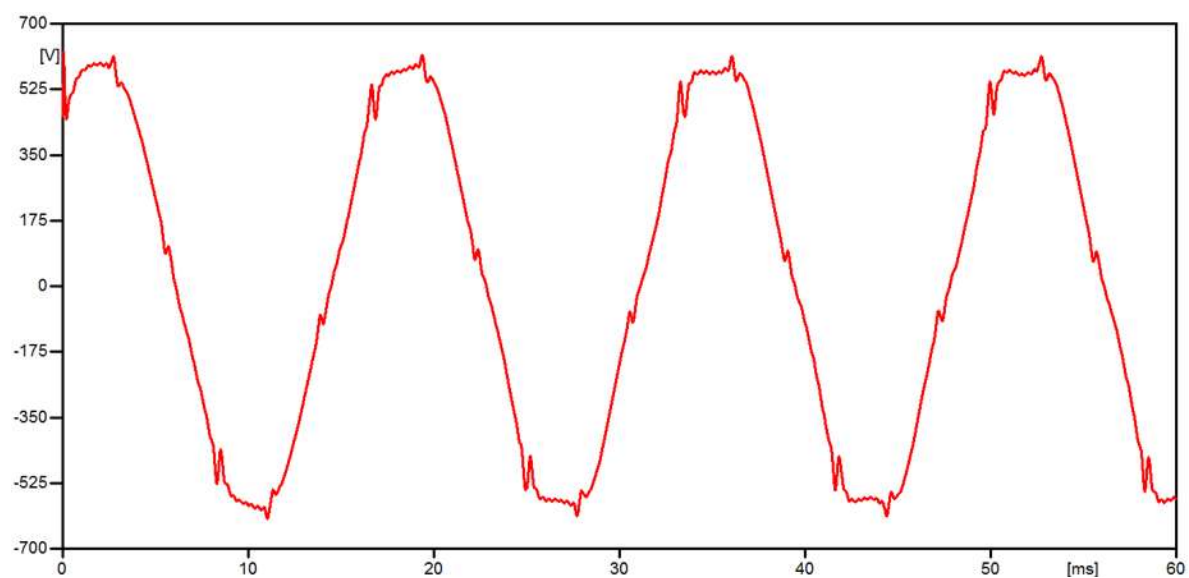


Figura 6.12. Forma de onda del voltaje cuando se mitiga del armónico 5 al 13.

En el modelo del sistema de la Figura 6.13 se agregan las series RCL para mitigar las armónicas 5, 7, 11, 13 y 17. Se puede notar en las formas de onda del voltaje y corriente de las Figuras 6.14 y 6.15 que la distorsión hasta este punto ha disminuido de forma importante, acercándose cada vez más a la forma de una onda senoidal pura.

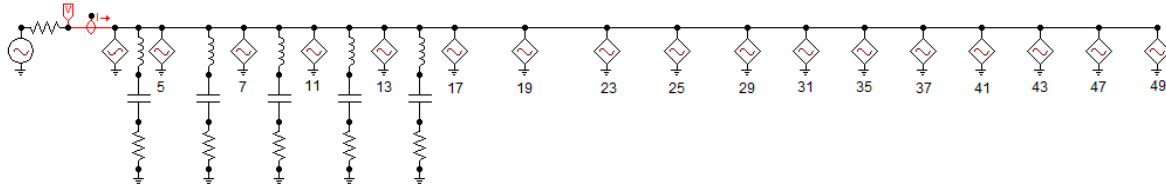


Figura 6.13. Modelo del sistema para mitigar del armónico 5 al 17.

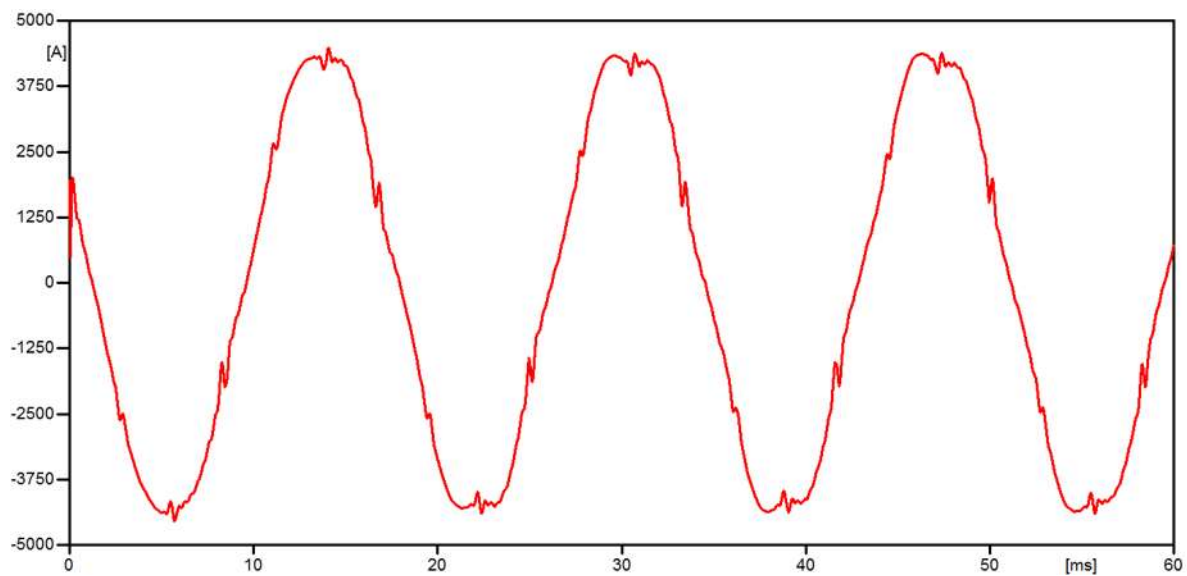


Figura 6.14. Forma de onda de la corriente cuando se mitiga del armónico 5 al 17.

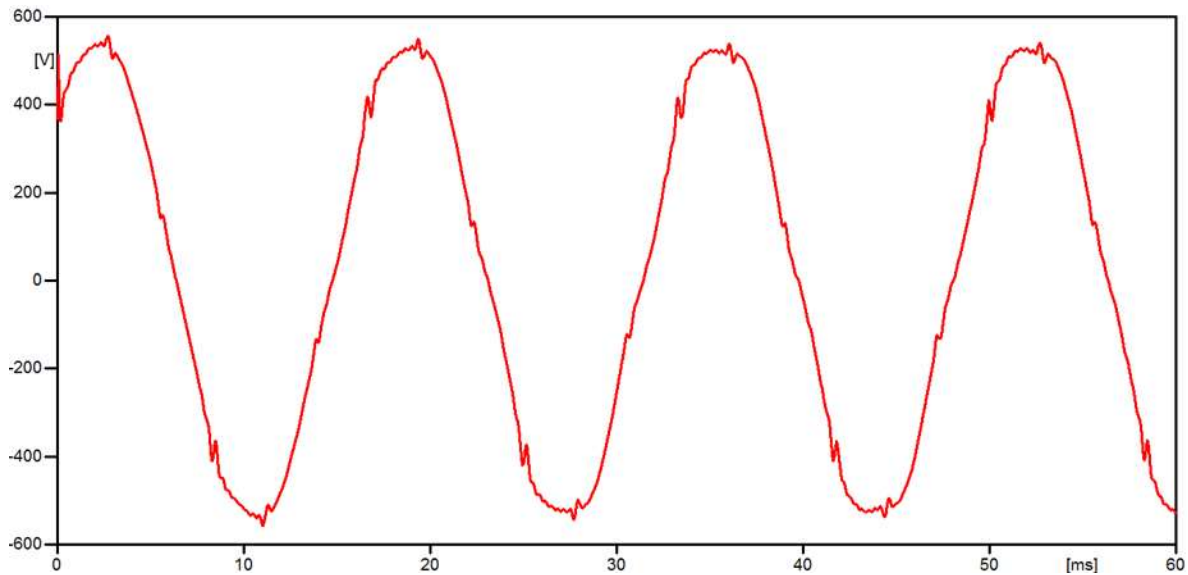


Figura 6.15. Forma de onda del voltaje cuando se mitiga del armónico 5 al 17.

En el siguiente modelo del sistema se agregan las series inductor-capacitor-resistor para mitigar de la armónica cinco hasta la diecinueve. En las formas de onda del voltaje y corriente de las Figuras 6.17 y 6.18 se observa que la distorsión disminuye solo un poco más respecto a la distorsión del modelo anterior cuando se aplicaba la serie filtradora para mitigar hasta la armónica diecisiete. Se puede observar que las magnitudes RMS del voltaje y corriente hasta este punto han disminuido.

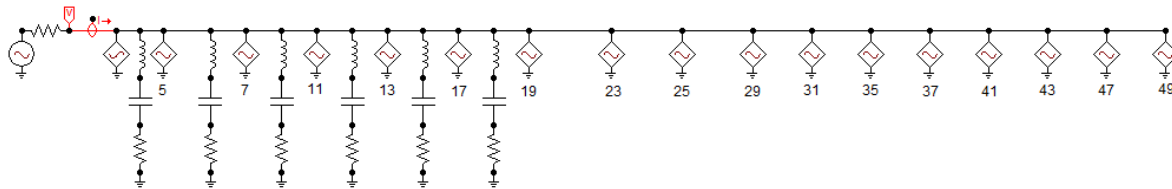


Figura 6.16. Series inductor-capacitor-resistor para mitigar del armónico 5 al 19.

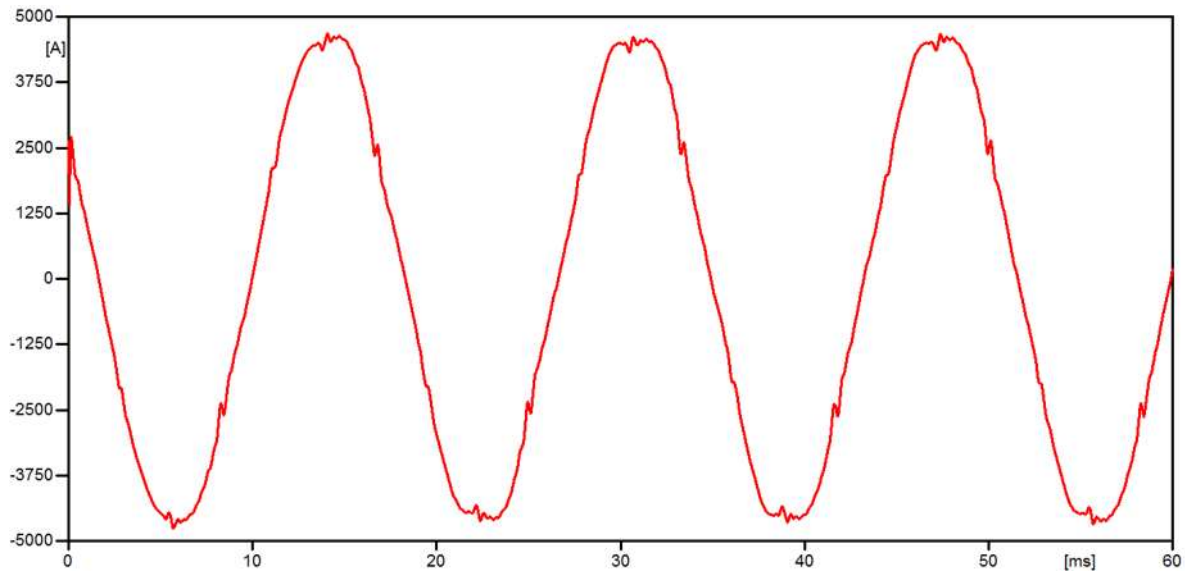


Figura 6.17. Forma de onda de la corriente cuando se mitiga del armónico 5 al 19.

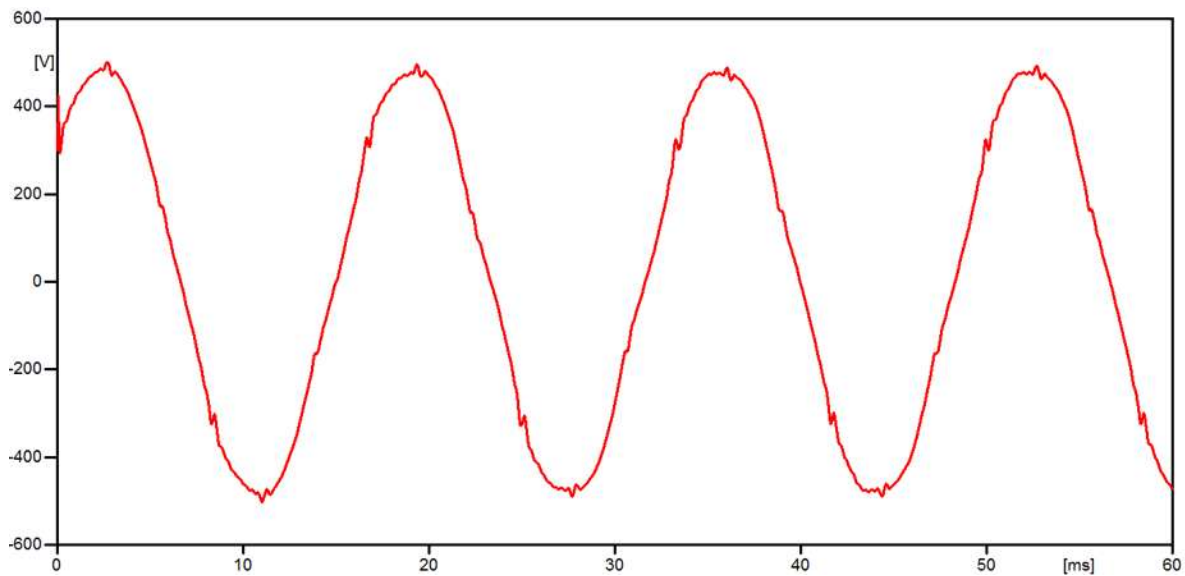


Figura 6.18. Forma de onda del voltaje cuando se mitiga del armónico 5 al 19.

El modelo del sistema para mitigar de la armónica 5 a la 25 se muestra en la Figura 6.19. Los resultados de las simulaciones para mitigar los armónicos mencionados se observan en las Figuras 6.20 y 6.21. Los resultados de las simulaciones hasta este punto son interesantes de observar ya que se puede ver que ambas formas de onda, tanto la del voltaje como la de la corriente prácticamente tienen ya la forma de una onda senoidal aunque todavía con pequeñas desviaciones. También se aprecia que los valores RMS de la corriente y voltaje siguen disminuyendo a medida que se van aplicando más series filtradoras, siendo la magnitud del voltaje la que más ha decrecido hasta este punto.

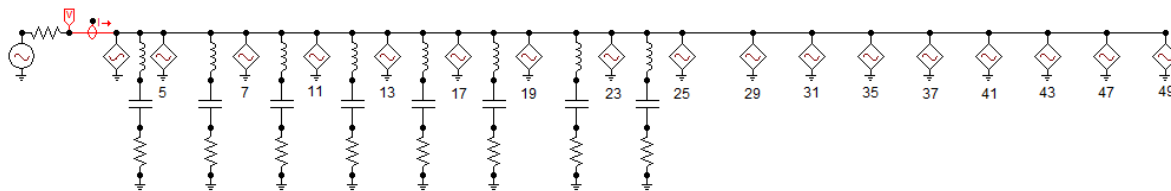


Figura 6.19. Series inductor-capacitor-resistor para mitigar del armónico 5 al 25.

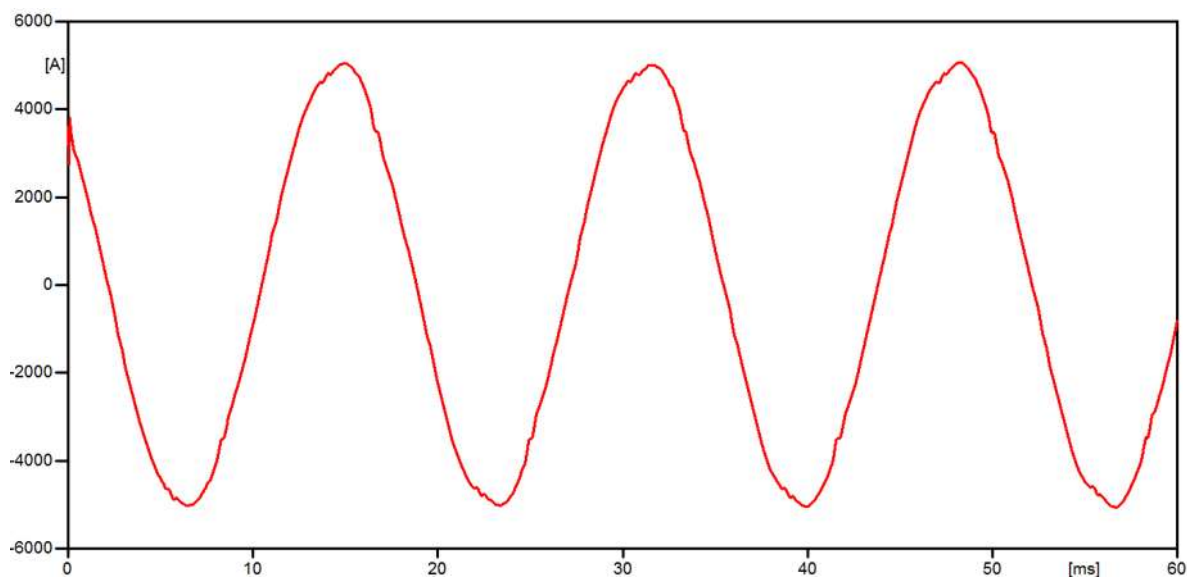


Figura 6.20. Forma de onda de la corriente cuando se mitiga del armónico 5 al 25.

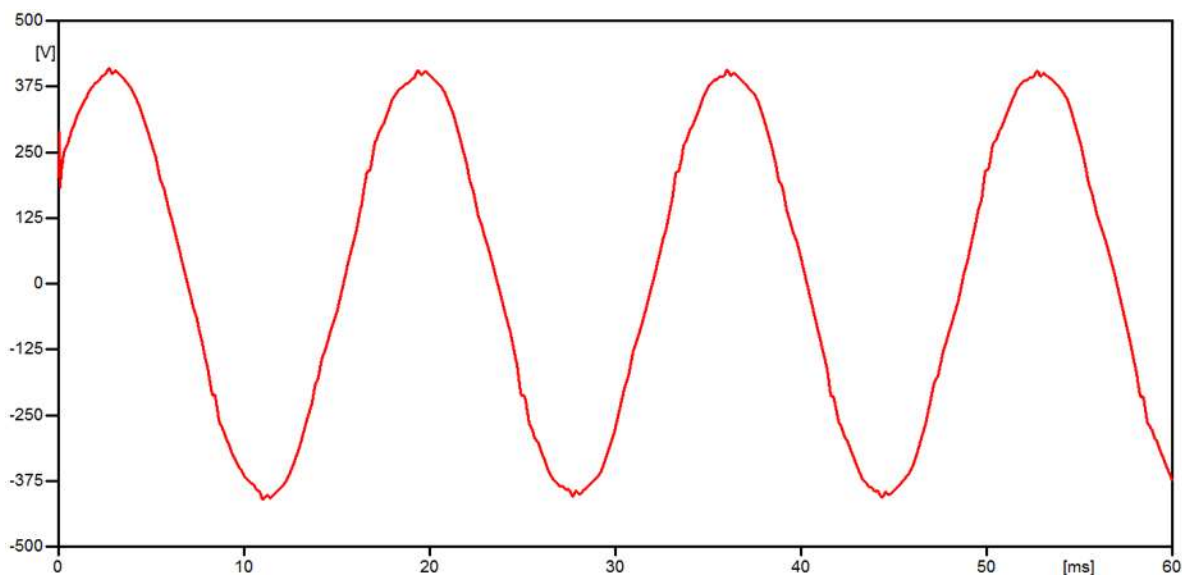


Figura 6.21. Forma de onda del voltaje cuando se mitiga del armónico 5 al 25.

Se procede a seguir agregando series filtradoras para seguir mitigando los armónicos restantes hasta el 49. Se apreciará en las simulaciones posteriores que la forma de onda de la corriente y voltaje se va perfeccionando cada vez un poco más a medida que se van agregando más series inductor-capacitor-resistor.

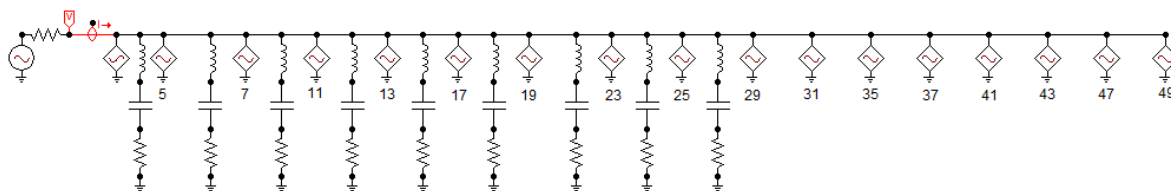


Figura 6.22. Series inductor-capacitor-resistor para mitigar del armónico 5 al 29.

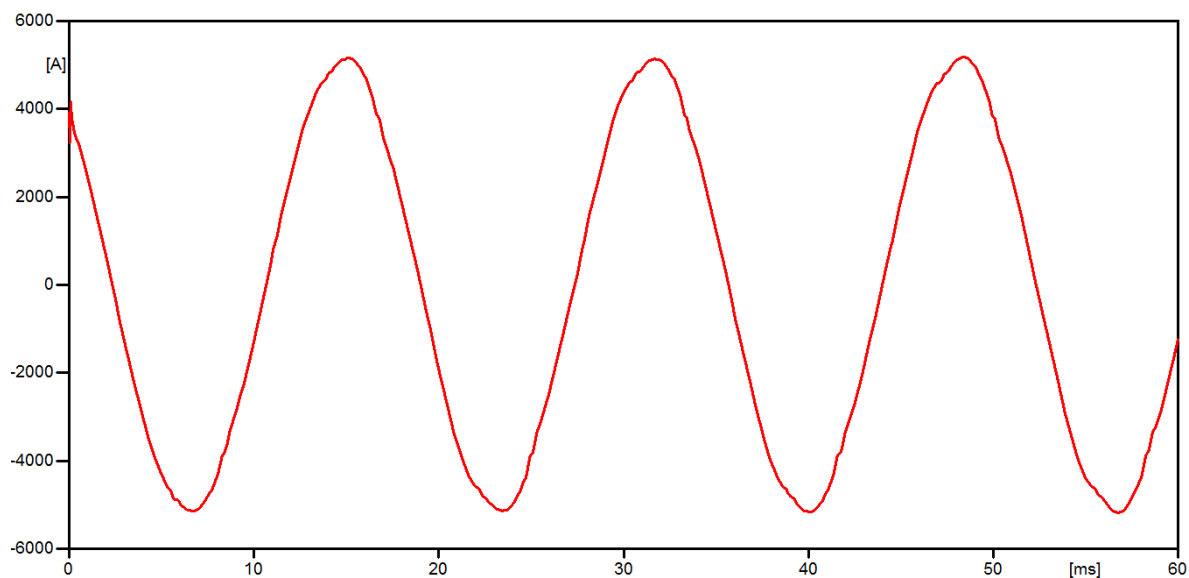


Figura 6.23. Forma de onda de la corriente cuando se mitiga del armónico 5 al 29.

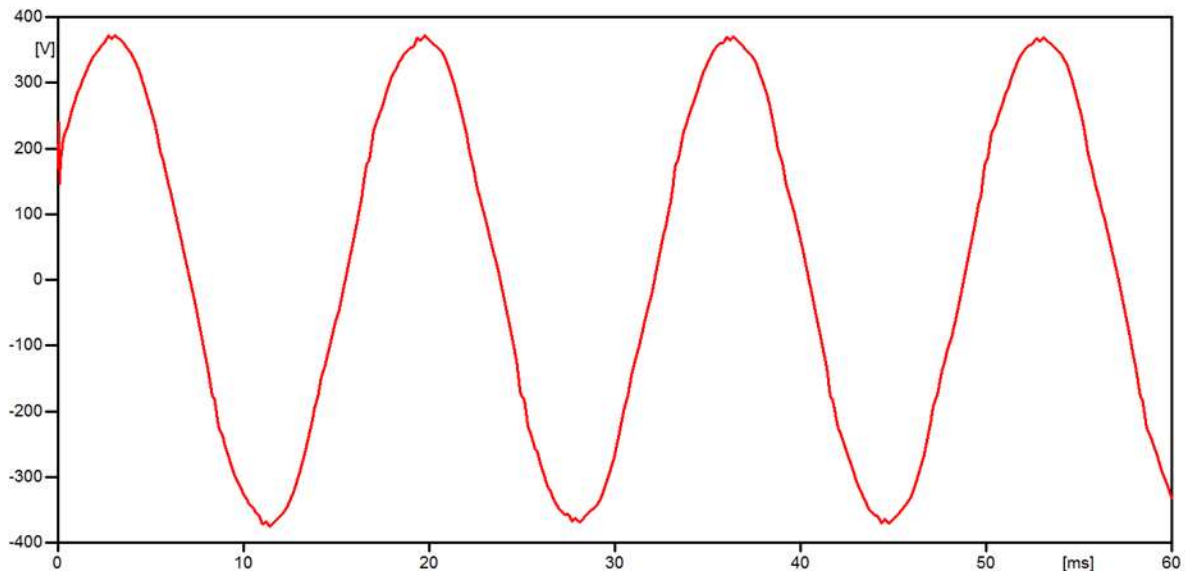


Figura 6.24. Forma de onda del voltaje cuando se mitiga del armónico 5 al 29.

Las formas de onda de las Figuras 6.26 y 6.27 pertenecen al modelo del sistema de la Figura 6.25 en el cual se aplica la serie filtradora para mitigar hasta la armónica 35. En dichas formas de onda del voltaje y corriente se puede apreciar que la distorsión armónica ha disminuido casi prácticamente por completo. También se observa que la magnitud RMS del voltaje sigue disminuyendo de forma considerable.

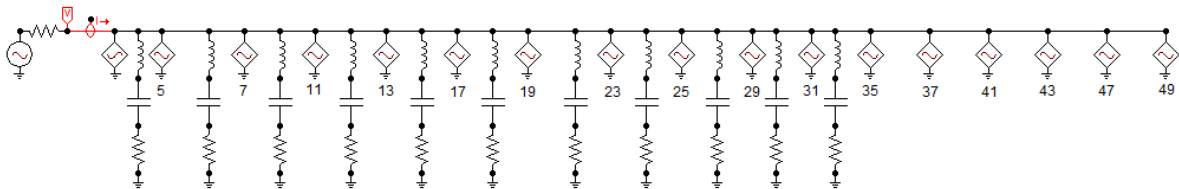


Figura 6.25. Series inductor-capacitor-resistor para mitigar del armónico 5 al 35.

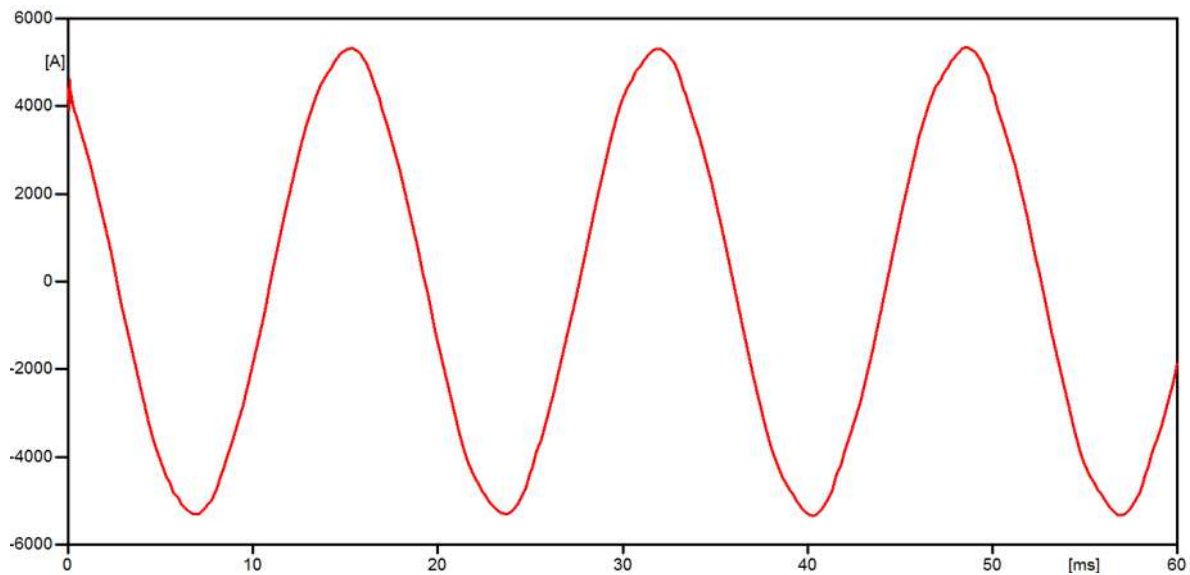


Figura 6.26. Forma de onda de la corriente cuando se mitiga del armónico 5 al 35.

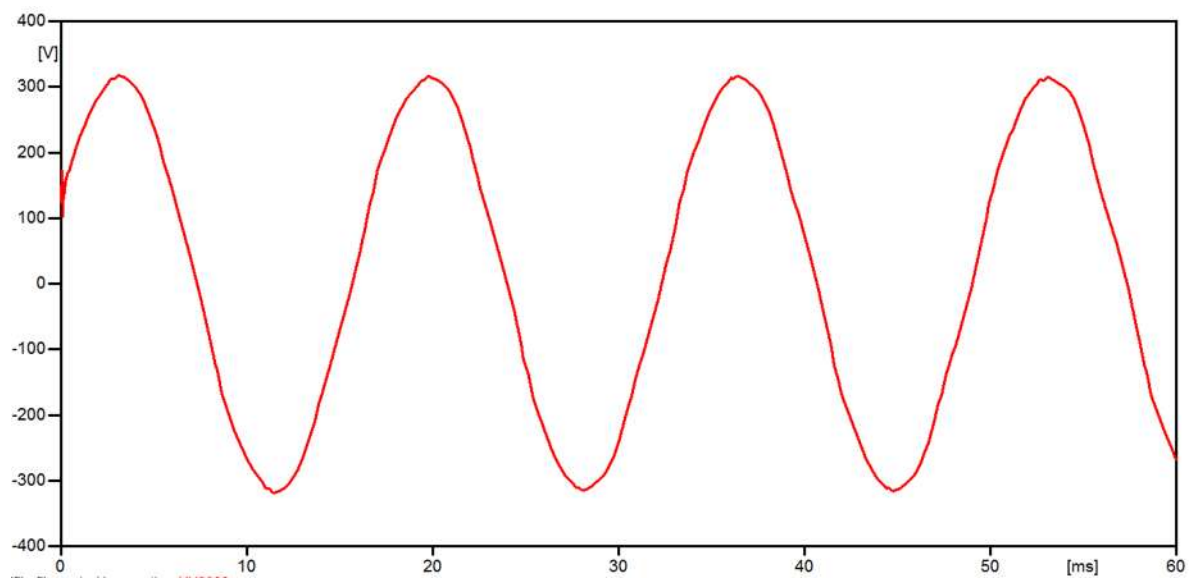


Figura 6.27. Forma de onda del voltaje cuando se mitiga del armónico 5 al 35.

En el siguiente modelo del sistema de la Figura 6.28 se añaden las series filtradoras para mitigar hasta el armónico 41. En las respectivas simulaciones de este modelo de las Figuras 6.29 y 6.30 se observa que ambas formas de onda del voltaje y corriente no cambian mucho respecto a las formas de onda del modelo anterior de la Figura 6.25 aunque si se puede ver que el valor RMS de la corriente y voltaje siguen disminuyendo siendo la magnitud del voltaje la que más disminución presenta. Hasta este punto se puede decir que prácticamente se ha eliminado toda la distorsión armónica importante sin haber mitigado las armónicas restantes 43, 47 y 49.

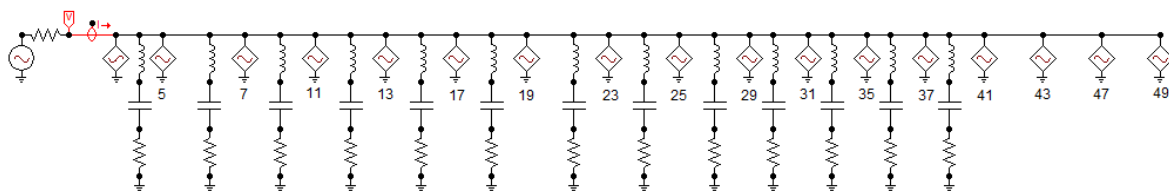


Figura 6.28. Series inductor-capacitor-resistor para mitigar del armónico 5 al 41.

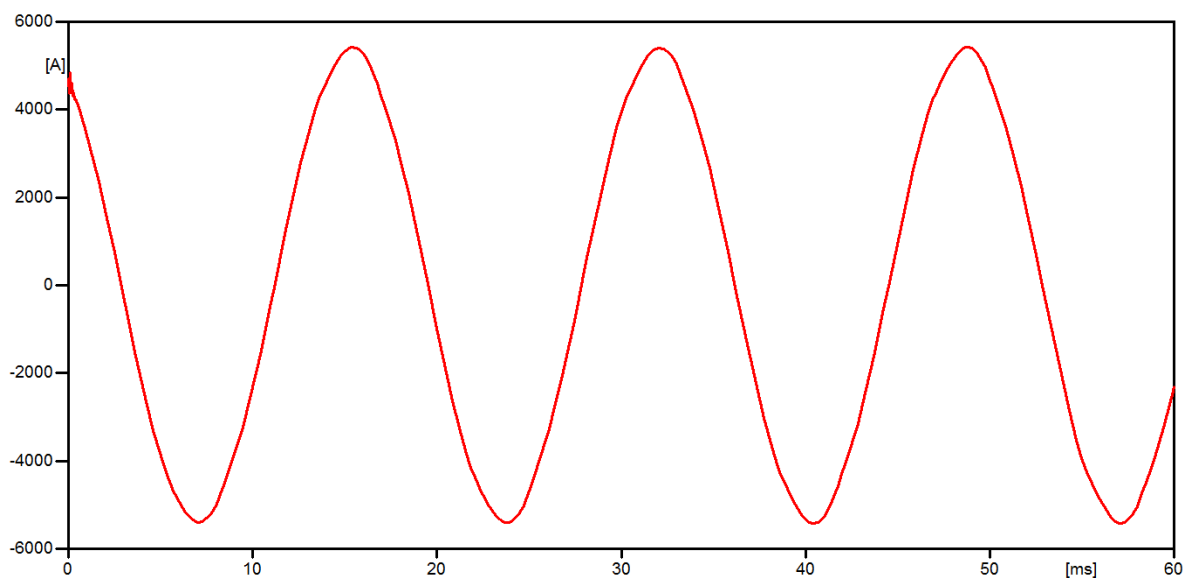


Figura 6.29. Forma de onda de la corriente cuando se mitiga del armónico 5 al 41.

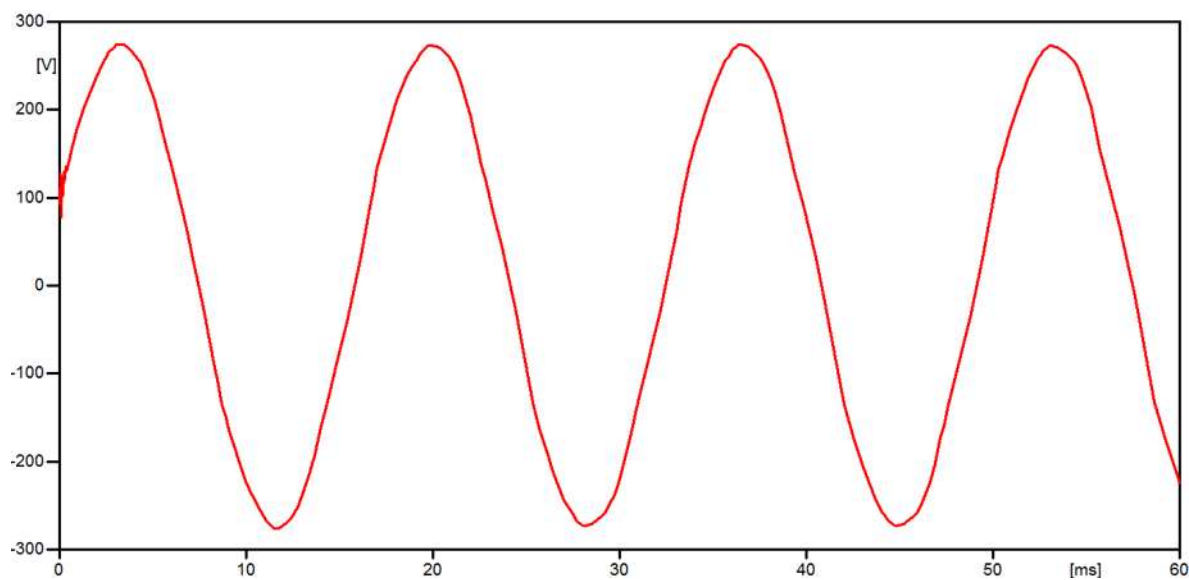


Figura 6.30. Forma de onda del voltaje cuando se mitiga del armónico 5 al 41.

Finalmente, en la el modelo de la Figura 6.31 se muestra el modelo del sistema con todas las series inductor-capacito-resistor para mitigar cada uno de los armónicos producidos por el convertidor de potencia en el sistema eólico que se está estudiando. El modelo de dicha figura representa al sistema eléctrico eólico completo en ATPDraw en el cual se incluyen la corriente y voltaje fundamentales producidas por el generador eléctrico del generador y las cuales son las nominales también del convertidor de potencia en cuestión, también incluye el convertidor de potencia y las armónicas que generan, los conductores eléctricos y su impedancia que conectan el generador, el convertidor y el filtro, así como todos los inductores y capacitores que forman al filtro armónico.

En las Figuras 6.32 y 6.33 se muestran las formas de onda de la corriente y voltaje una vez que se mitigan todas las armónicas producidas por el convertidor de potencia hasta la 49. En tales figuras se observa que prácticamente vuelven a tomar una forma de onda senoidal pura. Respecto al valor RMS de las ondas ya mitigadas, particularmente, en la onda de voltaje se puede ver que el valor RMS de este disminuyó considerablemente de 690 V nominales a poco más de 200 V RMS una vez que el filtro es aplicado. También para la onda final de la corriente se puede ver que el valor RMS de esta tiene un valor mayor que el valor nominal antes de que se agregaran las corrientes armónicas y el filtro al sistema.

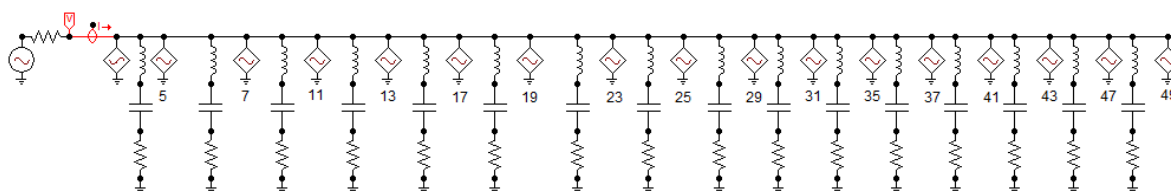


Figura 6.31. Series inductor-capacitor-resistor para mitigar del armónico 5 al 49.

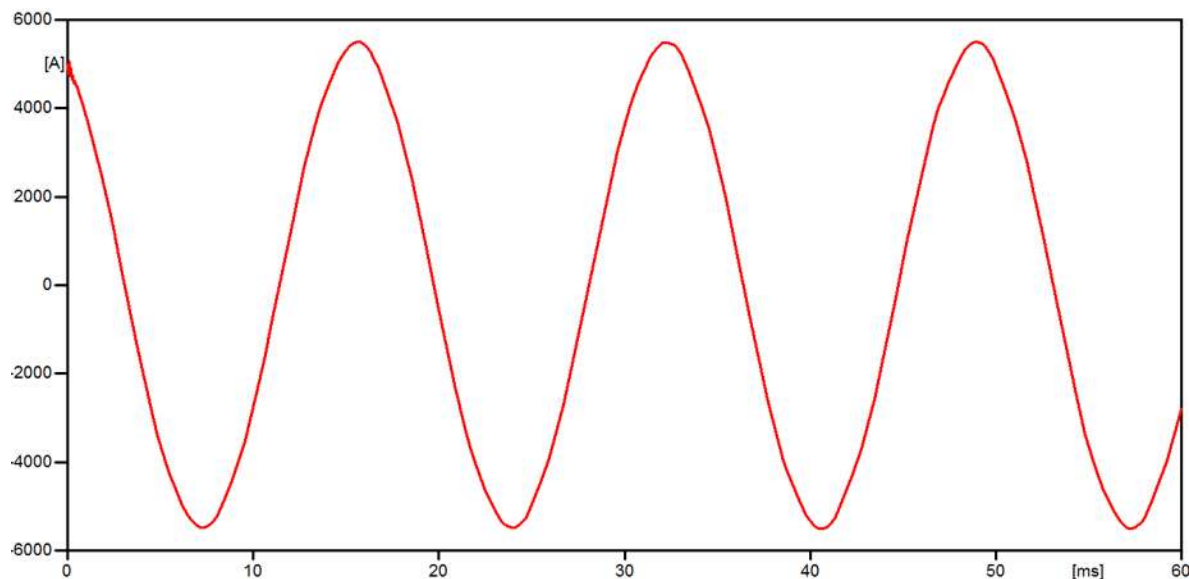


Figura 6.32. Forma de onda de la corriente cuando se mitiga del armónico 5 al 49.

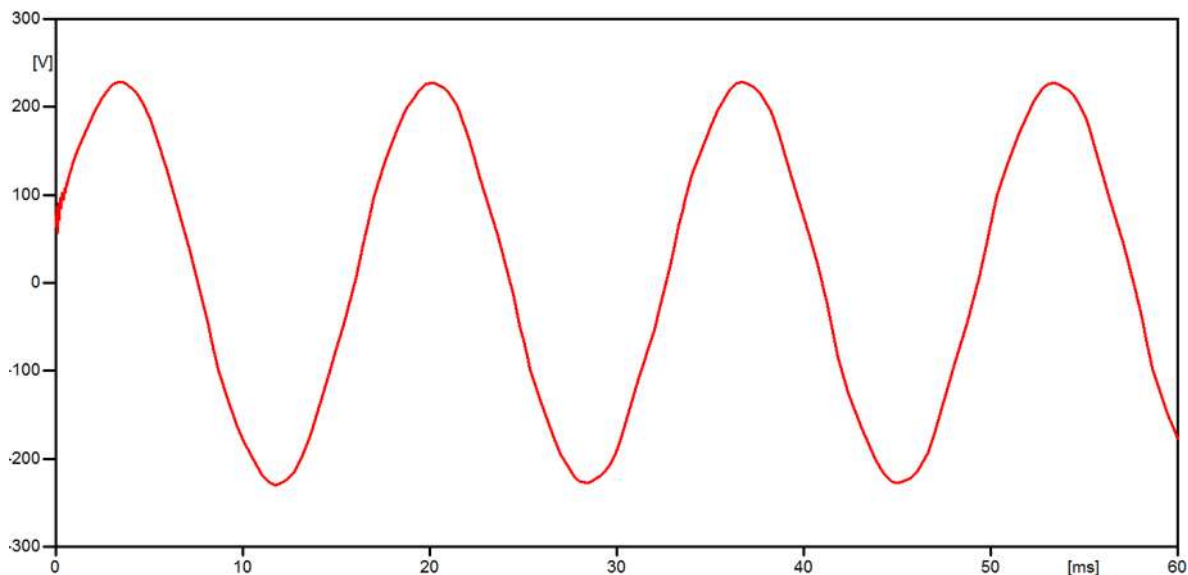


Figura 6.33. Forma de onda del voltaje cuando se mitiga del armónico 5 al 49.

Para comprobar que el filtro diseñado, calculado y modelado logra mitigar la distorsión armónica de la corriente y el voltaje a un nivel aceptable de acuerdo a los valores límite establecidos en el código de red, se procede a obtener de ATPDraw los valores RMS de cada voltaje y corriente presentes en el sistema que se está estudiando. De acuerdo a los resultados en ATPDraw, estos valores RMS son los que se muestran a continuación en la Tabla 6.1 los cuales se comparan también con los valores RMS iniciales antes de implementar el filtro y que fueron calculados mediante ecuaciones en el capítulo 5.

Tabla 6.1. Valores RMS de los voltajes y corrientes armónicos antes y después de aplicar el filtro.

Voltajes RMS de los armónicos sin aplicar el filtro	Voltajes RMS de los armónicos una vez aplicado el filtro	Corrientes RMS de los armónicos sin aplicar el filtro	Corrientes RMS de los armónicos una vez aplicado el filtro
$h_5=60.2453 \text{ V}$	$h_5=2.721 \text{ V}$	$h_5=602.4525 \text{ A}$	$h_5=26.96 \text{ A}$
$h_7=43.0323 \text{ V}$	$h_7=1.274 \text{ V}$	$h_7=430.3232 \text{ A}$	$h_7=12.43 \text{ A}$
$h_{11}=27.3842 \text{ V}$	$h_{11}=0.4664 \text{ V}$	$h_{11}=273.8420 \text{ A}$	$h_{11}=4.531 \text{ A}$
$h_{13}=23.1713 \text{ V}$	$h_{13}=0.3811 \text{ V}$	$h_{13}=231.7125 \text{ A}$	$h_{13}=3.754 \text{ A}$
$h_{17}=17.7192 \text{ V}$	$h_{17}=0.2044 \text{ V}$	$h_{17}=177.1919 \text{ A}$	$h_{17}=1.996 \text{ A}$
$h_{19}=15.8540 \text{ V}$	$h_{19}=0.1922 \text{ V}$	$h_{19}=158.5401 \text{ A}$	$h_{19}=1.836 \text{ A}$
$h_{23}=13.0968 \text{ V}$	$h_{23}=0.1889 \text{ V}$	$h_{23}=130.9679 \text{ A}$	$h_{23}=1.83 \text{ A}$
$h_{25}=12.0491 \text{ V}$	$h_{25}=0.08129 \text{ V}$	$h_{25}=120.4905 \text{ A}$	$h_{25}=0.7675 \text{ A}$
$h_{29}=10.3871 \text{ V}$	$h_{29}=0.05371 \text{ V}$	$h_{29}=103.8711 \text{ A}$	$h_{29}=0.504 \text{ A}$
$h_{31}=9.717 \text{ V}$	$h_{31}=0.04468 \text{ V}$	$h_{31}=97.1698 \text{ A}$	$h_{31}=0.416 \text{ A}$
$h_{35}=8.6065 \text{ V}$	$h_{35}=0.0641 \text{ V}$	$h_{35}=86.0646 \text{ A}$	$h_{35}=0.623 \text{ A}$
$h_{37}=8.1413 \text{ V}$	$h_{37}=0.07988 \text{ V}$	$h_{37}=81.4125 \text{ A}$	$h_{37}=0.7853 \text{ A}$
$h_{41}=7.347 \text{ V}$	$h_{41}=0.09026 \text{ V}$	$h_{41}=73.4698 \text{ A}$	$h_{41}=0.8926 \text{ A}$
$h_{43}=7.0053 \text{ V}$	$h_{43}=0.1084 \text{ V}$	$h_{43}=70.0526 \text{ A}$	$h_{43}=1.076 \text{ A}$
$h_{47}=6.4091 \text{ V}$	$h_{47}=0.1137 \text{ V}$	$h_{47}=64.0907 \text{ A}$	$h_{47}=1.131 \text{ A}$
$h_{49}=6.1475 \text{ V}$	$h_{49}=0.1368 \text{ V}$	$h_{49}=61.4747 \text{ A}$	$h_{49}=1.363 \text{ A}$

En la tabla anterior fácilmente puede observarse como los voltajes y corrientes armónicos disminuyeron de forma importante una vez que el filtro armónico se implementó en el sistema. En la siguiente gráfica de la Figura 6.34 se muestra el espectro de frecuencias de todas las corrientes armónicas presentes en el sistema. De igual manera, se comparan los valores RMS de cada una de estas corrientes armónicas con el valor RMS de la corriente fundamental nominal una vez que se implementa el filtro armónico que se diseñó. Se observa que las magnitudes de todas las corrientes armónicas se han logrado reducir notablemente.

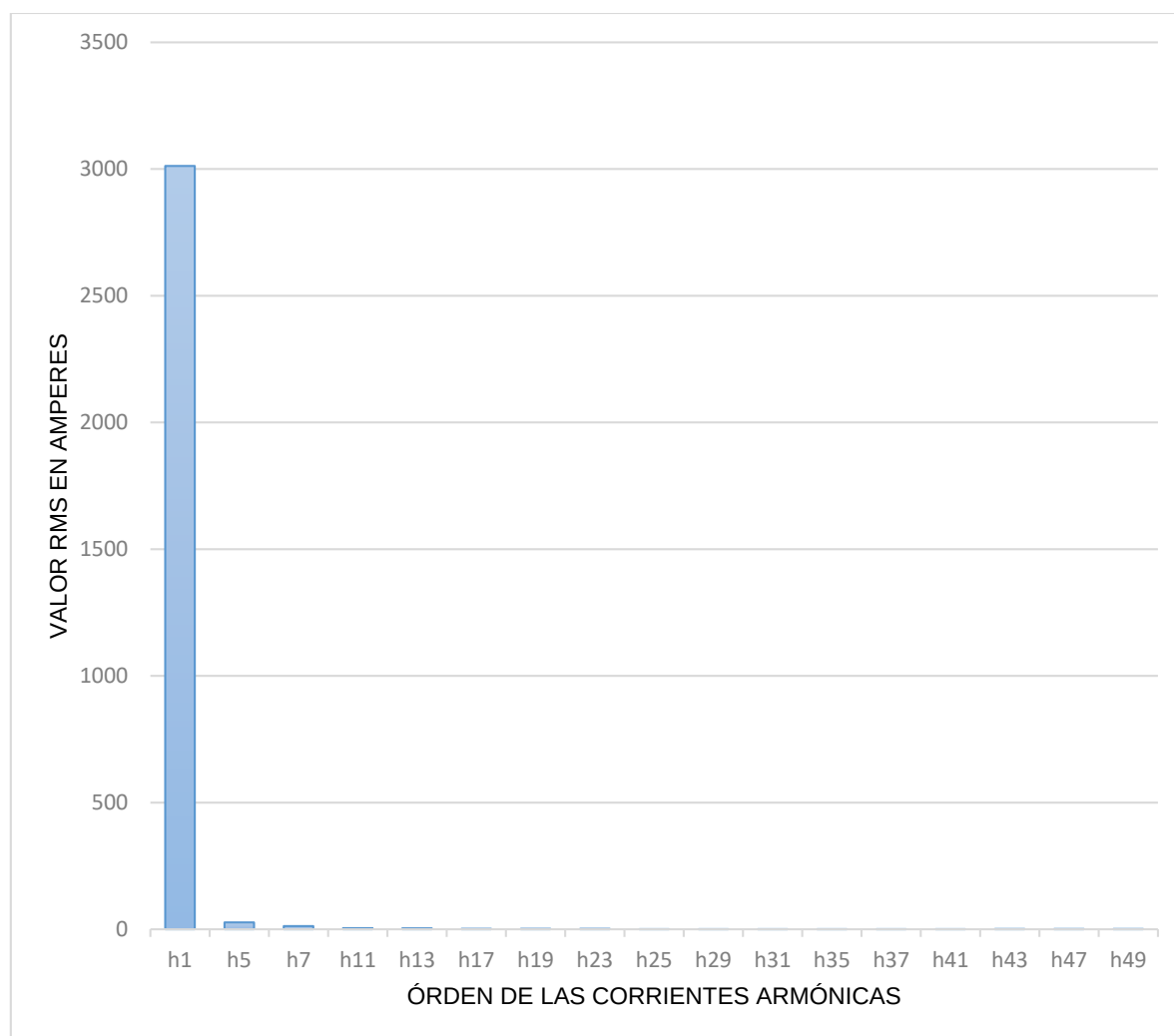


Figura 6.34. Espectro de frecuencias de corrientes armónicas con el filtro.

La siguiente gráfica de la Figura 6.35 se observa el espectro de frecuencias de los voltajes armónicos una vez que el filtro armónico se ha implementado, al igual que con las magnitudes RMS de las corrientes armónicas, los valores RMS de los voltajes han disminuido considerablemente al aplicarse el filtro.

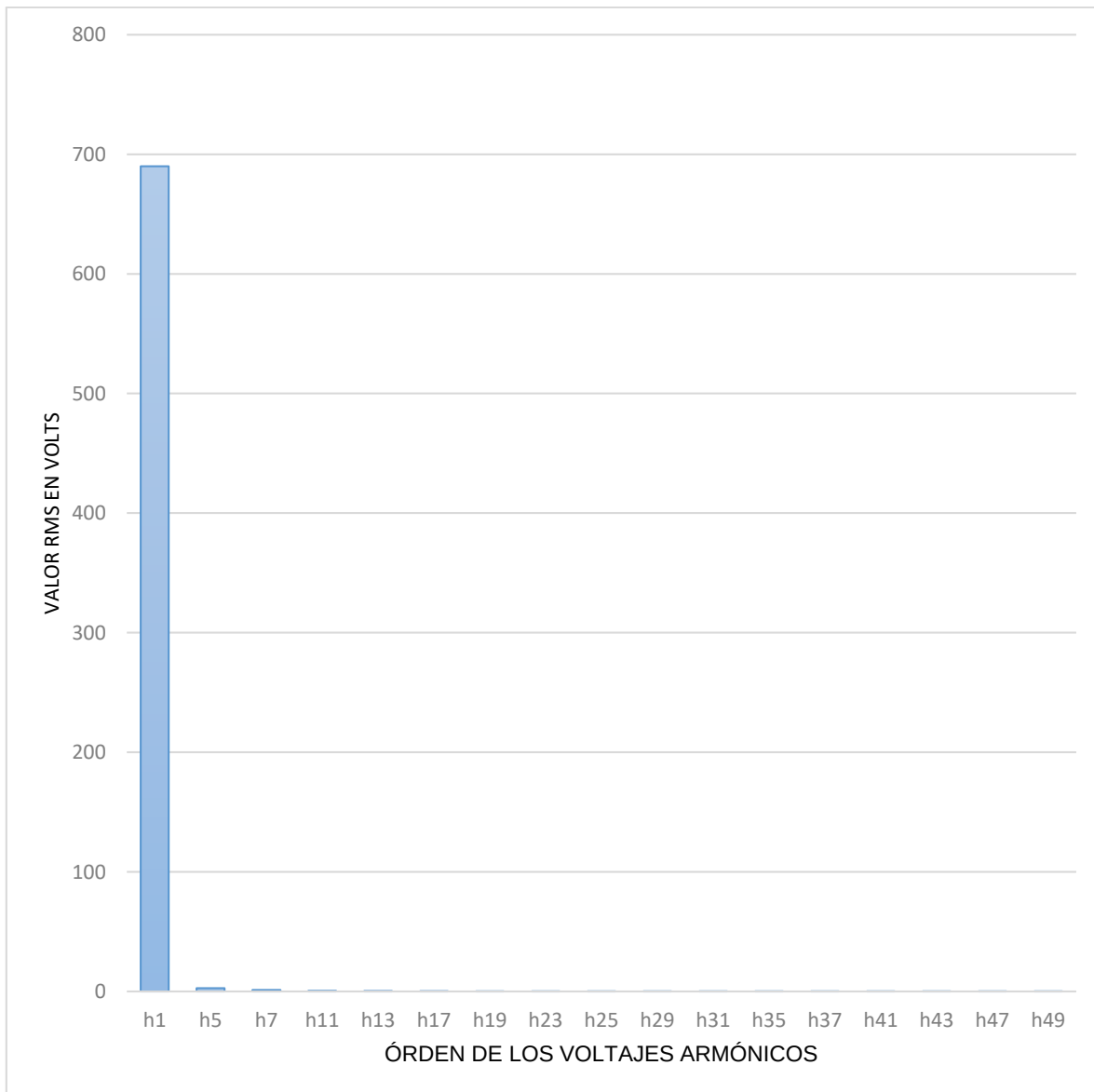


Figura 6.35. Espectro de frecuencias de voltajes armónicos con el filtro.

A continuación, en la gráfica de la Figura 6.36 se muestra el espectro de frecuencias de los voltajes armónicos una vez aplicado el filtro, pero ahora expresados como un valor porcentual respecto al valor de la componente fundamental que representa el 100%. Puede observarse que los valores de cada uno de los voltajes armónicos son menores al 1%, esto quiere decir la contribución de distorsión que cada voltaje armónico proporciona a la fundamental es menos del 1% del valor que tiene dicha componente fundamental.

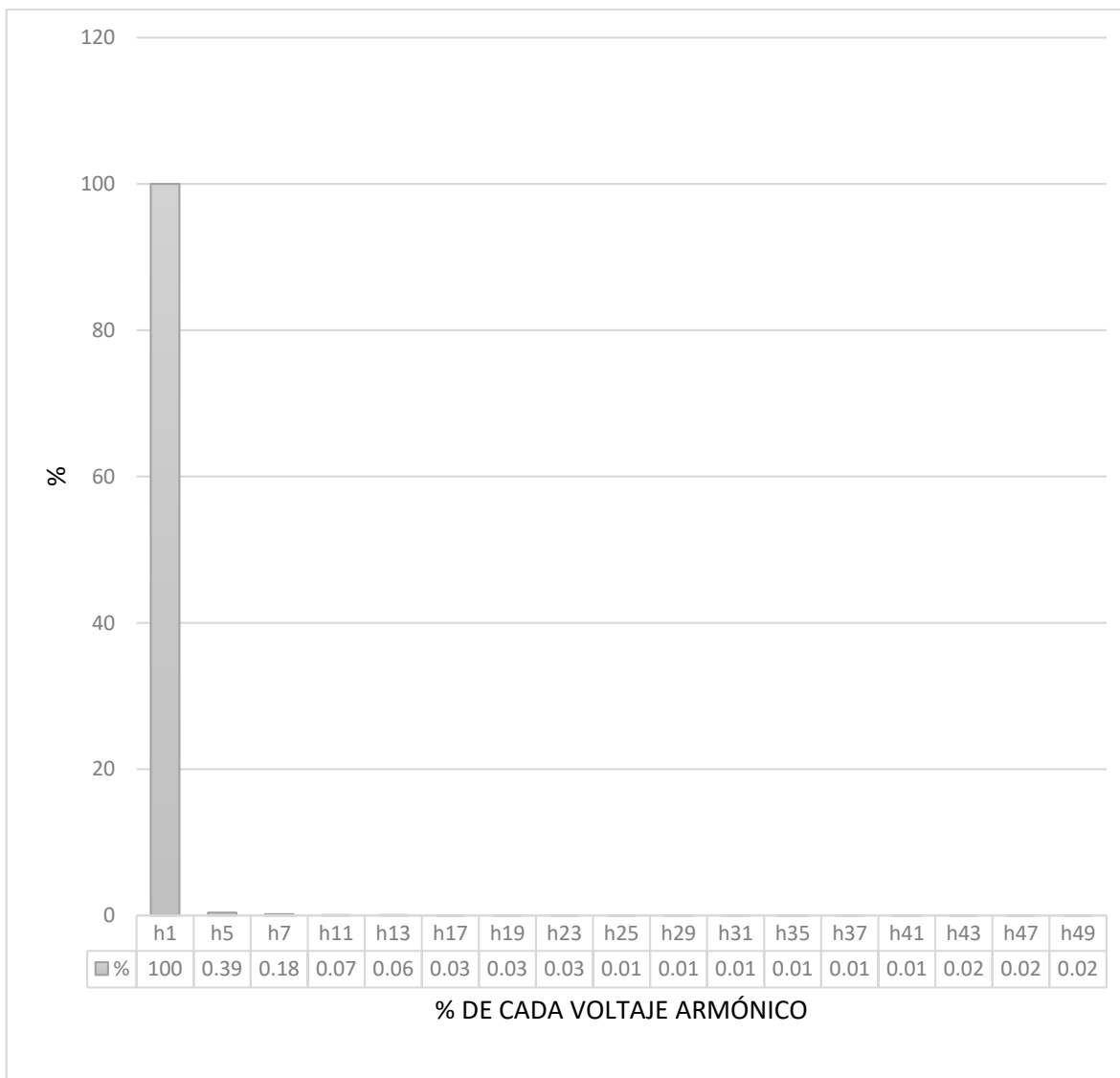


Figura 6.36. Espectro de frecuencias de voltajes expresados en porcentajes cuando se aplica el filtro.

Por último, se procede a calcular la Distorsión Armónica Total (THD) del voltaje ahora que se han mitigado los armónicos, esto con el fin de comprobar si el filtro que se diseñó logró su cometido de disminuir la distorsión armónica hasta niveles aceptables. Para realizar esto se usará la ecuación para calcular el THD del voltaje y los valores RMS de los voltajes armónicos obtenidos por ATPDraw que se encuentran en la Tabla 6.1, por lo tanto, tenemos que el THD del voltaje una vez que se aplicó el filtro es de:

$$\begin{aligned}
 & \mathbf{THD_v} \\
 &= \sqrt{\frac{2.721^2 + 1.274^2 + 0.4664^2 + 0.3811^2 + 0.2044^2 + 0.1922^2 + 0.1889^2 + 0.08129^2 + 0.05371^2}{3012.2623}} \\
 &= \mathbf{0.1027\%}
 \end{aligned}$$

En la Tabla 6.2 se compara el valor de THD del voltaje máximo permitido por el código de red y el THD del voltaje en nuestro sistema antes y después de aplicar el filtro. En esta tabla se puede observar claramente que la diferencia entre el THD del voltaje antes y después de aplicar el filtro es bastante y con lo cual se cumple el objetivo principal del filtro armónico el cual era el de disminuir la Distorsión Armónica Total del voltaje a un valor menor al 3%.

Tabla 6.2. Comparación de valores de THD del voltaje.

THD _v máximo permisible por el Código de Red	THD _v en el sistema antes de aplicar el filtro	THD _v en el sistema después de aplicar el filtro
3%	13.1115%	0.1027%

6.4. Conclusión del capítulo 6

Como ha podido comprobarse, calcular los valores y parámetros de inductancia, capacitancia y resistencia de un filtro armónico pasivo mediante ecuaciones prácticas, resultó ser muy eficiente, ya que como se pudo observar en las formas de onda de las simulaciones, cada vez que se añadían más inductores y capacitores previamente calculados, se reducía la distorsión armónica en estas formas de onda hasta reducirla prácticamente a un valor menor al máximo permisible que indica el Código de Red.

Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones

7.1. Conclusiones

- Al realizar los cálculos para conocer los valores RMS de las corrientes y voltajes armónicos se obtuvo que las magnitudes RMS de los armónicos de orden más bajo como el 5^{to}, 7^{mo} y 11^{er} armónicos son mayores a las magnitudes o valores RMS de los armónicos de orden más alto, como por ejemplo las magnitudes del 23^{er} o 25^{to} armónicos.
- Debido a lo anterior se puede decir que los armónicos predominantes en el convertidor de potencia y sistema eólico son los armónicos 5, 7 y 11, porque son los armónicos de mayor magnitud RMS y por lo tanto los que mayor distorsión armónica. Esto último puede observarse al comparar todas las formas de onda a medida que se agregaban más armónicos al sistema.
- Lo expuesto en los dos primeros puntos puede confirmarse específicamente en la Figura 5.20, donde se expone la forma de onda de la corriente cuando se le aplican los armónicos 5, 7 y 11, ya que a partir de ahí cuando se le van agregando armónicos mayores al 11^{vo} la forma de onda de la corriente sufre pequeños cambios en comparación con las tres primeras.
- También, es por los puntos anteriores que, en un estudio real de calidad de la energía eléctrica, cuando se analizan los armónicos en el sistema, normalmente solo se busca estudiar hasta el armónico 25, ya que como se vio, armónicos de orden más alto al 25, su magnitud RMS se va reduciendo considerablemente y por lo tanto también su impacto al sistema eléctrico.
- Sin embargo, a pesar del punto anterior, el haber estudiado en esta tesis hasta el armónico 49 en centrales de generación, como lo menciona el código de red, es muy razonable, ya que el valor RMS de los voltajes armónicos depende mucho de la Impedancia del sistema eléctrico, por lo tanto, si en una central generadora no se mitigan las corrientes armónicas mayores a la armónica 25, entonces por más pequeñas que estas sean, al momento de interactuar con la impedancia de las líneas de transmisión eléctrica y después con la impedancia de las líneas de distribución, lo que se tendrá serán magnitudes RMS de voltajes armónicos muy grandes y por lo tanto un THD del voltaje muy elevado, ya que la impedancia de las líneas de transmisión y distribución eléctrica puede ser muy grande.
- El valor RMS de la corriente total distorsionada cuando se agregan todos los armónicos al sistema, es mayor al valor RMS de la corriente nominal cuando no hay armónicos presentes. Este efecto pudo comprobarse en los resultados de la forma de onda de la Figura 5.36,

donde se aprecia que el valor de la corriente es mayor a 4000 Amperes, cuando el valor RMS nominal era de 3,012.26 Amperes. Esto pasa porque cada corriente armónica va aportando una cierta cantidad de amperes al valor de la componente fundamental de la corriente.

- El valor RMS del voltaje total distorsionado cuando se agregan todos los armónicos al sistema también es mayor al valor RMS del voltaje nominal, esto es debido porque cada uno de los voltajes armónicos aporta una determinada magnitud de voltaje al valor de la Distorsión Armónica Total del voltaje (THD_v). Esto se demostró en la simulación de la Figura 5.35, donde se observa que el valor RMS de la onda de voltaje es de poco más es 1000 Volts cuando el valor RMS del voltaje a la frecuencia fundamental era de 690 Volts.
- Si se hubiera incluido un valor de inductancia en el modelo, los valores RMS de los voltajes armónicos y también los valores de distorsión armónica total del voltaje hubieran sido mucho mayores, ya que la impedancia en el sistema hubiera aumentado.
- Cuando se aplican las series capacitor-inductor-resistor del filtro para mitigar las armónicas 5, 7, 11 y 13, se observó que tanto la onda de corriente y voltaje, adquieren una forma que se vuelve a parecer a una onda senoidal, esto sucede porque las armónicas de orden menor son las que aportan mayor cantidad de distorsión a la onda total, porque su valor RMS es mayor que las armónicas de orden más alto. Por lo tanto, al mitigar los voltajes y corrientes armónicos cuyo valor RMS es más grande, se puede disminuir gran parte de la distorsión total y esto sin haber mitigado a las armónicas de orden mayor.

En la práctica esto puede ser muy útil e importante, ya que puede pasar que muchas veces simplemente con mitigar los armónicos que aporten mayor distorsión se pueda disminuir el valor de THD del voltaje y la corriente a valores permisibles y esto sin la necesidad de diseñar e instalar un filtro muy grande o robusto que pudiera llegar a ser más costoso y difícil de mantener.

- En las Figuras 6.20 y 6.21, se observó que al agregar las series inductor-capacitor-resistor para mitigar hasta la armónica 25, las formas de onda prácticamente vuelven a ser o parecer una onda senoidal. Esto comprueba lo dicho por los autores en la bibliografía cerca de que las primeras veinticinco armónicas generalmente son las que más distorsión generan.
- El valor RMS del voltaje cuando se agregan las series inductor-capacitor-resistor para mitigar todas las armónicas es de alrededor de 220 Volts, esto es mucho menor al valor RMS del voltaje de 690 Volts cuando no se tenían armónicas presentes en el sistema. Este efecto puede observarse en la Figura 6.33 y puede deberse porque al añadir muchos inductores y capacitores, la impedancia del filtro aumenta, lo cual crea una importante caída de voltaje. En la práctica, el efecto de caída de voltaje que pueda provocar un filtro armónico es algo que se debe de tener muy en cuenta a la hora de instalar este tipo de equipos.

- El valor RMS de la corriente cuando se agregan las series inductor-capacitor-resistor para mitigar hasta la armónica 49, sigue siendo mayor al valor RMS de la corriente nominal cuando no se tienen armónicos presentes en el sistema. Este efecto se observa en la Figura 6.32 y puede deberse a que en la realidad el objetivo de un filtro armónico no es eliminar por completo los armónicos, sino mitigarlos, o sea, reducirlos a niveles muy bajos. Esto se puede observar también en la Tabla 6.1, donde se muestran los valores RMS de los voltajes y corrientes armónicos, los cuales no son cero y que fueron obtenidos de ATPDraw una vez que se aplicaron todos los filtros para cada uno de los armónicos.
- A pesar de que actualmente los filtros armónicos activos se empiezan a utilizar más debido a que pueden mitigar armónicos cuando estos cambian constantemente, se demostró que los filtros pasivos pueden ser una buena opción para mitigar armónicos cuando estos son constantes, tal como fue en el estudio de esta tesis.

7.2. Recomendaciones para trabajos futuros

- Si el filtro no fuera conectado junto a la carga no lineal (en este caso el convertidor de potencia), las corrientes armónicas se propagarían por todo el sistema eléctrico del parque eólico y después hasta el punto de interconexión, llegando hasta los usuarios finales causando problemas a estos. Es por eso que la ubicación recomendable de un filtro de armónicos debe de ser lo más cercano a la carga no lineal, tal como se hizo en esta tesis.
- Siempre que se construya el modelo de un sistema eléctrico que incluya cargas inductivas como motores eléctricos o transformadores, se debe de incluir un inductor en el modelo que represente la inductancia de este tipo de cargas. En esta tesis no se incluyó tal valor, porque la extensión del sistema que se decidió estudiar no involucraba dichas cargas, sino conductores eléctricos los cuales fueron representados por un valor de impedancia.
- En esta tesis los armónicos generados por el convertidor de potencia, así como los valores RMS de estos armónicos y la Distorsión Armónica Total que generan sobre las ondas fundamentales, fueron obtenidos por medio de ecuaciones y cálculos, sin embargo, en la práctica cuando se necesita saber los valores de distorsión que una carga no lineal como un inversor o rectificador produce, bastaría con revisar la ficha técnica de tales equipos o también obtener estos valores por medio de analizadores de red, realizando un estudio de calidad de la energía eléctrica.

- 1) Ackerman, T. (2005). *Wind power in power systems*. John Wiley & Sons, Ltd.
- 2) Barcón, S., Guerrero, R., Martínez, I. (2012). *Calidad de la energía; factor de potencia y filtrado de armónicas*. McGraw-Hill.
- 3) Carta, J., Calero, R., Colmenar, A., Castro, M. (2009). *Centrales de energías renovables; generación eléctrica con energías renovables*. UNED, Pearson.
- 4) Chakraborty, S., Simoes, M., Kramer, W. (2013). *Power electronics for renewable and distributed energy systems; a sourcebook of topologies, control and integration*. Springer.
- 5) CRE. (2016). *Disposiciones Administrativas de carácter general que contienen los criterios de eficiencia, calidad, confiabilidad, continuidad, seguridad, y sustentabilidad del Sistema Eléctrico Nacional: Código de Red*.
- 6) Dugan, R., McGranaghan, M., Santoso, S., Beaty, W. (2004). *Electrical Power Systems Quality*. McGraw-Hill.
- 7) Fluke and Philips. Understanding harmonics in power distribution systems.
<https://www.youtube.com/watch?v=YRrInGjzVo>.
- 8) Hansen et al. (2002). *Conceptual survey of generators and power electronics for wind turbines*. DTU.
- 9) IEEE Power and Energy Society. (2009). *IEEE Std. 1159-2009 Recommended practice for monitoring electric power quality*.
- 10) Ingeatteam. (2019). *Ready for your optimization; power converters, automation systems, O&M services*.
- 11) Kennedy, B. (2000). *Power quality primer*. McGraw-Hill.
- 12) Kusko, A., Thompson, M. (2007). *Power quality in electrical systems*. McGraw-Hill.
- 13) Manwell, J., McGowan, J., Rogers, A. (2009). *Wind energy explained; theory, design and application*. Wiley.
- 14) Mohan, N., Undeland, T., Robbins, W. (2009). *Electrónica de potencia; convertidores, aplicaciones y diseño*. McGraw-Hill.
- 15) Patel, M. (1999). *Wind and solar power systems*. CRC Press.
- 16) Pq Barcón (2021). *Whitepaper: Problemas y soluciones de la calidad de la energía*.
<https://pqbarcon.com/whitepaper-problemas-y-soluciones-calidad-energia/>.

- 17) Rashid, M. (2004). *Electrónica de potencia; circuitos, dispositivos y aplicaciones*. Pearson.
- 18) Sankaran, C. (2002). *Power quality*. CRC Press.
- 19) Singh, Chandra, Al-Haddad. (2015). *Power quality problems and mitigation techniques*. Wiley.
- 20) Villarrubia, M. (2013). *Ingeniería de la energía eólica*. Alfomega.