



UNIVERSIDAD DE PIURA

FACULTAD DE INGENIERÍA

Estudio de las perturbaciones armónicas en la calidad de energía eléctrica en la Universidad de Piura - campus Lima

Tesis para optar el Título de
Ingeniero Mecánico - Eléctrico

Gerardo Velarde Rojas

Asesor:
Mgtr. Ing. José Hugo Fiestas Chévez

Piura, julio de 2022



Dedicatoria

A Dios, por darme la oportunidad de tener a mi madre conmigo, y a mis hermanas por ser mi motivo.





Resumen

Cada vez la tecnología incorpora nuevas mejoras en los equipos electrónicos de potencia, con el objetivo de mejorar su eficiencia y autonomía, convirtiéndolos más sofisticados. Sin embargo, esto ha perjudicado la calidad de onda de la señal eléctrica por la aparición de las denominadas perturbaciones armónicas que afectan el funcionamiento de otros equipos de baja potencia. Se estudiará a detalle la parte teórica que involucra las perturbaciones eléctricas, métodos de análisis, normativas, efectos y mitigación de armónicos.

Las normativas serán aplicadas por medio de un caso práctico en una de las instalaciones de la Universidad de Piura – Sede Lima correspondiente al Bloque Administrativo. Se optó por este bloque porque es una de las instalaciones con mayores cargas generadoras de armónicas que son inyectados hacia la red como variadores de frecuencia, controladores, UPS, estabilizadores, equipos electrónicos (celulares, laptops, cajeros automáticos).

Para la identificación de los armónicos presentes en la red se usará un analizador de redes, que utiliza como principio la transformada discreta de Fourier para determinar la magnitud de los armónicos. La instalación del equipo normalmente se realiza en punto de acoplamiento común (PCC), desde donde se derivan los subcircuitos. Posterior a la medición se analizan los resultados y se contrasta con la normativa si está dentro de los límites establecidos.

El resultado obtenido por el analizador de redes muestra que el armónico de tensión de mayor magnitud es de 2.38 % para el 5to orden, y según Norma Técnica de Calidad de los Sistema Eléctrico (NTCSE) está dentro de los límites, ya que es inferior al 5 %. Respecto a los armónicos de corriente, la NTCSE no las evalúa, por lo que se recurre a la norma internacional IEEE 519, que relaciona la corriente máxima de cortocircuito y la corriente de demanda máxima de carga. En esta norma se establece un límite de 12 % para armónicos de orden 3, 5, y 7; y un límite de 5.5 % para armónicos de orden 11 y 13. De acuerdo con las lecturas, no se cumple con esta normativa, teniendo valores de 18.05 %, 27.21 % y 13.69 % en los armónicos 3, 5 y 7, respectivamente, y valores de 6.126 % y 8.701 % para los armónicos 11 y 13, respectivamente. La solución a este problema se plantea la utilización de filtros activos, ya que se ajustan mejor a este caso por la cantidad de armónicos significativos. Se procede a seleccionar los filtros comerciales que mejor se adecuen a nuestro sistema, haciendo un análisis costo – beneficio, con el objetivo de reducir las perturbaciones por debajo de los límites establecidos.

Tener un control periódico de los armónicos presentes en la red, permite tener una base de datos de la evolución de los armónicos en el tiempo, para así identificar la tendencia de los armónicos significativos, de forma tal que se pueda prever los posibles efectos en los equipos a corto, mediano y largo plazo. Los analizadores de redes no solo miden los armónicos sino potencia, energía, entre otras; la información recopilada también sería útil para la gestión de la red.



Tabla de contenido

Introducción	17
Capítulo 1	19
Calidad eléctrica	19
1.1 ¿Por qué es importante el estudio de la calidad energética?	19
1.2 ¿Qué es calidad energética?	20
1.2.1 <i>Beneficios de la Calidad energética en el Perú</i>	21
1.3 Análisis de la calidad energética: clasificación de las perturbaciones	24
1.3.1 <i>Perturbaciones transitorias de tensión</i>	25
1.3.2 <i>Variaciones de corta duración</i>	28
1.3.3 <i>Variaciones de larga duración</i>	33
1.3.4 <i>Desbalance de tensión</i>	35
1.3.5 <i>Distorsión de la forma de onda</i>	37
1.3.6 <i>Fluctuaciones de tensión y Flicker</i>	40
1.3.7 <i>Variaciones de frecuencia</i>	42
1.4 Posibles mitigaciones de las perturbaciones.....	44
Capítulo 2	47
Estudio de los armónicos en sistemas eléctricos	47
2.1 Antecedentes.....	47
2.2 Perturbaciones armónicas	48
2.3 Métodos de análisis de armónicos	48
2.3.1 <i>De la serie a la Transformada de Fourier</i>	49
2.3.2 <i>Transformada de Wavelet</i>	56
2.4 Fuentes generadoras de armónicos	59

2.4.1 Cargas lineales y no lineales	59
2.4.2 Fuentes generadoras de armónicos	60
2.5 Efectos de los armónicos	75
2.5.1 Efectos producidos por los armónicos.....	75
2.5.2 Efectos en las instalaciones eléctricas	76
2.5.3 Efectos en equipos de alta potencia conectados a la red eléctrica	81
2.5.4 Efectos en los equipos de baja potencia	83
2.6 Índices de medición de armónicos	84
2.6.1 Potencias	84
2.6.2 Distorsión armónica total	85
2.6.3 Factor de potencia en presencia de armónicos.....	86
2.6.4 Análisis de impedancia en función de la frecuencia	87
2.7 Normativas Internacionales.....	87
2.7.1 IEC (Normativa Europea).....	88
2.7.2 Normativa IEEE (normativa norteamericana)	99
2.7.3 Normativa Técnica Peruana (NTP).....	101
Capítulo 3.....	105
Medios de solución para los armónicos	105
3.1 Atenuación elemental de perturbaciones armónicos	105
3.2 Atenuación mediante Reactancia de línea para armónicos impares en motores	106
3.3 Reactancia antiarmónica para banco de condensadores.....	107
3.4 Atenuación mediante uso de equipos de filtrado	108
3.4.1 Filtro pasivo.....	108
3.4.2 Filtro activo	116
3.5 Factor K del transformador	120
3.6 Mitigación para armónicos de 3er orden	122
3.7 Direccionalidad	124
3.7.1 Método de desconexión de cargas a analizar.....	124
3.7.2 Método de superposición de THD_v y $THDI$	125
3.7.3 Método de Emmanuel.....	126

Capítulo 4.....	129
Caso práctico: estudio de los armónicos en la Universidad de Piura	129
4.1 Caso de estudio.....	129
4.2 Análisis de las instalaciones	131
4.3 Equipos de la instalación	134
4.3.1 Características de los equipos	134
4.3.2 Diagrama unifilar de las instalaciones	135
4.4 Consideraciones de la NTCSE para las mediciones.....	137
4.4.1 Ubicación del analizador de redes (análisis de cada caso)	138
4.5 Características del instrumento analizador de redes	140
4.5.1 Configuración del equipo en el PCC.....	143
4.6 Resultados y análisis de las mediciones	145
4.6.1 Tensión	146
4.6.2 Corriente.....	153
4.6.3 Filtros recomendados.....	158
4.6.4 Selección del coeficiente K del transformador	168
Conclusiones	173
Referencias bibliográficas.....	177



Lista de tablas

Tabla 1. Proporción de mediciones con mala calidad de tensión	23
Tabla 2. Montos de compensación por mala calidad de tensión	24
Tabla 3. Categoría y características típicas de las perturbaciones transitorias según la normativa IEEE 1159 - 2009	26
Tabla 4. Características de huecos de tensión, sobretensión e interrupciones según la normativa EN 50160.....	29
Tabla 5. Características de huecos de tensión, sobretensión e interrupciones según la normativa IEEE 1159 – 2009.....	29
Tabla 6. Categoría y características típicas de las perturbaciones transitorias según la normativa IEEE 1159 - 1999	33
Tabla 7. Tecnología aplicada en la mitigación de perturbaciones en la tensión	45
Tabla 8. Orden y secuencia de los armónicos.....	48
Tabla 9 Comparación entre las cuatro formas del análisis de Fourier	55
Tabla 10. Las cuatro transformadas de Fourier.....	56
Tabla 11. Magnitud de los armónicos emitido por los dispositivos convertidores.....	64
Tabla 12. Armónicos generados por un Horno de Arco	71
Tabla 13. Efectos en el tiempo sobre los equipos eléctricos.....	76
Tabla 14. Estructura de la Norma IEC 61000 - X	88
Tabla 15. Subpartes a evaluar.....	89
Tabla 16. Límites según la clase, establecido por la Normativa IEC 61000 – 2 – 4	90
Tabla 17. Límites para equipos de clase A	92
Tabla 18. Límites para equipos de clase B	92
Tabla 19. Límites para equipos de clase C con $5\text{ W} \leq P \leq 25\text{ W}$	93
Tabla 20. Límites para equipos de clase C con $P \geq 25\text{ W}$	93
Tabla 21. Límites para equipos de clase D	94
Tabla 22. Limitaciones para la Etapa 1.....	95
Tabla 23. Limitaciones para la Etapa 2.....	96
Tabla 24. Niveles de tensión	97
Tabla 25. Límites de la tensión armónica para nivel de compatibilidad planificación	98
Tabla 26. Límites de distorsión de voltaje según IEEE 519	100
Tabla 27. Límites de corriente armónica en el PCC	100

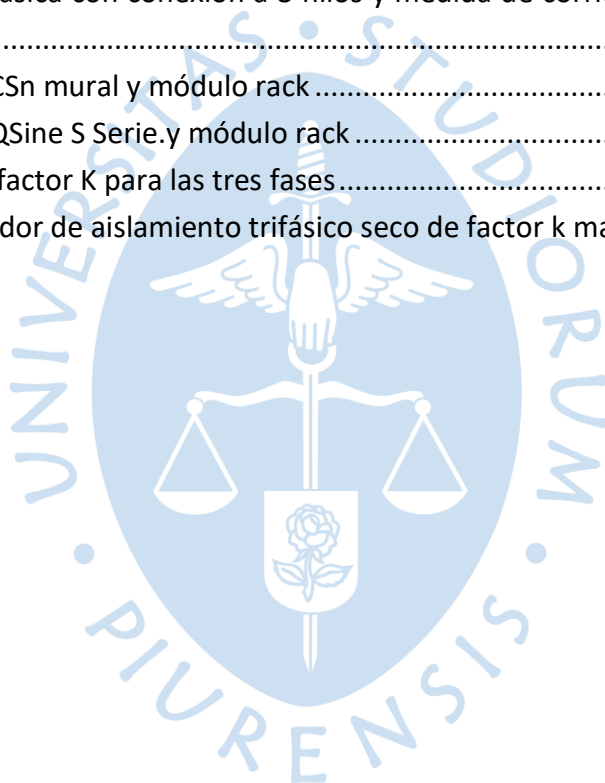
Tabla 28. Sectores de Distribución Típico	101
Tabla 29. Descripción general de la normativa NTCSE	103
Tabla 30. Límite perturbaciones armónicas establecidas por NTCSE.....	103
Tabla 31. Límite perturbaciones armónicas establecida por NTCSE	104
Tabla 32. Resultados obtenidos de un filtro pasivo aplicado en el mall JIU en China.....	114
Tabla 33. Reducción de armónicos con PQsine	118
Tabla 34. Factor K normalizados	121
Tabla 35. Porcentaje de armónicos en la instalación	122
Tabla 36. Equipos en monofásicos.....	123
Tabla 37. Capacidad del neutro ante armónicos de acuerdo a la normativa IEC 60354 -5-524:2001.....	123
Tabla 38. Potencias armónicas.....	127
Tabla 39. Características del transformador trifásico.....	133
Tabla 40. Condiciones de la NTPSE para la interpretación de mediciones.....	137
Tabla 41. Datos del equipo	140
Tabla 42. Parámetros de tensión	146
Tabla 43. Datos significativos de sobretensión.....	147
Tabla 44. Datos de la medición de armónicos de orden 0 - 50	149
Tabla 45. Parámetros de tensión NTPSE.....	151
Tabla 46. Parámetros de tensión IEEE 519 - 1992	152
Tabla 47. Parámetros de tensión IEC 61000 – 3 – 6	152
Tabla 48. Parámetros de corriente	153
Tabla 49. Datos de placa del interruptor automático principal del bloque administrativo ..	154
Tabla 50. Límites de los armónicos para una corriente máxima de cortocircuito de 910.96	155
Tabla 51. Comparativo entre el límite y la magnitud de los armónicos medidos por el analizador de redes	155
Tabla 52. Resultado de la Distorsión Total de la Demanda	157
Tabla 53. Distorsión armónica de corriente en cada fase	158
Tabla 54. Cuadro resumen de los filtros evaluados.....	166
Tabla 55. Aplicaciones de los filtros.....	167
Tabla 56. Parámetros medidos por el analizador de redes	168
Tabla 57. Factor k para diferentes tipos de carga.....	169

Lista de figuras

Figura 1. Demanda de la energía a nivel global	22
Figura 2. Clasificación de las perturbaciones que afectan la calidad eléctrica según IEEE 1159 – 2009	25
Figura 3. Perturbaciones transitorias sobre la tensión impulsiva y oscilatoria	26
Figura 4. Los siete tipos de problemas en el suministro eléctrico	28
Figura 5. Clasificación de las perturbaciones de corta duración: Hundimiento y elevación de tensión según la normativa IEEE 1150-2009.....	30
Figura 6. Hundimiento de Tensión (SAG) de categoría instantáneo, duración entre 0.5 – 30 ciclos.....	31
Figura 7. Características de hundimiento de tensión	31
Figura 8. Tensión SWELL de categoría momentánea, con duración de 0.5 – 30 ciclos	32
Figura 9. Desequilibrio de tensión del sistema eléctrico	35
Figura 10. Generación de armónico en el sistema eléctrico	38
Figura 11. Señal de tensión con disturbio Notching	40
Figura 12. Variación de la señal de tensión y Flicker en el sistema eléctrico	41
Figura 13. Variación de la frecuencia	44
Figura 14. Perturbaciones presentes en la tensión de la red eléctrica	44
Figura 15. Relación entre número de operaciones y muestras	55
Figura 16. Ondícula de Morlet para valores $\Omega = \pi$ y $\sigma = 1$ a) tiempo y b) frecuencia	57
Figura 17. a) señal transformada de Fourier y b) transformada Wavelet	58
Figura 18. Sistema representativo a) carga lineal y b) carga no lineal	59
Figura 19. Sistema eléctrico con cargas generadoras armónicas	60
Figura 20. Tipos de fuentes de regulación y control.....	61
Figura 21. Sistemas convertidores de 6 pulsos.....	62
Figura 22. Señal en continua a la salida del conversor	63
Figura 23. Análisis de corriente en los dispositivos tiristores	64
Figura 24. Módulo de un cicloconversor trifásico.....	65
Figura 25. Comportamiento de la señal a la salida del módulo 1.....	66
Figura 26. Operación modo bloqueo	67
Figura 27. Clasificación de los dispositivos electrónicos en inversores	68
Figura 28. Pulso de control para los tiristores	69

Figura 29. Variación del número de pulsos.....	70
Figura 30. Armónicos individuales de un horno de arco eléctrico	72
Figura 31. a) Características de los Fluorescentes según fabricante, b) Efectos en la onda de corriente y c) Magnitud de los armónicos generados por los fluorescentes.....	73
Figura 32. Partes internas de motor eléctrico	74
Figura 33. Curva de saturación en el núcleo del transformador	75
Figura 34. Circuito RLC	77
Figura 35. Curva característica impedancia – frecuencia	78
Figura 36. Curva característica corriente – frecuencia	78
Figura 37. Efectos en conductores según el incremento de la frecuencia	80
Figura 38. Distribución de cargas según las potencias	106
Figura 39. Configuración de reactores de línea	107
Figura 40. Configuraciones del filtro	110
Figura 41. Sintonización de filtros pasivos para armónicos.....	114
Figura 42. Sistema de control del filtro activo	117
Figura 43. TDH con 30 % en el dominio del tiempo sin aplicación de filtro activo Pqsine	119
Figura 44. Aplicando filtro activo PQsine la perturbación armónica TDH < 5 % con señal mejorada en el dominio del tiempo.....	119
Figura 45. Filtro paralelo, formado por la combinación de dos filtros: activo y pasivo	120
Figura 46. Evaluación del nivel de emisión ON y OF.....	125
Figura 47. Superposición de armónicos de tensión y corriente de orden 5.....	126
Figura 48. Área perimetral del campus Lima	129
Figura 49. Flujograma de trabajo.....	130
Figura 50. Tablero eléctrico de distribución	133
Figura 51. Diagrama unifilar en MT y BT.....	134
Figura 52. Variador de frecuencia para electrobombas monofásicas	134
Figura 53. Acondicionador de aire modelo york de 3.6 kW	135
Figura 54. Diagrama unifilar de aire acondicionado.....	135
Figura 55. Diagrama unifilar de sistema de estabilización.....	136
Figura 56. Tablero General de distribución	138
Figura 57. Diagrama unifilar del bloque administrativo	139
Figura 58. Equipo Metrel MI 2883	140
Figura 59. Formas de conexión del equipo	142
Figura 60. Configuración de parámetros del equipo	143
Figura 61. Configuración 3 W con conexión a tierra de los equipos	144
Figura 62. Selección de la conexión para la medición	144
Figura 63. Instalación de equipo para la medición de parámetros de tensión	144
Figura 64. A la izquierda se muestra la instalación de equipo para la medición de parámetros de corriente, a la derecha la conexión a tierra	145

Figura 65. Verificación de conexión del equipo corriente y tensión	145
Figura 66. Analizando las mediciones obtenidas por el equipo Metrel MI 2883	146
Figura 67. Forma de onda de la Tensión instantánea $V_L - L = V1 - 2$	146
Figura 68. Tensión a lo largo del tiempo.....	147
Figura 69. Armónicos de orden 2 a 13	148
Figura 70. Gráfica de la corriente en comparación con la normativa NTPSE	150
Figura 71. Variación de la distorsión armónica total THDv%.....	151
Figura 72. Forma de onda de la Corriente instantánea $V_I - 1 = V_I - 2$	154
Figura 73. Representación de la magnitud de los armónicos de corriente	157
Figura 74. Gráfica de la TDD % a lo largo del tiempo.....	157
Figura 75. Variación de la distorsión armónica total THD1%	158
Figura 76. Medida trifásica con conexión a 3 hilos y medida de corriente en el lado de carga	161
Figura 77. Accusine PCSn mural y módulo rack	163
Figura 78. Accusine PQSine S Serie.y módulo rack	165
Figura 79. Gráfica del factor K para las tres fases.....	170
Figura 80. Transformador de aislamiento trifásico seco de factor k marca PERTEL	171





Introducción

En las últimas décadas los equipos electrónicos han tenido un gran impacto en la mejora de las funcionalidades ya sean equipos de alta potencia (automatización industrial) o baja potencia (celulares, televisores, equipos electrónicos de medición, etc.), todos estos considerados equipos o cargas no lineales, y son los que más afectan en la calidad de red eléctrica por los armónicos de magnitudes superior a lo permitido por la NTPSE, estos tienen efectos negativos. Según casos de estudio, se evidencia que el calentamiento de los transformadores en un 10 % adicional a sus parámetros de diseño puede reducir en un 50 % el tiempo de vida de estos (Ramírez Castaño & Cano Plata, Calidad del Servicio de Energía Eléctrica, 2006).

La presente investigación surgió con el interés de evaluar la importancia de la calidad eléctrica y las perturbaciones armónicas y su impacto sobre los equipos eléctricos. Al mismo tiempo, se pone a disposición de los estudiantes los alcances para evaluar casos prácticos de estudio de las perturbaciones armónicas en la calidad eléctrica. En esta tesis se realiza el estudio de la calidad eléctrica en una institución educativa superior, poniendo énfasis en las perturbaciones armónicas y en las medidas de mitigación correspondientes.

El capítulo 01 estudiará la importancia y beneficio del análisis de calidad energética, porque una señal distorsionada por las perturbaciones como variaciones, fluctuaciones, desbalance, entre otros, afectan directamente a los equipos eléctricos. De todas las perturbaciones, el capítulo 02 se enfocará en el estudio de los armónicos y métodos matemáticos tal es el caso de la transformada de Fourier que sirve como base para nuevos métodos matemáticos que explican su origen. Posteriormente los equipos generadores y los efectos que causan tanto en el mismo equipo como en toda la red eléctrica; estos armónicos son cuantificables y para ello aplicaremos ecuaciones; los valores obtenidos son contrastados con las normativas tanto nacional como internacional y que también serán estudiadas cada una de estas normativas. El capítulo 03 se enfocará en los diferentes medios de solución que permiten mitigar la magnitud de estos armónicos dentro de los límites según las normativas; entre los equipos muy utilizados se tienen a las reactancias y los filtros. En el Capítulo 04 aplicaremos un caso práctico dentro de las instalaciones de la Universidad de Piura. Se evaluarán todos los parámetros eléctricos relacionados a los armónicos medidos mediante un

equipo analizados de redes y con estos resultados se elegirá los equipos que ayuden a mitigar; posteriormente se emitirán las conclusiones.

El desarrollo de esta tesis permite ampliar los conocimientos en la parte eléctrica específicamente en el análisis interno de la corriente como son las perturbaciones armónicas. También, resultará útil entender el funcionamiento (en base a la transformada de Fourier) y configuración de los analizadores de redes para así profundizar el mundo de la instrumentación. Profundizar el tema de las normativas enseña que todo se rige a unos estándares que son establecidos por empresas que en base a la experiencia determinan estos estándares y que sirve como guía antes, durante y después para la mitigación respectiva.

La elaboración de este trabajo es fundamental para los estudiantes porque permite ampliar los conocimientos y para los profesores elaborar laboratorio para la medición de perturbaciones armónicas en la red por medio de un analizador de redes.



Capítulo 1

Calidad eléctrica

1.1 ¿Por qué es importante el estudio de la calidad energética?

Fue Nicola Tesla quien desarrolló la corriente alterna entre los años 1800 a 1900, y dando inicio a la electricidad comercial, además fue Tesla el inventor del motor de corriente alterna que en años posteriores fue comprado por George Westinghouse y usado para la generación de corriente alterna, proyectándose hacia el futuro de la electricidad (Tomás Supervielle, 2018). Toda la electricidad producida por las centrales generadoras convencionales es de corriente alterna y existen muchas empresas generadoras de electricidad en diferentes partes del mundo principalmente en los países desarrollados como Norteamérica y gran parte de Europa, y en paralelo se construían redes de transmisión de largas distancias y subestaciones; hasta ese momento la electricidad era abundante y suficiente para abastecer a las diferentes industrias del mundo, de manera que se obtenían buenos beneficios económicos. Sin embargo, el crecimiento de las industrias era tan rápido que se alcanzó los límites de la red local establecidas. En consecuencia, surgieron los problemas de abastecimiento de la energía, debido a esta situación las diferentes organizaciones promovieron modos de una utilización adecuada de la energía, denominado eficiencia energética. En efecto, esto permitió el desarrollo de la electrónica introduciendo nuevos dispositivos con nuevas tecnologías, con circuitos cada vez más complejos pero que permiten optimizar la energía.

En la actualidad los nuevos sistemas en la industria incorporan dispositivos que incrementan la productividad mediante el control y automatización de procesos (facilidad de regulación), con el objetivo de consumir una menor cantidad de energía eléctrica (ahorro energético) en consecuencia puedo conectar más dispositivos al sistema. Sin embargo, la desventaja es que los sistemas se vuelven más vulnerables a las perturbaciones generados por los dispositivos; económicamente, los beneficios son mayores utilizando las tecnologías que dejar de usarlas. Las distorsiones pueden ocasionar daños severos y significantes en los procesos de producción, pero si se tiene un control sobre estos no se afectará en gran medida la productividad.

Los dispositivos utilizados en la industria moderna son generalmente variadores de velocidad (para el caso de motores asíncronos), arcos eléctricos, rectificadores, inversores,

sistemas de propulsión, entre otros; a toda la tecnología que contengan circuitos que están implementados con semiconductores para el control de la energía se le denomina cargas no lineales, responsables de la contaminación o perturbación del sistema eléctrico mediante la deformación de la señal de corriente que afecta a las cargas sensibles que están diseñados para soportar hasta cierto límite de perturbación y si no se tiene cuidado estos pueden sufrir daños provocando un inadecuado funcionamiento de los equipos como por ejemplo parpadeo de la luz, sobredimensionamiento del sistema de cableado y transformadores, entre otros. Originando una nueva problemática en el campo de la electricidad y aparece un nuevo concepto de análisis y estudio, denominado “calidad de la energía”.

La electricidad es considerada como un producto que se puede comercializar, de ahí la importancia de estudiar la calidad, y como todo producto requiere estándares que garanticen esa calidad, estos estándares son establecidos mediante normativas que limitan la distorsión de la forma de la señal suministrada. Por tanto, hay un cliente que espera que el distribuidor le ofrezca un producto en base a la calidad, y el mediador encargado de regular que se respeten estas bases establecidas son las entidades u organizaciones supervisoras de cada país.

Adicional a lo mencionado, la importancia de la calidad de la energía también consiste en encontrar soluciones factibles para corregir los disturbios o distorsiones presentes en los sistemas eléctricos en las diferentes instalaciones de las industrias, para así evitar fallas de los equipos.

1.2 ¿Qué es calidad energética?

Cuando un equipo electrónico funciona correctamente de acuerdo a los parámetros de operación y no causa ninguna alteración de la señal suministrada, que puede manifestarse en la corriente, voltaje o frecuencia; entonces diremos que hay una buena calidad eléctrica. Si por el contrario, hay anomalías en el equipo; es decir, problemas fortuitos, extraños o sin motivo aparente y la señal del sistema eléctrico es diferente a lo establecido, entonces estaremos ante un problema de calidad eléctrica que a corto o mediano plazo puede provocar que los equipos se dañen.

Existen varias definiciones de calidad energética, la que más se consideran adecuadas es la establecida por las normativas, a continuación, se mencionan algunas:

- El término calidad de energía se refiere a una amplia variedad de fenómenos electromagnéticos que caracterizan a la tensión y corriente en un momento determinado y en una localización determinada en el sistema de energía (Collins, 2008).
- Las características de la electricidad en un punto determinado del sistema eléctrico, evaluado frente a una serie de parámetros técnicos de referencia (Ramírez Castaño & Cano Plata, 2006).

Independientemente de la definición que se considere, el tema de la calidad energética es de gran importancia en el mercado comercial y su estudio permite a los dispositivos de los diferentes procesos, trabajar adecuadamente, además hay que mencionar que hoy en día más del 80 % de la perturbación en el sistema eléctrico es generado por los equipos instalados dentro de las industrias (Corporation Fluke, 2011); es decir, que a mayor cantidad de equipos con dispositivos de electrónica de potencia mayor será la generación de armónicos. También demanda la capacitación de los técnicos e ingenieros en temas de medición y control de las perturbaciones eléctricas.

No obstante, es importante mencionar la diferencia entre la “Calidad de suministro” y “calidad de onda o señal eléctrica”, el primero está relacionado en la administración y continuidad en el suministro de la tensión que brinda la empresa suministradora de la electricidad, involucra el tiempo de duración y rehabilitación de la tensión a través de parámetros de medición como las sobretensiones, interrupciones, etc.; el segundo es una parte de la calidad de suministro y está referida al usuario, es decir, cómo realmente utiliza la corriente que posteriormente afectará a la tensión y estos efectos son los problemas que dan origen a las perturbaciones de corrientes armónicas, que definiremos en capítulos posteriores.

Otros de los términos a mencionar para no confundir con la calidad energética, es la eficiencia energética, aunque ambos están estrechamente relacionados. La eficiencia es reducir la potencia y energía demandada al sistema eléctrico sin que afecte el funcionamiento normal de las cargas o equipos instalados en la industria; y esto implica ahorro de energía mediante la incorporación de equipos electrónicos de potencia como los variadores de velocidad, arrancadores, los UPS para los ordenadores de oficina, entre otros. Actualmente la eficiencia energética tiene un papel importante en la industria porque el consumo energético supera en algunos casos los millones de dólares como en la industria minería, pesquera, entre otras; sin embargo, puede ocasionar pérdidas significativas si no se tiene en consideración la calidad del sistema eléctrico. En esta investigación no se estudiará la eficiencia energética, el enfoque estará en lo que suceda en la red eléctrica al implantar equipos con dispositivos de electrónica de potencia.

1.2.1 Beneficios de la Calidad energética en el Perú

La electricidad llegó al Perú en 1884 con la primera central hidroeléctrica de Tarma en el departamento de Ancash (Seymour & Horsley, 2005), desde esa fecha la producción de electricidad se ha ido incrementando hasta 48 TWh debido a muchos factores como la demanda y el crecimiento industrial en el Perú (Tamayo, Salvador, Vásquez, & Vilches, 2016); a nivel mundial también hubo un crecimiento acelerado de las economías mundiales que demandaban una mayor electricidad. La Figura 1, se observa a demanda de electricidad del Perú en comparación con Latinoamérica y el mundo.

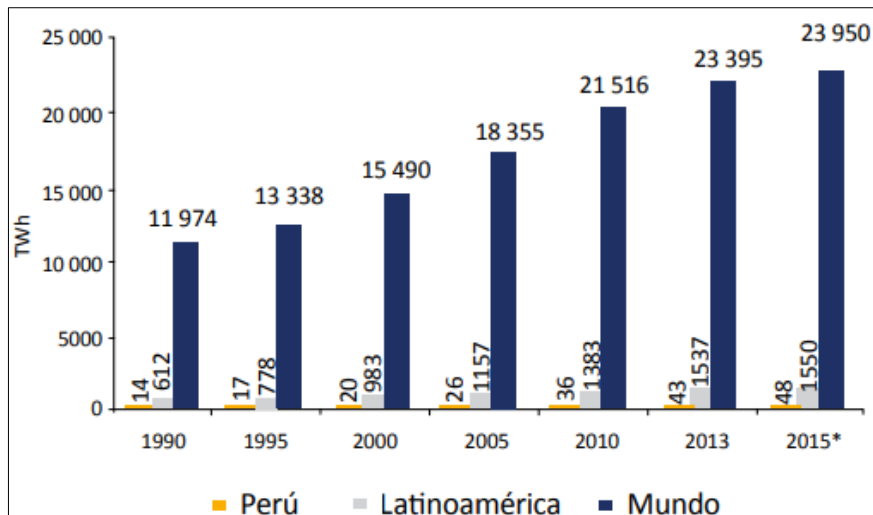


Figura 1. Demanda de la energía a nivel global

Fuente: Osinergmin (2019) La industria de la electricidad en el Perú: 25 años de aportes al crecimiento económico del país.

El crecimiento de esta demanda estaba proyectado desde el siglo XX, así en 1996 surge Osinergmin, una entidad encargada de supervisar que opera de manera confiable y que regula a las empresas del sector energético en el Perú tanto la parte eléctrica como los hidrocarburos, también involucra a los usuarios, además cumple la función de sancionadora imponiendo multas por incumplimiento de la normativa, fiscalizadora que permite el desarrollo de una infraestructura eléctrica eficiente y el cumplimiento de las normas vigentes de seguridad y calidad, y tiene como objetivo principal desarrollar las actividades de generación, transmisión y distribución de la energía eléctrica garantizando a los usuarios un suministro de electricidad adecuado, continuo, seguro, confiable y oportuno. (OSINERGMIN, 2019). Su trabajo ha permitido mejorar los procedimientos de supervisión y fiscalización en calidad y seguridad del sector eléctrico, a través de encuestas y reclamos de los usuarios. En cuanto a la calidad eléctrica su aporte ha sido fundamental en la identificación de las empresas que suministran una mala calidad eléctrica.

En la Tabla 1 se muestra la proporción de medición de la mala calidad de tensión y una reducción en la mayoría de las empresas en el transcurso de los 6 años, aun así, el porcentaje por compensación es elevado respecto al límite establecido por la Norma Técnica Peruana (NTCSE).

Tabla 1. Proporción de mediciones con mala calidad de tensión

Empresa	2000	2001	2002	2003-I	2003-II	2004-I
Luz del Sur	27 %	22 %	19 %	17 %	21 %	16 %
Edelnor	27 %	25 %	21 %	18 %	18 %	17 %
Hidrandina	13 %	30 %	19 %	18 %	22 %	30 %
SEAL	47 %	43 %	20 %	23 %	20 %	28 %
Electro Centro	31 %	19 %	18 %	30 %	24 %	30 %
Electro Sur Este	45 %	29 %	17 %	12 %	7 %	5 %
Electro Puno	48 %	44 %	43 %	49 %	40 %	56 %
Electro Sur Medio	27 %	18 %	7 %	3 %	9 %	17 %
ENOSA	58 %	42 %	32 %	38 %	35 %	32 %
Electro Oriente	18 %	13 %	16 %	14 %	14 %	11 %
Electro Norte	52 %	37 %	44 %	38 %	26 %	24 %
Electro Sur	23 %	11 %	16 %	32 %	25 %	18 %
Electro Ucayali	35 %	18 %	31 %	31 %	22 %	24 %
EDECAÑETE	38 %	30 %	31 %	20 %	21 %	42 %
TOTAL	31.00 %	26.00 %	20.90 %	20.70 %	20.80 %	21.40 %

Fuente: Osinergmin (2019) La industria de la electricidad en el Perú: 25 años de aportes al crecimiento económico del país.

El suministro de mala calidad ocasiona perjuicios para la industria debido a la variación de los parámetros eléctricos de la electricidad, ante estos problemas, las empresas han incorporado generadores para compensar estas variaciones lo que implica un costo, por tal razón Osinergmin aplica las normativas para compensar los gastos a los usuarios afectados, sin embargo, esta cantidad resulta ínfimo para las empresas suministradoras en comparación con los daños hacia la industria y la facturación por ventas de la energía eléctrica obtenidas que superan los 700 millones de soles durante el 2016 (División de Supervisión Regional, 2017).

En la Tabla 2 se indica la compensación por mala calidad de tensión de las empresas suministradoras durante los semestres del 2013 al 2016.

Tabla 2. Montos de compensación por mala calidad de tensión

Empresa	Total, del 1er semestre 2013 (\$)	Total, del 2do semestre 2013 (\$)	Total, del 1er semestre 2014 (\$)	Total, del 2do semestre 2014 (\$)	Total del 1er semestre 2015 (\$)	Total, del 2do semestre 2015 (\$)	Total del 1er semestre 2016 (\$)	Total del 2do semestre 2016 (\$)
Coelvisac	0	0	0	0	0	0	0	0
Luz del sur	4 361	5 519	7 236	16 061	21 083	1 696	2 054	2 341
Edelnor	4 557	4 184	5 034	1 321	5	6	602	75
Electro Dunas	8 826	11 758	10 094	11 300	12 655	9 765	5 332	4 157
Eilhichal	...	...	...	...	...	0	0	0
Electro oriente	1 271	8 653	65 672	73 647	83 046	120 456	277 658	310 399
Electrosur	2 020	2 260	9 456	1 126	2 343	1 936	1 620	1 809
Electro sur este	52 680	58 865	52 351	333 108	335 258	214 150	53 651	68 727
Seal	1 152	760	305	193	6	54	54	24
Electro Puno	2 288	1 090	1 370	4 793	9 228	...	7 809	51 568
Electro Tocache	116	...	...	...	...	...	...	...
Electronorte	11 536	10 148	16 204	317	403	933	1 143	1 612
Enosa	103 429	155 764	224 258	290 311	386 526	464 238	586 254	662 106
Hidrandina	14 112	31 687	34 242	49 599	55 314	87 904	112 476	106 334
Electrocentro	17 525	32 197	63 296	104 918	143 487	151 967	192 810	140 135
Total	223 847	322 883	489 519	886 693	1 049 353	1 053 105	1 241 464	1 349 286

Fuente: División de Supervisión Regional (2017). Estadística de la calidad de tensión - Segundo semestre 2016.

1.3 Análisis de la calidad energética: clasificación de las perturbaciones

El sistema eléctrico está expuesto a diferentes tipos de eventos que ocasionan anomalías u operaciones inadecuadas de los equipos, producto de la alteración de los parámetros de la electricidad como la tensión, corriente y potencia; estos eventos son denominados “perturbaciones” y que será caso de estudio en esta sección.

Las perturbaciones son producidas frecuentemente por equipos eléctricos que incorporan, componentes basados en la electrónica de potencia, estas perturbaciones son perjudiciales para aquellos equipos sensibles o de baja potencia como PLC, dispositivos de control, etc. En este capítulo abordaremos las variaciones afectadas por las perturbaciones que están asociadas a la amplitud, frecuencia, forma de onda, entre otras; que están definidas por instituciones internacionales como el Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (IEEE) que clasifica a las perturbaciones en las siguientes categorías:

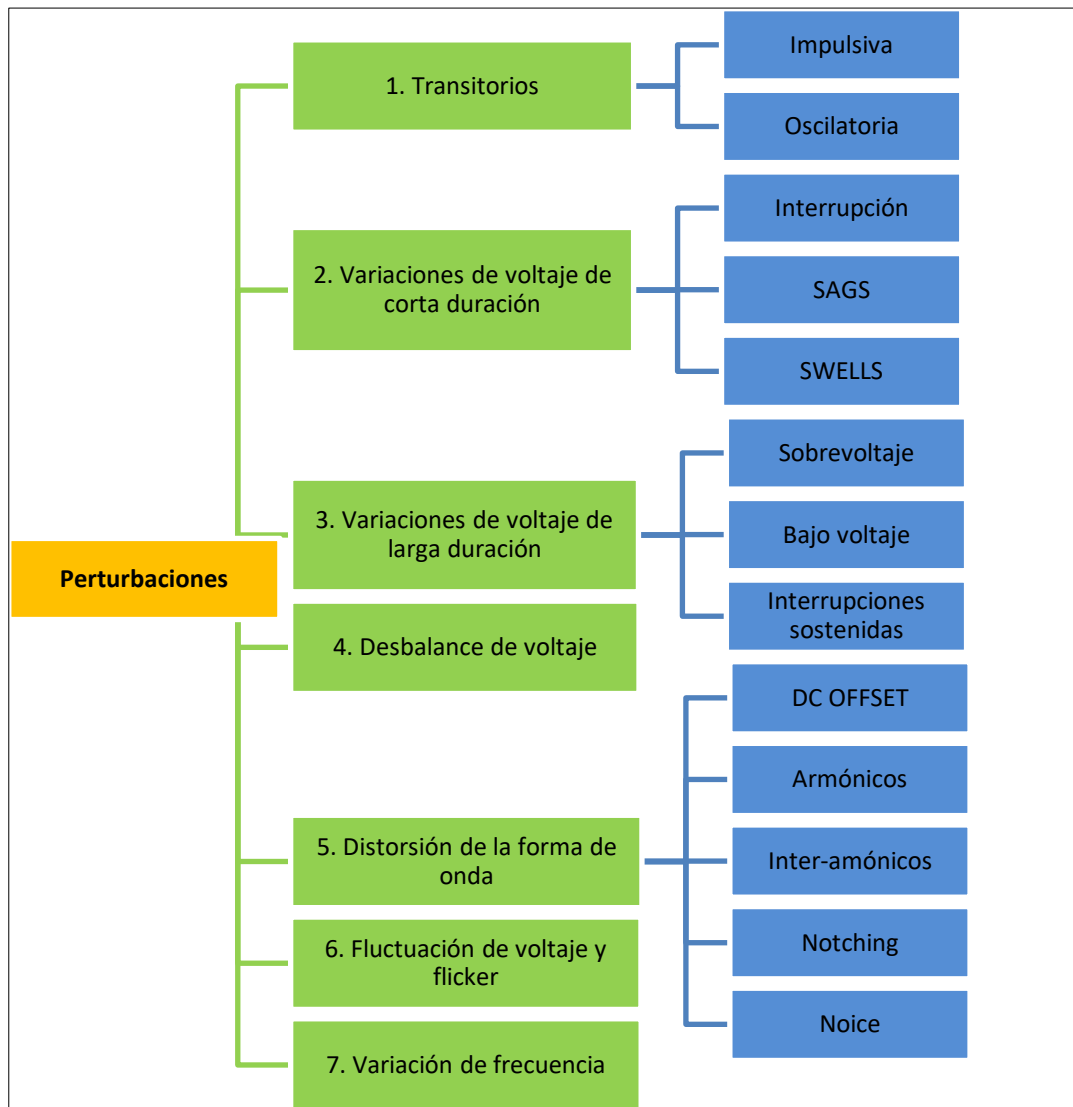


Figura 2. Clasificación de las perturbaciones que afectan la calidad eléctrica según IEEE 1159 – 2009

1.3.1 Perturbaciones transitorias de tensión

Es una fluctuación brusca del valor instantáneo de la amplitud de la tensión, y se evidencia por una breve discontinuidad de la señal que son mayormente de corta duración de apenas unos microsegundos y milisegundos e inferiores a un ciclo de frecuencia fundamental, y se pueden manifestar en cualquier parte del sistema eléctrico (METREL, 2011); contienen componentes de altas frecuencias difíciles de detectar debido al tiempo de duración, por lo que son consideradas las perturbaciones más perjudiciales, y su análisis se realiza mediante valores instantáneos. Por tanto, son incrementos que siempre hay que considerarlos porque puede que ingresen a los equipos electrónicos y destruyan los circuitos e inclusive al mismo equipo, todo depende de la magnitud de la sobretensión.

Estas fluctuaciones transportan energía que va atenuándose a medida que se aleja del punto de generación, aunque es posible que se repita a lo largo del tiempo, por esa razón en la práctica se suele considerar que aparecen en todo el sistema al mismo tiempo que se establece. En consecuencia, es muy probable que algunas de estas fluctuaciones presentes en la línea de alta tensión se propaguen y sean transmitidos a través de los acoplamientos inductivos de los transformadores y aparezcan en líneas de tensión más bajas, no de igual magnitud, pero siguen siendo significativos.

No obstante, los avances tecnológicos en aislamientos dieléctrico han permitido que los cables, transformadores, interruptores, entre otros., se protejan mejor a estas perturbaciones, aun así, tratar de prevenir estas perturbaciones es casi imposible. El problema está en los equipos que no son inmunes a estos tipos de impulsos como por ejemplo los rectificadores de diodos utilizados en las fuentes de alimentación de los equipos, sistemas de disparo, controladores de velocidad mediante triacs y tiristores, en sistema de control, etc.

Según la normativa IEEE 1159-2009, las perturbaciones transitorias se dividen en dos categorías: Transitorios impulsivos y oscilatorios. La Tabla 3 describe las características de estas perturbaciones.

Tabla 3. Categoría y características típicas de las perturbaciones transitorias según la normativa IEEE 1159 - 2009

Categoría	Contenido espectral típico	Duración típica	Magnitud típica de voltaje
Transitorio impulsivo			
Nanosegundos	5 ns subida	< 50 ns	
Microsegundos	1 μ s subida	50 μ s – 1 ms	
Milisegundos	0.1 ms subida	> 1 ms	
Transitorio oscilatorio			
Frecuencia baja	< 5 kHz	0.3 – 0.5 ms	0 – 4 pu
Frecuencia media	5 – 500 kHz	20 ms	0 – 8 pu
Frecuencia alta	0.5 – 5 MHz	5 ms	0 – 4 pu

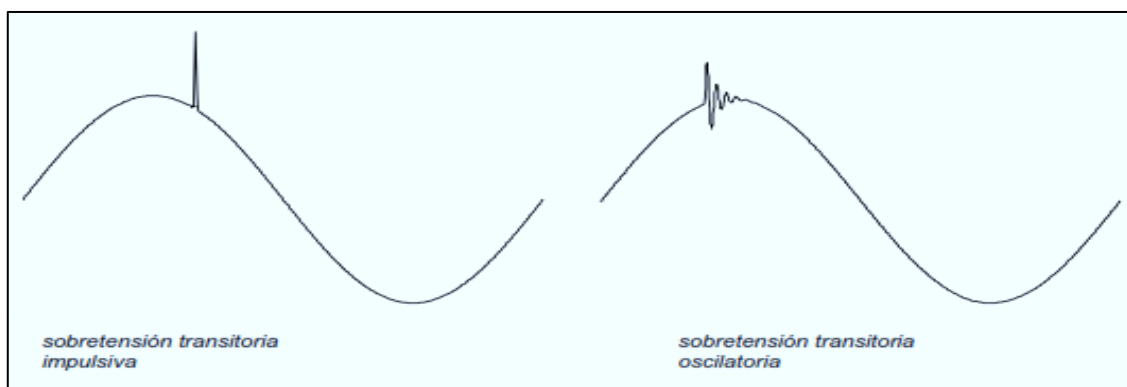


Figura 3. Perturbaciones transitorias sobre la tensión impulsiva y oscilatoria

Fuente: Metrel (2011) Calidad de la energía: análisis de potencia, armónicas y perturbaciones de red en sistemas trifásicos de distribución.

a) Transitorios impulsivos:

Se caracterizan por un cambio brusco diferente de los valores nominales de la tensión, corriente o ambas y diferente frecuencia de la frecuencia fundamental. Además, es de polaridad unidireccional y pueden ser positivo o negativos. Se caracterizan por su duración en el tiempo de subida y bajada del impulso, y por su contenido espectral normalmente superior a los 5 kHz. No es fácil identificar las perturbaciones transitorias impulsivas por lo que se requiere un equipo con alta frecuencia de muestreo. Las causas más comunes que originan los impulsos transitorios:

- Maniobras de interrupción (desconexión y conexión).
- Fallas en la red eléctrica (cortocircuitos)
- Descargas atmosféricas (descarga de rayos que inciden directamente sobre las líneas de tensión).

Entre los efectos que pueden ocasionar, tenemos: degradación de los aislamientos y equipos conectados al sistema eléctrico, destrucción de semiconductores de equipos convertidores de potencia CA/CC-CC/AC, etc.

b) Transitorios oscilatorios:

Se caracterizan por un cambio brusco de diferente tensión de la tensión o corriente nominal o ambas y a diferente frecuencia de la frecuencia fundamental. Además, es de polaridad unidireccional, la transición de polaridad de la perturbación de positiva a negativa es más rápida. Se caracterizan por su duración y contenido espectral, con respecto al contenido espectral pueden ser de baja, media y alta frecuencia. El transitorio es de alta frecuencia si la frecuencia primaria está entre 0.5 MHz y 5 MHz con una duración aproximadamente los 5 μ s (microsegundos); normalmente este tipo de transitorios es producto de la atenuación de los transitorio impulsivo.

El transitorio es de media frecuencia si la frecuencia dominante esta entre 5 kHz y 500 kHz con una duración aproximada a los 20 μ s (microsegundos); la energización de banco de condensadores genera transitorios oscilatorios. El transitorio es de baja frecuencia si la frecuencia dominante es inferior a 5 kHz con una duración en milisegundos comprendida entre 0.2 ms y 50 ms; estos transitorios están presentes mayormente en los sistemas de transmisión y distribución, siendo el más común la conmutación de los bancos de condensadores que dan como resultado frecuencias comprendida entre 300 Hz y 900 Hz (Seymour & Horsley, 2005).

Las causas más comunes que originan los oscilatorios transitorios:

- Posterior a una perturbación transitoria impulsiva

- Maniobra de elementos del sistema eléctrico
- Conmutación de transformadores. Generan frecuencias inferiores a 300 Hz.
- Conmutación de banco de condensadores. Uso de capacitores para la compensación de reactiva
- Conexión/desconexión de cargas que provocan grandes cambios bruscos de la corriente.

Las oscilaciones de tipo impulsivo están muy relacionadas con las descargas atmosféricas y principalmente en líneas de alta tensión; por el contrario, las oscilatorias están casi siempre presente en el sistema eléctrico de la industria y afectan frecuentemente a los equipos sensibles.

Casos prácticos de transitorios oscilatorios de tensión: caso 01, una mala sujeción de una de sus fases de tal manera que la vibración del motor genera que los bornes estén en constante movimiento generando chispazos que pueden ser fácilmente perceptibles. Caso 02, en la Figura 4 se muestra unas oscilaciones producidas por la desconexión repentina de los bancos de condensadores.

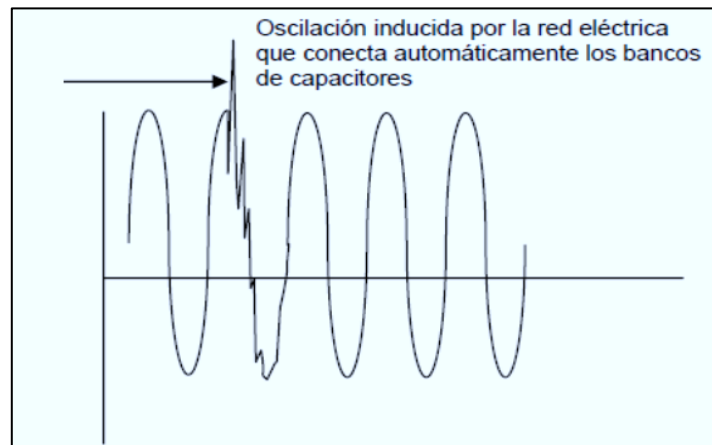


Figura 4. Los siete tipos de problemas en el suministro eléctrico

Fuente: Seymour & Horsley (2005) Los siete tipos de problemas en el suministro eléctrico.

1.3.2 Variaciones de corta duración

De acuerdo con la clasificación por parte de la normativa IEEE 1159-2009, estas perturbaciones se caracterizan por la variación de pequeña duración del valor eficaz de la tensión de suministro con un tiempo mayor que medio periodo (> 0.5 Hz) e inferior o igual a un minuto (≤ 1 min), a la frecuencia fundamental. Pueden presentarse con huecos de tensión (SAG), interrupciones y sobretensiones (SWELL) que también son definidos en los estándares IEC 61000-4-30. Las perturbaciones se analizan mediante dos parámetros de magnitud y duración.

Estas perturbaciones son producidas por fallas en la red eléctrica, falso contactos de entre los cables o bornes del equipo eléctrico, acoplamiento de grandes cargas a la red demandando altas corrientes de arranque como los equipos rotativos.

En la Tabla 4 y Tabla 5 se indican las características completas según la normativa a. IEEE 1159-199, b. IEC 6000-3-4, respectivamente y en la Figura 5 la clasificación de la perturbación de corta duración.

Tabla 4. Características de huecos de tensión, sobretensión e interrupciones según la normativa EN 50160

Categoría	Magnitud	Duración
Hueco de tensión (SAG)	10 % - 90 % de la tensión de referencia	10 ms – 1 min
Elevación de tensión (SWELL)	110 % - 180 % de la tensión de referencia	10 ms – 1 min
Interrupción	< 10 % tensión de referencia	< 3 min > 3 min

Tabla 5. Características de huecos de tensión, sobretensión e interrupciones según la normativa IEEE 1159 – 2009

Categoría	Duración típica	Magnitud típica de voltaje
Hueco de tensión (SAG)		
Instantáneo	0.5 – 30 ciclos	0.1 - 0.9 pu
Momentáneo	30 ciclos – 3 s	0.1 - 0.9 pu
Temporal	3 s – 1 min	0.1 - 0.9 pu
Elevación de tensión (SWELL)		
Frecuencia baja	0.5 – 30 ciclos	1.1 – 1.8 pu
Frecuencia media	30 ciclos – 3 s	1.1 – 1.8 pu
Frecuencia alta	3 s – 1 min	1.1 – 1.8 pu

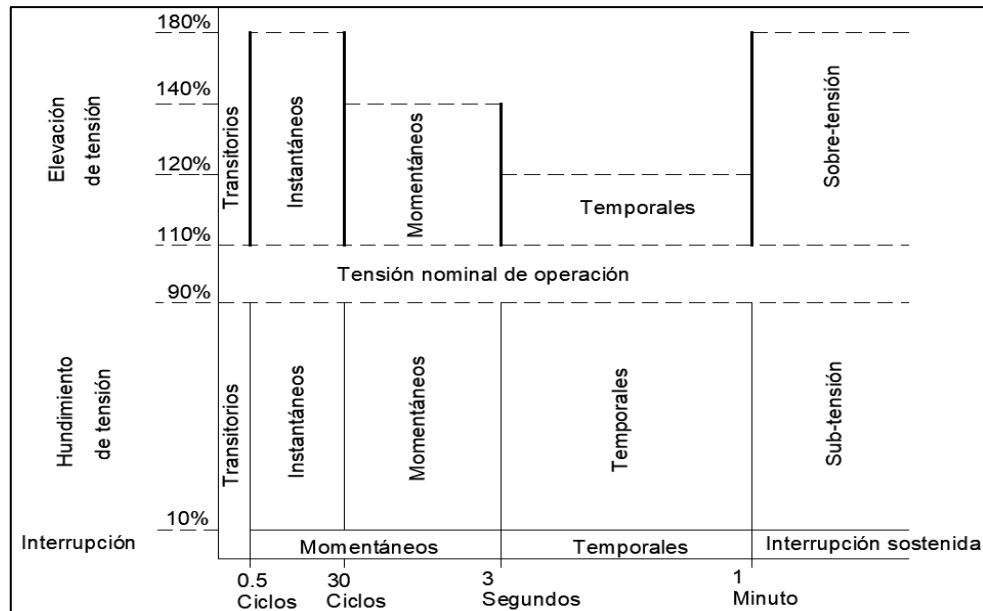


Figura 5. Clasificación de las perturbaciones de corta duración: Hundimiento y elevación de tensión según la normativa IEEE 1150-2009

Según las condiciones en que ocurre el fallo pueden presentar los siguientes casos:

- Caída momentánea o hueco de tensión (SAG): Es la reducción o disminución momentánea del valor eficaz de la tensión suministrada en cualquier punto de la red eléctrica que se ubica por debajo del umbral de referencia. La magnitud de su disminución se encuentre entre 0.1 y 0.9 pu de la tensión nominal en las fases de la señal, seguida de una recuperación de la tensión a su valor referencial después de 0.5 ciclos (10 ms) a 1 minuto desde que se inició el suceso de acuerdo a la IEEE 1159. Los efectos que pueden producir es el mal funcionamiento y avería de los equipos, principalmente a los equipos más sensible a estas perturbaciones como los UPS, computadores, PLC, equipos de iluminación, reguladores de velocidad, instrumentos de medición, etc.; por tanto, estas perturbaciones son los que más influyen en el funcionamiento anormal de los equipos electrónico como los que contienen relés y los contactores.

Según Ducuara Valenzuela (2017) las causas que dan origen son:

- ✓ Descargas Atmosféricas. Impacto directo de rayos sobre las líneas de transmisión.
- ✓ Cortocircuitos. Como contacto de animales con partes energizadas del sistema en líneas aéreas por aves y en líneas subterráneas por roedores.
- ✓ Falla simple monofásica a tierra.
- ✓ Energización de grandes cargas por su consumo de corriente como el arranque de motores de inducción.
- ✓ Maniobras efectuadas sobre la red eléctrica por parte de la empresa distribuidora.
- ✓ Conmutación de cargas de gran potencia que se conectan al sistema.

- ✓ Fallas en sistemas alimentadores paralelos que se encuentren conectados al mismo barraje.
- ✓ Energización de transformadores o cambios repentinos de taps de grandes transformadores.
- ✓ También se puede generar por demanda de electricidad por parte de los usuarios.

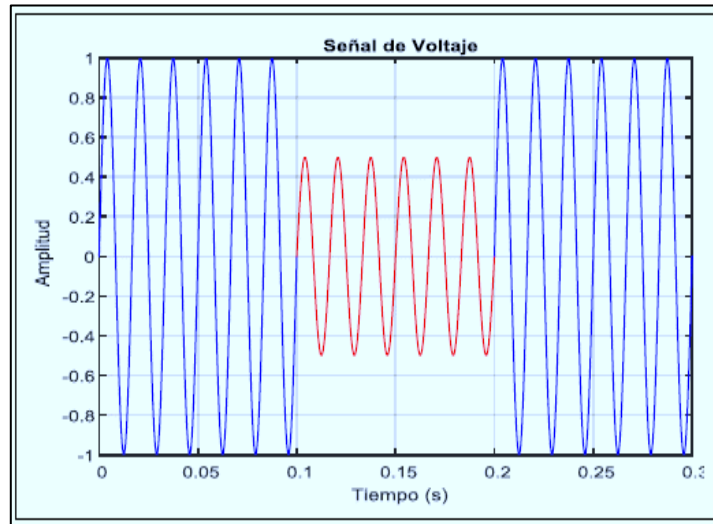


Figura 6. Hundimiento de Tensión (SAG) de categoría instantáneo, duración entre 0.5 – 30 ciclos.

Fuente: Ducuara Valenzuela, Jaime A. (2017) Mitigación de perturbaciones en calidad de potencia en sistemas de distribución usando control distribuido.

En la Figura 7 se puede observar como la señal de tensión se reduce debido a una de las causas mencionadas.

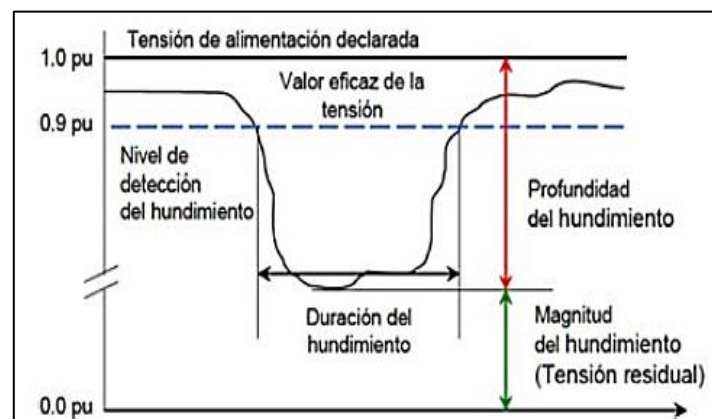


Figura 7. Características de hundimiento de tensión

Fuente: Giovanni Parra, Obregón Merchán, & Augusto (2013) Implementación de un sistema de alimentación ininterrumpida, con visualización de parámetros eléctricos en LCD

Uno de los efectos de estas perturbaciones, es la apertura de las bobinas de los contactores de los motores eléctricos debido a la pérdida de la fuerza electromagnética de cierre, ocasionando paradas inesperadas de los equipos de la industria.

- Incremento momentánea o sobretensión (SWELL):

Para la IEEE 1159, es el aumento momentáneo del valor eficaz de la tensión suministrada en cualquier punto de la red eléctrica que se ubica por encima del umbral de referencia. La magnitud del incremento se encuentra entre 1.1 y 1.8 pu de la tensión nominal en las fases de la señal, seguida de una disminución de la tensión hasta su valor referencial después de 0.5 ciclos a 1 minuto desde que se inició el suceso, para la normativa IEC 61000-4-30 el tiempo oscila entre 10 milisegundos y un minuto. Esta perturbación no es muy frecuente en los sistemas eléctricos como la tensión SAG.

Según Ducuara Valenzuela (2017) las causas que dan origen son:

- ✓ Falla simple monofásica a tierra puede causar que las fases no falladas tengan un incremento en su valor de tensión eficaz.
- ✓ Conmutación de cargas de gran potencia que se descuentan del sistema.
- ✓ Deslaste de carga en el sistema de potencia.
- ✓ Instalaciones sin puesta a tierra o sistemas en delta o con neutro flotante.
- ✓ Energización de banco de condensadores.
- ✓ Maniobras de apertura sobre la red eléctrica por parte de la empresa distribuidora.
- ✓ Ajustes incorrectos de los tap de los transformadores.

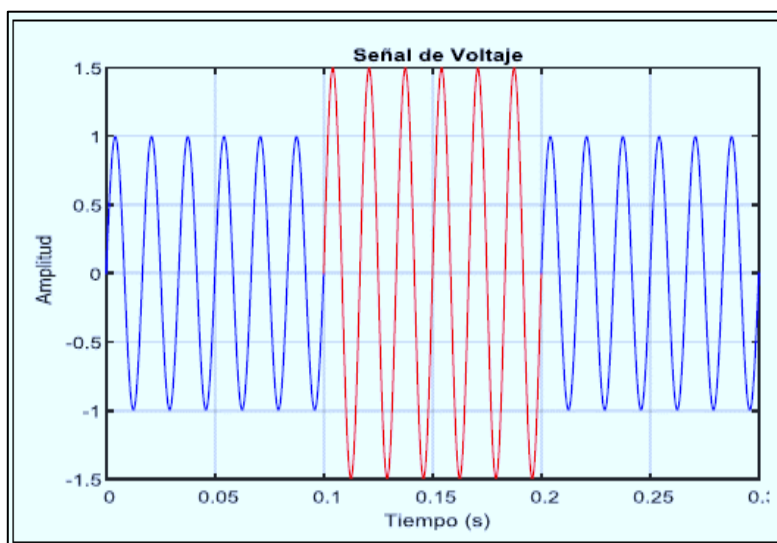


Figura 8. Tensión SWELL de categoría momentánea, con duración de 0.5 – 30 ciclos

Fuente: Ducuara Valenzuela, Jaime A. (2017) Mitigación de perturbaciones en calidad de potencia en sistemas de distribución usando control distribuido

- Interrupción:

Condición en que el valor eficaz de la tensión suministrada, en un punto de la red eléctrica, se ubica por debajo del umbral de referencia con una magnitud inferior al 5 % de su tensión referencial en las fases de la señal, seguida de un aumento de la tensión hasta su valor referencial. Según la IEC 61000-3-4, la interrupción es de breve duración si el tiempo está entre 1 y 3 minutos, y de larga duración si el tiempo es superior a 3 minutos, la duración se mide desde que se inicia el suceso. Para la normativa IEEE 1159-2009, el tiempo es de 3 segundos a 1 minuto de ocurrido el suceso. Aunque esta perturbación no es muy frecuente en los sistemas eléctricos como la tensión SAG. La magnitud se mide de la misma manera que una interrupción de corta duración.

1.3.3 Variaciones de larga duración

Ante una perturbación de esta categoría se ve afectada la tensión eficaz (rms) producto de la variación de la tensión nominal. Se caracterizan por parámetros como la amplitud y la duración con un tiempo de variación que supera los 1 minuto ($> 1\text{min}$). Idealmente la tensión de suministro del sistema eléctrico debería mantenerse en un valor constante sin embargo, en la realidad la amplitud de la tensión sufre fluctuaciones debido a las cargas conectadas al sistema eléctrico. Las causas que originan las variaciones normalmente son

- ✓ Fallas en la red eléctrica.
- ✓ Variaciones de carga eléctricas por mal distribución o por consumo variable en todo el sistema eléctrico que puede provocar saturación de la red.

La Tabla 6 muestra la clasificación de la perturbación de larga duración y las características completas según la normativa a. IEEE 1159-1999

Tabla 6. Categoría y características típicas de las perturbaciones transitorias según la normativa IEEE 1159 - 1999

Categoría	Magnitud	Duración
Sobretensión	110 % - 120 % de la tensión de referencia	$> 1\text{ min}$
Subtensión	90 % - 80 % de la tensión de referencia	$> 1\text{ min}$
Interrupción	0 % tensión de referencia	$> 1\text{ min}$

Según el Código Nacional de Electricidad, las tolerancias admisibles para la variación de tensión nominales en los puntos de entrega de energía para cualquier sistema de tensión alterna, es $\pm 5\%$ de la tensión nominal; y para redes secundarias en servicios calificados como Urbano-Rural y/o Rural, la tolerancia es $\pm 7.5\%$ (García, 2006). El exceso de estas tolerancias

ocasiona envejecimiento del aislamiento de los conductores, calentamiento e inclusive el mal funcionamiento de los equipos conectados a la red.

Las variaciones largas de tensión pueden ser tensiones altas, bajas e interrupciones sostenidas; la diferencia entre ellos va depender del tiempo y la amplitud.

- **Sobretensión (OVERVOLTAGE):**

La sobretensión implica un incremento en el valor eficaz de la tensión de alimentación mayor al 110 % con un tiempo superior a un minuto (Collins, 2008). Entre el "OVERVOLTAGE" y "SWELL" difieren en el tiempo de duración, siendo el primero el de mayor duración. La sobretensión es frecuentemente producto de la conmutación de cargas como la desenergización de grandes cargas como los bancos de condensadores, también es producto de malas regulaciones en el sistema de distribución, ajustes inapropiados en las tomas de los transformadores.

Los efectos más comunes son los sobrecalentamientos de los receptores provocando averías al superar los límites térmicos; aun así, son difícil de detectar a simple vista porque los equipos siguen funcionando.

- **Baja-tensión o subtensión (UNDERVOLTAGE):**

Una baja tensión implica una reducción en el valor eficaz de la tensión de alimentación inferior al 90 % con un tiempo superior a un minuto. Entre el "UNDERVOLTAGE" y "SAG" difieren en el tiempo de duración, para tensiones inferiores al 0.9 pu de su valor nominal, para un tiempo mayor duración que el SAG (Collins, 2008).

La baja tensión es frecuentemente producto de la energización de grandes cargas ocasionando una reducción de la tensión hasta que un equipo externo logre regular la caída de tensión dentro los límites de tolerancia, el arranque de motores eléctricos debido a una impedancia muy baja, esta demanda de corriente puede ser inclusive superior a 6 veces la corriente nominal, la saturación del sistema eléctrico puede provocar una caída de tensión es decir cuando la energía eléctrica suministrada o contratada por la industria es inferior a la potencia de la carga conectada.

Los efectos más comunes son la desaceleración de los equipos rotativos, en consecuencia, hay una pérdida del par mecánico, y si la variación de tensión no es estable puede generar recalentamiento de la bobina del motor, así como desgaste del eje y los rodamientos. El caso de las lámparas fluorescentes, la intensidad luminosa disminuye provocando una baja visibilidad en los diferentes establecimientos de la empresa. En general los equipos presentan anomalías respecto al funcionamiento normal.

- Interrupciones sostenidas

Interrupción sostenida o corte se produce cuando la tensión suministrada es interrumpida debido a la ausencia de tensión (amplitud de la tensión en cero) por tiempos mayores a un minuto, frecuentemente estas interrupciones son permanentes y en este caso requiere la intervención del personal técnico para corregir el problema, pero no quiere decir que la carga este dañado. Son producto de averías en el sistema de generación, transmisión o distribución debido a muchos factores, aunque en muchos casos son por mantenimiento de las líneas de tensión. Estos efectos son más visibles durante las horas punta en el que hay una mayor demanda en el consumo de la energía eléctrica.

1.3.4 Desbalance de tensión

Un sistema está desbalanceado si el sistema trifásico es asimétrico o esta desequilibrado respecto al umbral de referencia en el punto de suministro, es decir, las tensiones o corriente entre las fases son diferentes en amplitud y los desfases relativos entre ellos están desplazadas a diferente ángulo de su desfaseamiento normal de 120° . Vectorialmente las magnitudes del módulo no son iguales.

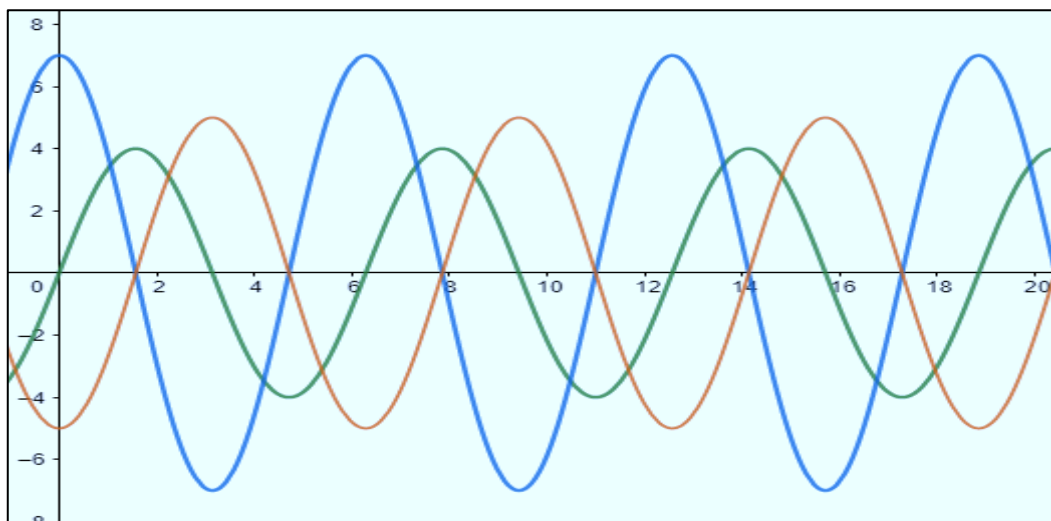


Figura 9. Desequilibrio de tensión del sistema eléctrico

Los desequilibrios más frecuentes se producen en los sistemas trifásicos debido a un mal reparto de las cargas sobre las fases de distribución por consiguiente hay una alteración del sistema. En el caso de una conexión en estrella el desequilibrio de corriente alterna se detecta cuando la corriente que circula por el neutro es diferente a cero, por tanto, las corrientes que circulan por las fases también son diferentes. Es recomendable evitar conectar cargas trifásicas y/o monofásicas en una sola fase, hay que distribuirlo adecuadamente sobre las demás fases del sistema trifásico. En baja tensión, las cargas monofásicas son mayormente las causantes de estas perturbaciones, principalmente las cargas de grandes potencias.

La normativa IEC 61000-4-30 cuantifica el desbalance de tensión a través del método de componentes simétricas, para un desbalance monofásico y trifásico se aplica la ecuación 1 y 2 respectivamente. Respecto a la normativa americana, la IEEE 1159-1999 establece la ecuación 3 para desbalances trifásicos. Todos los casos están expresados en porcentaje. Los Analizadores de Redes y otras herramientas de medición, aplican estas ecuaciones para calcular la desviación de simetría. Normalmente en los análisis de estas perturbaciones utilizan la normativa IEEE 1159, expresa de la siguiente manera:

$$v_2\% = 100 \times \frac{V_2}{V_1} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$v_2\% = 100 \times \frac{\sqrt{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}}{\sqrt{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \quad \text{Ecuación 2}$$

Para β

$$\beta = \frac{U_{ab\ fund}^4 + U_{bc\ fund}^4 + U_{ca\ fund}^4}{(U_{ab\ fund}^4 + U_{bc\ fund}^4 + U_{ca\ fund}^4)^2}$$

$$v_{asim}\% = \frac{\text{desviación máxima respecto del valor medio de cargas tensión}}{\text{valor medio de tensión}} \quad \text{Ecuación 3}$$

$$v_2 = 100 \times \max \left[\frac{V_{ij} - V_{media}}{V_{media}} \right]$$

Donde:

- ✓ U_2 es la secuencia negativa de la tensión de línea
- ✓ U_1 es la secuencia positiva de la tensión de línea
- ✓ $U_{ij\ fund}$ componente fundamenta entre fases
- ✓ i, j son subíndices que corresponden a las fases

Caso práctico, para las tensiones medidas en la línea trifásica del sistema que son 18.40 kv, 18.25 kv y 18.05 kv, de estos datos el valor medio es $V_{medio} = 18.23$, por consiguiente:

$$18.40 - 18.23 = 0.17$$

$$18.25 - 18.23 = 0.02$$

$$18.05 - 18.23 = -0.18$$

Por tanto, el grado de asimetría:

$$v_2 = 100 \times \max \left[\frac{V_{ij} - V_{media}}{V_{media}} \right]$$

$$V_{asim}\% = \frac{0.18}{18.23} \times 100 \approx 1\%$$

A continuación, se mencionan las cargas más frecuentes que originan el desbalance de la línea de tensión (Ramírez Castaño & Cano Plata, Calidad del Servicio de Energía Eléctrica, 2006):

- ✓ Hornos de inducción
- ✓ Hornos de fusión de resistencia
- ✓ Instalaciones inductivas por calentamiento
- ✓ Hornos de resistencia para la fabricación de electrodos
- ✓ Instalaciones de calentamiento por arco voltaico
- ✓ Máquinas de soldadura por resistencia
- ✓ Hornos de fusión de acero de arco voltaico
- ✓ Sistemas de tracción eléctrica, por la conexión fase-tierra.

Respecto a los efectos que producen la asimetría:

- ✓ Respecto a los transformadores y líneas de tensión, la corriente que circula puede llegar a ser el doble de la normal.
- ✓ Equipos de regulación y control, como los variadores de velocidad de los motores asíncronos, para un grado de asimetría superior o igual al 2 % en tensión, puede resultar un aumento de temperatura por calentamiento del motor producto de un incremento de corriente de hasta 30 % en una de las fases, por tanto, el calor disipado por los conductores provocara el disparo del relé térmico o termomagnético.

1.3.5 Distorsión de la forma de onda

Existe distorsión de onda cuando hay una desviación de la forma de onda de la señal suministrada respecto de la señal fundamental pura. Caracterizado por el contenido espectral de la deformación. El grado de deformación se puede cuantificar por los parámetros del tiempo y frecuencia. Hay cinco tipos de distorsión de la forma de onda.

- **Compensación DC offset:**

Es la presencia de una componente de tensión o corriente continua (CD) en la tensión o corriente alterna (AC) en estado estacionario, que origina el desplazamiento positivo o negativo de la señal sinusoidal de su eje original. La magnitud de la tensión puede oscilar entre 0 a 10 % del valor eficaz. Los efectos producidos por una asimetría en convertidores electrónicos (rectificadores) o por medio de perturbaciones geomagnéticas, pueden ser perjudiciales para los equipos como calentamiento de los transformadores debido a una

saturación de los núcleos, por tanto, una degradación en el tiempo de los transformadores, degradación en los aislamientos de los conductores.

- Armónicos:

Está relacionada con la generación de armónicos, y se definen como la señal de corriente o tensión con frecuencias múltiplo enteros de la frecuencia fundamental (60 Hz o 50 Hz). El rango de análisis comprende los primeros 100 armónicos y su magnitud puede variar de 0 a 20 % del valor eficaz de la tensión. Los responsables que originan estas perturbaciones son las cargas no lineales conectadas al sistema o red eléctrica, y es el punto de mayor análisis en la industria porque son frecuentemente perjudiciales para los equipos eléctricos. Los efectos más frecuentes causados como la vibración y aumento de pérdidas en todo equipo rotativo, degradación de los condensadores, apertura de los equipos de protección como los interruptores, etc.

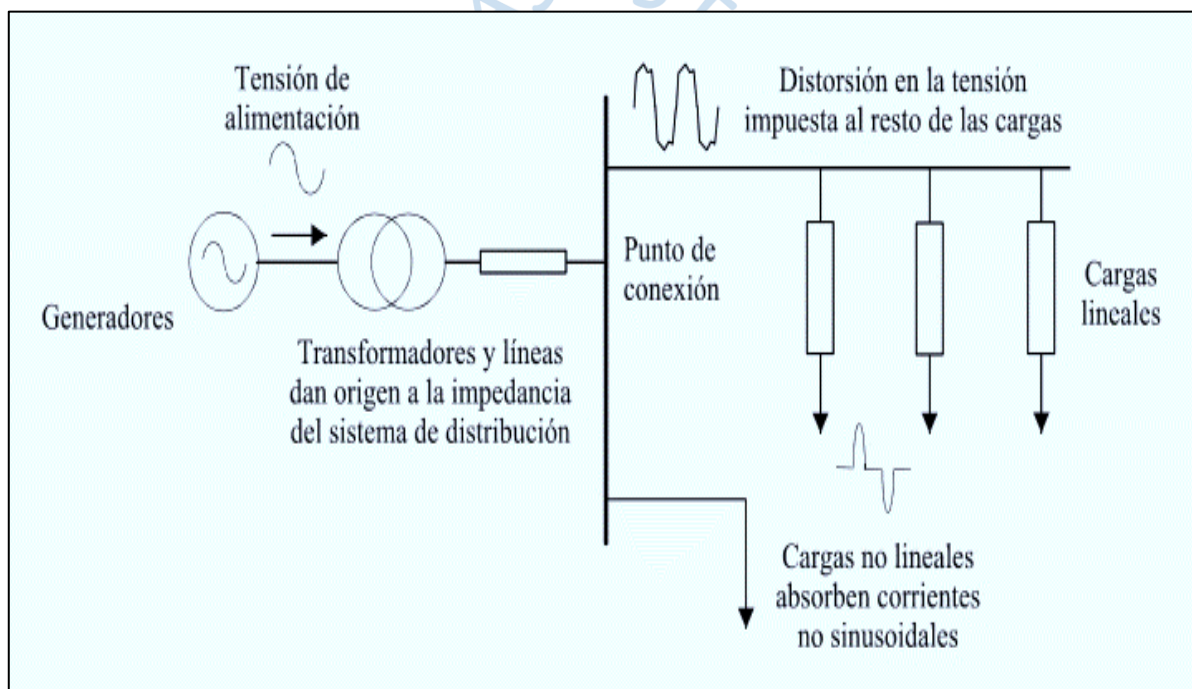


Figura 10. Generación de armónico en el sistema eléctrico

Fuente: García (2006) Análisis wavelet aplicado a la medida de armónicos, interarmónicos y subarmónicos en redes de distribución de energía eléctrica.

- Interarmónicos:

La normativa IEC 61000-2-1, define a los interarmónicos como: “Entre los armónicos de frecuencia de la tensión y de la corriente de la red de alimentación, se puede observar otras frecuencias que no son un múltiplo entero de la fundamental. Estas frecuencias pueden aparecer como frecuencia discreta o como un espectro de banda”.

Entonces, en términos prácticos un interarmónicos es cualquier frecuencia que no es múltiplo entero de la frecuencia fundamental y se transfieren entre los diferentes niveles de tensión. Respecto a la cuantificación, es muy compleja debido a que una señal con

interarmónicos no necesariamente tiene que ser periódica e inclusive puede ser asimétrica, pero aun así su estudio en los últimos años ha adquirido mucha importancia por los dispositivos electrónicos de potencia. Las fuentes que la originan son básicamente por medio de la conmutación asíncrona de los dispositivos semiconductores de los convertidores estáticos. Por ejemplo, los convertidores de modulación de anchura de impulso (PWM). Los dispositivos que generan esta perturbación son básicamente los siguientes:

- ✓ Cargas conductoras de arcos eléctricos. Se incluyen los hornos de arco y las máquinas de soldadura.
- ✓ Dispositivos de accionamiento eléctrico de carga variable
- ✓ Convertidores estáticos, en particular los convertidores de frecuencia directos e indirectos.
- ✓ Controles de ondulación

Entre los efectos tenemos:

- ✓ Oscilaciones de baja frecuencia en sistemas mecánicos
- ✓ Efectos térmicos
- ✓ Perturbación en el funcionamiento normal de los equipos electrónicos y fluorescentes.
- ✓ Interferencia con las señales de control y de protección en las líneas de suministro de energía eléctrica.
- ✓ Sobrecarga de filtros pasivos en paralelo para armónicos de orden elevado
- ✓ Interferencia en las telecomunicaciones
- ✓ Saturación de los transformadores de corriente

Otra de las formas de detectar la presencia de interarmónicos en el sistema eléctrico, son mediándose la variación en la magnitud de la tensión y en los *flicker*.

• *Notching*:

Estos disturbios son repetitivos o periódicos, que tienen forma de onda de corta duración que causan pequeños huecos sobre la tensión como se aprecia en la Figura 11. Estos son causados durante la funcionalidad anormal de los dispositivos electrónicos cuando la señal es conmutada de una fase a otra, es decir se produce un pequeño cortocircuito en un lapso de tiempo debido a que algunos reguladores quedan energizados, ocasionando recorte drástico en la tensión suministrada. Tienen un alto contenido espectral por su alta frecuencia, complicando la cuantificación por medio de equipos Analizadores de armónicos. Los dispositivos que la originan son los rectificadora, convertidores, entre otros, contenido dentro de los PCs, UPS, etc.

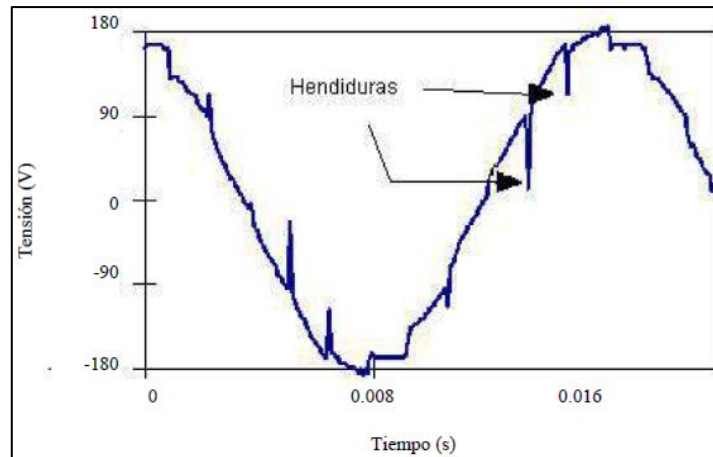


Figura 11. Señal de tensión con disturbio *Notching*

Fuente: Ramírez Castaño (2004) Redes de distribución de energía.

Se pueden mitigar a través de inductancias, aisladores, filtros. Los efectos más frecuentes sobre los equipos, son los siguientes:

- ✓ La generación de armónicos de alta frecuencia
- ✓ Si la profundidad del *notching* pasa por cero puede ocasionar mal funcionamiento en los equipos eléctricos como.

- Ruido (*Noise*):

El ruido es una señal indeseada que es originada por los transmisores de radios, por la operación de lámparas fluorescentes, arqueo entre conductores, cargas con rectificadores, etc. Con un contenido espectral inferior a 200 kHz, pero no clasificable como distorsión transitoria o armónica. Puede afectar directamente a diferentes dispositivos eléctricos como el mal funcionamiento de computadoras y microcontroladores.

La magnitud del ruido y el rango de la frecuencia dependen exclusivamente de la fuente que origina el ruido y de las características del sistema como la susceptibilidad del equipo. La magnitud típica de un ruido es aceptable si es menor al 1 % de la tensión. Como solución práctica pueden ser eliminados a través de los transformadores de aislamiento sobre la red, y para el caso general los ruidos en cualquier equipo se mitigan con el uso de filtros.

1.3.6 Fluctuaciones de tensión y Flicker

Estos tipos de disturbios se caracterizan por una variación rápida o una serie de cambios aleatoria asociados al valor eficaz o valor pico de la tensión entre dos niveles consecutivos durante un tiempo establecido de milisegundos a segundos. La fluctuación de tensión varía, según la normativa IEEE 1159-2009, entre 0.9 pu a 1.1 pu. Uno de los efectos más perceptibles por el ojo humano es el parpadeo o fluctuación de la tensión de algunas cargas como en la luminosidad de las lámparas o fluorescentes, denominado *flicker*. El *flicker* depende de los parámetros de frecuencia y duración de las fluctuaciones de la tensión que lo causan y oscilan entre 0.5 Hz a 30 Hz.

Los *Flicker* son medidos de acuerdo a la normativa, el cual establece los límites como la IEC 61000-4-15 “medidor de *Flicker* – especificaciones funcionales y de diseño”. La mayoría de los instrumentos analizadores de redes permiten medir los *Flicker*, para ello utiliza los indicadores de *Flicker* de corta duración (P_{st}) y de larga duración (P_{lt}), para el caso de un P_{st} se realiza un análisis estadístico en base a unos datos para un intervalo de 10 minutos y un P_{lt} es aplicado en equipos con duración de ciclos de servicios de una carga en un tiempo mayor a 30 minutos y está relacionado directamente con el P_{st} . Según la normativa ambos no deben superar la unidad en alta, media ni baja tensión, siendo 1 el umbral de irritabilidad como la fluctuación máxima de luminancia que puede, mayormente, soportar una persona. A través de un dispositivo analizador de redes, en la Figura 12 se puede visualizar en la tercera grafica la señal del *flicker* fluctuante a lo largo del tiempo en la red eléctrica.

$$P_{st} \leq 1$$

$$P_{lt} \leq 0.65$$

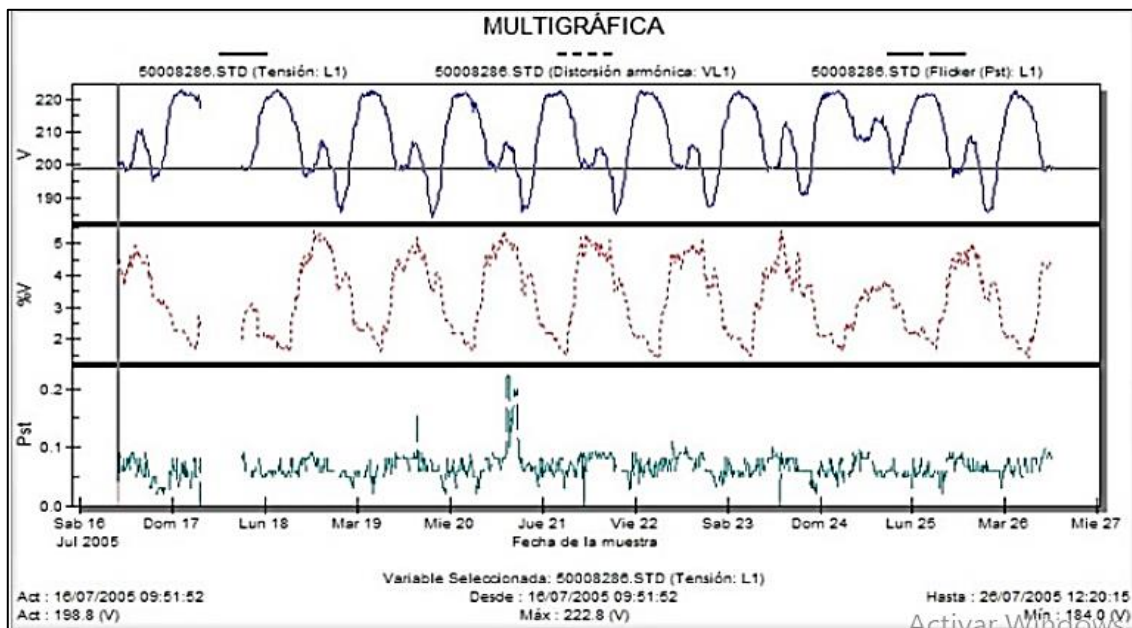


Figura 12. Variación de la señal de tensión y *Flicker* en el sistema eléctrico

Fuente: OSINERGMIN (2019) Calidad de producto: tensión.

Las causas que la originan son frecuentemente las cargas no lineales, entre los principales dispositivos perturbadores:

- ✓ Máquinas de soldadura por resistencia
- ✓ Arranque de motores
- ✓ Molinos trituradores
- ✓ Ventiladores de minas
- ✓ Hornos de arco

- ✓ Compresores
- ✓ Laminadoras
- ✓ Máquinas herramientas en general
- ✓ Hornos microondas
- ✓ Impresoras láser
- ✓ Lámparas de descarga
- ✓ Electrodomésticos con regulación automática
- ✓ Aerogeneradores

Las fluctuaciones de tensión de sistemas de alta tensión están por debajo de los límites, por tanto, no producen ningún efecto sobre los equipos eléctricos que demandan grandes potencias, excepto los equipos sensibles como los equipos digitales de control, PLC, etc.

1.3.7 Variaciones de frecuencia

En un sistema eléctrico de corriente alterna (AC), la variación o desviación de la frecuencia fundamental surge cuando se produce una alteración del equilibrio entre la carga conectada a la red y la máquina generadora de electricidad. Además, la frecuencia del sistema eléctrico está directamente relacionada con la velocidad de giro de los generadores, dicho de otra manera, con el número de revoluciones por minutos (RPM).

La frecuencia fundamental de todo el sistema eléctrico interconectado del Perú, es de 60 Hz. Según la Norma Técnica Peruana (NTPSE) y en base a la EN50160, las tolerancias admitidas sobre la frecuencia fundamental, para cualquier nivel de tensión, en condiciones normales de operación:

$$60 \text{ Hz} \pm 0.6 \%$$

El sistema interconectado nacional cuenta con varias centrales de generación de diferentes tipos como centrales térmicas, hidráulicas, de combustión, entre otras, con el objetivo de que se abastezca la demanda nacional. La generación tiene que ser mayor a la demanda de ahí que existan varias centrales eléctricas incluidas la de reserva que están para compensar variaciones bruscas de carga y lo más importante mantener la frecuencia dentro de los límites establecidos. La variación de frecuencia también se puede producir por la desconexión o conexión de grandes cargas de la industria que producen ligeros descensos de la velocidad en otros equipos rotativos. En conclusión, la frecuencia variara según como se ve afecta la red en la interacción entre carga y generador.

- Si la carga es superior a la generación, la velocidad con que caiga la frecuencia dependerá de la disponibilidad de la energía de reserva y de la constante de inercia del conjunto de los generadores. Una vez que se ubica fuera de los límites, y no se tienen un buen sistema de regulación y protección para detectar esta caída de la frecuencia y dar solución lo más rápido

posible, puede ocasionar un colapso del sistema y consecuencias perjudiciales. Como solución ante este caso, es recomendable disponer de un sistema de deslastre por frecuencia.

$$carga > generacion \rightarrow f_x < f_{fundamental}$$

- Si la carga es inferior a la generación, es más fácil y rápido de actuar para estabilizar el sistema, esto se logra actuando sobre los sistemas de regulación de los alternadores con el objetivo de disminuir su capacidad de generación.

$$carga < generacion \rightarrow f_x > f_{fundamental}$$

El análisis de la cantidad de carga necesaria para variar la frecuencia hasta fuera de sus límites. Se realiza por medio del grado de deformación D expresada en MW/Hz, necesitamos un cambio de carga en MW para producir una variación de frecuencia de 0.1 Hz. Si la variación de frecuencia excede lo permitido tenemos una variación de carga significativa

Los efectos que produce la variación de frecuencia en el sistema para el rango de tolerancia.

- Cambio de velocidad de las maquinas rotativas. Los motores transmiten más o menos potencia.
- Los relojes eléctricos sincronizados con la red se atrasan o adelanta.
- Los filtros de armónicos sufren un efecto distorsionador.
- Los equipos electrónicos que utilizan la frecuencia como referencia de tiempo se ven alterados.
- Las turbinas de las centrales eléctricas se ven sometidas a fuertes vibraciones que suponen un severo esfuerzo de fatiga.
- Posibles problemas en el funcionamiento de instalaciones de autogeneración.

En la Figura 13 tenemos la medición de la frecuencia realizada en el transcurso de una semana, y en ella podemos observar un pico elevado que es producto de un impacto de un rayo sobre las líneas de transmisión.

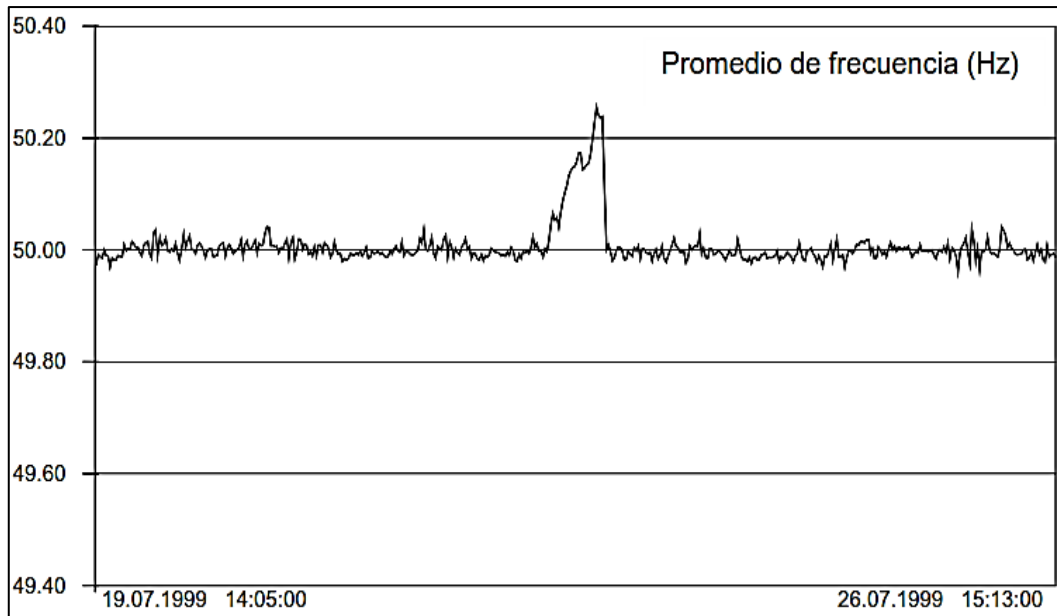


Figura 13. Variación de la frecuencia

Fuente: Metrel (2011) Calidad de la energía: análisis de potencia, armónicas y perturbaciones de red en sistemas trifásicos de distribución

1.4 Posibles mitigaciones de las perturbaciones

En resumen, la Figura 14 muestra los cambios de la señal de tensión producto de las perturbaciones y en la Tabla 7 se mencionan las posibles tecnologías que puedan dar solución ante estos problemas.

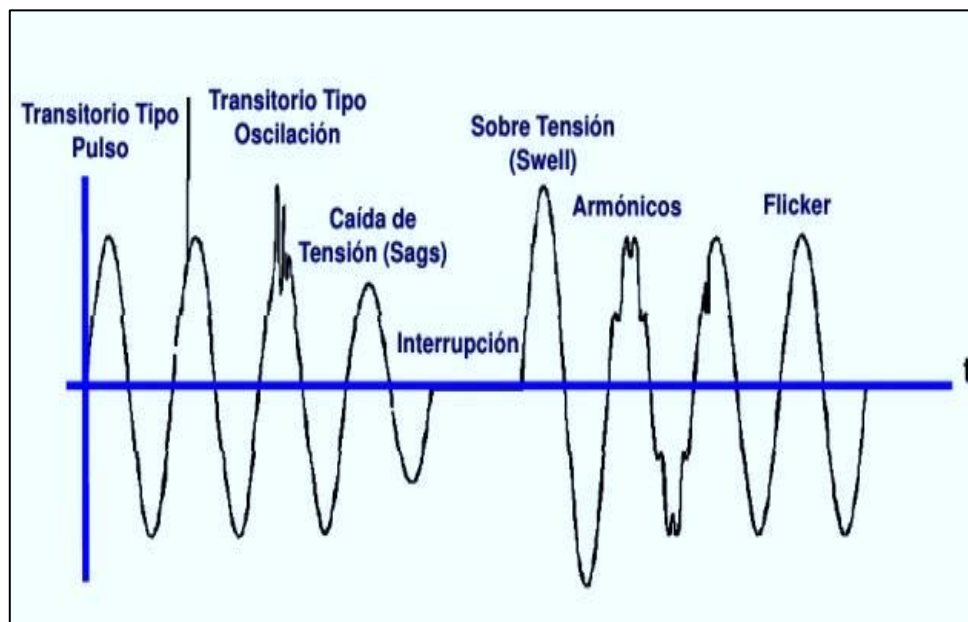


Figura 14. Perturbaciones presentes en la tensión de la red eléctrica

Fuente: Voltimum (2016) Parámetros a medir y analizar en el concepto power quality.

Tabla 7. Tecnología aplicada en la mitigación de perturbaciones en la tensión

Variación de frecuencia								E			
Noice						E	E	E			
Notching	E					E					
Inter armónicos	E			E						E	
Armónicos				E		E	OP	E	E		
DC-Offset											
Interrupción sostenida											
Subvoltaje						ME				E	
Sobrevoltaje						E	E	E	E	E	
Swells						E	E	E	E		
Sags						E	E	E	E		
Interrupción					ME				E		
Oscilatoria					ME				E	E	
Impulsiva	ME	ME	ME			E	E	E		E	
	Puesta a tierra aislada	Línea dedicada	Transformadores de aislamiento	Filtros	Supresores	Transformadores ferro resonante	Acondicionamiento de línea	UPS	Acondicionador de energía	Limitador de tensión	

	Eficaz
	Media eficaz
	Opcional
	No eficaz



Capítulo 2

Estudio de los armónicos en sistemas eléctricos

2.1 Antecedentes

En la 1832, la teoría de la inducción electromagnética permitió el desarrollo de los motores de corriente continua (DC). Posteriormente, según Guirado Torres, Asensi Orosa, & Jurado Melguizo (2006), en 1882 se instala la primera central eléctrica en corriente continua y su respectiva red de distribución. La desventaja de transportar corriente continua eran las grandes pérdidas de energía por efecto Joule durante todo el trayecto por ese motivo las centrales de generación eran construidas en el centro de las ciudades con demanda masiva de electricidad. En 1891 se crea el sistema trifásico que transporta corriente alterna (AC) y consigo el desarrollo de varios equipos trifásicos como los transformadores de corriente alterna utilizados para elevar la tensión y en efecto se reduce la corriente con la finalidad de disminuir las pérdidas. Por tanto, la energía transportada es más óptima y fiable. Sin embargo, las industrias necesitaban corriente continua dentro de sus instalaciones y la forma de obtenerlas era mediante los generadores DC que estaban acoplados mecánicamente a los motores AC, denominados moto-generadores, la ventaja de este modo de conexiones era el aislamiento total de los sistemas AC-DC, es decir, cualquier inconveniente en algunos de los sistemas no afectaba directamente al otro sistema.

Por otra parte, con el avance de la electrónica, los equipos se convirtieron en sofisticados y económicos, automatizando la conversión de la potencia, tal es el caso de los equipos de accionamientos electromecánicos, conversores, rectificadores, etc. En poco tiempo reemplazó los métodos tradicionales de conversión; no obstante, surgieron algunos problemas sobre estos equipos en cuanto a demanda en consumo de potencia significativa con respecto al consumo total, el bajo valor del factor de potencia relacionado con la rectificación controlada; la solución a estos problemas se basó en la creación de los condensadores shunt. Aun así, surgieron otros problemas como la distorsión armónica que fueron detectados por personal técnico en 1920 y que fueron provocadas por cargas que contenían dispositivos electrónicos de potencia, en consecuencia, afectaron directamente al sistema de potencia y en la funcionalidad de múltiples equipos.

En la actualidad, el interés por estudiar estas perturbaciones armónicas ha aumentado considerablemente por sus efectos significativos en la calidad eléctrica de la red y con ello las nuevas técnicas de detección que estudiaremos en este capítulo.

2.2 Perturbaciones armónicas

Los armónicos se definen como la desviación estable de la señal idealmente senoidal de la corriente o tensión a la frecuencia fundamental, una frecuencia diferente a la fundamental con una duración permanente y no definida en la red eléctrica; caracterizados por su frecuencia múltiplo entero de la fundamental comprendida entre 0 – 5 kHz y su magnitud entre 0 – 20 % de la fundamental. Estos tipos de perturbaciones afectan directamente a la calidad de la señal suministrada y se clasifican como par e impar (Martínez Morato, 2012). Los impares están presentes en las instalaciones eléctricas de toda la red y los pares son producto de asimetrías en el sistema eléctrico debido a la presencia de la componente continua, aunque no son muy comunes en las redes eléctricas.

Los armónicos a igual que las fases de línea, contienen una secuencia y pueden ser positiva, negativa o cero; para el caso de giro de un motor, los armónicos de secuencia positiva estarán a favor del giro, mientras que la secuencia negativa en contra del giro y en cero solo se trasladan por el conducto neutro. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se muestra el comportamiento de los armónicos en base a su orden, frecuencia y secuencia.

Tabla 8. Orden y secuencia de los armónicos

Orden	1 er	2 do	3 er	4 to	5 to	6 to	7 mo	8 vo	9 no	N
Frecuencia	60	120	180	240	300	360	420	480	540	60xn
Secuencia	+	-	0	+	-	0	+	-	0	...

Fuente: Martínez Morato (2012) Estudio de armónicos y propuesta de soluciones en taller de chapistería de SEAT MARTOREL.

Normalmente en la red de distribución eléctrica los armónicos predominantes son de tipo impar, y según aumenta el orden la magnitud de los armónicos disminuye, mayormente se evalúan los armónicos hasta el orden 50°, siendo los más significantes a considerar hasta el orden 13°.

2.3 Métodos de análisis de armónicos

Una señal distorsionada por la presencia de armónicos se puede estudiar, analizar y representar por medio de teorías y modelos matemáticos.

Este análisis empezó entre el siglo XVIII y XIX con los cálculos básicos referente a los armónicos en especial Fourier (1768-1830), propuso que toda función continua periódica admitía el desarrollo en series trigonométricas, sin embargo, fue rechazada por Joseph-Louis de Lagrange, pero posteriormente los matemáticos establecieron las condiciones para ser

considera. Las Series de Fourier (SF) nace a partir del estudio de la propagación de calor y desde entonces se convirtió en la transformada matemática por excelencia porque representa una función en el dominio del tiempo a otra función en el dominio de la frecuencia (Trinidad Torres, 2017).

En la actualidad es muy utilizado en interpretar y resolver sistemas dinámicos. En cierto modo, las series de Fourier tienen limitaciones que describiremos en la sección 2.3.1. Ante esta perspectiva, en las últimas décadas han surgido nuevas transformadas matemáticas con el objetivo de desarrollar nuevos algoritmos más eficientes (Martínez Morato, 2012) en cuanto a operaciones matemáticas para el desarrollo de nuevas tecnologías; tal es el caso de la Transformada Wavelet (TW) construido en base a las teorías de Fourier por Alfred Haar en 1909, con ciertas limitaciones en aplicaciones convencionales. Según Osorio (2006), entre 1930-1980 múltiples físicos y matemáticos como Marr, Levi, Morlet, Grossman, Coifman y Weis definieron los conceptos básicos de Wavelet. En 1980, Mallat estableció métodos que relacionaban los Filtros Espejos de Cuadratura, los Algoritmos Piramidales y las bases Orto-normales; en base a estas investigaciones, a mediados de ese mismo año, Yves Meyer presenta las Wavelets no triviales (continuas sin soporte compacto), y según Córdova Zamorano (2012) en 1989 la física y matemática I. Daubechies establece un conjunto de Wavelets orto-normales dando inicio a las aplicaciones Wavelet en el campo de las nuevas transformadas matemáticas que ha igual que las Transformadas de Fourier su análisis se basa en el dominio del tiempo y frecuencia con ciertas características más exactas, precisas y eficientes. En los años consiguientes, la importancia de la transformada Wavelet en toda aplicación que implique el tratamiento de datos y para el análisis de los parámetros de la calidad de la red eléctrica ha tomado un rol de gran interés que ha motivado a seguir investigando en nuevas técnicas y métodos, teniendo como partida los modelos matemáticos de Fourier. En esta sección evaluaremos las siguientes Transformadas matemáticas más aplicadas en la actualidad:

- Transformada de Fourier
- Transformada de Wavelet

2.3.1 De la serie a la transformada de fourier

2.3.1.1 Serie de Fourier en el tiempo (SF). La Serie de Fourier es uno de los modelos matemáticos emblemáticos y consiste en un procedimiento matemático analítico que descompone cualquier función más o menos compleja, definida en el dominio del tiempo en una serie de senos y cosenos con frecuencia múltiplos de la fundamental. La función para analizar se caracteriza por ser continua y periódica.

Sea $u_{(t)}$ una señal periódica distorsionada con características mencionadas anteriormente, por tanto, debe cumplirse que $u_{(t)} = u_{(t+T)}$, para cualquier valor de tiempo t ; T es un valor constante que mantiene la relación en todo momento para cualquier intervalo,

denominado periodo. Además, T está relacionado inversamente con la frecuencia, matemáticamente $T = \frac{1}{f}$; un ciclo de la señal es equivalente a 2π radianes, entonces el número de radianes por segundo define a la frecuencia angular ω , donde $\omega = \frac{2\pi}{T}$.

Según Carrillo Gonzáles (2003) la función $u_{(t)}$ en la Serie de Fourier queda expresada como:

$$u_{(t)} = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(\omega_0 n t) + b_n \sin(\omega_0 n t)) \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde a_n y b_n son los coeficientes y a_0 el valor continuo o promedio de $u_{(t)}$. La función es representada para un periodo T constante, y por facilidades de análisis de la SF se selecciona un intervalo de $\langle -\frac{T}{2}, \frac{T}{2} \rangle$. El ω_0 es la frecuencia angular fundamental y n corresponde al orden del armónico para todo $n \in \mathbb{Z}^+$, y el conjunto $\omega_0 n$ representa el n -ésimo armónico de la frecuencia fundamental. La relación frecuencia – periodo en base a la fundamental se expresa como:

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f_0$$

Los coeficientes a_n , b_n y a_0 mencionadas se calculan de la siguiente manera:

✓ El coeficiente a_0 se obtiene multiplicando a toda la ecuación 4 por la integral $\int_{-T/2}^{T/2} () dt$

✓ El coeficiente a_n se obtiene multiplicando la ecuación 4 por $\cos(\frac{2\pi m}{T} t)$, para $m \in \mathbb{Z}^+$; luego aplicamos la integral $\int_{-T/2}^{T/2} () dt$, posteriormente se analiza dos casos: $n \neq m$ y $n = m$.

✓ El coeficiente b_n se obtiene multiplicando la ecuación 4 por $\sin(\frac{2\pi m}{T} t)$, para $m \in \mathbb{Z}^+$; luego aplicamos la integral $\int_{-T/2}^{T/2} () dt$, posteriormente se analiza dos casos: $n \neq m$ y $n = m$.

Según Carrillo Gonzáles (2003), con resultados:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} u_{(t)} dt \quad \text{Ecuación 5}$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} u_{(t)} \cos(\omega_0 n t) dt \quad \text{Ecuación 6}$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} u_{(t)} \sin(\omega_0 n t) dt \quad \text{Ecuación 7}$$

De la SF, las funciones senos y cosenos periódicos a lo largo del tiempo, poseen cierta simetría respecto al origen que simplifican los cálculos de los coeficientes y consiste en analizar la simetría de la señal periódica.

Si $u(t)$ es una función con simetría par se cumple que $u(t) = u(-t)$, por tanto, no existe la serie de coseno ($b_n = 0$). Por el contrario, si $u(t)$ es una ecuación con simetría impar entonces se cumple que $u(t) = -u(-t)$, en consecuencia, no existe la serie de senos ($a_n = 0$). Tal es el caso de la corriente de la red eléctrica producida por las centrales generadoras que se caracteriza por tener simetría impar respecto al origen, por consiguiente, el valor promedio de la señal de corriente $a_0 = 0$ y $a_n = 0$ (para una señal ideal).

Otra forma de expresar la Serie de Fourier es en el plano de los números complejos, denominado Forma compleja de la serie de Fourier (FCS). Según Carrillo Gonzáles (2003), para demostrarlo es necesario recurrir a las identidades de Euler, las cuales son

$$\cos(n\omega_0 t) = \frac{1}{2}(e^{jn\omega_0 t} + e^{-jn\omega_0 t})$$

$$\sen(n\omega_0 t) = \frac{1}{2j}(e^{jn\omega_0 t} - e^{-jn\omega_0 t})$$

$$e^{jn\omega_0 t} = \cos(n\omega_0 t) + j\sen(n\omega_0 t)$$

Se procede a remplazar en la ecuación 4,

$$u(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \left(\frac{e^{jn\omega_0 t} + e^{-jn\omega_0 t}}{2} \right) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \left(\frac{e^{jn\omega_0 t} - e^{-jn\omega_0 t}}{2j} \right)$$

Luego, se agrupan las ecuaciones en términos de a_n y b_n ,

$$u(t) = c_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{2} e^{jn\omega_0 t} (a_n - jb_n) + \frac{1}{2} e^{-jn\omega_0 t} (a_n + jb_n) \right] \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde,

$$c_n = \begin{cases} c_{n*} = \frac{1}{2}(a_n - jb_n), & n > 0 \\ c_{-n*} = \frac{1}{2}(a_n + jb_n), & n < 0 \\ c_0 = a_0 & n = 0 \end{cases}$$

Remplazando los valores a_n y b_n obtenemos los coeficientes c_{n*} y c_{-n*}

$$c_{n*} = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} u(t) e^{-jn\omega_0 t} dt$$

$$c_{-n^*} = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} u(t) e^{+jn\omega_0 t} dt$$

Según Carrillo Gonzáles (2003), con $c_n \in \mathbb{Z}$, la Serie Compleja de Fourier queda expresada como:

$$u_{(t)} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{jn\omega_0 t} \quad \text{Ecuación 9}$$

$$c_n = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} u_{(t)} e^{-jn\omega_0 t} dt \quad \text{Ecuación 10}$$

Esta ecuación es más compacta que la SF, donde c_n es el coeficiente de la serie compleja y representa al armónico n . La función $u_{(t)}$ tiene que ser convergente si no fuera el caso, hay probabilidades que los coeficientes sean divergentes durante la integración.

- Aplicación y limitación de la FS:

Fourier empezó su estudio con los fenómenos dinámicos y los describió a través de funciones periódicas que en años posteriores servirían para que los matemáticos y físicos puedan evaluar otros sistemas; entre las aplicaciones más comunes:

- ✓ Procesamiento de señal
- ✓ Procesamiento de imágenes
- ✓ Flujo de calor

La SF trabaja con funciones simple de seno y cosenos, facilitando el análisis de cualquier función, aunque presenta limitaciones en cuanto a toda función periódica debido a que las funciones no periódicas no son tomadas en consideración siendo esta última la predominante en la mayoría de casos de estudio. Ante esta situación Fourier presenta la Transformada de Fourier (TF) partir del análisis de la Serie de Fourier (SF), ampliando el campo de las matemáticas clásicas.

2.3.1.2 Transformada de fourier (FT). La transformada de Fourier surge de las limitaciones presentas en la Serie de Fourier y es la primera vez que se transfiere una función del dominio tiempo al dominio de la frecuencia. Esta nueva herramienta matemática analiza y muestra no solo a las funciones periódicas sino incluye a todas las funciones no periódicas presentes en la señal, por tanto, aparecen todas las frecuencias. Adicionalmente, si conocemos la señal en la Transformada de Fourier podemos conocer la señal en el dominio del tiempo aplicando la transformada inversa de Fourier, recuperando toda la información inicial.

Según Carrillo Gonzáles (2003), de la serie de Fourier Compleja:

$$u(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{jn\omega_0 t} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left(\frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} u(t) e^{-jn\omega_0 t} dt \right) e^{jn\omega_0 t}$$

Para una señal no periódica la función $u(t): \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}$; en la serie de Fourier $\omega_0 n$ representa el n-ésimo armónico de la frecuencia fundamental, donde $n\omega_0 = n \frac{2\pi}{T} = 2\pi f_0$ en ese caso la serie resultante dependía del periodo era constante. Analizando, $u(t)$ es no periódica si $T \rightarrow \infty$ (periodo variable), entonces la frecuencia queda expresada $f = \frac{1}{T}$, donde $f \neq f_0$ y $\omega_0 \neq \omega \rightarrow 0$, entonces definimos $\Delta\omega$ tal que $\Delta\omega \rightarrow \infty$, es decir $\Delta\omega = \omega_f - \omega_{f-1} = \frac{2\pi}{T}$; agrupando la expresión se obtiene lo siguiente:

$$u(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{1}{2\pi} \int_{-T/2}^{T/2} u(t) e^{-jn\Delta\omega t} dt \right) e^{jn\Delta\omega t} \Delta\omega$$

$$u(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} u(t) e^{-j\omega t} dt \right) e^{j\omega t} d\omega \quad \text{Ecuación 11}$$

Según Carrillo Gonzáles (2003), $\omega = 2\pi f$, por tanto, definimos la Transformada de Fourier:

$$U(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t) e^{-j\omega t} dt \quad \text{Ecuación 12}$$

Al resolver $U(\omega)$ la función dependerá de la frecuencia f .

Para regresar del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo, resolvemos la ecuación 11, al cual se le denomina Transforma inversa de Fourier.

$$u(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} U(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad \text{Ecuación 13}$$

- Aplicación de la transformada de Fourier en los armónicos:

El estudio en el dominio de la frecuencia ha tomado un papel importante en el desarrollo de la medicina, telecomunicaciones, mecánica, electricidad, etc. Por ejemplo, las frecuencias de gran magnitud pueden originar vibraciones que pueden dañar los componentes mecánicos de un motor, esas vibraciones se evalúan en el dominio de la frecuencia. Nos interesa el campo de la electricidad, en específico la Calidad Eléctrica y estas se relacionan con los armónicos presentes en las señales de tensión o corriente y con la ayuda de la transformada de Fourier este estudio se ha hecho aún más relevante porque se puede visualizar en el dominio de la frecuencia el orden y magnitud de todos los armónicos presentes

y según sea el problema a evaluar, identificar los que interfieren en la señal para luego buscar reducirlos de tal manera que no afecte al sistema eléctrico.

La ecuación de la transformada de Fourier emplea funciones que en un intervalo de tiempo finito pueden tomar infinitos valores y en la actualidad resulta muy complejo introducir la transformada como tal en una máquina computacional para que lo resuelva. Otro de los inconvenientes está en la función que define a la señal, tiene que ser conocida y realmente resulta complejo conocerlo con exactitud porque solo se obtiene ciertos datos o muestras. Ante este problema surge la Transformada Discreta de Fourier que analizaremos en la siguiente sección (Carrillo Gonzáles, 2003).

2.3.1.3 Transformada discreta de Fourier (DFT). La Transformada Discreta de Fourier consiste en discretizar la Transformada de Fourier en un conjunto de muestras en un intervalo finito (ventaneo), con el objetivo de que toda esa información pueda ser identificadas y procesada por un sistema computacional para análisis de eventos temporales como el ritmo cardiaco o el revote de una pelota. Según Vetterli & Kovacevic (1995), definimos matemáticamente la Transformada Discreta de Fourier como:

$$U(\omega_n) = \frac{1}{N} \sum_{s=0}^{N-1} u_s e^{\frac{-j\omega_n s}{N}} \quad \text{Ecuación 14}$$

Suponiendo una señal desconocida $u(t)$ y lo único que se tiene son muestras medidos uniformemente cada cierto intervalo de tiempo. De la ecuación 14, los parámetros de la transformada discreta $U(\omega_n)$ para el análisis espectral son: N es el número de muestras, u_s son los valores de la muestra, $\omega_n = 2\pi n$; s es la variable en el dominio de la frecuencia, para $s = 0, 1, 2, \dots, N - 1$.

También es posible pasar de la serie de Fourier a tiempo discreto, siendo este paralelo al del tiempo continuo a igual que la transformada de Fourier.

- Límites de la DFT:

A medida que aumenta N el análisis espectral realizado por el sistema computacional se demorará más tiempo en dar la respuesta porque implica realizar más operaciones. Esto condujo a que la electrónica desarrollará software de mayor capacidad. Las aplicaciones son las mismas que se en la TF. Aunque existe otro algoritmo que acelera el proceso, reduciendo el número de operaciones llamada transformada rápida de Fourier; de esa manera se tienen un mayor campo de aplicación.

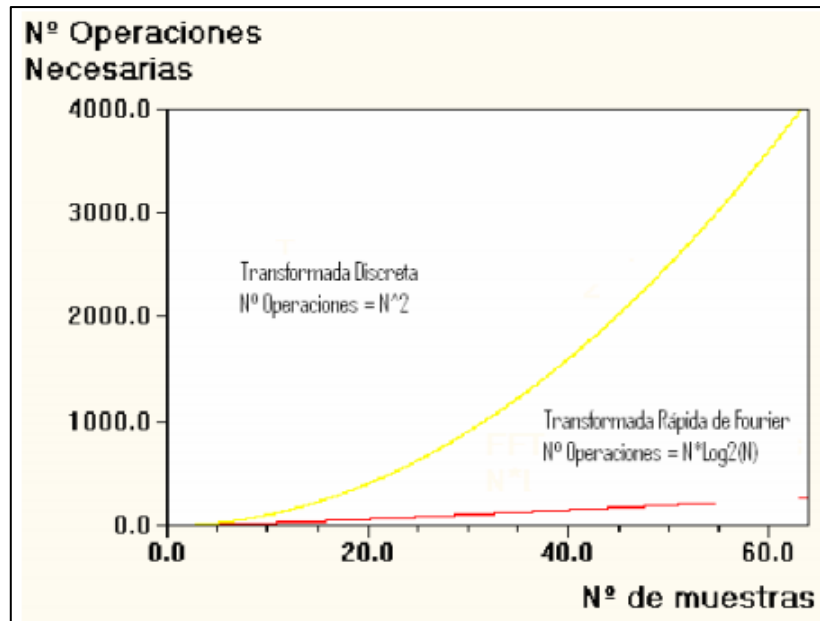


Figura 15. Relación entre número de operaciones y muestras

Fuente: Ocampo (2007) Detección y posible identificación de fallas en motores eléctricos con base en el análisis de vibraciones.

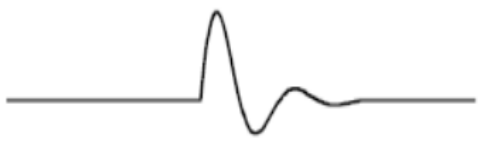
2.3.1.4 Resumen de análisis de Fourier (SF). La mayoría de los equipos utilizados en diferentes campos de la ingeniería convierten la señal analógica en señal digitalizada (discreta) conocida como conversores A/D, es decir pasamos de evaluar en el intervalo infinito a uno finito; como caso práctico, en la industria pesquera, las cámaras de refrigeración deben mantener cierta temperatura para que los productos se mantengan conservados y la forma de medir la temperatura es por medio de un sensor que realiza capturas del medio cada tiempo (Δt) determinado y va graficando; de igual manera en el estudio de la calidad eléctrica, según el estándar IEC 61000-4-7, los armónicos son medidos por instrumentos digitales que usan como modelo la TDF, los más conocidos son los Analizadores de redes.

La Tabla 9 indica la comparación entre las transformada Fourier, y la Tabla 10 muestra la señal en la serie de Fourier, transformada de Fourier y la transforma discreta de Fourier.

Tabla 9 Comparación entre las cuatro formas del análisis de Fourier

Propiedad de tiempo	Periódica (t,n)	No periódica (t,n)
Continua (t)	Serie de Fourier (SF)	Trasformada de Fourier (TF)
Discreta (n)	Serie de Fourier en tiempo discreto (SFTD)	Transformada de Fourier en tiempo discreto (TFTD)

Tabla 10. Las cuatro transformadas de Fourier

Tipo de Fourier	Ejemplo de señal
Transformada de Fourier Señales continuas y aperiódicas	
Serie de Fourier Señales continuas y periódicas	
Transformada de Fourier en tiempo discreto Señales discretas y aperiódicas	
Serie Discreta de Fourier Señales discretas y periódicas	

Fuente: Smith (1999) The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing.

2.3.2 Transformada de Wavelet

En esta sección se explicará algunos casos, pero no profundizaremos el tema por su contenido amplio de análisis e inclusive puede ser un tema de investigación específico.

La transformada Wavelet, surge en base a la metodología de la transformada de Fourier y es muy aplicado en diferentes campos de la ciencia y la ingeniería. Para analizar cómo trabaja la transformada Wavelet se realizará la comparación con la Transformada de Fourier.

$$U_{(\omega)} = \int_{-\infty}^{\infty} u_{(t)} e^{-j\omega t} dt$$

Transformada de Fourier

$$u_{(t)} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} U_{(\omega)} e^{jn\omega t} d\omega$$

Transformada inversa de Fourier.

Partimos de la ecuación de la transformada de Fourier donde se tiene una función $u(t)$ y una señal de comparación caracterizada por senos y cosenos con una duración infinita y que podía ser expresada en forma compleja $e^{-j\omega t}$, esta señal es simple y fácil de evaluar y por esa simplicidad la transformada de Fourier se convierte en un modelo matemático muy utilizado. Al momento de multiplicar las señales $u_{(t)}$ y $e^{-j\omega t}$ e integrarlas en el tiempo, en ese instante se procede con la comparación y mientras más se parezcan ambas señales, mayor será el valor durante la integración. En cuanto al resultado de $U_{(\omega)}$, estará compuesto por una serie de coeficientes en el dominio de la frecuencia llamado Espectro de Fourier, al graficar dichas frecuencias se consigue toda la información sobre la magnitud y frecuencias presentes de la

señal analizada para su evaluación, en el caso de la calidad eléctrica interesa la magnitud de los armónicos. Posteriormente para encontrar la señal original $u(t)$ se aplica la Transformada de Inversa de Fourier, para ello se multiplica cada coeficiente por un conjunto infinito de ondas senos y cosenos en forma compleja a la frecuencia ω , dicho de otra manera $U(\omega)e^{jn\omega t}$ para luego aplicar la integral. La desventaja de utilizar la TF se limita solo sobre funciones estacionarias, no muestra en el tiempo la evolución de las características de los espectros ante un evento no estacionario, no analizan espectros temporales (finitos), no analizan singularidades de un fenómeno transitorio por su alta frecuencia, pérdida de información al aplicar la transformada inversa porque se extiende en un intervalo infinito.

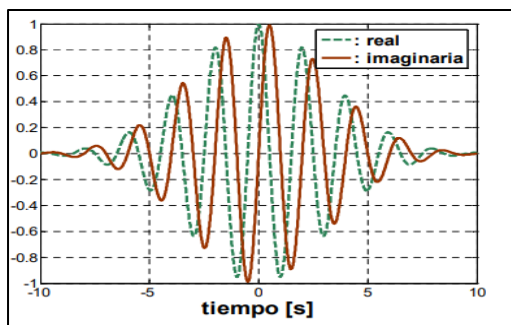
La Transformada Wavelet (TW) resuelve los límites establecidos por TF, porque esta TW es muy útil para funciones no estacionarias, variables en el tiempo, discontinuas, simples o complejas que son distorsionadas por señales perturbadoras externas como señales de ruido, fluctuación de frecuencias, entre otras., y las evalúa tanto en el dominio tiempo como en la frecuencia. Estos eventos son muy comunes en señales eléctricas (Colom Palero, 2001).

A diferencia TF, en la TW se aplica una señal de comparación que no se descompone en una serie de senos y coseno de duración infinita, sino que la señal de comparación se descompone en una serie de pequeñas ondas o también llamada Ondícula, estas se caracterizan por ser ondas localizadas en frecuencia (dilatación) y tiempo (traslación) (Nuñez Gutierrez, Lira Pérez, Cardenas Galindo, & Alvarez Salas, 2009) que oscilan en un instante y luego regresan rápidamente a cero (corta duración), con un promedio nulo y pueden ser reales y complejas. Sea la señal de comparación $\psi(t)$, que reemplaza a función de comparación de la transformada de Fourier, denominada Wavelet de Morlet, se expresa de la siguiente manera.

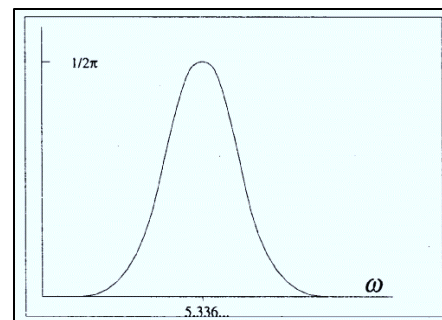
$$\psi(t) = e^{i\Omega t} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t}{\sigma}\right)^2}$$

Ecuación 16

Gráficamente,



a)



b)

Figura 16. Ondícula de Morlet para valores $\Omega = \pi$ y $\sigma = 1$ a) tiempo y b) frecuencia

Fuente: Montejo & Suárez (2020) Aplicaciones de la transformada Ondícula ("wavelet") en ingeniería industrial.

Donde $\psi_{(t)}$ es una onda centrada en $t = 0$, teóricamente se puede extender de $< -\infty, +\infty >$ y al ser una onda localizada contiene un valor significativo entre dos instantes de tiempo $< t_1, t_2 >$ dependiente de Ω y θ . Es posible desplazar la onda para $t \neq 0$ hacia un $t = b$, donde b es el nuevo punto localizado llamado factor de traslación. Si se requiere expandir (dilatarse) o reducir el intervalo en el que la señal contenga valor no nulo significativos; además, es posible escalar la onda básica para el análisis en frecuencia por medio de a denominado factor de escala (Nieto & Orozco, 2008). Y quedaría expresado como:

$$\psi_{(a,b)} = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad \text{Ecuación 17}$$

Para $\psi_{(t)}$ sin los parámetros a y b , se le denomina Wavelet Madre.

Respecto al factor de escala, normalmente $s > 0$, donde para $s > 1$ se da la dilatación de la Wavelet, y para $s < 1$ la wavelet se contrae. La ventaja de variar s , se obtienen rangos de diferentes frecuencias; para valores muy altos de s se quiere decir que hay frecuencia de mayor rango y por tanto ψ es de escala de mayor (Vetterli & Kovacevic, 1995).

Lo presentado hasta ahora no es suficiente para representar como una Wavelet a cualquier función oscilatoria de corta duración con valor promedio cero, sino que existen varias restricciones para ser consideradas como tal.

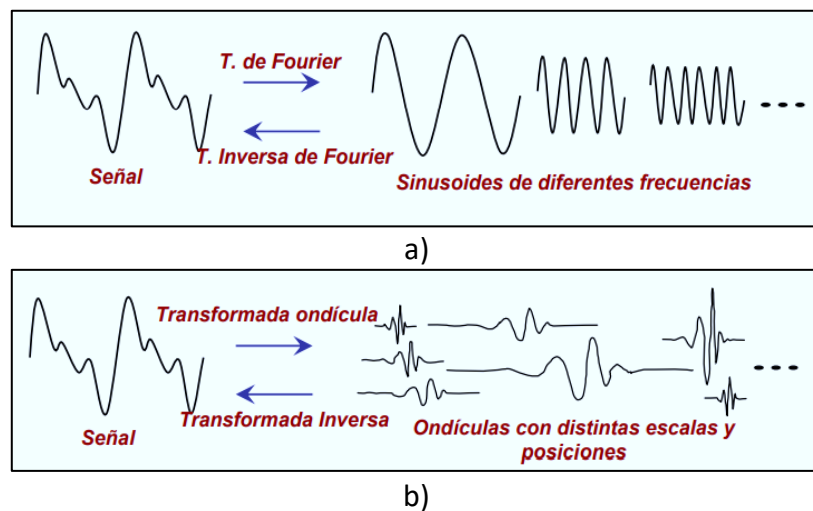


Figura 17. a) señal transformada de Fourier y b) transformada Wavelet

Fuente: Montejo & Suárez (2020) Aplicaciones de la transformada Ondícula ("wavelet") en ingeniería industrial.

Así como la Wavelet Morlet, existen otras Wavelet.

- ✓ Wavelet de A. Haar
- ✓ Wavelet de Poisson
- ✓ Wavelet de Marr

✓ Wavelet de Cauchy

✓ Wavelet de Bessel

Según Ortiz (1998), son muy aplicados en los siguientes casos

✓ Análisis numérico

✓ Computación grafica

✓ Dispositivos de medición

✓ Procesamiento de señales

✓ Mecánica de fluidos

✓ Estudios de señal de corriente armónica

2.4 Fuentes generadoras de armónicos

2.4.1 Cargas lineales y no lineales

Los armónicos afectan la calidad de la señal de tensión y corriente suministrada por las empresas de distribución. Son producidas por cargas generadoras de armónicos denominadas cargas no lineales y se caracterizan por consumir tensión idealmente senoidal, pero entregan corriente distorsionada, para luego circular por la red eléctrica a través de los cables conductores, contactores, condensadores, entre otros elementos de protección y maniobra instalados en los sistemas eléctricos.

Para el análisis, diseñamos un circuito típico de todo sistema eléctrico que consta de una fuente generadora de electricidad (G), una carga que puede ser lineal (CL) o no lineal (CNL) y una impedancia de línea (Z) que representa al cableado; la interacción entre estos dos puntos se da en dos casos:

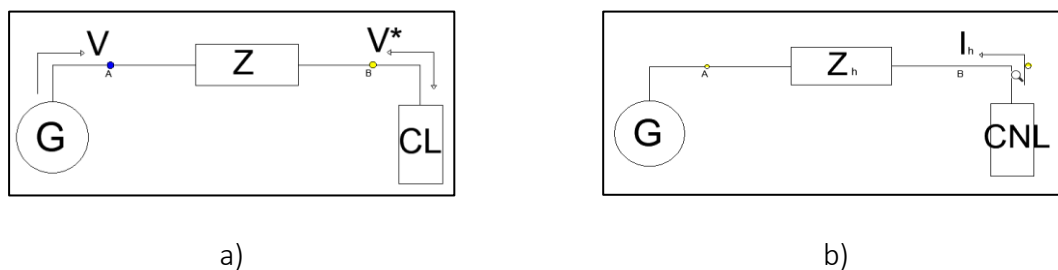


Figura 18. Sistema representativo a) carga lineal y b) carga no lineal

El primer caso se tiene una carga lineal (CL), donde la fuente generadora produce una tensión V a una frecuencia fundamental en el nodo de salida A , luego pasa por la impedancia de línea Z que produce una caída de tensión obteniendo en el nodo de entrada B de la carga una tensión V^* manteniendo la misma frecuencia fundamental generada, esa tensión es

absorbida por la carga lineal para general una potencia determinada; la corriente que regresa a la red, es la misma que ingresa a la carga (Oriol Boix, 1996).

En el segundo caso se tiene una carga no lineal (CNL), esta carga genera una intensidad armónica I_h diferente a la intensidad proporcionado por el generador G, y al circular por la impedancia Z_h de línea, siendo h el orden del armónico, se genera una tensión armónica V_h en el punto B. B puede ser un punto de distribución para varias cargas ubicadas en diferentes instalaciones, por tanto los armónicos se distribuyen en todo ese sistema eléctrico afectándolas directamente. Ver Figura 19.

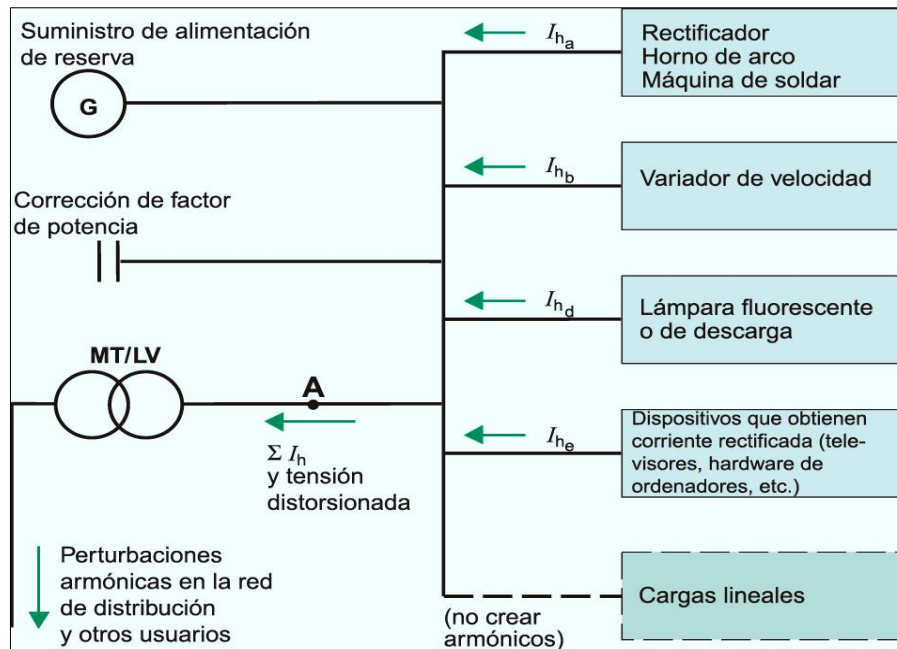


Figura 19. Sistema eléctrico con cargas generadoras armónicas
Fuente: Schneider Electric (2018) Detección y filtro de armónicos.

Respecto a la potencia, de la Figura 19, se inyecta una tensión generada por un generador a frecuencia fundamental f_1 y una potencia P_A , en el trayecto hay una caída de tensión por la línea de transmisión obteniendo una potencia P_B a la entrada de la carga no lineal gran parte de esta potencia es consumida por la carga no lineal (P_{CNL}) o también llamada potencia útil (P_u), la otra parte es consumida por pérdidas en el núcleo ($P_{perdidas}$) y el resto P_h se convierte en potencia con corriente armónica inyectada directamente a la red produciendo en efecto caídas de tensión en la línea de la red e inclusive del generador.

En las siguientes secciones, se analizará las fuentes y efectos que ocasionan los armónicos en el sistema eléctrico.

2.4.2 Fuentes generadoras de armónicos

Todas las cargas eléctricas no lineales son suministradas de corriente por el sistema eléctrico y tienen un límite de aceptación de armónicos generados. Con el avance de la electrónica de potencia surgen los convertidores de potencia y se han ido implementado en

los equipos electrónicos, en consecuencia, los armónicos incrementaron por el uso masificado de los convertidores ocasionando efectos sobre todo el sistema eléctrico, y el interés de estudiar los armónicos se convierte en un tema tan importante al momento de diseñar en general todo sistema de potencia como: sistemas industriales, edificaciones, de distribución y generación.

El sector industrial es el que produce en gran parte la mayoría de armónicos de magnitudes significantes por el uso de equipos que demandan el uso de convertidores de potencias, por ejemplo, hornos de arco e inducción, secadores estáticos y rotativos, cámara o contenedores de frio, accionamiento de motores, calentadores, UPS, inversores de frecuencia, motores de corriente directa accionados por medio de tiristores, transformadores sobreexcitados, rectificadores, etc. La Figura 20 muestra los convertidores y rectificadores utilizados en sistemas de potencia.

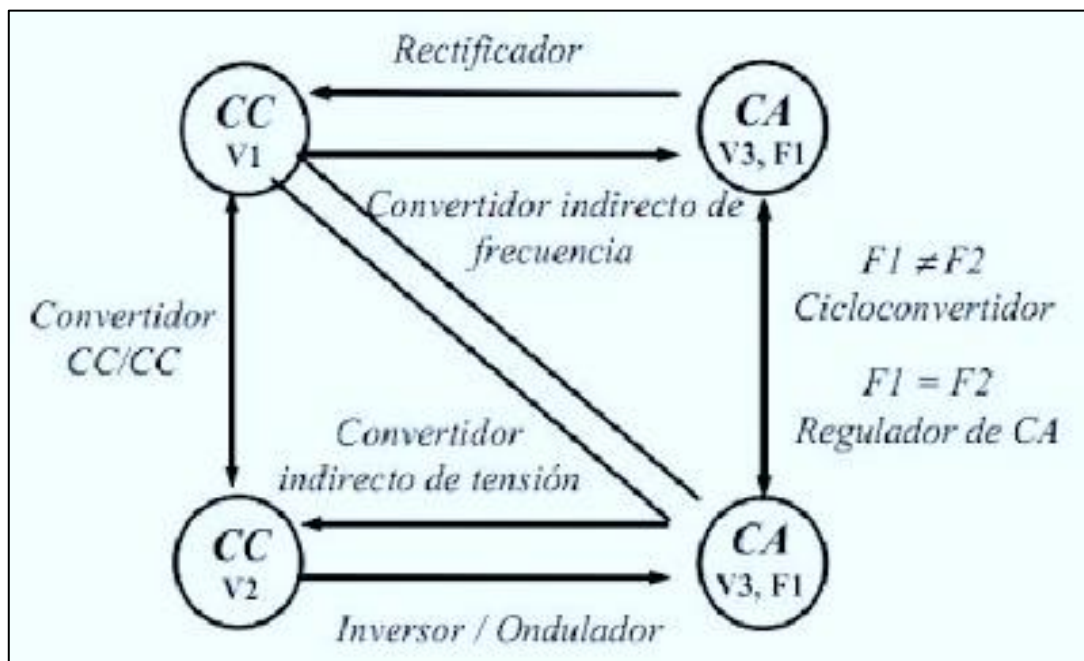


Figura 20. Tipos de fuentes de regulación y control

Fuente: Rivero Trelles (2008) Regulación, control y protección de máquinas eléctricas. Apuntes de la asignatura.

De acuerdo con la normativa IEEE 519-1992 sobre “prácticas recomendadas y requerimientos para el control de armónicos en sistemas eléctricos de potencia”, clasifica a las principales fuentes generadoras de armónicos en tres categorías:

- ✓ Dispositivos de electrónica de potencia
- ✓ Dispositivos generadores de arco eléctrico
- ✓ Dispositivos ferromagnéticos

Describiremos algunos de los equipos emisores de armónicos de estas categorías.

2.4.2.1 Dispositivos de electrónica de potencia

- Convertidores de conmutación:

El importante avance de la electrónica trajo consigo el desarrollado de dispositivos electrónicos sólidos (diodos, tiristores, etc.) cada vez de menor tamaño y mostrando una mejor confiabilidad y en cuanto precio son muy económicos lo que permite su comercialización a gran escala para diferentes aplicaciones en la ingeniería. Un conjunto de estos dispositivos puede convertirse en una fuente de armónicos que afecta directamente a la carga misma y al sistema. Los convertidores fueron diseñados para convertir la corriente alterna (AC) en continua (DC), normalmente se aplican a equipos como fuentes conmutadas y variadores de velocidad para el control de equipos rotativos.

El sistema trifásico es el más utilizado en el sector industrial por lo que los dispositivos electrónicos sólidos se agrupan para formar los denominados puentes de pulso, los comunes son de 6 y 12 pulsos. Analizaremos los convertidores de 6 pulsos AC/DC controlados y se llaman así porque forma seis ondulaciones en un ciclo de onda en la salida del puente en referencia a la señal senoidal de la entrada, y por convertidor controlado quiere decir que podemos controlar la señal de salida. La Figura 21 muestra la configuración del puente con los dispositivos electrónicos: Tiristores.

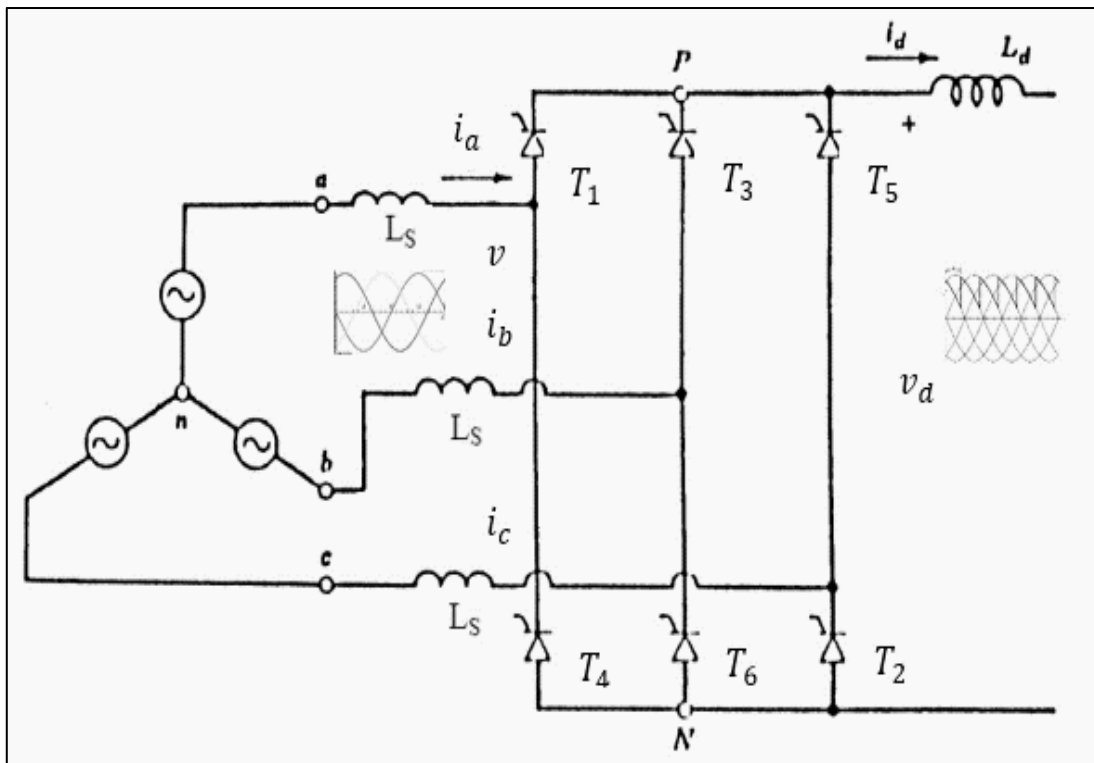


Figura 21. Sistemas convertidores de 6 pulsos

Fuente: Hart (1997) *Introduction to power electronics*.

Donde T1, T2, T3, T4, T5 y T6 corresponde a los tiristores, estos son sincronizados de tal manera que no se activen dos tiristores en una misma columna porque si no puede ocasionar un cortocircuito.

La primera onda se forma al activarse los tiristores T5 - T6, luego T5 llega al punto en que la señal es cero y el tiristor se comporta como un diodo abierto impidiendo la circulación de corriente; inmediatamente se activa T1, mientras que T6 todavía está en la parte positiva conduciendo la energía, formándose la onda T6 - T1; posteriormente T6 se abre porque deja de percibir corriente, inmediatamente se activa T2, mientras que T1 sigue conduciendo la corriente formándose la onda T1 - T2, y así sucesivamente se va formando las ondas T2 - T3, T3 - T4 y T4 - T5. A la etapa de activación se denomina ángulo de disparo y para este caso corresponde a $\frac{\pi}{3}$; la Figura 22 se muestra a detalle las ondas generadas y se puede visualizar en la parte superior las ondas formadas por suposición de las tensiones entre línea - línea. Algunos libros, al paso del tiristor de cerrado a abierto se llama conmutación natural (Devia Narváez, 2011).

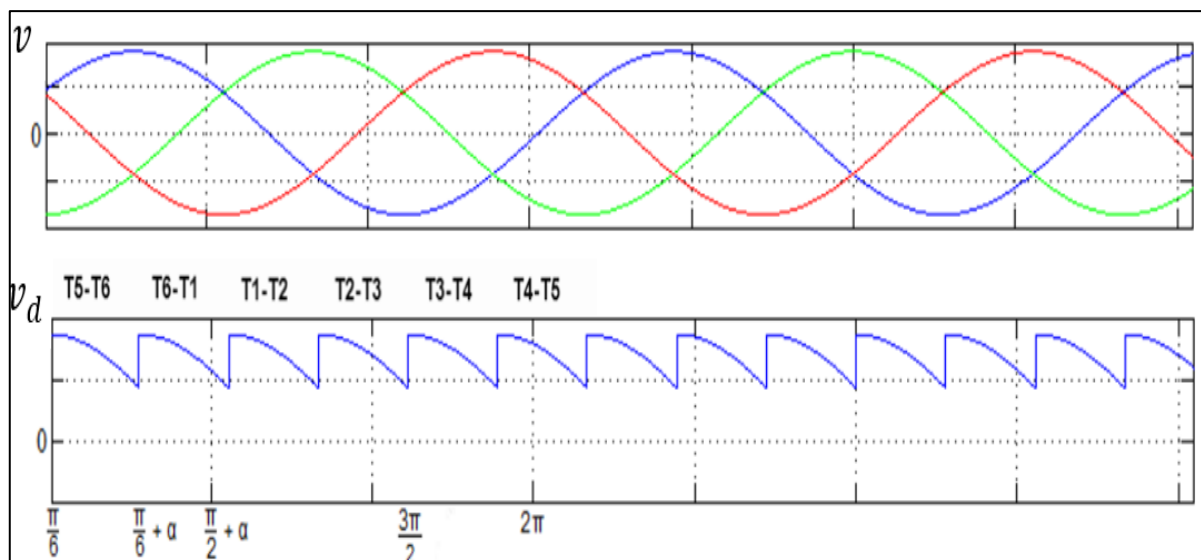


Figura 22. Señal en continua a la salida del conversor

Fuente: Devia Narváez (2011) Modelado de un convertidor ca/cc trifásico para el análisis de la distorsión armónica.

En efecto, la corriente en cada uno de los tiristores se distorsiona debido al *switch*eo generados por los tiristores; en la Figura 23 se muestra la señal de corriente donde α el ángulo de disparo y el controlador de la señal de salida, es decir a medida que α aumenta, la tensión media disminuye.

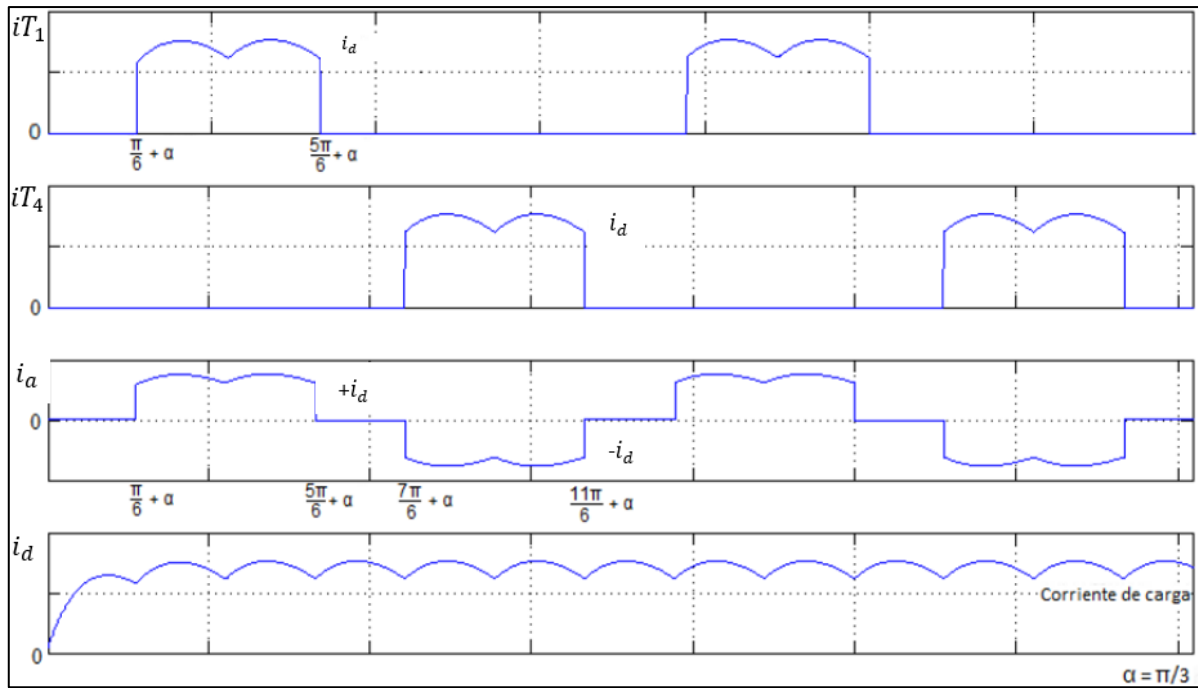


Figura 23. Análisis de corriente en los dispositivos tiristores

Fuente: Devia Narváez (2011) Modelado de un convertidor ca/cc trifásico para el análisis de la distorsión armónica.

Se procede a analizar los armónicos generados en el lado de suministro AC; la señal de corriente de fase es descompuesta por medio de la Serie de Fourier con el objetivo identificar el orden de los armónicos presentes, en este caso la onda está compuesta de 6 pulsos obteniendo a la salida una frecuencia $f_s = 6f_0$, por tanto, los armónicos presentes quedarían expresada de la siguiente manera:

$$h = 6n \pm 1$$

donde $n \in \mathbb{Z}^+$, y se agrega el ± 1 para analizar los armónicos impares, las cuales son:

Tabla 11. Magnitud de los armónicos emitido por los dispositivos conversores

H	5°	7°	11°	13°	17°	19°	23°
1/h (%)	20	14.3	9.1	7.7	5.9	5.3	4.3

De la Tabla 11 los armónicos de orden 3° se anula, por tanto, a medida que aumenta el número de pulsos, los primeros armónicos predominantes se irán eliminado. Entonces la ecuación general para cualquier convertidor según el número de pulsos (p):

$$h = pn \pm 1$$

Para que todo lo mencionado se cumpla el sistema debe ser: sistema balanceado, no debe haber solapamiento en la conmutación, la corriente de la carga debe permanecer

constante y simétrica en los pulsos de disparo enviados a los tiristores. Ante cualquier incumplimiento los armónicos pueden incrementar su valor.

- Cicloconvertidores (AC/AC):

Estos dispositivos normalmente se aplican en sistemas de altas demandas de potencias. Los cicloconvertidores están diseñados para operar como variadores de frecuencia de manera directa de AC/AC, dicho de otro modo, convierte una potencia alterna en potencia alterna de distinta frecuencia y pueden ser variables o fijas tanto en frecuencia como en amplitud. Los cicloconvertidores se ubican entre dos sistemas, la red y la carga y dependiendo de la aplicación, la conversión puede ser monofásica o trifásica. La mayoría de equipos en la industria operan con sistemas trifásicos y se requiere sean variables, entonces el enfoque estará en este tipo de sistema.

Un cicloconvertor trifásico está compuesto por tres módulos que están conectados a la red trifásica (V_A, V_B, V_C) y cada módulo incorpora dos grupos, el primer grupo conducirá la parte positiva del sentido positivo de la corriente senoidal y otro grupo conducirá la parte negativa del sentido negativo de corriente senoidal; a la salida de cada grupo se obtendrá una corriente i_a^+ y i_a^- con su respectiva señal de tensión alterna variable. Respecto a los dispositivos electrónicos pueden ser tiristores, triacs y IGBT's, su uso dependerá de la eficiencia de cada uno y estos dispositivos dependen de un pulso para su apertura y cierre (ángulo de disparo), siendo α_n el ángulo de disparo negativo en el intervalo $< 0, \frac{\pi}{2} >$ y α_p el ángulo de disparo positivo en el intervalo de $< \frac{\pi}{2}, 2\pi >$ y debe cumplirse que $\alpha_p + \alpha_n = 2\pi$, y es lógico porque se está trabajando con cada semiperiodo de la señal alterna de entrada (Molina, 2012).

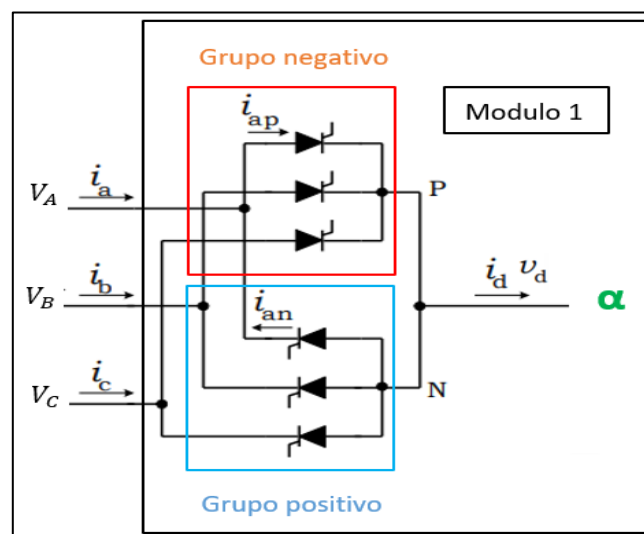


Figura 24. Módulo de un cicloconvertor trifásico

Fuente: Molina (2012) Características de los armónicos generados por controladores de velocidad para motores de corriente directa y alterna.

De la Figura 24, α es la salida del modulo 1, para el modulo 2 y 3 el análisis se da de la misma manera, no obstante, la salida de tensión de cada módulo debe estar desfasado 120° respecto del otro. La Figura 25 muestra la señal de salida tanto de la tensión (v_d) como de la corriente (i_d).

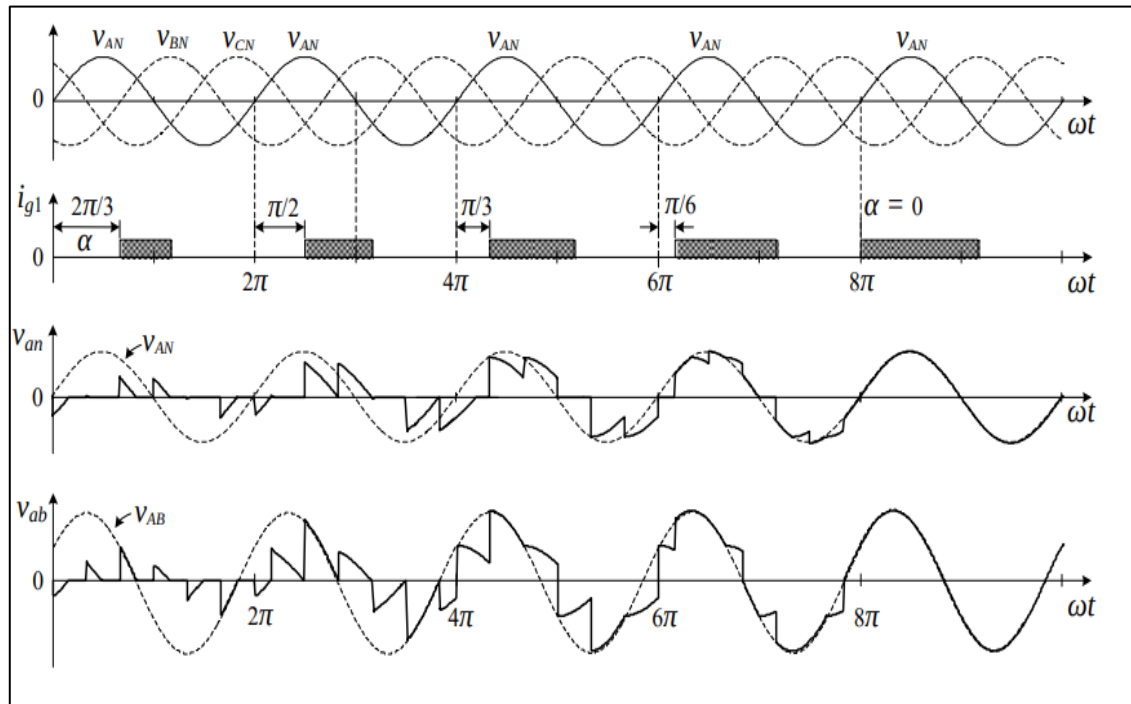


Figura 25. Comportamiento de la señal a la salida del módulo 1

Fuente: Pérez (2016) Tomado de Capítulo 6: Convertidores CA-CA.

Donde i_{g1} corresponde a la compuerta de ingreso de la señal de pulsación y α es el ángulo de disparo del dispositivo electrónico. Según la Figura 26, a medida que el ángulo de disparo disminuye aumenta el número de pulsos y la señal alterna se aproxima a una onda senoidal y por tanto la distorsión de onda en cuanto armónicos se reducen.

Los cicloconvertidores se clasifican en: operación modo bloqueo y en corriente de circulación, en el primero caso el grupo positivo conduce en el semiperiodo positivo mientras el grupo negativo está en modo abierto, cuando el sentido de la señal alterna es negativo, conduce el grupo negativo y se abre el grupo positivo; en el segundo caso es todo lo contrario al primer caso, ambos grupos están en conducción, además, se instala una bobina de inducción y se genera una corriente inductiva que limita la corriente de salida, este último caso no es muy común en los dispositivos, sin embargo, el análisis es similar al de operación en modo bloque.

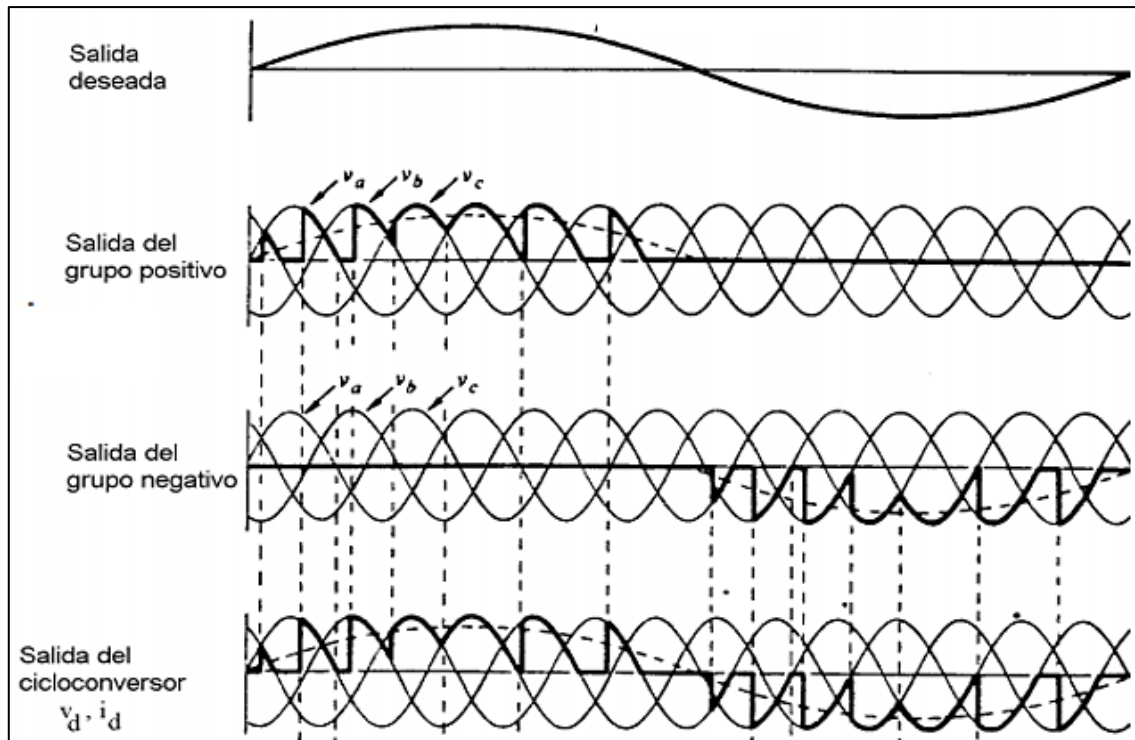


Figura 26. Operación modo bloqueo

Fuente: Pérez (2016) Tomado de Capítulo 6: Convertidores CA-CA.

La frecuencia de salida requerida es inferior a la frecuencia de entrada, y están relacionada con los armónicos, siendo el de mayor interés los armónicos en el sistema trifásicos por su complejidad para evaluarlo y por su uso frecuente en equipos de gran potencia como durante el arranque de los motores trifásicos asíncronos. El espectro de amplitud de la frecuencia armónica generado por el cicloconvertor está compuesto por un ancho de banda que está relacionado con la frecuencia de salida, la expresión para estos armónicos es la siguiente:

$$f_a = (pn \pm 1)f_e \pm 6kf_s$$

Según Hanzeika & Bieri (2004), el primer bloque corresponde a la frecuencia armónica características según el número de pulsos, y el segundo bloque corresponde al ancho de banda de cada armónico característica, donde:

f_a : Frecuencia de la armónica del n -ésimo orden de la red de suministro.

f_e : Frecuencia de entrada del cicloconvertor

f_s : Frecuencia de salida del cicloconvertor

p : Número de pulsos del cicloconvertor

$n \in \mathbb{Z}^+$

$k \in \mathbb{Z}^+ \cup \{0\}$

Para $k = 0$ y $n = 1, 2, 3, \dots$ se obtiene el armónico característico de orden n -ésimo para un número de pulso n . Si para $k = \text{constante}$ y n variable (1, 2, 3, ...) se obtiene el ancho de banda de la frecuencia armónica característica.

- Inversores PWM:

Los inversores PWM al igual que los cicloconvertidores, están conformados por dispositivos electrónicos que permiten el control de la magnitud y la frecuencia de la señal, en este caso se obtiene la señal de salida en alterna AC a partir de una señal continua DC (I.T.T., 2020). La aplicación del PWM en los circuitos mejora la forma de onda de la señal de tensión porque hay un control de los dispositivos en cuanto al encendido y apagado realizado por medio de un tren de pulsos variable; el corte de los dispositivos se da a la frecuencia requerida para producir la tensión alterna con dicha frecuencia.

Los dispositivos más comunes utilizados son los transistores y SCR. En la Figura 27 se clasifican según la aplicación.

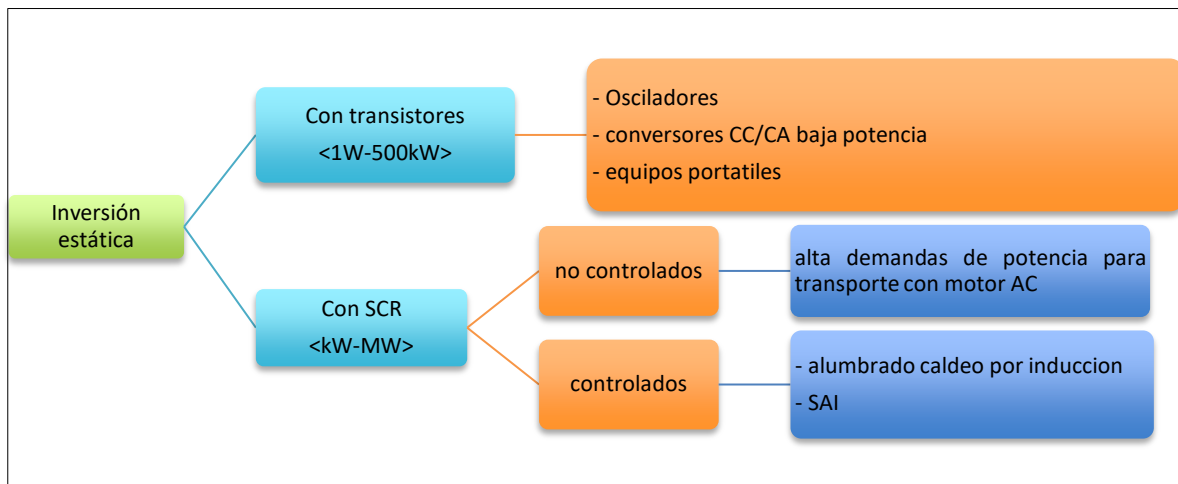


Figura 27. Clasificación de los dispositivos electrónicos en inversores

Fuente: I.T.T. (2020) Introducción a la Electrónica de Potencia: Inversores. Tema 11: Inversores.

El pulso de control enviado al dispositivo es una comparación entre una señal de referencia o control ($V_{referencia}$) a una frecuencia f_1 denominada frecuencia moduladora y una señal triangular o portadora ($V_{portadora}$) a una frecuencia f_s denominada frecuencia de conmutación que es la frecuencia de control del dispositivo electrónico. La frecuencia f_1 corresponde a la frecuencia a la salida del inversor y la señal de referencia utilizada es la senoidal, sin embargo, la señal obtenida a la salida será no senoidal variable a una frecuencia f_1 . Para variar la tensión a la salida se varía el ancho del pulso por semiperiodo. En la Figura 28 se muestra las señales mencionadas.

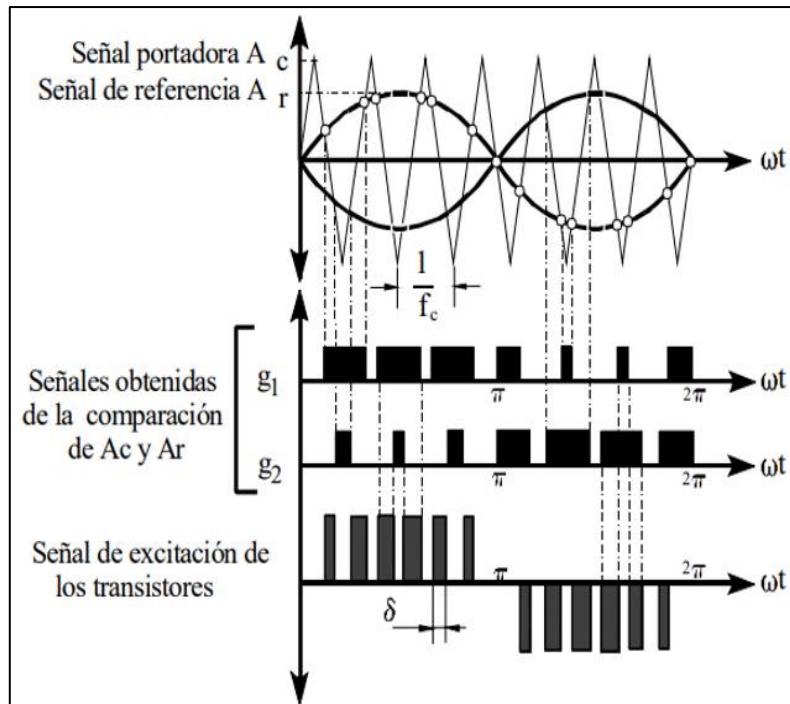


Figura 28. Pulso de control para los tiristores

Fuente: I.T.T. (2020) Introducción a la Electrónica de Potencia: Inversores. Tema 11: Inversores.

Donde $f_c = f_1$ es la frecuencia de control, y δ es el pulso tanto para la parte positiva como negativa.

Al tener una tensión no senoidal y una frecuencia variable diferente a la fundamental, se generarán armónicos, pero cómo es posible modular o controlar la anchura del pulso habrá una reducción significativa de los armónicos, convirtiéndola en un sistema muy eficiente. Para definir a los armónicos se emplean dos parámetros: el índice de modulación de amplitud (m_a) que es la relación entre las amplitudes de las señales de tensión de referencia y triangular, y el índice de modulación de frecuencia (m_f) que es la relación entre las frecuencias triangulares y las de control.

$$m_a = \frac{V_{\text{referencia}}}{V_{\text{triangular}}}$$

$$m_f = \frac{f_s}{f_1}$$

Para f_1 constante, aumentamos f_s de tal manera que aumentan las pulsaciones en cada semiperiodo, no obstante m_f aumenta y en consecuencia empiezan aparecer los armónicos con frecuencias altas según como incrementa f_s ; a simple vista es perjudicial para el sistema eléctrica, pero es más fácil eliminar altas frecuencias a través de un filtro pasabajo, y estos van ubicados a la salida del inversor y la otra ventaja es la reducción de la dimensión del filtro; la desventaja: a mayor frecuencia de conmutación, los dispositivos electrónicos

sufren pérdidas por sobrecalentamientos y es más complejo el tiempo de sincronización que puede beneficiar al aumento de armónicos significativos.

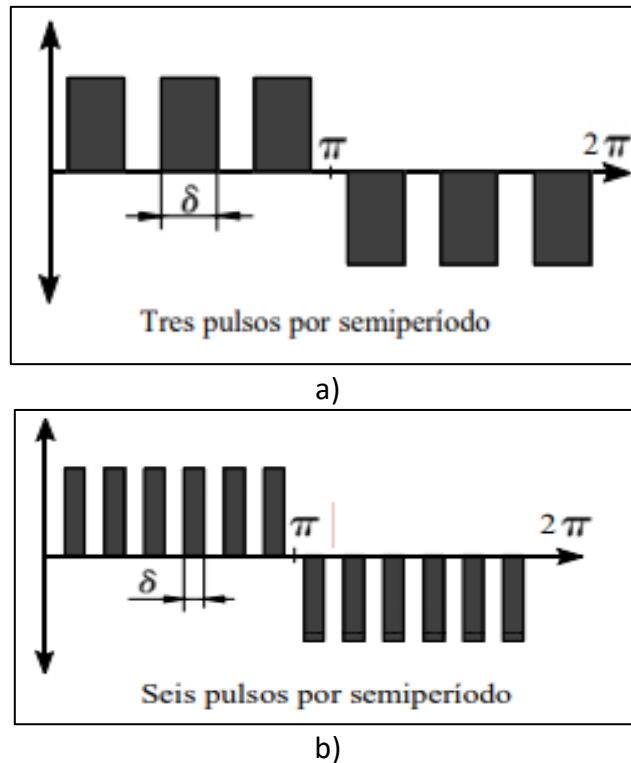


Figura 29. Variación del número de pulsos

Fuente: I.T.T. (2020) Introducción a la Electrónica de Potencia: Inversores. Tema 11: Inversores.

Estos circuitos son aplicados en motores eléctricos que después de ser desenergizados se convierten en generadores de corriente y es ahí donde participan los inversores para convertir la corriente a la frecuencia de la red y de esa manera se aprovecha la energía en un 95 %. También se aplican a la gran mayoría de motores de altas potencias y bajas revoluciones que requieren un control automático sobre estos, para ello se utiliza los variadores de velocidad que contienen un convertidor CA/CC, posteriormente se utiliza los inversores CC/CA con el objetivo de regular la potencia sobre el motor.

2.4.2.2 Hornos de arco. Los hornos de arco eléctricos se emplean normalmente en procesos de fundición de metales chatarra, y el proceso consta de dos etapas: fundición y refinado; para la fundición se utilizan electrodos que provocan un corto circuito al contactar con la tierra y deben soportar una corriente por encima de los 60 kA. Estas se caracterizan por su no linealidad e incorporan dispositivos electrónicos para el control de la frecuencia y presentan un sistema de potencia muy complejo caracterizado por la inestabilidad en la tensión. Estas cargas producen sobre la señal eléctrica: fluctuaciones de la tensión provocando la presencia de *Flicker*, desbalance en las fases, bajo factor de potencia para la operatividad de estas cargas y generación de armónicos.

Durante la operatividad de la carga, el sistema sufre la desenergización y energización de la tensión y esto se logra a través de un transformador reductor trifásico a 60 Hz compuesta de varios TAP's; como se requiere una alta corriente en la salida, en consecuencia, se obtendrá una baja tensión en la misma salida.

Los armónicos son generados por el comportamiento complejo del arco eléctrico y la variabilidad aleatoria de la tensión que afecta directamente en magnitud y orden en los armónicos, complicando el análisis de los espectros armónicos (Rosales, 1995). Los armónicos generados por esta carga son: 3°, 5°, 7°, 9, 11°, 13°, ... y a medida que aumenta el orden de los armónicos decrece la magnitud de estos, pero significativamente; siendo el armónico predominante el de 3° orden. Hay la posibilidad que se generen armónicos pares e inclusive puede aparecer tensión continua (CC). Respecto al transformador, estas se configuran en estrella – delta con el objetivo evitar que los armónicos principalmente de 3° orden (por su magnitud) se introduzcan a la red eléctrica por medio del neutro.

La Tabla 12 muestra la magnitud de los armónicos generados por un horno de arco en una industria de fundición. Hay dos columnas: la primera hace referencia un caso crítico y la otra columna es una referencia a los armónicos normalmente generados por sistema de control de estas cargas.

Tabla 12. Armónicos generados por un Horno de Arco

Armónico	Peor caso % Fundamental	Tipo % Fundamental
2	17.0	5.00
3	29.0	20.0
4	7.50	3.00
5	10.0	10.00
6	3.50	1.50
7	8.00	6.00
8	2.50	1.00
9	5.00	3.00

Fuente: Ramírez Castaño & Cano Plata (2006) Calidad del Servicio de Energía Eléctrica.

Un caso práctico de medición de armónicos pares e impares generados por un arco eléctrico se detalla en la Figura 30.

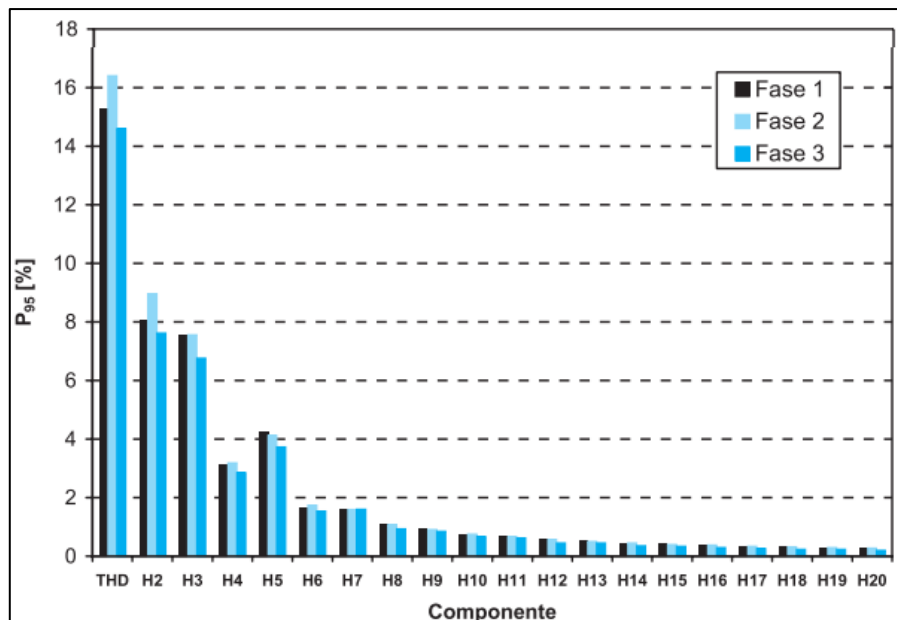


Figura 30. Armónicos individuales de un horno de arco eléctrico

Fuente: Issouribehere, Issouribehere & Barbea (2009) Aspectos de calidad de servicio en hornos de arco eléctrico como cargas en los sistemas de distribución.

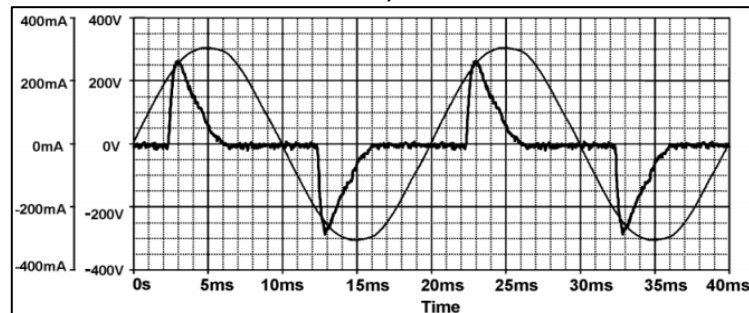
2.4.2.3 Lámparas fluorescentes. Todas las instalaciones sean edificaciones e industriales, contienen sistemas de iluminación de diferentes características. Los primeros equipos de iluminación fueron los incandescentes que eran puramente resistivas, pero ineficientes por su alto consumo de potencia usualmente superiores a 100 W y un bajo promedio de vida; luego surgieron las halógenas y posteriormente las lámparas fluorescentes compactas (CFL), siendo esta última más eficiente, económico, bajo consumo de potencia normalmente 25 W y un prolongado tiempo de vida superior a los incandescentes. Sin embargo, los CFL son cargas no lineales generadoras de corrientes distorsionadas por tanto inyectan armónicos impares a la red eléctrica pero debido a su bajo consumo de potencia los armónicos generados no son de gran magnitud por lo que no hay una restricción severa. La normativa aplicada es la IEC 61000-3-2 (clase C).

Como caso práctico en la Figura 31 inciso a), se visualiza los fluorescentes más comunes con sus respectivos datos de fabricante y en el **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** inciso b), muestra la señal de tensión y corriente siendo la onda de tensión la más afectada y los armónicos generados por el fluorescente de tipo L2P14W.

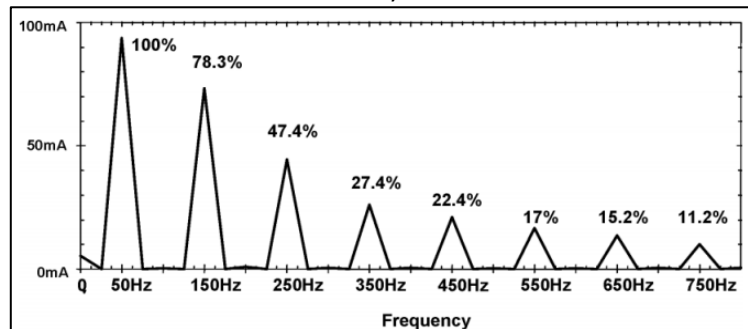
No obstante, las lámparas en conjunto producen armónicos, pero no son muy significativos porque tienen una tasa de distorsión total muy baja. Con respecto a los armónicos, el 3° y 5° es el más relevante por la misma razón que las fuentes de alimentación. También, pueden ocasionar eventos de *Flicker* perceptible a la ser humano cuando se produce una fluctuación rápida de la tensión con una frecuencia variable entre 1-10 Hz en un nivel inferior al 0.3 %. (Issouribehere, Issouribehere, & Barbea, 2009).

LAMP ID.	MARCA	FABRICADO EN	P(W)	I(mA)	LUMENS	VIDA MEDIA
L1P 11W	Philips Genie	China	11	80	600	3 años (5.5 h/día)
L2P 14W	Philips Ecotone Economy	Europa	14	115	900	6000h
L3P 15W	Philips Tornado	China	15	110	1000	3000h
L4P 20W	Philips SL-E Pro	Polonia	20	145	1200	10000h
L5O 12W	Osram Dulux El Economy	Alemania	12	120	600	6 años (3 h/ día)
L6O 21W	Osram Dulux Star	China	21	160	1200	6000h
L7G 11W	General Electric Biax Electronic	Hungria	11	85	600	15 años (2.7 h/ día)

a)



b)



c)

Figura 31. a) Características de los Fluorescentes según fabricante, b) Efectos en la onda de corriente y c) Magnitud de los armónicos generados por los fluorescentes

Fuente: Cunill (2017) Estudio y caracterización armónica de las lámparas fluorescentes compactas de baja potencia.

2.4.2.4 Variadores de velocidad y frecuencia. Los primeros equipos eléctricos utilizados en la industria necesitaban ser alimentados de una fuente DC y para ello se utilizaban los motores DC, estos equipos se caracterizaban por su linealidad debido a que eran accionados eléctrica y mecánicamente por un motor AC y para el control de velocidad se lograba variando la corriente de campo de un generador eléctrico DC conectado entre el motor DC y AC, la conexión del generados al motor AC se lograba a través de bridas. En cuanto a la distorsión de tensión y corriente de la red era nula, sin embargo, presentaba desventajas como: alto costo por mantenimiento, baja eficiencia, equipos muy pesados por su gran tamaño, no controlables, altas vibraciones y de altos precios.

Con el desarrollo de la electrónica de potencia se redujo el sistema tradicional aprovechando directamente la corriente y tensión de una fuente alterna o continua fija. Por tanto, se obtiene una tensión variable a la salida y un mejor control de la velocidad. Entre los dispositivos electrónicos tenemos a los rectificadores controlados. Los motores DC toman una mayor importancia porque pueden entregar altos torques de arranque, pero bajas velocidades por la conmutación lenta en los anillos.

En el transcurso de los años surgieron los motores de inducción, siendo estos más complejos que los motores DC, pero con un control eficiente del torque y la velocidad a través del control de la tensión y la frecuencia. El control del torque y la velocidad se puede dar por medio del control de la frecuencia o el control de frecuencia y tensión (Yung, 2017). Respecto al control de la frecuencia: la frecuencia que ingresa al estator del motor debe ser variable. En el caso en que la tensión en el estator es constante al valor nominal, variamos la frecuencia por debajo de la frecuencia nominal y en efecto es posible que origine un aumento del flujo en el entrehierro y puede llegar inclusive a saturarse provocando posibles cambios bruscos de torque y velocidad a la salida. Los dispositivos frecuentemente utilizados son: los inversores y cicloconvertidores y como sabes estos sistemas producen armónicos en el sistema eléctrico.

En cuanto al control de la frecuencia y la tensión: para el caso en que la frecuencia y tensión sean constante en el estator, el flujo en el entrehierro será constante, entonces se evita posibles saturaciones y así mismo el torque permanece constante; el caso en que la tensión y la frecuencia sea variable: hay un control sobre el torque y la velocidad, y el torque normalmente se mantiene constante. Al igual que los controladores de frecuencia, se emplean los inversores con PWM y el cicloconvertor (frecuencia inferior a la fundamental).

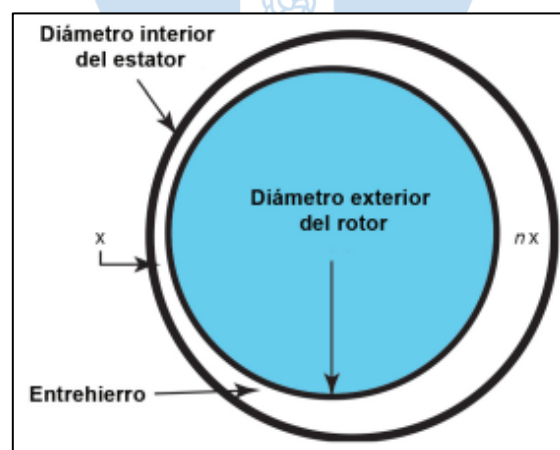


Figura 32. Partes internas de motor eléctrico

Fuente: Yung (2017) El Entrehierro ¿Qué es y por qué es importante?

2.4.2.5 Saturación de transformadores. Los transformadores son muy utilizados en la industria por su capacidad de reducir o elevar la tensión. El proceso de saturación ocurre de la siguiente manera: a la entrada del transformador ingresa una tensión senoidal y se espera que a la salida al transformador sea la misma señal senoidal con una potencia mayor o menor

a de la entrada según el diseño de demanda establecido bajo ciertas condiciones de operación por las cargas no lineales conectadas al secundario del transformador, para que ello suceda es importante la presencia de una corriente de magnetización que origina un flujo senoidal; según la Figura 33, el flujo (B) y la corriente (I) se comportan linealmente (en fase) hasta alcanzar un punto donde la relación flujo-corriente dejan de ser lineales e ingresan a una región crítica porque ante una pequeña variación del flujo, se produce un crecimiento abrupto de la corriente generando efectos negativos como la distorsión de la señal (Reybell H., 2009), produciendo armónicos en específico de 3° orden e inclusive con un 40 % de la fundamental y en consecuencia el equipo sufre sobrecalentamiento en las bobinas y un incremento de las pérdidas por efecto Joule, y si no hay un control sobre ellos pueden generar explosión del transformador, a esta zona se le llama región de saturación del transformador.

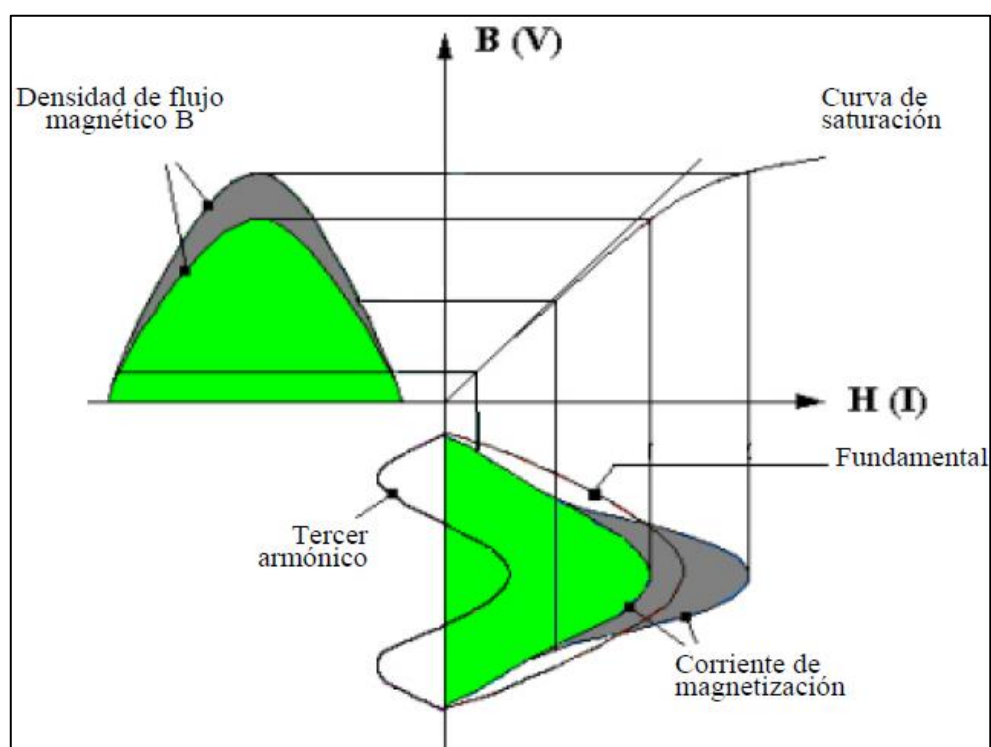


Figura 33. Curva de saturación en el núcleo del transformador

Fuente: Ramírez Castaño & Cano Plata (2006) Calidad del Servicio de Energía Eléctrica.

2.5 Efectos de los armónicos

2.5.1 Efectos producidos por los armónicos

La presencia de armónicos en la red eléctrica trae efectos negativos sobre las cargas no lineales o sensibles que están conectadas en el mismo sistema eléctrico como los dispositivos electrónicos de baja potencia y dependiendo de la magnitud pueden ocasionar fallas e incluso pérdidas económicas. Según sea el tiempo de permanencia y la magnitud de los armónicos en la red, los efectos pueden presentarse a corto y largo plazo:

Tabla 13. Efectos en el tiempo sobre los equipos eléctricos

Efectos	
Corto plazo	Largo plazo
✓ Los dispositivos de protección ubicados en las líneas de suministro y distribución, actúan de manera repentina. ✓ Los motores y generadores trabajan con variadores de frecuencia sino hay un control adecuado sobre estos pueden ocasionar elevadas velocidades por tanto el incremento de las vibraciones y ruidos. ✓ El aumento de las pérdidas por efecto Joule se produce por un aumento en la corriente, deteriorando a los bancos de condensadores por incremento de la temperatura. ✓ Funcionamiento anormal de las cargas no lineales, en especial las cargas sensibles. ✓ En la conexión triángulo - estrella con neutro, los armónicos tienden a fluir por el neutro ocasionando un sobrecalentamiento en la línea conductora del neutro	✓ La sobrecorriente causa sobre los equipos eléctricos como motores de inducción, desgastes en las partes mecánicas antes del tiempo fijado. ✓ Falla de transformadores por saturación de corriente en el entrehierro. ✓ todos los equipos sufren sobrecalentamiento de diferentes magnitudes produciendo en los generadores, motores inducción, transformadores y cables, etc., la reducción de tiempo de vida. ✓ Falla en los bancos de condensadores ✓ Efectos de resonancia son muy perjudiciales que inclusive pueden causar la destrucción del banco de condensadores.

El sector industrial y residencias utilizan equipos eléctricos de diferentes potencias según sea la aplicación, y de acuerdo a lo visto en esta sección, así como hay generadores de armónicos también existen una gran variedad de dispositivos electrónicos que se ven afectados directamente por los armónicos. A continuación, analizaremos los efectos sobre los equipos más frecuentes utilizados en la industria.

2.5.2 Efectos en las instalaciones eléctricas

2.5.2.1 Efectos de resonancia. En una red sin capacitores, los armónicos de corriente se distribuyen en las diferentes cargas del sistema. Sin embargo, es necesario la presencia de banco de capacitores conectados a la red con el fin de compensar la potencia reactiva demandada por la parte inductiva o capacitiva de los equipos eléctricos, esta compensación se logra por medio del parámetro denominado factor de potencia.

Existe una relación entre los armónicos y el banco de condensadores, este último actúa como un amplificador de la magnitud de los armónicos cuando ocurre un evento denominado fenómeno de resonancia y se da en sistemas con cargas con parte reactiva (capacitiva e inductivo), por donde circula una corriente alterna con una determinada frecuencia de manera que la parte reactiva se anula (reactancia inductiva y capacitiva se igualan), por tanto el sistema adquiere un carácter puramente resistivo (corriente y tensión en fase) con un factor de potencia $fp = 1$. A la frecuencia que se produce la resonancia se llama frecuencia de resonancia (f_0). Para una mejor interpretación, recurrimos a la interpretación matemática, la Figura 34 muestra un circuito RLC en serie, en base al circuito explicaremos el efecto de resonancia.

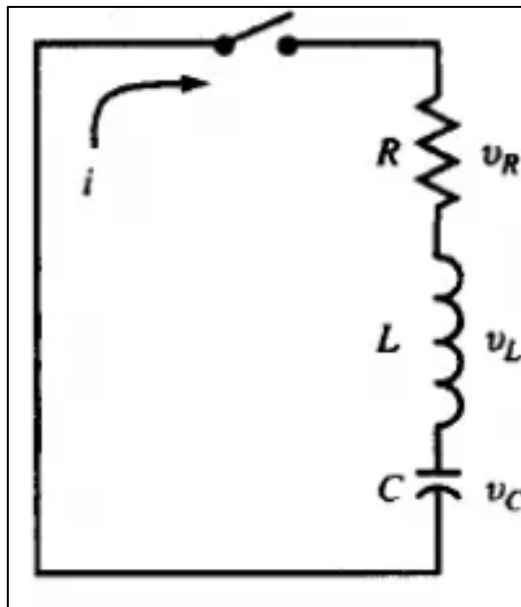


Figura 34. Circuito RLC

Fuente: Edminister & Nahvi (1997) Circuitos eléctricos.

Del circuito, se obtiene la impedancia resultante,

$$\bar{Z} = \bar{R} + j\bar{X} = \bar{R} + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$$

Ante una resonancia se cumple que $X_L = X_C$, por consiguiente, la parte reactiva $\bar{X}$ se anula, por tanto $2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC} \Rightarrow f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$, siendo f_0 la frecuencia de resonancia.

En la Figura 35, la parte inductiva crece de manera lineal con pendiente positiva mientras que la parte capacitiva lo hace logarítmicamente convergente al dominio de la frecuencia y la resistencia mantiene su valor constante. Para una determinada frecuencia sea f_1 se obtiene una impedancia Z_1 y a medida que aumenta la frecuencia f , el valor de la parte capacitiva disminuye y la inductiva aumenta mientras que la impedancia decrece hasta alcanzar su valor mínimo y esto ocurre cuando $Z = R$ (puramente resistiva) para una frecuencia $f = f_0$ porque a esa frecuencia la parte inductiva y capacitiva obtienen el mismo

valor; en consecuencia, la admitancia también aumenta porque esta es directamente proporcional a la corriente e inversa a la impedancia. ¿Qué sucede con la corriente a la frecuencia de resonancia? La corriente alcanza su valor máximo, y como la corriente contiene armónicos estas también se verán amplificadas.

$$V_h = Z_h I_h$$

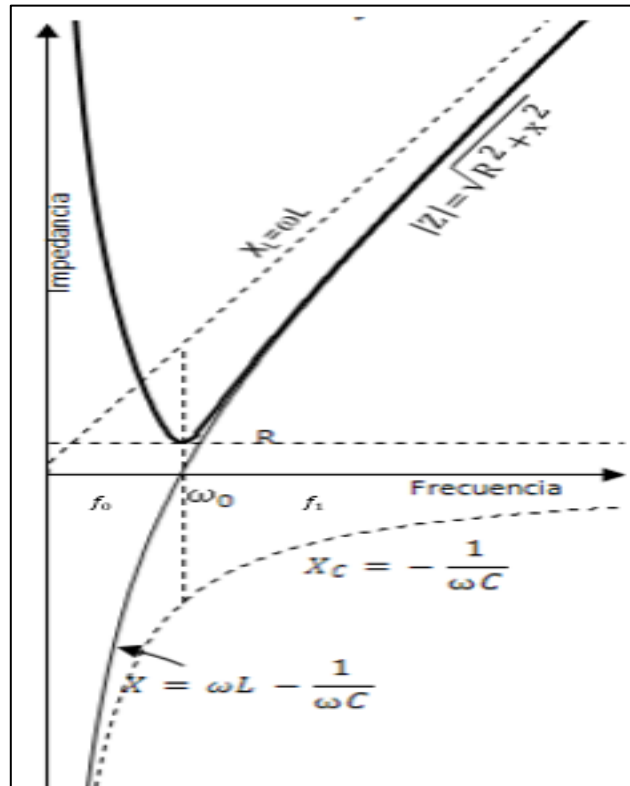


Figura 35. Curva característica impedancia – frecuencia

Fuente: FCEIA (2006) Teoría de circuitos: Capítulo 11.

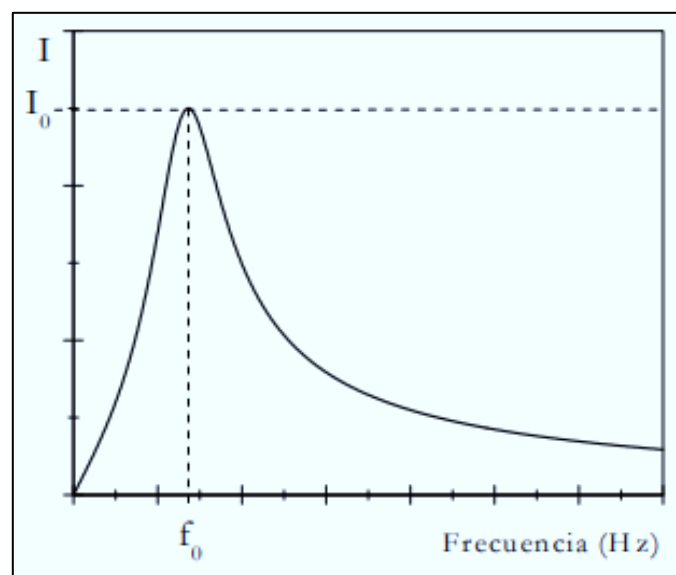


Figura 36. Curva característica corriente – frecuencia

Fuente: UNLS (2013) Resonancia en un circuito serie RLC.

Por lo tanto, los bancos de condensadores no emiten corrientes armónicas, no obstante, sí amplifican la magnitud de la frecuencia de las perturbaciones armónicas en las señales de corriente, los efectos sobre los bancos de condensadores pueden ser perjudiciales como sobrecalentamientos excesivos y también puede provocar efectos en el sistema eléctrico como los disparos frecuentes de sus interruptores, falla de los propios transformadores e incluso se queman por las altas temperaturas, etc.

Para un sistema con reactancias en paralelo ocurre todo lo contrario, la impedancia es máxima y la corriente es mínima, sin embargo, aumentan las tensiones armónicas.

2.5.2.2 Salto de protecciones. Los armónicos presentes en las señales de corriente y tensión pueden alterar los valores picos como eficaces que son transportados por el sistema eléctrico. La mayoría de los equipos cuenta con sistemas de protección que se activan al ver alteraciones significativas de la corriente, estos pueden ser diferenciales, térmicos, magnéticos o magneto-térmicos, entre otros.

Los diferenciales actúan dependiendo del tipo de fenómeno se presenta en la red, y algunos no responden adecuadamente a las señales armónicas, entre las diferencias más efectivas tenemos a los “superinmunizados”, que permiten el filtrado de altas frecuencias mediante filtros pasa-bajos, sin tener que realizar disparos inesperados por estos efectos. Y además disponen de un circuito de acumulación de energía del transitorio, lo cual permite actuar correctamente si se trata de un defecto diferencial (se produce el disparo) o de un transitorio (actúan los filtros sin la necesidad de interrumpir el paso de la corriente).

Con respecto a los magneto-térmicos, debido al incremento de la temperatura producidos por los armónicos provoca calentamientos, y estos se aperturan por esos efectos. Principalmente en cargas como centros de cómputos, fotocopiadoras e impresoras. Es recomendable no conectar a un mismo ramal las impresoras y fotocopiadoras conjunto con los ordenadores. De tal manera se evita reinicios inesperados de los ordenadores, pero los armónicos seguirán circulando por los sistemas eléctricos.

2.5.2.3 Vibración, ruido y acoplamiento. Las vibraciones en una máquina rotativa se puede generar por múltiples factores como desajustes de pernos o sujetadores que sostienen a los motores, no obstante si la vibraciones persisten es posible que los factores sean internos relacionados directamente con la electricidad, normalmente estas vibraciones son producto de las altas frecuencia de los armónicos ocasionados por las interferencias electromagnéticas, que afectan principalmente a los transformadores, tableros eléctricos y motores eléctricos de la industria, y en general todo equipo eléctrico rotativo (Ramírez Castaño & Cano Plata, 2006). Por ello, es necesario sobredimensionar los equipos en función de los niveles de armónicos que deban soportar en régimen permanente, aunque esta opción no es idónea porque demanda altos precios. Actualmente existen múltiples equipos externos de medición que detectan las vibraciones y actúan inmediatamente para reducir los armónicos. También, para niveles altos de ruido o interferencias, puede afectar en las telecomunicaciones y cables de

data debido a la interferencia en la calidad de la señal, la comunicación entrecortada y pérdidas de datos.

2.5.2.4 Deterioro de la onda de tensión. Las corrientes armónicas ocasionan deformación de la tensión hasta el punto de tener una onda totalmente diferente a la señal fundamental, incluso pueden reducir sus valores picos de la fundamental al cual se le denomina achatamiento. Puede traer consecuencias sobre los equipos como apagones fortuitos, reinicios de ordenadores, etc.

2.5.2.5 Calentamiento cables. El aumento de la frecuencia armónica implica el aumento de la corriente en los conductores que transportan corriente alterna. Los conductores de cada fase y el neutro e inclusive los equipos eléctricos se ven afectados por los sobrecalentamientos producto de este incremento de la corriente debido a los armónicos que circulan por la red. Cuando la corriente es muy excesiva los aislamientos del conductor se van deteriorando y las consecuencias pueden llegar a ser muy desastrosas, por esa razón es mejor dimensionar adecuadamente la sección de los conductores teniendo en cuenta la frecuencia de las perturbaciones armónicas para prever casos fortuitos. El armónico más frecuente en estos tipos de instalaciones es de 3° orden.

Otro de los efectos muy conocido es el “efecto piel” y se presenta cuando hay cambios rápidos de la corriente. De la ecuación del efecto Joule IR^2 donde R es la oposición a la corriente e I es la corriente definida como la intensidad de corriente por el área transversal del conductor, cuando hay un incremento de la frecuencia, el área efectiva disminuye y en consecuencia la densidad de corriente aumenta y se desplaza a la periferia exterior del conductor. Por tanto, el conductor aumenta su resistencia a la corriente alterna provocando un sobrecalentamiento severo.

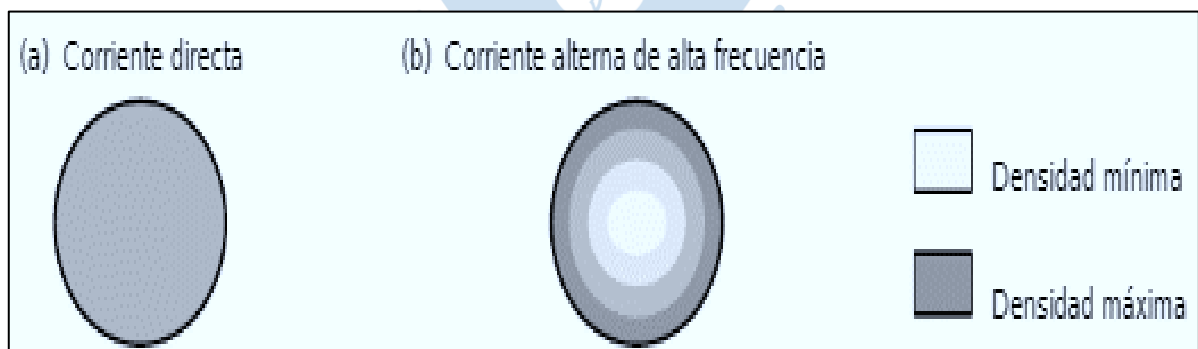


Figura 37. Efectos en conductores según el incremento de la frecuencia

Fuente: Tejada & Llamas (2010) Efectos de las Armónicas en los Sistemas eléctricos.

Según Acevedo Ramírez, Esparza Gonzáles & Olivares Galván (2009), matemáticamente se expresa:

$$\sigma = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{10\rho}{\mu f}}$$

Donde: σ es la profundidad de penetración (m); ρ es la resistividad del conductor (Ω/m); μ es la permeabilidad en el vacío ($4\pi 10^{-7}$) y f es la frecuencia (Hz).

2.5.3 Efectos en equipos de alta potencia conectados a la red eléctrica

2.5.3.1 Condensadores de potencia. Como ya lo habíamos mencionado en el subtema 2.5.2.1, los condensadores provocan el efecto de resonancia, que en términos prácticos podemos decir que la frecuencia de los armónicos reduce la impedancia de los condensadores, esto implica la amplificación de la magnitud de la tensión y corriente inclusive más alto que como si no hubiera condensadores. Entre los efectos principales:

- Molestias acústicas
- Pérdidas y sobrecalentamientos producto del incremento de la tensión armónica.
- Vibraciones, desgaste mecánico.
- Envejecimiento prematuro por pérdidas dieléctricas en el condensador.
- Incremento de la compensación de la potencia reactiva por encima de los límites permitidos en las cargas.
- Reducción de las posibilidades de utilización a plena carga. El factor de potencia se ve afectado por el mal funcionamiento del banco de condensador
- Destrucción de los condensadores causados por la resonancia con las cargas del sistema, y produce efectos aumento de la corriente y tensión.

2.5.3.2 Motores eléctricos. Los principales efectos de los armónicos tanto de tensión y corriente sobre las máquinas rotativas síncronas o de inducción, es el incremento de las pérdidas por efecto Joule, es decir, por calentamiento producto de las altas frecuencias, estas pérdidas se dan en el devanado del estator y en el deslizamiento entre el estator y rotor, esto origina desgaste de la parte mecánica del eje, además los armónicos pueden acelerar o frenar la velocidad cuando no se alcanzan los valor de tensión y corriente adecuados, disminuyendo el rendimiento, también afecta al torque porque se necesita más corriente para producir el mismo par, en consecuencia, se reduce la eficiencia. Los efectos más comunes en estas máquinas eléctricas:

- Aumento de las emisiones de vibraciones y ruido audibles.
- Pérdidas y sobrecalentamientos en el cobre y el núcleo que ocasionando posibles cortocircuitos por ende destrucción de los motores eléctricos.
- Vibraciones en el eje, desgaste mecánico (rodamientos) y excentricidad.
- Reducción de las posibilidades de utilización a plena carga y de la eficiencia en la relación velocidad/par.

- El rotor gira de acuerdo al sentido de giro del campo magnético producido en el entrehierro por la corriente circulante en la bobina del estator, sin embargo, los armónicos presentes en el estator pueden cambiar el sentido de la rotación del eje si estos son de secuencia negativa generando un campo armónico contrario al movimiento del eje del rotor en consecuencia se produce frenos intempestivos del motor.
- Incremento de la tensión en los materiales aislantes.

Los efectos son disparos intempestivos debidos a la superación de los valores de cresta de la corriente.

2.5.3.3 Interferencia armónica con la protección del sistema de potencia

- La distorsión armónica actual afecta la capacidad de interrupción de los disyuntores y fusibles.
- Los armónicos degradan las características de funcionamiento de los relés de protección por los constantes incrementos de temperatura.
- Algunos relés digitales funcionan con una base de datos como muestra y la distorsión armónica interfiere de tal manera que crea un error en dicha operación. Aunque las diferentes experimentaciones realizadas demuestran que los errores en la medición son muy bajos y no afectan en la medición por eso existen márgenes de error permitidos para evaluar los resultados obtenidos en las mediciones.
- Los fusibles se activan térmicamente y son inherentemente sobre dispositivos actuales. Los materiales fusibles también son susceptibles al efecto de piel adicional de las frecuencias armónicas.

2.5.3.4 Conductor de neutro. El conductor neutro es muy utilizado en configuración delta - estrella del transformador. Los armónicos generados en cada fase en especial los de 3er orden se suman y circulan por el conductor neutro hasta llegar al transformador esto sucede si hay un desbalance en la distribución de cargas por fases en el sistema eléctrico, La conexión estrella es muy común las instalaciones por su aplicación en cargas monofásicas.

- Calentamiento en el neutro
- Degradación del conductor de neutro
- Disparo de protecciones
- Sobrecorriente circulando por el neutro

2.5.3.5 Transformadores. Los transformadores de potencia están diseñados para trabajar a la frecuencia de 60 Hz o 50 HZ, además deben ser capaces de disipar los efectos de calentamiento ocasionado tanto por las partes mecánicas como eléctricas del transformador cuando están operando sin carga y a plena carga y bajo ciertas condiciones límites establecidas por el fabricante. Además, la impedancia del transformador está directamente relacionada

con la frecuencia y en consecuencia con la distorsión armónica. Los armónicos tienen una gran influencia en los transformadores muy aparte de las pérdidas, son las que limitan la potencia de estos, además si el calentamiento es muy elevado es porque hay un alto contenido de las perturbaciones armónicas y estas son en gran parte emitidas por las cargas no líneas conectadas al transformador, entonces se tienen que reducir estas cargas si en caso hay un bajo dimensionado. Como resumen los efectos producto de los armónicos son:

- Pérdidas y calentamientos en el núcleo. Principalmente en el hierro (foucault) y el cobre (histéresis) así como en las laminaciones.
- Disminución del rendimiento
- Sobrecaentamiento de los devanados
- Vibraciones en el núcleo por la presencia de elevadas frecuencias armónicas de tensión y corriente.
- Pérdida de aislamiento térmico por aumento de armónicos de tensión.
- Molestias acústicas
- Saturación en el núcleo del transformador en el núcleo.
- Sobredimensionamiento del transformador.

2.5.4 Efectos en los equipos de baja potencia

2.5.4.1 Efectos en equipos de consumo. Los efectos en aparatos eléctricos de bajo consumo se pueden dar de varias maneras:

- Receptores de televisión: usualmente la trama de la pantalla se distorsiona impidiendo la visibilidad de las imágenes, acompañado de nitidez baja, además el rayo catódico como la placa de la pantalla y los filamentos sufren desgastes.
- Iluminación de arco fluorescente y de mercurio: estos dispositivos incorporan un circuito con condensadores y una componente inductancia del balasto en conjunto producen una frecuencia resonante a frecuencias armónicas. En efecto parpadeos de los fluorescentes calentamientos excesivos y ruidos audibles por la presencia de la distorsión de voltaje armónico.
- Ordenadores. Estas cargas no lineales son las que más armónicos genera en el sistema eléctrico y a la vez son los más sensibles a estos. Los problemas surgen cuando se tiene muchos ordenadores y otros equipos conectados a un mismo ramal, lo que implica que los armónicos se sumen y generan altas distorsiones sobre el sistema, estas frecuencias pueden resultar muy elevadas incluso por encima de la fundamental. Los efectos son:

- ✓ Los efectos que provocan son perturbaciones funcionales que generan pérdidas de datos o funcionamiento defectuoso de los equipos de control

- ✓ Perdidas de datos
- ✓ Daños en el disco duro
- ✓ Reinicios inesperados

2.5.4.2 Efectos de los armónicos en los instrumentos de medida. Los instrumentos de medición están calibrados con margen de error permisible, los equipos pueden fallar durante la medición cuando se exceden los valores o rangos establecidos en el instrumento. Los armónicos ocasionan errores en la medición, pero es responsabilidad del personal técnico evaluar si estos errores coinciden con la base de datos con valores anteriores.

2.6 Índices de medición de armónicos

2.6.1 Potencias

- Tensión instantánea

Lineal	No lineal
$v_{(t)} = V_m \sin(\omega_0 t + \theta)$	$v_{(t)} = \sum_{h=1}^h V_h \sin(h\omega_0 t + \theta_h)$
$v_{(t)} = I_m \cos(\omega_0 t + \varphi)$	$i_{(t)} = \sum_{h=1}^h I_h \sin(h\omega_0 t + \varphi_h)$

- Valor eficaz considerando para casos en presencia de continua DC

Lineal	No lineal
$V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$	$I_{rms}^h = \sqrt{I_1^2 + I_H^2} = \sqrt{\sum_{h=0}^{\infty} I_h^2}$
$I_{rms} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$	$V_{rms}^h = \sqrt{V_1^2 + V_H^2} = \sqrt{\sum_{h=0}^{\infty} V_h^2}$

- Potencia instantánea

Lineal $p_{(t)} = \frac{V_m I_m}{2} \cos(\theta - \varphi) + \frac{V_m I_m}{2} \cos(2\omega t - \theta - \varphi)$

$$\text{No lineal} \quad p_{(t)} = \sum_{h=1}^h V_h \sin(h\omega_0 t + \theta_h) \cdot \sum_{h=1}^h I_h \sin(h\omega_0 t + \varphi_h)$$

• Potencia activa y reactiva

Lineal

$$P = \frac{V_m I_m}{2} \cos(\theta - \varphi) = V_{rms} I_{rms} \cos(\theta - \varphi)$$

$$P = \frac{V_m I_m}{2} \cos(\theta - \varphi) = V_{rms} I_{rms} \sin(\theta - \varphi)$$

No lineal

$$P_h = \sum_{h=1}^h V_h I_h \cos(\theta_h - \varphi_h)$$

$$Q_h = \sum_{h=1}^h V_h I_h \sin(\theta_h - \varphi_h)$$

• Potencia aparente

Lineal

$$S = V_{rms}^2 I_{rms}^2$$

No lineal

$$S_T = (V_{rms}^h I_{rms}^h)^2 = (I_1^2 + I_H^2)(V_1^2 + V_H^2)$$

$$S_T = (V_1 I_1)^2 + (V_1 I_H)^2 + (V_H I_1)^2 + (V_H I_H)^2$$

Donde Jiménez Molano (2008):

Potencia aparente fundamental

$$(V_1 I_1)^2$$

$$P^2 + Q^2$$

Potencia aparente de distorsión de voltaje

$$(V_1 I_H)^2$$

Potencia aparente de distorsión de corriente

$$(V_H I_1)^2$$

D

Potencia aparente de armónica

$$(V_H I_H)^2$$

Entonces la potencia aparente quedaría expresada:

$$S_T = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}$$

2.6.2 Distorsión armónica total

Los armónicos se pueden evaluar de forma individual o grupal:

$$v_h = \frac{V_h}{V_1} 100\%$$

$$i_h = \frac{I_h}{I_1} 100\%$$

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} 100\%$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} 100\%$$

2.6.3 Factor de potencia en presencia de armónicos

El factor de potencia ideal sin interferencia de armónicos la expresamos de la siguiente manera:

$$fp = \frac{P_1}{S_1} = \cos(\varphi)$$

Donde P_1 y S_1 son las potencias en base a la fundamental y φ es el desplazamiento entre la corriente y tensión fundamental del sistema eléctrico.

No obstante, en la realidad, la mayoría de las cargas en la industria son no lineales y principalmente generadores armónicos, esto se ha explicado de manera detallada en varios de los capítulos incluyendo el presente capítulo, por tanto, el factor de potencia se modifica en presencia a estas perturbaciones, es decir el $fp \neq \cos(\varphi)$, para ello se introducen nuevos parámetros conocidos como factor de desplazamiento (DF) y factor distorsión o distorsión armónica (DH) para definir a nuestro nuevo factor de potencia.

El factor de desplazamiento está en base a la fundamental, y queda expresada de la siguiente manera:

$$DF = \frac{V_{1-ef} \cdot I_{1-ef} \cdot \cos(\varphi_1)}{V_{1-ef} \cdot I_{1-ef}} = \frac{P_1}{S_1} = \cos(\varphi_1)$$

Donde I_{1-ef} y V_{1-ef} es la amplitud de la corriente y tensión eficaz de la componente fundamental.

Como los armónicos son señales cuyas frecuencias son múltiplos enteros de la fundamental y alteran la corriente, por tanto, para una tensión de entrada sinusoidal y las corrientes no sinusoidales de entrada I_{ef} (valor eficaz de la corriente de línea con todos los armónicos), tendremos el factor de potencia total:

$$fp_{total} = \frac{V_{ef} \cdot I_{1-ef} \cdot \cos(\varphi_1)}{V_{ef} \cdot I_{ef}} = \frac{I_{1-ef}}{I_{ef}} \cdot \cos(\varphi_1) = DH \cdot DF = fp_{dist} \cdot fp_1$$

También, el factor de distorsión puede ser expresada en relación a la distorsión armónicos total (THD), como se sabe, la distorsión armónica total es la relación entre la potencia que disiparía una resistencia a causa de la distorsión de las componentes de la forma de onda y la potencia que disiparía esa misma resistencia causa únicamente de la componente fundamental. Además, la THD nos da una referencia que nos permite realizar una

comparación entre diferentes formas de onda. Entonces la nueva expresión para la distorsión armónica:

$$DH = \sqrt{\frac{1}{1 + THD^2}}$$

con relación al factor de potencia fundamental, se tendría:

$$fp_{total} = \frac{1}{\sqrt{1 + THD^2}} \cdot \cos(\varphi_1)$$

Como una conclusión, un bajo factor de potencia también puede ser producto a un aumento de la corriente, y esta es producto de las distorsiones armónicas.

2.6.4 Análisis de impedancia en función de la frecuencia

La impedancia está conformada por una parte resistiva, inductiva y capacitiva, a excepción de la resistiva las demás están en relación de la frecuencia, sin la presencia de armónicos (cargas lineales) la frecuencia corresponde a la fundamental, pero en la realidad esta frecuencia varía debido a las cargas no lineales que distorsionan la forma de onda y por tanto la frecuencia de corriente se ven alteradas, y son múltiplos enteros de la fundamental. Entonces en presencia de armónicos las impedancias van a variar significativamente conforme estos aumenten si en caso no se tienen un control adecuado.

Cuando abordamos el tema de la resonancia, la gráfica describía detalladamente sobre lo que pasaba con las impedancias conforme variaba la frecuencia, si es inferior a la frecuencia de resonancia (f_0), la impedancia se comporta de manera capacitiva y si estamos por encima de la f_0 la impedancia se comporta de manera altamente inductiva, anulando casi por completo la carga resistiva, esta última parte es casi imposible que se de en la realidad, esto da origen a otros parámetros relacionados al factor de calidad o de selectividad (Q).

2.7 Normativas Internacionales

Diversos sectores de la industria sufrieron un impacto económico de gran magnitud por la presencia de perturbaciones armónicas en la red ocasionando paradas de máquinas. Ante esta perspectiva las diferentes organizaciones en conjunto con profesionales, investigadores de las diferentes empresas, institutos y universidades establecieron estándares para asegurar la integridad del sistema, con la finalidad que los usuarios y distribuidores de electricidad puedan aplicar las recomendaciones, pautas y limitaciones para garantizar la calidad energética en todo el sistema eléctrico. Es preciso mencionar que es obligación de las empresas, que prestan el servicio de distribución de la electricidad, proporcionar al usuario una tensión y corriente con la menor contaminación de armónicos, y al usuario se le exige que limite la magnitud de contaminación del sistema eléctrico.

Varios bloques económicos como Europa, Norteamérica, Asia, etc., tienen sus estándares o normativas regulatorias de armónicos de acuerdo a la estructuración de su red eléctrica. Entre las normativas internacionales muy aplicadas y que sirven de referencia para otros países son la IEEE y a la IEC. En el Perú se ha establecido en base a estas normativas existentes, las normativas que deben ser utilizadas para verificar la calidad eléctrica en la industria peruana por medio de la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos (NTCSE) en conjunto con el instituto nacional de calidad (INACAL) y la entidad reguladora OSINERMIN.

Se mencionarán algunas normativas de mayor utilidad para el análisis de la calidad energética.

2.7.1 IEC (Normativa Europea)

Una de las organizaciones líderes en preparación y publicaciones de estándares internacionales específicamente para todas las tecnologías eléctricas es la IEC (Comisión Electrotecnia Internacional); además es una de las tres organizaciones hermanas globales (IEC, ISO, ITU) que desarrollan estándares internacionales. Hay casos en que la IEC coopera con ISO (Organización Internacional de Normalización) o ITU (Unión Internacional de Telecomunicaciones) con el objetivo de asegurar que las Normas Internacionales encajen perfectamente y se complementen entre sí.

La mayoría de las normativas internacionales son establecidas por IEC. A continuación, se mencionará la categoría de la IEC “compatibilidad electromagnética” que está enfocado en temas de la calidad energética:

Tabla 14. Estructura de la Norma IEC 61000 - X

Corto plazo	Largo plazo
IEC 61000-1-x	Generalidades: esta parte se enfoca en aspectos generales como conceptos generales y específicos, terminologías, consideraciones generales (introducción, principios fundamentales).
IEC 61000-2-x	Entorno: está relacionada con la descripción del entorno (donde se realizará las mediciones con el instrumento), clasificación del medio y niveles de compatibilidad.
IEC 61000-3-x	Límites: definen los valores permisibles de emisión de perturbaciones que sean generados por las cargas. Establece límites de inmunidad (en la medida en que no están bajo la responsabilidad de los comités de producto)

Corto plazo	Largo plazo
IEC 61000-4-x	Técnicas de prueba y medición: se detallan técnicas para la medición con el instrumento de medición y las técnicas de prueba o ensayo.
IEC 61000-5-x	Pautas de instalación y mitigación: esta parte proporciona las pautas para la correcta conexión de las cargas dentro de las instalaciones para asegurar la compatibilidad electromagnética. Además, los métodos y utilización adecuados de los diferentes dispositivos de atenuación.
IEC 61000-6-x	Normas genéricas: Requisitos genéricos de emisión e inmunidad en diversos entornos

Fuente: AENOR (2006) Part 3-2: Limits. limits for harmonics current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase).

Cada parte se clasifica en subpartes de las cuales se selecciona los puntos de interés para evaluar las perturbaciones armónicas. Las partes enfocadas a los armónicos son la IEC 6000-2-x e IEC 6000-3-x, y las subpartes respectivas:

Tabla 15. Subpartes a evaluar

IEC 61000-2-2
IEC 61000-2-4
IEC 61000-3-2
IEC 61000-3-4

Fuente: Circutor (2018) Armónicos: Problemática actual y su solución.

- 61000-2-2:

Establece los niveles de compatibilidad para las perturbaciones conducidas de baja frecuencia y la transmisión de señales en las redes de suministro público en baja tensión. Se aplica en puntos de intersección común donde son conectadas las cargas. Proporciona los valores establecidos para el nivel de compatibilidad de las redes eléctricas de distribución pública de corriente alterna en baja tensión para frecuencias nominal de 60 Hz o 50 Hz y para tensión nominal máxima de 420 V (monofásico) y 690 V (trifásico) (AENOR, 2003).

- 61000-2-4:

Establece los niveles de compatibilidad para las perturbaciones conducidas de baja frecuencia en las redes de instalaciones industriales. Las cargas distribuidas en las instalaciones deben identificarse y caracterizarlas antes de evaluar las perturbaciones en el punto de acoplamiento. Los límites establecidos se mencionan en la Tabla 16. Según Circutor (2018), las clases corresponden a:

- ✓ Clase 1: instalación industrial prevista de cargas electrónicas sensibles
- ✓ Clase 2: instalación industrial con cargas en condiciones normales de operatividad para límites habituales.
- ✓ Clase 3: instalación industrial con cargas que degradan completamente la red eléctrica por presencia dispositivos convertidores, inversores, etc., utilizados en equipos de gran demanda de potencia.

Tabla 16. Límites según la clase, establecido por la Normativa IEC 61000 – 2 – 4

Orden Armónico h	Clase 1 $V_h \%$	Clase 2 $V_h \%$	Clase 3 $V_h \%$
2	2	2	3
3	3	5	6
4	1	1	1.5
5	3	6	8
6	0.5	0.5	1
7	3	5	7
8	0.5	0.5	1
9	1.5	1.5	2.5
10	0.5	0.5	1
> 10 mult. de 2	0.2	0.2	1
11	3	3.5	5
13	3	3	4.5
15	0.3	0.3	2
17	2	2	4
19	1.5	1.5	4
21	0.2	0.2	1.75
> 21 mult. de 3	0.2	0.2	1
23	1.5	1.5	3.5
25	1.5	1.5	3.5
> 25 no mult. de 2 ni 3	$0.2+12.5/h$	$0.2+12.5/h$	$5xv(11/h)$
[(THD)] _V	5 %	8 %	10 %

Fuente: Circutor (2018) Armónicos: Problemática actual y su solución.

• 61000-3-2:

Establece los límites para las emisiones de corriente armónica (para equipos o cargas con corriente de entrada ≤ 16 A por fase), dicho de otra manera, todo equipo debe estar diseñado por el fabricante para cumplir con las limitaciones de esta normativa con un

consumo de corriente de hasta 16 A por fase conectados a la red eléctrica en baja tensión con sistemas 220/380 V, 230/400 V y 240/415 V operando a 50 Hz o 60 Hz. Para sistemas inferiores a una tensión nominal 220 V (línea neutra) no está definido por la normativa (UNICAMP, 2018).

También aplica en equipos de soldadura de uso no profesional, pero con corriente de entrada nominal ≤ 16 A por fase; para los equipos de soldadura profesional queda excluido de esta normativa. En general, es posible que un equipo no permitido por esta norma se conecte a red eléctrica siempre y cuando exista una solicitud de permiso dentro del manual de instrucción del equipo, bajo esta condición se negocia con la empresa de suministro eléctrico, teniendo en cuenta las restricciones de instalación sujetas dentro de la normativa IEC 61000-3-12 (Academy of EMC, s.f.).

La normativa no aplica en los siguientes casos (para valores nominales):

- ✓ Elementos calefactores controlados simétricamente con una potencia ≤ 200 W
- ✓ Otros equipos atenuadores de control de fase independiente
- ✓ Equipos con potencia ≤ 75 W que no sean equipos de iluminación
- ✓ Equipos de iluminación con potencia ≤ 5 W
- ✓ Equipos profesionales con potencia total superiores > 1 kW

La normativa clasifica a los equipos en cuatro clases:

Clase A:

- ✓ Equipos trifásicos equilibrados.
- ✓ Aspiradoras.
- ✓ Electrodomésticos, excluyendo los equipos identificados como clase B, C o D.
- ✓ Herramientas, excepto herramientas portátiles.
- ✓ Luminarias profesionales para iluminación en eventos.
- ✓ Reguladores de luz para lámparas de incandescencia.
- ✓ Equipo de sonido.
- ✓ Atenuadores de control de fase independiente.
- ✓ Otros equipos, excepto los indicados en una de las siguientes clases.

Los límites que no deben exceder los armónicos de la corriente de entrada que están establecidos en la Tabla 16. Los límites para equipos de Clase A se muestran en la Tabla 17.

Tabla 17. Límites para equipos de clase A

Orden Armónico H	Corriente armónica máxima permisible Clase A
Armónicos pares	
3	2.3
5	1.14
7	0.77
9	0.4
11	0.33
13	0.21
$15 \leq n \leq 39$	$2.25/n$
Armónicos pares	
2	1.08
4	0.43
6	0.30
$8 \leq n \leq 40$	$1.84/n$

Fuente: UNICAMP (2018) Electromagnetic Compatibility (EMC) Low-Frequency Standards.

Clase B:

- ✓ Herramientas portátiles
- ✓ Equipos de soldadura por arco que no son equipos profesionales.

Los armónicos de corriente de entrada no deben exceder los valores indicados en la Tabla 18, donde los límites de la clase B son límites de la clase A multiplicado por 1.5.

Tabla 18. Límites para equipos de clase B

Orden Armónico H	Corriente armónica máxima permisible Clase B
Armónicos pares	
3	3.45
5	1.71
7	1.155
9	0.60
11	0.495
13	0.315
$15 \leq n \leq 39$	$3.375/n$
Armónicos pares	
2	1.62
4	0.645
6	0.45
$8 \leq n \leq 40$	$2.76/n$

Fuente: UNICAMP (2018) Electromagnetic Compatibility (EMC) Low-Frequency Standards.

Clase C:

✓ Equipos de iluminación: Clase de iluminación, se incluyen dispositivos de regulación con una potencia activa de entrada superior a 25 W. Además, estos tipos de equipos de iluminación incandescentes deben contener reguladores de luz.

✓ Para una potencia entre $5\text{ W} \leq P \leq 25\text{ W}$

Los armónicos de corriente de la clase C no pueden exceder los límites en cuanto a potencia de la clase D.

Las corrientes armónicas (I_h) quedan limitados respecto a la fundamental en porcentaje:

Tabla 19. Límites para equipos de clase C con $5\text{ W} \leq P \leq 25\text{ W}$

Orden de los armónicos	Límite máximo
2	5 %
3	35 %
5	25 %
7	30 %
9, 11	20 %
THD	70 %

Fuente: UNICAMP (2018) *Electromagnetic Compatibility (EMC) Low-Frequency Standards*.

✓ Para una potencia $P \geq 25\text{ W}$

Luminarias: aquellas que contienen lámparas incandescentes e incorporan atenuadores de control de fase con potencia a la entrada $P \geq 25\text{ W}$, la I_h de entrada no debe exceder los límites establecidos para los equipos de la clase A.

Otras luminarias: Las corrientes armónicas no deben sobrepasar los límites relativos indicados en la Tabla 20.

Tabla 20. Límites para equipos de clase C con $P \geq 25\text{ W}$

Orden de los armónicos N	Corriente armónica máxima admisible expresada en porcentaje de la corriente de entrada a la frecuencia fundamental
2	2
3	$30 \times \lambda^*$
5	10
7	7
9	5
$11 \leq n \leq 39$ (sólo armónicos impares)	3
λ^* es el factor de potencia del circuito	

Fuente: UNICAMP (2018) *Electromagnetic Compatibility (EMC) Low-Frequency Standards*.

Clase D: Equipos con potencia de entrada inferior a 600 W

- ✓ Monitores de PC y computadoras personales
- ✓ receptores de radio o TV
- ✓ Equipos con uno o varios variadores de velocidad (VDS) para el control de motores del compresor como refrigeradores y congeladores.

Las corrientes armónicas no deben sobrepasar los límites relativos indicados en la Tabla 20. Los límites para equipos de Clase A se muestran en la Tabla 21.

Tabla 21. Límites para equipos de clase D

Orden de los armónicos N	75 W < P < 600W mA/W	P > 600 w A
3	3.4	2.30
5	1.9	1.14
7	1.0	0.77
9	0.5	0.4
11	0.35	0.22
13	0.296	0.21
$15 \leq n \leq 391$	$3.85/n$	$2.25/n$
No se aplican límites para equipos con una potencia de entrada inferior a 75 W		

Fuente: UNICAMP (2018) *Electromagnetic Compatibility (EMC) Low-Frequency Standards*.

• 61000-3-4

Establece limitaciones para las emisiones de corriente armónica en redes de suministro en baja tensión para los equipos con corriente de entrada asignada superior a 16 A y hasta 75 A por fase. Es un complemento de la normativa IEC 61000-3-4, aplicado en sistemas 240 V(monofásico) y 600 V(trifásico) a 50 Hz o 60 Hz

Define los ciertos conceptos para evaluar la emisión de armónicos.

- ✓ Punto de acoplamiento común (PCC): punto común cercano al consumidor
- ✓ Distorsión armónica parcial ponderada (PWhD): este parámetro mide la distorsión ponderada de los armónicos de orden superior con el fin de garantizar que estos no afecten en magnitud siendo estos lo más pequeños posibles. Según la IEC, se obtiene de los armónicos de orden 14° a 40°.

$$PWhD = \sqrt{\sum_{n=14}^{40} \left(\frac{I_n}{I_1}\right)^2}$$

- ✓ Potencia cortocircuito (S_{sc}):

$$S_{sc} = \frac{V_{nomial}^2}{Z_{cc}(\text{impedancia en el PCC})}$$

✓ Relación de cortocircuito (R_{SC})

$$R_{SC} = \frac{S_{sc}}{3S_{equi}}$$

Equipo monofásico

$$R_{SC} = \frac{S_{sc}}{2S_{equi}}$$

Equipo interfase (fase – fase)

$$R_{SC} = \frac{S_{sc}}{3S_{equi}}$$

Equipo trifásico

Donde S_{equi} es la potencia aparente nominal.

El objetivo de esta normativa es brindar los procedimientos y restricciones para la conexión de equipos emisores de armónicos en la red eléctrica y se dividen en tres etapas:

- ✓ Etapa 1: se cauteriza por una conexión simplificada es decir que si el equipo tiene bajas emisiones de armónicos que garantice la relación de cortocircuito $R_{SC} \geq 33$, entonces pueden conectarse en cualquier punto de la red.
- ✓ Etapa 2: se caracteriza por una conexión basada en datos de red y equipo, equipos con niveles de armónicos significativos que incumple la Etapa 1, pero pueden ser aceptados si para la relación de cortocircuito se cumple $R_{SC} \geq 33$
- ✓ Etapa 03: si no se cumple la Etapa 2 o la corriente de entrada supera los 75 A, la conexión de la carga a la red se da por un acuerdo en relación a la potencia contratada entre el consumidor y la entidad suministradora. Donde el consumidor garantiza mantener los límites establecidos por medio del uso de dispositivos atenuadores de corriente armónicas.

Los límites establecidos para las etapas se mencionan en la Tabla 22 y Tabla 23.

Tabla 22. Limitaciones para la Etapa 1

Etapa 1: valores de emisión de corriente para una conexión simplificada de los equipos. $S_{equi} \leq S_{sc}/33$	
Orden de Armónico N	Corriente armónica permisible $I_n/I_1\%$
3	21.6
5	10.7
7	7.2
9	3.8
11	3.1
13	2

Orden de Armónico N	Corriente armónica permisible $I_n/I_1\%$
15	0.7
17	1.2
19	1.1
21	≤ 0.6
23	0.9
25	0.8
27	≤ 0.6
29	0.7
31	0.7
≥ 33	≤ 0.6
Pares	≤ 0.6

I_1 : Corriente fundamental.

I_n : Componente de la corriente armónica.

Fuente: UNICAMP (2018) Electromagnetic Compatibility (EMC) Low-Frequency Standards.

Tabla 23. Limitaciones para la Etapa 2

Etapa 2: valores de emisión de corriente para equipos monofásicos, interfásicos y trifásicos desequilibrados.

Mínimo R_{SC}	Factores de distorsión de corriente armónica admisibles.		Corriente armónica individual admisible $I_n/I_1\%$					
	THD	PWHD	I_3	I_5	I_7	I_9	I_{11}	I_{13}
66	25	25	23	11	8	6	5	4
120	29	29	25	12	10	7	6	5
175	33	33	29	14	11	8	7	6
250	39	39	34	18	12	10	8	7
350	46	46	40	25	15	12	9	8
450	51	51	40	30	20	14	12	10
600	57	57	40	30	20	14	12	10

Nota 01: El valor relativo de los armónicos pares no debe exceder de $16/n\%$.

Nota 02: Se permite la interpolación lineal entre valores R_{SC} sucesivos.

Nota 03: En el caso de equipos trifásicos desequilibrados, estos valores se aplican a cada fase.

I_1 : Corriente fundamental.

I_n : Componente de la corriente armónica.

Fuente: UNICAMP (2018) Electromagnetic Compatibility (EMC) Low-Frequency Standards.

- 61000-3-6

Establece la evaluación de los límites de emisión para las cargas perturbadoras conectadas a las redes de media (MT) y alta tensión (AT). Cargas de grandes consumos de potencia que en conjunto con las cargas de otros usuarios pueden generar armónicos significativos que requieren ser evaluadas en base a los límites establecidos para conocer el impacto sobre la red eléctrica y según los resultados se analiza si son o no incorporadas en la red eléctrica, esto se logra a través de procedimientos que son propuestos por la IEC 61000-3-6.

La normativa proporciona los niveles de compatibilidad y planificación de tensiones armónicas: los niveles de compatibilidad están conformados por referencias que limitan las emisiones e inmunidad de todos los equipos con el objetivo de resguardar la compatibilidad electromagnética de todo el sistema (red eléctrica-carga/equipo); la compatibilidad generalmente está basada en niveles de 95 % de probabilidad, es decir que un 95 % de probabilidad que las perturbaciones deben ser inferiores al límite de emisión fijado por los niveles. El nivel de planificación está relacionado con planificar el impacto de todas las cargas conectadas sobre el sistema de suministro, estos son especificados por las empresas de suministro eléctrico para medir de manera interna la calidad en sus redes en los diferentes niveles de tensión.

Los niveles de tensión del sistema quedan definidos de la siguiente manera:

Tabla 24. Niveles de tensión

Niveles	Rangos
Baja tensión (BT)	$V_n \leq 1kV$
Media tensión (MT)	$1kV \leq V_n \leq 35kV$
Alta tensión (AT)	$35kV \leq V_n \leq 230kV$
Extra alta tensión (EAT)	$230kV < V_n$

Fuente: De Campos (2018) Normas IEEE y IEC sobre regulaciones en THD para sistemas de baja y media tensión. ITESM.

Los límites de la tensión armónica tanto para los niveles de compatibilidad como planificación, se visualizan en la Tabla 25.

Tabla 25. Límites de la tensión armónica para nivel de compatibilidad planificación

Orden de los armónicos (h)	Baja y media tensión		Alta tensión y extra alta tensión
	Nivel de compatibilidad	Valores indicativos de niveles de planificación	Valor e indicativos de niveles de planificación
Armónicos impares no múltiplo de 3			
5	6	5	2
7	5	4	2
11	3.5	3	1.5
13	3	2.5	1.5
17	2	1.6	1
19	1.5	1.2	1
23	1.5	1.2	0.7
25	1.5	1.2	0.7
>25	$0.2+1.3 \times 25/n$	$0.2+0.5 \times 25/n$	$0.2+0.5 \times 25/n$
Armónicos impares múltiplo de 3			
3	5	4	2
9	1.5	1.2	1
15	0.3	0.3	0.3
21	0.2	0.2	0.2
>21	0.2	0.2	0.2
Armónicos pares			
2	2	1.6	1.5
4	1	1	1
6	0.5	0.5	0.5
8	0.5	0.4	0.4
10	0.5	0.4	0.4
12	0.2	0.2	0.2
>12	0.2	0.2	0.2
Distorsión armónica total THD	8	6.5	3

Fuente: De Campos (2018) Normas IEEE y IEC sobre regulaciones en THD para sistemas de baja y media tensión. ITESM.

2.7.2 Normativa IEEE (normativa norteamericana)

La IEEE (Instituto de Ingeniera Eléctrica y Electrónica) a igual que la IEC están enfocados en las normativas internacionales siendo la IEEE más estricta que la IEC en cuanto análisis de perturbaciones armónicos; con respecto a la “compatibilidad electromagnética” la IEEE ha establecido normativas para la estandarización en Norteamérica y Sudamérica.

2.7.2.1 IEEE-519. La IEEE ha establecido la norma IEEE 519 “recomendaciones prácticas y requerimientos para el control de armónicos en sistemas eléctricos de potencia”, específicamente para el análisis de la calidad de potencia en base a las limitaciones de los valores deseables de armónicos. Esta normativa aplica criterios una para la empresa suministradora (encargada de brindar una tensión de calidad) y otra para los usuarios (encargados de no distorsionar la tensión); además los límites son más estrictos que la IEC en voltaje de nivel superior, cargas grandes, sistemas débiles, y en los armónicos de orden superior.

Para la medición define el concepto de punto de acoplamiento común (PCC), es un punto común de intersección y distribución eléctrica para las cargas lineales y no lineales de las diferentes instalaciones y la vez conectados a la una subestación que suministra la energía a la red- y es en estos puntos donde se realizan las mediciones (establecen los límites individuales y totales de distorsión de voltaje) y las maniobras principales. La medición se hace en el lado primario del transformador de media tensión, pero es más complicado medir en media tensión (instrumento de medición que no cuenta con rangos altos) por eso comúnmente se realizan en el lado secundario o baja tensión del transformador y por medio de la relación de transformación del transformador se puede realizar el análisis en alta tensión.

La medición se realiza independientemente de las propiedades del transformador y la ubicación de los medidores. Ante cualquier inconveniente entre usuarios y la suministradora se recurre a mediciones y cálculos con el objetivo de aclarar posibles injusticias.

Límites de distorsión en voltaje

Estos límites se aplican a las empresas de suministro eléctrico, las mediciones se hacen en un punto de acoplamiento común (PCC) donde se medirán los índices de armónicos significativos, recordemos que las mediciones se realizan en baja tensión del transformador.

Los límites de distorsión armónica de voltaje recomendados para tensión de 1 kV a 69 kV no deben superara el 5 %, para baja tensión inferior a 1kV puede superar el 10 %, se considera inaceptable. En la siguiente Tabla 26, se muestran los valores en porcentaje para los límites de tensión para los armónicos individuales y totales. También podemos observar que a medida que aumenta el nivel de voltaje los límites de distorsión disminuyen.

Tabla 26. Límites de distorsión de voltaje según IEEE 519

Voltaje en el punto de acoplamiento común (PCC)	Distorsión individual de tensión (%)	Distorsión total de tensión THD (%)
$V \leq 69 \text{ kV}$	3.0	5.0
$69 \text{ kV} < V \leq 160 \text{ kV}$	1.5	2.5
$160 \text{ kV} < V$	1.0	1.5

Nota: los sistemas de alto voltaje pueden llegar hasta 2.0 % en THD cuando lo que causa es un alto voltaje terminal DC, el cual podría ser atenuado.

Fuente: Blooming & Carnovale (2006) Application of IEEE Std 519 - 1992 Harmonic Limits.

Límites de distorsión en corriente

Estos límites se aplican al usuario o cliente receptor de la electricidad y son responsables de inyectar corrientes armónicas excesivos a la red; al igual que el caso anterior, las mediciones se hacen en un punto de acoplamiento común (PCC).

La normativa no emplea terminologías comunes utilizados en la IEC, en vez de utilizar distorsión armónica total (THD) se emplea la demanda de distorsión total (TDD), es decir -la THD suele tomar como referencia la distorsión de la tensión, pero también es aplicable a la corriente y utiliza el valor de rms total del contenido en lugar del contenido de la fundamental mientras que la TDD es exclusivo y solo se aplica a la distorsión de la corriente. También en vez de emplear la corriente fundamental (I_1) se utiliza la corriente de demanda máxima (I_L), y esta es la distorsión de la corriente armónica frente a la demanda máxima del sistema eléctrico.

Los límites se determinan en base a la relación entre la corriente de cortocircuito y la demanda máxima de corriente y esta relación nos proporciona una cierta visión de la impedancia de la fuente eléctrica y su capacidad para soportar armónicos en la medida que aumente la corriente de cortocircuito en comparación con la corriente de línea, es poco probable que nuestro circuito se vea afectado por la presencia de armónicos, es decir a mayor I_{sc} menor es la distorsión de tensión.

Tabla 27. Límites de corriente armónica en el PCC

Límites de corriente armónica para carga no lineal en el punto de acoplamiento común con otras cargas, para voltajes entre 120V-69 kV						
Máxima distorsión armónica impar de la corriente, en % del armónico fundamental						
I_{sc}/I_L	< 11	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$35 \leq n$	TDD
$< 20^*$	4	2	1.5	0.6	0.3	5
$20 < 50$	7	3.5	2.5	1	0.5	8

I_{SC}/I_L	< 11	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$35 \leq n$	TDD
$50 < 100$	10	4.5	4	1.5	0.7	12
$100 < 1000$	12	5.5	5	2	1	15
> 1000	15	7	6	2.5	1.4	20

Nota: Los armónicos pares se limitan al 25% de los límites de los armónicos impares mostrados anteriormente

*Todo equipo de generación se limita a estos valores independientes del valor de I_{SC}/I_L que presente.

I_{SC} : Corriente máxima de cortocircuito en el PCC.

I_L : Corriente de demanda máxima de carga (a frecuencia fundamental) en el PCC.

TDD : Distorsión total de la demanda en % de la demanda máxima.

I_{SC}/I_L : Esta relación muestra el tamaño relativo de la carga en comparación con el sistema de utilidad y esta relación en el primario determina los límites actuales.

Fuente: Halpin (2005) Comparación de los estándares armónicos IEEE e IEC.

La desventaja de utilizar la IEEE 519, esta solo aplicado a analizar el contenido total de la distorsión armónicos en el PCC y no permite evaluar de manera individual.

2.7.3 Normativa técnica peruana (NTP)

El Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minas (OSINERGMIN) planteo la “normativa técnica de calidad de los servicios eléctricos” en el Perú, con el objetivo de establecer los niveles permisibles referente a la calidad del servicio eléctrico y las obligaciones de las empresas suministradoras de electricidad. Actualmente hay dos grupos de normativas, la primera está referida a las normativas técnicas de calidad de los servicios eléctricos (NTCSE) y la segunda, a normativas técnicas de calidad de los servicios eléctricos rurales (NTCSER),

Antes de pasar a estas normativas, tenemos que mencionar los sectores de distribución típica (STD), las cuales están establecidas de la siguiente manera:

Tabla 28. Sectores de Distribución Típico

Sectores de Distribución Típico	Descripción
1	Urbano de Alta Densidad:
2	Urbano de Media Densidad:
3	Urbano de Baja Densidad:
1	Urbano de Alta Densidad:
2	Urbano de Media Densidad:

Sectores de Distribución Típico	Descripción
3	Urbano de Baja Densidad:
1	Urbano de Alta Densidad:
2	Urbano de Media Densidad:

Fuente: OSINERGMIN (2012) R.D N° 154-2012-EM/DGE.

A continuación, se analizará los contenidos de las Normas Técnicas de la Calidad de Servicio Eléctrico.

2.7.3.1 NTCSE. Fue publicada en 1997, y tiene como objetivo establecer los niveles mínimos de calidad de los servicios eléctricos, incluido el alumbrado público, y las obligaciones de las empresas de electricidad y los Clientes que operan bajo el régimen de la Ley de Concesiones Eléctricas, Decreto Ley N° 25844. La NTCSE sufrió varias modificaciones desde su creación como los casos para la disminución de las penalidades, flexibilizar los rangos permisibles, sustentados por las normativas IEC, y aplicar gradualmente las compensaciones por mal alumbrado público, calidad de suministro y calidad de producto. Tal es el caso del artículo 1° del D. S. N°009-99-EM publicado el 1999.04.11 que ha sido modificado mediante el D.S. N°004-2006-EM, publicado el 2006.01.06, y dispone lo siguiente: “Suspender la aplicación de la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos” para:

- Todas las localidades correspondientes a los sistemas eléctricos calificados por la Autoridad como Sectores de Distribución Típicos 4 o 5
- Los Sistemas Aislados Menores. Considerar Sistema Aislado Menor a todo sistema eléctrico cuya potencia instalada, en generación, no supere los 5 MW.
- Las localidades correspondientes a los sistemas eléctricos calificados por la Autoridad como Sectores de Distribución Típicos 2 o 3, cuyo promedio de las dos más altas demandas registradas en el periodo de control de la calidad del suministro no exceda los 500 kW.

Considerando lo anterior. En cuanto al control de la calidad de los servicios eléctricos, las normativas abordan 4 puntos:

- Calidad de Producto
- Calidad de Suministro
- Calidad de Servicio Comercial
- Calidad de Alumbrado Público

Siendo de interés la Calidad de Producto, verificaremos los aspectos establecidos en este punto. A continuación, se muestra la Tabla 29:

Tabla 29. Descripción general de la normativa NTCSE

	Evalúa	Indicador	Tolerancia		Sanciones / compensación
			Nivel de tensión	% V nominal	
Aspecto: Calidad de producto	Tensión	$\Delta V_K(\%)$ (% de desviación de la tensión nominal)	BT	$\pm 5 \% V_n$	Pago de compensación
			AT	$\pm 5 \% V_n$	
	Frecuencia	$\Delta f_K(\%)$ (% de desviación de la frecuencia nominal)	Indicadores	Tolerancia	Pago de compensación
			Variación sostenida ($\Delta f_K(\%)$)	$\pm 0.6\%$	
			Variación súbita (VSF)	$\pm 1 \text{ Hz}$	
			Variaciones diarias (IVDF)	$\pm 600 \text{ ciclos}$	
	Perturbaciones	P_{st} (Índice de severidad por Flicker)	$P_{st} \leq 1$		No aplica
	Perturbaciones	THD (tensiones armónicas)	NTCSE		No aplica

Fuente: Salvador G. (2014) Calidad del Servicio Eléctrico en la Región Cajamarca.

Calidad de producto

Interesa más el primer aspecto que es calidad de producto que involucra a la tensión, perturbaciones y frecuencia, para las perturbaciones los límites de la distorsión armónica individual y total de tensión (THDv) se muestran en la Tabla 30

Tabla 30. Límite perturbaciones armónicas establecidas por NTCSE

Orden de los armónicos o THD	TOLERANCIA $ V_h $ o $ THD $ (% con respecto a la tensión nominal del punto de medición)	
	Alta y Extra Alta Tensión	Baja y Media Tensión
	Armónicas impares no múltiplo de 3	
5	2.0	6.0
7	2.0	5.0
11	1.5	3.5
13	1.5	3.0

Armónicas impares no múltiplo de 3		
17	1.0	2.0
19	1.0	1.5
23	0.7	1.5
25	0.7	1.5
Mayores de 25	$0.1+2.5/n$	$0.2+12.5/n$
Armónicas impares múltiplo de 3.		
3	1.5	5.0
9	1.0	1.5
15	0.3	0.3
21	0.2	0.2
Mayores de 21	0.2	0.2
Armónicas pares		
2	2.0	2.0
4	1.0	1.0
6	0.5	0.5
8	0.5	0.5
10	0.5	0.5
12	0.2	0.2
Mayores de 12	0.2	0.2
Distorsión armónica total THD	3	8
Se entiende que para tensiones de media y baja tensión son aquellas con tensiones menor o igual a 60 kV, y para alta y muy alta tensión con tensiones mayor a 60 kV		

Fuente: MINEM (1997) Normas Técnicas de los Servicios Eléctricos Decreto Supremo.

2.7.3.2 NTCSEER. Estas normativas van aplicado a todo el sistema eléctrico rural (SER), sectores de distribución típicos (STD) 4, 5 y 6. Respecto a las normativas se abordan los aspectos: Calidad de tensión y calidad de suministro. En la Tabla 31 se muestran los detalles:

Tabla 31. Límite perturbaciones armónicas establecida por NTCSEER

Aspecto:	Evalúa	Indicador	Tolerancia		Sanciones / compensación
			Nivel de tensión	% V nominal Urbano	
				$\pm 5 \% V_n$	Pago de compensación
				$\pm 5 \% V_n$	
Calidad de producto	Calidad de Tensión	$\Delta V_K(\%)$ (% de desviación de la tensión nominal)	BT		
			AT		

Fuente: Salvador G. (2014) Calidad del Servicio Eléctrico en la Región Cajamarca.

Capítulo 3

Medios de solución para los armónicos

Con la finalidad de evitar el funcionamiento anormal de los equipos eléctricos producto de las perturbaciones armónicas, se desarrollaron medios de mitigación de armónicos para reducir el impacto tomando como referencia las normativas IEC e IEEE.

Hay dos formas, la primera es aislando el equipo de los armónicos de la red eléctrica principalmente de las tensiones armónicas en el punto de acoplamiento común, y el segundo consiste en limitar a las cargas generadoras de armónicos a través de dispositivos. En este trabajo de investigación nos enfocaremos en este segundo caso en una instalación ya hecha.

3.1 Atenuación elemental de perturbaciones armónicas

Cuando la generación de armónicos esta alrededor de los límites permitidos se emplean métodos de agrupación de cargas lineales de las no lineales con el objetivo de reducir o mantener la magnitud de los armónicos inferior a los límites de acuerdo a las normativas estudiadas. En la industria, normalmente las cargas se instalan aguas abajo del devanado secundario del transformador de potencia. La distorsión armónica de corriente y la impedancia de línea están relacionados directamente con la tensión, en base a esta teoría existen algunos métodos de agrupación en los sistemas eléctricos. A continuación, mencionamos tres de estos métodos de agrupación:

- Las cargas perturbadoras de armónicos se deben procurar ubicarse lo más alejado de las cargas sensibles y lo más próximo al transformador, de tal manera que la impedancia de línea de la carga no lineal sea menor respecto de la carga sensible es decir $Z_1 < Z_2$.
- En los sistemas eléctricos con varios subsistemas evitar colocar las cargas no lineales en el ramal donde están instalados las cargas lineales o sensibles porque las afectaría directamente. Y a si aumentar las posibilidades de neutralizar y reducir los armónicos.
- Otra de las formas de obtener una mejora sobre los armónicos, es mediante la separación de las cargas lineales de las no lineales pero cada una conectada a su respectiva subestación o transformadores de distribución ubicados en la industria (ver ejemplo), es decir con transformadores independientes. El inconveniente de esta organización es el aumento en el coste por implementación del transformador adicional.

En una industria las instalaciones están distribuidas por zonas y cada una cuenta con un transformador de baja tensión dependiendo la potencia instalada en cada zona.

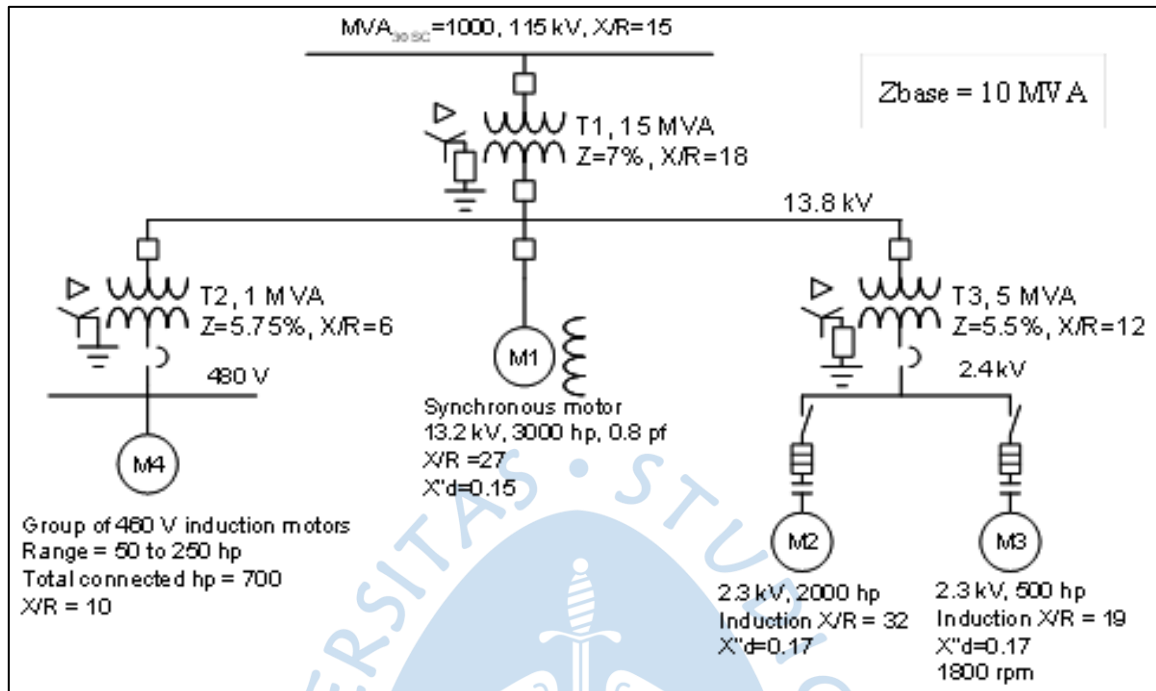


Figura 38. Distribución de cargas según las potencias

Fuente: Grainger & Stevenson (1994) Power System Analysis.

No obstante, en los sistemas eléctricos no es muy común encontrar cargas separadas entre lineales y no lineales, la mayoría de los sistemas agrupan ambas cargas siendo la predominante las no lineales. En la Figura 38, se muestran cargas no lineales separadas en diferentes sistemas porque son de alto consumo y principales generadores de perturbaciones armónicas de magnitud considerable. En estos casos, para mitigar los armónicos del sistema se emplean dispositivos externos.

3.2 Atenuación mediante Reactancia de línea para armónicos impares en motores

Una de las formas de mitigar los armónicos impares y las sobretensiones generadas por las cargas no lineales, es a través los reactores de línea (que consisten en unas bobinas o inductores conectados en serie a los conductores del sistema trifásico) que están diseñados para utilizarse como filtros de entrada o salida en unidades de frecuencia variable en corriente alterna PWM, principalmente en los variadores de velocidad que controlan los equipos rotativos y así evitando fallas, mal funcionamiento de los equipos conectados al sistema eléctrico tal es el caso del disparo de los relés de protección sin razón alguna, también se usan en los inversores. Normalmente se conectan en serie con la carga no lineal por medio del variador de velocidad para proteger de los armónicos procedentes de otras instalaciones y si se instalan en el lado del motor actúan como atenuadores de los armónicos de frecuencia producto de las conmutaciones del variador.

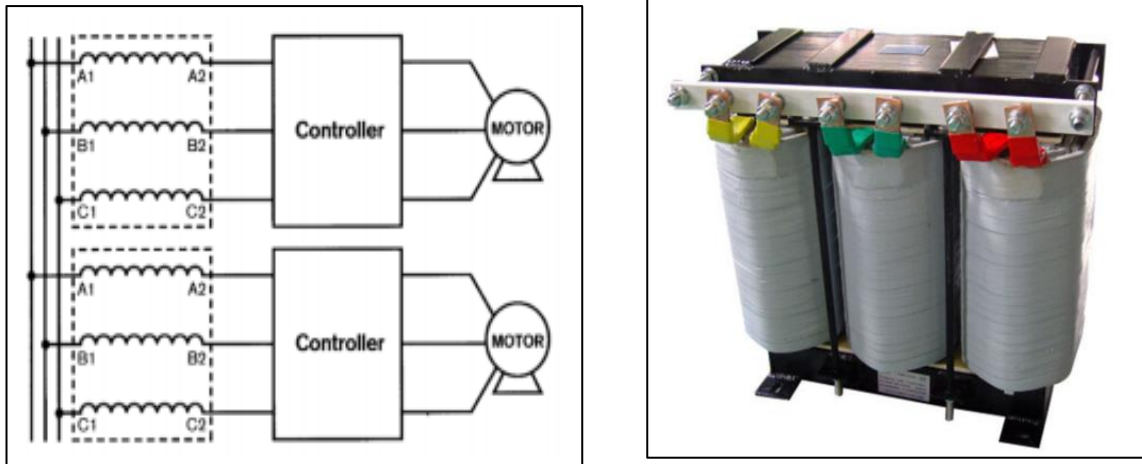


Figura 39. Configuración de reactores de línea

Nota. MTE Corporation (2012) Reactor RLW

Los efectos positivos de los reactores:

- Aumenta la durabilidad funcional del motor
- Reducción de armónicos de línea de entre 40-50 % a un 20 %. (Circutor, 2020)
- Reducción del aumento de la temperatura
- Reducción de ruido de los motores

Se obtiene beneficios para la mejora del rendimiento y protección de los rectificadores en las fuentes de alimentación. Además, no es difícil de instalar y en cuanto a costos, es muy económico. No obstante, en sistemas con armónicos de rango elevados la reducción es mínima, normalmente se aplica en sistemas donde los armónicos están próximo a los límites permitidos.

3.3 Reactancia antiarmónica para banco de condensadores

Las corrientes armónicas de altas frecuencias son conducidas hacia los bancos de condensadores provocando disminución de su impedancia, pero a la vez amplifican los armónicos, los cuales pueden ser muy perjudiciales para estos e incluso pueden llegar a destruirlas debido al sobrecalentamiento. Para evitar estos hechos se recomienda colocar impedancias antiarmónicas o reactores de línea RL conectadas en serie al condensador de tal modo que aumenta la impedancia del condensador y reduce la contaminación armónica en la instalación eléctrica. Los bancos de condensadores son indispensables para compensar potencia reactiva a las cargas que contengan componente inductiva como los motores eléctricos. Es indispensable realizar un buen estudio de los armónicos presentes en la red antes de instalar los capacitores. También se recomienda realizar la medición periódica de los niveles de armónicos por si hay que sustituir las reactancias.

3.4 Atenuación mediante uso de equipos de filtrado

Las cargas no lineales de gran demanda ocasionan más daños al sistema eléctrico no solo por su alta demanda sino también por los armónicos, entonces se recurre a equipos atenuadores de perturbaciones armónicas como filtros.

Las altas perturbaciones de corriente armónica por encima de los límites establecidos requieren un análisis de la red eléctrica para detectar los puntos donde se están generando las perturbaciones y esto requiere una investigación para mitigarlas. Actualmente existen dos tipos de filtros muy aplicados mayormente en la industria y que han tenido avances significativos en cuanto al desarrollo tecnológico como son los filtros pasivos y activos.

3.4.1 Filtro pasivo

Los filtros pasivos tienen como objetivo desviar las corrientes armónicas de la carga por los filtros para reducir la cantidad de corriente armónica y así evitar la circulación de estos sobre el sistema de potencia. Es sintonizado de acuerdo a cada frecuencia del armónico que se requiere filtrar o un rango determinado. Para el caso de filtros sintonizados es aplicable para filtrar cada uno de los armónicos, generalmente de orden 3, 5 y 7; mientras que los filtros de banda o pasa-altas son utilizados para un rango de armónicos que se caracterizan por una corriente muy pequeña, es decir, aplicado para armónicos superiores al orden 11.

En cuanto a la funcionalidad, la frecuencia de resonancia del conjunto de circuitos del filtro está próxima a los armónicos existentes, inmediatamente la impedancia disminuye permitiendo la circulación de la corriente por su ramal.

Estos filtros son muy utilizados en la industria por su bajo costo y fácil instalación, aunque hay que algunos problemas de resonancia si es que no se hace un buen diseño.

Estos filtros son aplicados cuando se requiere los siguientes puntos:

- ✓ Compensación de potencia reactiva. Instalaciones donde se requiere una mejora en el factor de potencia.
- ✓ Aplicable a industrias con instalaciones generadoras de armónicos de potencia total superior a 200 KVA.
- ✓ Para la reducción de la tasa de distorsiones de armónicos de tensión para evitar efectos de perturbación en las cargas sensibles.
- ✓ Reducción de la tasa de distorsión de armónicos de corriente para evitar sobrecargas
- ✓ Limitar la propagación de corriente armónica para mejorar la calidad de la potencia

Para ello hay que tener en cuenta alguna de las consideraciones importantes para el diseño del filtro, tales como:

- ✓ Condiciones de contingencia del filtro de armónicas

- ✓ Condiciones normales de operación del filtro de armónicas: todo filtro no siempre se sintoniza a los valores exactos de acuerdo al cálculo matemático realizado porque todo equipo siempre sufre deterioro de sus componentes debido a muchos factores externos como internos y esto altera el valor del filtro, entre los factores principales a tener en cuenta para funcionamiento del filtro: las variaciones de temperatura ambiente, fallas en unidades capacitivas, tolerancia de los componentes.
- ✓ Características de un filtro sintonizado.
- ✓ Condiciones de contingencia del sistema incluyendo armónicas.
- ✓ Estudio de la interacción entre el sistema y la carga: la relación de cortocircuito, las caídas de tensión.
- ✓ Condiciones normales de operación del sistema incluyendo armónicas: es necesario evaluar las condiciones en la que se encuentra nuestro sistema eléctrico para que nuestro filtro actúe de manera correcta sin problema. Algunas de los parámetros a evaluar para un óptimo filtrado y entrega de potencia reactiva: variación de frecuencia del sistema, todas las corrientes y tensiones armónicas, desbalance de tensión en el sistema, variación de tensión del sistema, configuraciones del sistema de potencia, condiciones de carga, entre otros.
- ✓ Requerimientos de potencia reactiva y máximas magnitudes de corrientes armónicas existentes: los filtros deben ser capaces de no solo filtrar armónicos sino de poder entregar al mismo tiempo potencia reactiva requerida por el sistema o la carga. Por tanto, los filtros están constituidos por componentes como capacitores, reactores y en algunos casos resistencias.
- ✓ Límites permisibles de corrientes y tensiones armónicas: esto se analiza de acuerdo a las normativas existentes como la IEEE e IEC.
- ✓ Configuración del filtro en sistemas trifásicos: los filtros pueden ser tan efectivos colocándolos ya sea en cualquiera de las dos formas delta y/o estrella: en estrella no hay una buena mejora del factor de potencia debido a la reducción de la capacidad de operación de los condensadores porque la distribución de la potencia se ve reducida a 3 veces menor; en delta no se puede sintonizar para armónicos de secuencia cero debido a la falta de conexión de los condensadores al neutro del sistema.

A continuación, se muestran las configuraciones más usuales:

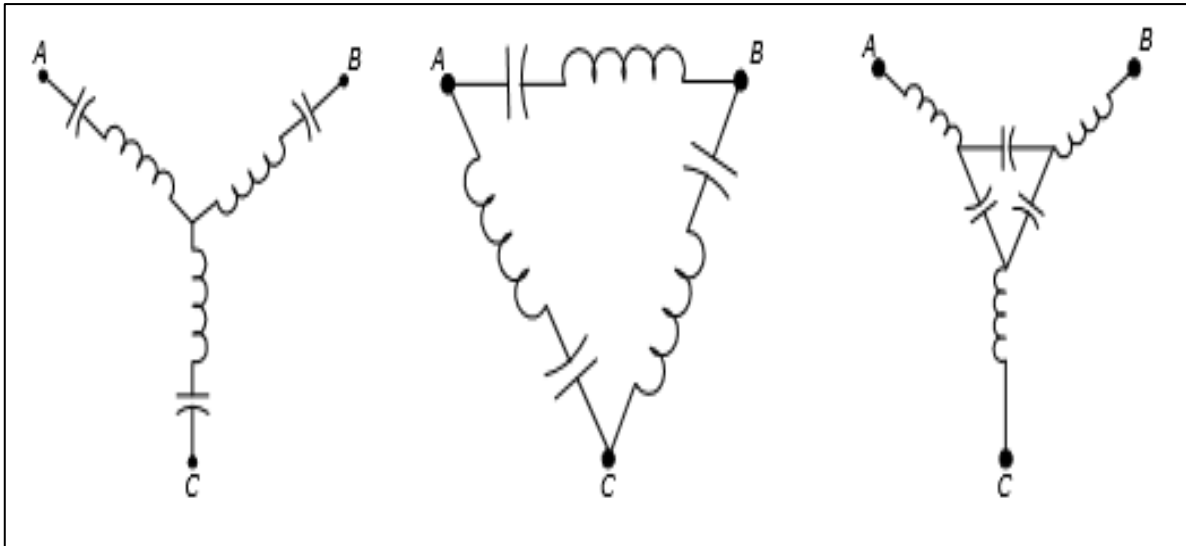


Figura 40. Configuraciones del filtro

Fuente: Ramírez Castaño & Cano Plata (2006) Calidad del Servicio de Energía Eléctrica.

✓ Ubicación del filtro. Pueden estar conectados a cada carga o en el PCC para varias cargas conectadas, todo dependerá de la magnitud del efecto de las corrientes armónicas y de la potencia reactiva.

Para el caso de sistemas de media y alta tensión, los filtros son instalados para tensiones superiores a 1 kV, tanto los filtros de armónicos como el banco de condensadores están expuestos a muchos esfuerzos similares, sin embargo, son los filtros los que están propensos a estos esfuerzos.

Filtros pasivos: serie

Este filtro tiene como objetivo evitar el paso de armónicos de cierto grado en particular, que va desde la carga generadora de armónicos hacia otras cargas conectadas en el mismo ramal o hacia el sistema de potencia, en este caso se tiene una alta impedancia que esta sintonizada a una frecuencia determinada, la impedancia está constituida por un circuito LC (inductivo capacitivo) que actúan como un tapón, es decir los armónicos que se quieran filtrar solo circularan entre la carga y el filtro evitando la circulación de los armónicos hacia otras instalaciones. Sin embargo, puede dañar el filtro por sobrecalentamiento o saturación lo que implica mantenimientos periódicos y por ende un mayor costo.

Filtros pasivos: paralelo

A diferencia de los filtros pasivos serie, los filtros en paralelo actúan como baja impedancia para los armónicos que se quieran filtrar, es decir el filtro actúa como un sumidero; son más económicos y efectivo que los filtros en serie. Solo transportan las frecuencias para lo que fue diseñado y proporcionan la potencia reactiva que demande el sistema de potencia. Los filtros más demandados son los sintonizados y pasa-alta: el primero son sintonizado a la frecuencia que se quiere filtrar es decir la componente capacitiva e

inductiva son iguales, por tanto, se tienen una impedancia mínima, absorbiendo gran parte las corrientes armónicas; y el segundo, también denominado filtros amortiguadores, es utilizado para eliminar frecuencias que no son fijas, pero son muy elevadas.

Al momento de instalar los bancos de condensadores en un esquema de filtro, es recomendable no sintonizarlo al valor exacto de la frecuencia armónica a filtrar porque produce una sobrecarga en los bancos de condensadores, además es por los bancos donde circulan gran parte de los armónicos. En consecuencia, hay que sintonizarlo por debajo de la frecuencia a filtrar, así se evita la quema de los fusibles del banco de condensadores.

En general, los filtros pasivos pueden ser necesario en las instalaciones, no obstante, pueden provocar problemas inesperados, entre ellos tenemos:

- ✓ Instalaciones que no tienen problemas de reactivos, pero conectan filtros para limitar la inyección de armónicos pueden tener problemas de sobretensiones permanentes debido a los reactivos generados por los filtros.
- ✓ Atraen corrientes armónicas presentes en la red hacia el sistema del usuario.
- ✓ Se pueden presentar resonancias entre la fuente y el filtro.
- ✓ La sintonía del filtro está sujeta a cambios.

En varias ocasiones, pueden encontrarse soluciones mucho más simples para evitar los problemas de resonancia armónica, de tal manera que no se generen mayores problemas, entre ellas tenemos:

- ✓ Instalar los bancos de condensadores a mayores niveles de tensión, donde la capacidad de corto circuito es más alta, forzando a que las resonancias ocurran a frecuencias elevadas donde las amplitudes armónicas son pequeñas.
- ✓ Procurar utilizar circuitos o transformadores independientes para las cargas no lineales
- ✓ Modificar distancias
- ✓ Sobredimensionar el banco de condensadores para desplazar la frecuencia de resonancia a frecuencias alejadas de los armónicos presentes
- ✓ Reubicar bancos de condensadores
- ✓ Una juiciosa escogencia del banco de condensadores para mejorar el factor de potencia puede, en combinación con elementos existentes en el sistema, actuar como un filtro sin la adición de más elementos.

3.4.1.1 Diseño de filtros de armónicos pasivos. Diseñar filtros pasivos contempla una gran responsabilidad por los costos que puede ocasionar en las instalaciones por paradas de planta, entre las consideraciones más importante está el estudio cuidadoso de todas las cargas

conectadas al sistema, análisis de calidad eléctrica y la impedancia de la red. Entre las otras consideraciones a tener en cuenta:

Capacidad del filtro. Potencia reactiva

Los filtros deben de proporcionar la potencia reactiva para mejorar el factor de potencia y para controlar la tensión. También, en base a estos se determina la capacidad efectiva del filtro.

Sintonía del filtro

La sintonía tiene como objetivo reducir la corriente y tensión armónica en el sistema eléctrico. La sintonización se realizará en base al de menor orden que en este caso es la menor siendo esa la más significativa, es decir tenemos dos frecuencias de orden 5 y 7, será suficiente con sintonizar el de menor orden para reducir los demás armónicos y estar dentro de los límites establecidos. Pero no se debe sintonizar al valor exacto para evitar resonancia.

Cálculos para el diseño de filtros

El diseño se basa en una conexión de varios filtros LC en paralelo a la carga, y luego serán sintonizados a los armónicos significativos detectados con las mediciones realizadas con el instrumento analizador de redes. Sin embargo, los filtros pasivos también deben de proporcionar potencia reactiva que será suministrada a la frecuencia fundamental.

Entonces, la parte capacitiva del filtro está relacionada con los kVar del filtro, y la parte inductiva es utilizada para crear una resonancia en serie con el capacitor a la frecuencia de sintonización de tal manera que se ofrece una baja impedancia para el armónico a filtrar.

Los parámetros utilizados para el cálculo de la potencia reactiva y capacitiva para reducir el armónico significativo:

$$X_{filtro} = \frac{(V_{nominal})^2}{Q_C(VAr)}, \text{ para } Q_C = P. (\tan \phi_1 - \tan \phi_2)$$

$$X_{cap} = h^2 \cdot X_L$$

$$X_{cap} = \frac{h^2}{h^2 - 1} \cdot X_{filtro}, \text{ por tanto}$$

Valor del capacitor (C_{farad}):

$$C_{farad} = \frac{1}{\omega X_{cap}}$$

Inductancia del filtro:

$$X_L = \frac{X_{cap}}{h^2}, \text{ por tanto } L_{henrios} = \frac{X_{henrios}}{\omega}$$

$$Z = R + j \left(L_{henrios} \cdot \omega - \frac{1}{C_{farad} \cdot \omega} \right)$$

Factor de calidad (Q):

$$Q = \frac{X_L}{R}$$

Donde:

Q : Factor de calidad

Q_C : Potencia reactiva que el filtro suministrara

$V_{nominal}$: Tensión nominal

X_{cap} : Reactancia capacitiva del filtro

X_L : Reactancia inductiva del filtro

X_{filtro} : Reactancia del filtro

C_{farad} : Capacitor (uf)

$L_{henrios}$: Inductor (Hr)

$\omega = 2\pi f$: frecuencia angular

Como se mencionó anteriormente, no se debe sintonizar al valor exacto del armónico, según la normativa IEC 61000-3-6, que considera que las cargas eléctricas deben operar normalmente con una probabilidad del 95 % del valor máximo de armónicos permitidos, además la normativa IEEE 519 menciona que las cargas deben trabajar normalmente para contenidos de armónicos sobre los valores límite por periodos cortos de tiempo sin sufrir daños. En consecuencia, "h" tiene que ser un 95 % de probabilidad. En cuanto al factor de calidad se recomienda lo más grade posible, mayormente entre 70-80.

3.4.1.2 Caso práctico: aplicación de uso de filtro pasivos. En un centro comercial, se implementó un sistema de filtros pasivos para mitigar los armónicos 5to y 7mo identificados en la red, en la Figura 41 se muestra el diagrama unifilar y la ubicación de los filtros pasivos.

Los beneficios obtenidos son muy gratificantes porque no solo se redujo la magnitud de los armónicos 5to y 7mo, sino también la distorsión de voltaje de los armónicos paso de 4.8 % a 1.8 % y además mejoró el facto de potencia de 0.92 a 0.99.

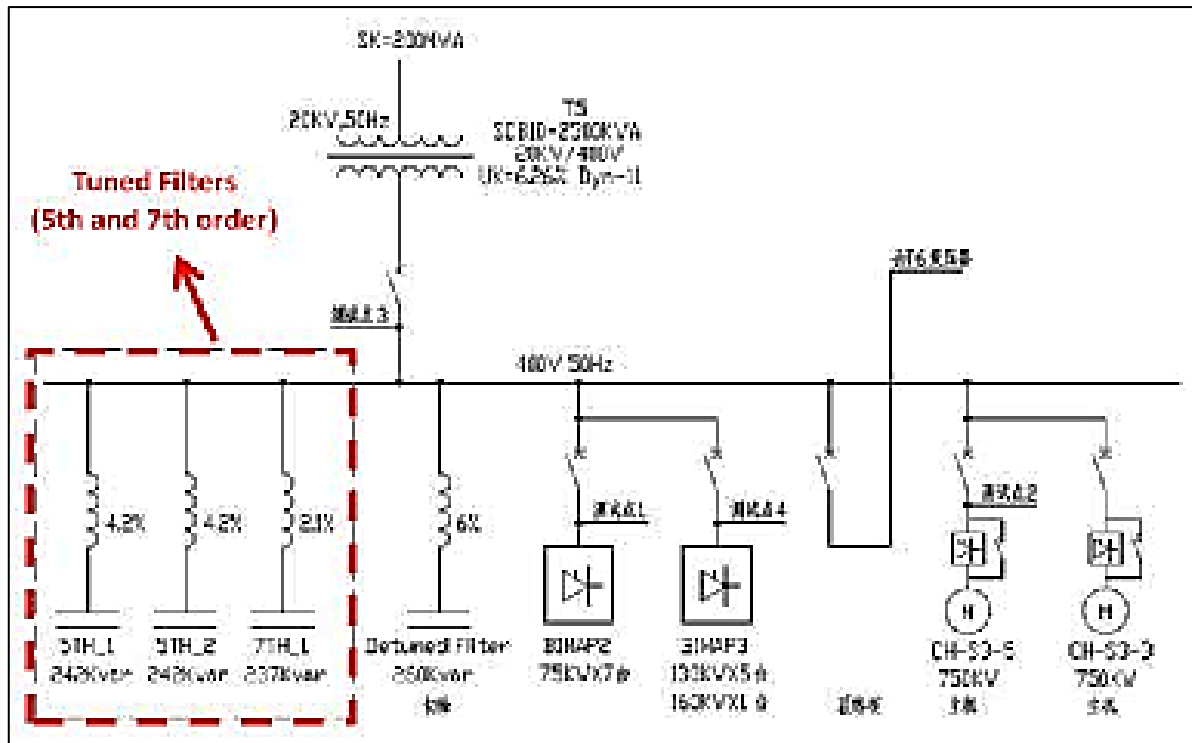


Figura 41. Sintonización de filtros pasivos para armónicos

Fuente: Motta & Faúndes (2016) Active / passive harmonic filters: Applications, challenges & trends.

Tabla 32. Resultados obtenidos de un filtro pasivo aplicado en el mall JIU en China

	Sin filtro	Sintonización de filtros			Resultado / Reducción
	Ningún filtro conectado	Primer filtro conectado	Segundo filtro conectado	Tercer filtro conectado	
	11:09:30	11:10:00	11:11:00	11:11:30	
Potencia activa (KW)	1489	1494	1497	1506	
Potencia reactiva (KVAr)	641	364	188	190	70.36 %
Potencia aparente (KVA)	1621	1538	1509	1518	6.35 %
Voltaje (V)	234	235.567	237.075	238.867	2.08 %
Corriente RMS (A)	2266	2109	2050	2078	8.30 %
THD %	4.78 %	3.04 %	2.79 %	1.78 %	62.82 %
Armónico 5to orden	3.83 %	0.89 %	0.81 %	0.94 %	75.38 %
Armónico 7to orden	1.77 %	2.32 %	2.15 %	0.89 %	49.49 %

	Sin filtro		Sintonización de filtros						Resultado / Reducción
	Ningún filtro conectado		Primer filtro conectado		Segundo filtro conectado		Tercer filtro conectado		
	11:09:30		11:10:00		11:11:00		11:11:30		
Armónico 11to orden	1.40 %		0.89 %		0.86 %		0.62 %		56.00 %
【THD】 _I	17.68 %	394.51 A	9.92 %	208.25 A	9.93 %	202.51 A	6.56 %	135.94 A	65.45 %
Armónico 5to orden	16.21 %	361.71 A	3.85 %	80.82 A	4.31 %	87.90 A	5.12 %	106.17 A	70.65 %
Armónico 7to orden	4.68 %	104.43 A	8.16 %	171.19 A	7.99 %	163.03 A	2.75 %	56.98 A	45.44 %
Armónico 11to orden	3.38 %	75.47 A	2.30 %	48.31 A	1.87 %	38.23 A	1.13 %	23.33 A	69.09 %
Corriente fundamental	2231		2099		2040		2074		7.07 %
Factor de potencia	0.92		0.97		0.99		0.99		0.99

Fuente: Motta & Faúndes (2016) Active / passive harmonic filters: Applications, challenges & trends.

3.4.1.3 Limitaciones de los filtros pasivos. Presentan algunas limitaciones que se resumen a continuación:

- ✓ Frecuentemente, requieren un número de derivaciones en paralelo. La pérdida de energía de una unidad paralela altera totalmente la frecuencia de resonancia y el flujo de la corriente armónica. Esto puede incrementar los niveles de distorsión fuera de los límites permisibles.
- ✓ Las pérdidas de energía en los elementos resistivos de filtros pasivos pueden ser considerables para filtrar armónicos de orden superior. A demás, hay una reducción de la eficiencia del filtro.
- ✓ Si los convertidores alimentan corriente directa al sistema, pueden causar saturación en el reactor del filtro, resultando en un incremento de la distorsión.
- ✓ Un cambio en el sistema o en las condiciones de operación puede resultar en una desintonización e incremento de la distorsión por razones que dificultan la compensación de los armónicos. Si no hay un equipo de monitoreo, el problema no puede ser detectado.
- ✓ Los filtros pasivos no son adaptables a cambios dinámicos en el sistema y una vez instalados son difícilmente reemplazados. Ni la frecuencia de sintonización ni el tamaño del filtro pueden ser cambiados tan fácilmente.

- ✓ La adición de cargas más armónicas puede provocar sobrecarga de los filtros deteriorando el tiempo de vida.
- ✓ Se requieren dispositivos especiales para la protección y el monitoreo del filtro.
- ✓ El deterioro y los efectos de la temperatura desintonizan el filtro de una forma fortuita.
- ✓ El diseño se ve en gran parte afectado por la impedancia del sistema. Para ser efectivo, la impedancia del filtro debe ser menor que la impedancia del sistema y el diseño puede llegar a ser un problema para sistemas robustos porque se requiere un filtro muy grande.

3.4.2 Filtro activo

Los filtros activos están diseñados para solucionar las desventajas de los filtros pasivos convencionales. Sin embargo, son más caros debido a que incorporan la electrónica de potencia para darle soluciones principalmente a problemas de resonancia y eliminan los armónicos e interarmónicos presente en la red tanto para tensión como para corriente.

El objetivo de los filtros activos es la reducción de armónicos ya sea en de la red de distribución o en la carga no lineal. Es sabido que las cargas no lineales tienden a consumir corriente no senoidal generalmente en redes con impedancia no nulos esto implica deformar la tensión de la red. Por tanto, no solo implica reducir los armónicos sino también devolverle a la señal la tensión y corriente la forma senoidal para que circule por la red y sea aprovechada por cargas sensibles.

A diferencia de los filtros pasivos, los activos presentan la ventaja de adaptarse a las condiciones dinámicas de la carga e incluido a la red y reduce las probabilidades de posibles resonancias entre red – filtro. A los tipos de perturbaciones comunes que dan solución los armónicos:

- ✓ Reducción de sobretensiones en los puntos de acoplamiento común más significativos.
- ✓ Reducción de armónicos presentes entre el filtro activo y la central generadora de electricidad o las subestaciones presentes en las industrias.
- ✓ Reducción de armónicos en el punto de acoplamiento común.
- ✓ Corrección del factor de potencia.
- ✓ Equilibra las líneas entre las fases de tensión y el neutro.
- ✓ Equilibra las corrientes que circulan por las fases.
- ✓ Reducción de niveles elevados de tensión y *flickers*.

Las cargas no lineales son frecuentemente utilizadas en sistemas monofásicos domésticos y de oficina.

Dentro de los filtros activos existen tres tipos de configuración: serie, paralelo y mixto:

- ✓ Filtros en serie: actúan como fuentes de tensión en serie con la red. Su finalidad es asegurar que la tensión en los bornes de la carga sea senoidal, para prevenir la transferencia de armónicos al sistema eléctrico.
- ✓ Filtro en paralelo: actúan como fuentes de corriente. Su finalidad es contrarrestar los armónicos de corriente generados por las cargas, la señal de corriente devuelta a la red será la suma de la corriente de la carga y del filtro obteniendo la forma senoidal.
- ✓ Filtros mixtos: utilizan los filtros en serie y paralelo al mismo tiempo. Su finalidad es conseguir que señales de tensión y corriente senoidales.

3.4.2.1 Modelo del filtro de corriente

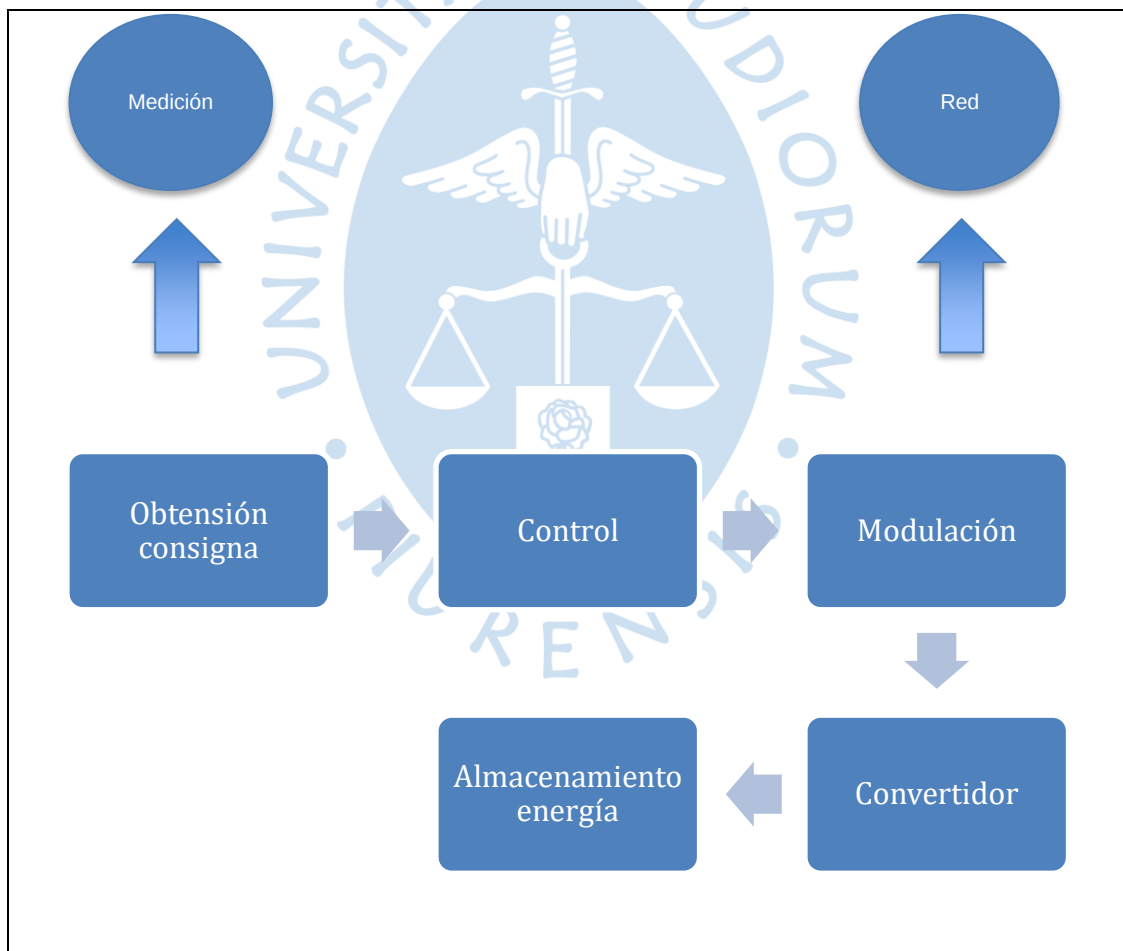


Figura 42. Sistema de control del filtro activo

- ✓ Medición: conformado por un circuito de medición de corriente y tensión.
- ✓ Obtención de consigna: conformado por un circuito que separa a la corriente fundamental de la corriente armónica que absorbe la carga. Existen muchos

procedimientos que permiten separarlos cada una con sus ventajas e inconvenientes, aunque es muy frecuente el uso de filtros selectivos (NOTCH).

- ✓ Control: conformado por un circuito de obtención de consigna y un circuito de control.
- ✓ Modulación: se encarga de la generación de las señales moduladas, su función es transformar unas señales de tensión (variable en amplitud) que proceden del módulo de control, en tiempos de encendido y apagado de cada interruptor del VSI.
- ✓ Convertidor: las señales de modulación ingresan a los convertidores para que de esa manera el filtro absorba la corriente que coinciden con las consigan medida. Este módulo se conecta a la red de manera directa o a través de un transformador o por medio de una bobina. Cuando se conecta directamente es necesario que los convertidores (usualmente IGBT) tengan la capacidad de soportar tensiones superiores a la de un inversor, estos son muy utilizados para el control de motores eléctricos, sin embargo, los inversores pueden mejorarse empleando inversores multinivel.
- ✓ Almacenamiento de energía: conformado por grupos de condensadores.

3.4.2.2 Modelo del filtro de corriente. Ante perturbaciones de corriente es conveniente aplicar filtro activo paralelo, si la potencia de la carga es elevada o si los rectificadores con condensador son de elevado valor se recomienda el uso de filtro activo en serie y un filtro pasivo en paralelo; si el objetivo es reducir los armónicos de corriente en el neutro y equilibrar cada una de las fases se emplea filtros activo paralelo en cada ramal. En sistemas con perturbaciones de tensión es conveniente el empleo de filtros activos en serie. Para mitigar Perturbaciones de tensión y corriente significativas en el punto de acoplamiento común es el adecuado el uso de filtro activo serie y paralelo, se emplean los filtros comerciales UPCQ, aunque resultan ser más caro.

En el siguiente caso se tiene un problema de perturbaciones armónicas de corriente con THD de 30 % y ante este tipo de perturbaciones se recomienda la aplicación de filtro en paralelo, por tanto, se aplican los filtros PQsine-S dando como resultado una mejora de la onda senoidal tanto para corriente como para tensión, los resultados obtenidos en el display del filtro son los siguientes:

Tabla 33. Reducción de armónicos con PQsine

Caso	THD, Sin Pqsine	THD, con PQsine
Caso de estudio A	30 %	< 5 %
Caso de estudio B	27.6 %	0.7 %

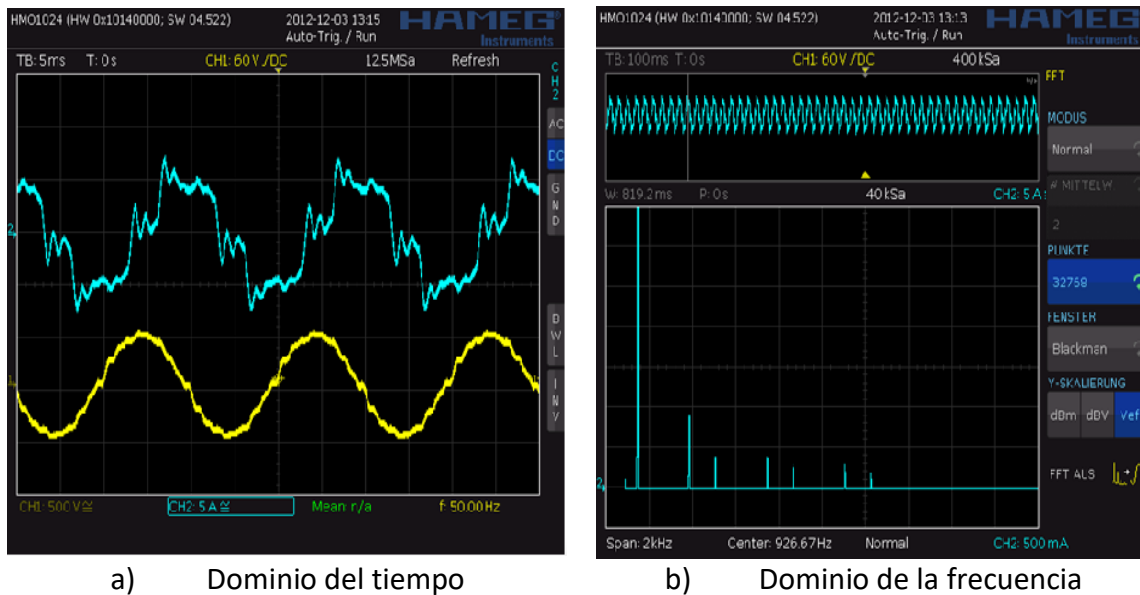


Figura 43. TDH con 30 % en el dominio del tiempo sin aplicación de filtro activo Pqsine
Fuente: Lamich (2020) Filtros Activos de Potencia.

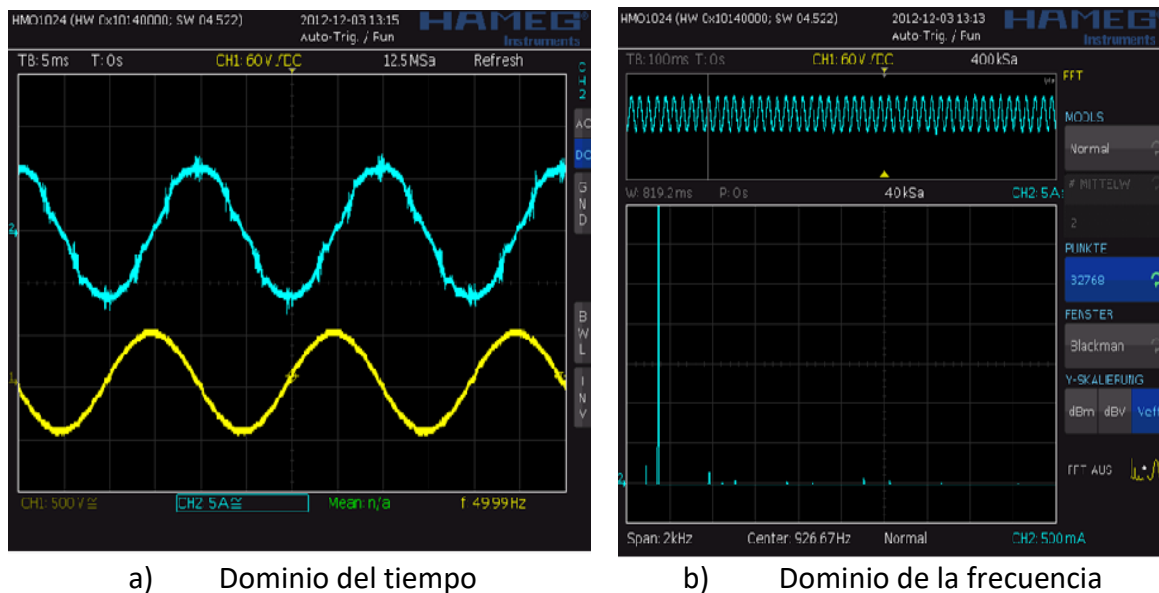


Figura 44. Aplicando filtro activo PQsine la perturbación armónica TDH < 5 % con señal mejorada en el dominio del tiempo
Fuente: Lamich (2020) Filtros Activos de Potencia.

Los filtros activos pueden configurarse en células en serie y/o paralelo y estos pueden estar en serie y/o paralelo con filtros pasivos que también pueden estar conformados por células en paralelo o serie.

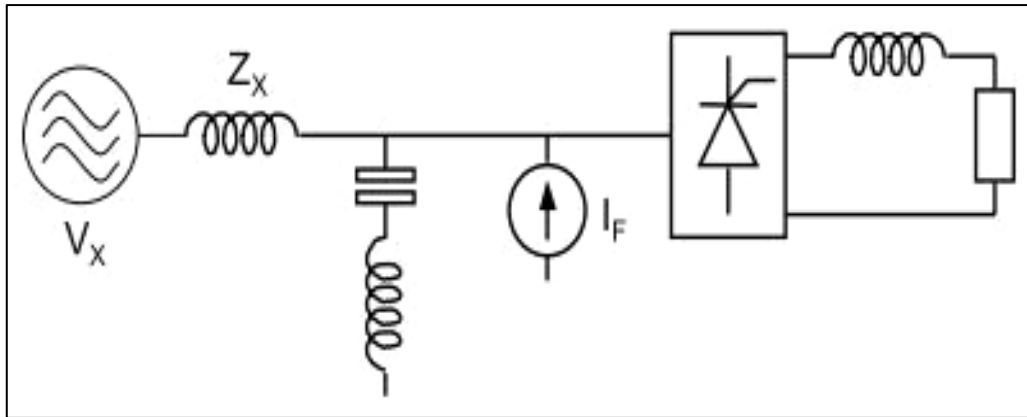


Figura 45. Filtro paralelo, formado por la combinación de dos filtros: activo y pasivo

Fuente: Lamich (2020) Filtros activos de potencia.

3.5 Factor K del transformador

En la actualidad, el tiempo de vida útil de los transformadores se han visto reducidos y en peor de los casos sufren daños severos mayormente por sobrecalentamiento sin haber estado saturados por sobrecarga, los daños provienen de las distorsiones armónicas generados por las cargas no lineales que deforman la señal sinusoidal y en consecuencia los devanados del transformador se saturan.

Para equipos como los convertidores de frecuencia variable en AC, los armónicos más comunes y perjudiciales son de orden 5, 7, 11 y 13; y para equipos como los conmutadores de las fuentes de potencia (PC u ordenadores) los armónicos más comunes son de orden 3; cuando se tienen valores altos en magnitud de estos armónicos en comparación con la fundamental, es donde se produce el calentamiento del transformador.

Debido a los problemas que afectan los armónicos, existen en el mercado una línea de transformadores llamado “transformadores tipo K”. Estos están diseñados para soportar temperaturas producidas por las pérdidas a la frecuencia fundamental y por los altos contenidos de los armónicos de corriente (generados en los devanados del transformador). Por lo tanto, La normativa IEEE 1100-1992, define al factor K como una constante que indica la capacidad del transformador para soportar el aumento de la temperatura., pero manteniendo el límite de la temperatura nominal, en otras palabras, el factor K está diseñado para soportar la temperatura en exceso, sin embargo, tiene limitaciones que dependen mucho de la magnitud, cantidad y la duración en que se presentan los armónicos.

Por ejemplo, uno de tipo K=9 significa que el transformador soporta nueve veces más la temperatura de las corrientes armónicas que un transformador con carga lineal (K=1), por lo tanto, a mayor K mayor capacidad del transformador para manejo de armónicos sin sobrecalentarse considerando las limitaciones.

El K se puede calcular y luego comparar con el K del transformador, pero hay que conocer la magnitud de las componentes armónicas del sistema eléctrico. La expresión para el cálculo de K es el siguiente:

$$k = \frac{\sum_{h=1}^{\infty} h^2 \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2}{\sum_{h=1}^{\infty} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2} \quad \text{Ecuación 18}$$

Donde:

$\frac{I_h}{I_1}$: Distorsión individual

h: número del armónico

Como recomendación, para una buena elección de del factor K en cualquier instalación sea industrial, edificaciones, entre otras, se empieza por la medición de parámetros eléctricos y de acuerdo a ello se realiza el cálculo y posteriormente se selecciona el transformador, si se está en una etapa de diseño, se evalúan las posibles cargas que se van a instalar y a la vez se proyecta para un futuro aumento de cargas. Otra importante consideración a tener en cuenta: $K_{carga} < K_{transformador}$, si tenemos un $K_{carga} = 3.1$, entonces el $K_{transformador} = 4$ para el cálculo se debe utilizar casi todos los armónicos presentes, ya que si solo consideramos los primeros tendremos valores de K altos lo que conlleva a sobredimensionar nuestro transformador. También si cambiamos las cargas lineales por no lineales o incorporamos cargas generadoras de armónicos también implicará un sobrecalentamiento de nuestro transformador.

Los valores más comunes establecidos por normativa tenemos:

Tabla 34. Factor K normalizados

Categoría
K – 04
K – 09
K – 13
K – 20
K – 30
K – 40

Caso práctico 01: para tener idea de la importancia de un sobrecalentamiento en un transformador, supongamos que circula el 5to armónico por los devanados del transformador y cuya magnitud es de 40 % respecto a la fundamental las pérdidas asociadas a las corrientes de Eddy será de $5 \times 0.4 = 2$, es decir el doble de la fundamental, de la misma manera procederán los demás armónicos.

Caso práctico 02: una carga industrial demanda 75 KVA para un $K = 1$, si remplazamos por un transformador con $K = 4$, quiere decir que este último transformador será de un tamaño mayor que el otro con la ventaja que para $K=4$ el transformador puede operar bajo ciertas condiciones de distorsión armónicos.

Caso 03: la Tabla 35 muestra la magnitud de los armónicos presentes durante una medición por un periodo de tiempo establecido en una instalación industrial. Se requiere remplazar el transformador que está operando por un transformador con factor K .

Tabla 35. Porcentaje de armónicos en la instalación

$I_h\%$	H	I_h^2	h^2	$I_h^2 h^2$
100	1	1	1	1.00000
33.33	3	0.11109	9	0.99980
20	5	0.04	25	1.00000
14.2	7	0.02016	49	0.98804
11	9	0.0121	81	0.98010
9	11	0.081	121	0.98010
7.7	13	0.00593	169	1.00200
6.66	15	0.00444	225	0.99800
5.88	17	0.00346	289	0.99920
5.26	19	0.002767	361	0.99880
4.76	21	0.002266	441	0.99920
4.34	23	0.001884	529	0.99640
4	25	0.00160	625	1.00000
$\sum_{h=1}^{h=25} I_h^2 h^2 = 12.94169$				

Reemplazando en la ecuación 18, se obtiene un $K=13$.

3.6 Mitigación para armónicos de 3er orden

En toda instalación eléctrica con neutro distribuido (conexión delta - estrella) las cargas no lineales pueden provocar sobrecargas sobre este conductor producto de la circulación de armónicos de 3er orden.

En la red las cargas son conectadas de manera simétrica es decir que las dos primeras semiondas de corriente son de polaridad opuesta lo que implica que los armónicos de orden par son nulos, para el caso de una instalación trifásica conectada con cargas no lineales, equilibrada y sin conexión a neutro (configuración delta en el secundario), los armónicos de 3er orden de cada fase serán absorbidas por estas cargas no lineales, pero al no tener conexión a neutro la suma de las corrientes armónicas iguales de 3orden serán nulos. Entonces en un sistema trifásico, equilibrado y simétrico no generarán armónicos de 3er orden, esto también es aplicado para todo armónico múltiplo de 3. Por tanto, estos armónicos predominan

principalmente en las cargas monofásicas. Hay casos en la que los armónicos de 3er orden pueden ser muy significativas y que pueden ocasionar problemas en la red.

En la Tabla 36, se muestran algunos de los equipos que son conectados en monofásico en las instalaciones.

Tabla 36. Equipos en monofásicos

Actividad	Aparatos
Domestica	TV, hi-fi, video, horno, microondas, etc.
Terciaria	Microordenadores, fax, impresoras, fotocopadoras, etc.
Industrial	Alimentación conmutada, etc.

En un caso práctico, suponiendo que tenemos una fuente trifásica equilibrada con conexión neutro, en el que están conectados tres cargas monofásicas de igual característica en cada fase, si las cargas son lineales entonces tendremos un sistema equilibrado donde la suma de corrientes será nula, si en caso tenemos un carga no lineal, la señal de corriente serán distorsionadas por tanto contiene armónicos, como la conexión es monofásica, los armónicos de 3er orden estarán presentes en las tres fases, resultando la suma de estas corrientes en el neutro diferente de cero y la cantidad de armónicos que circula por conductor neutro, también será tres veces respecto a de las fases.

La normativa IEC 60354-5-524:2001 nos brinda la referencia para determinar la sección del conductor neutro para corrientes no sinusoidales producidas por las cargas no lineales. Indica que la sección del neutro debe tener como mínimo la misma sección del conductor de las fases. En presencia de armónicos:

Tabla 37. Capacidad del neutro ante armónicos de acuerdo a la normativa IEC 60354 -5-524:2001

Armónicos Triple – N		
THD fase		
<15 %	No es necesario un aumento de la sección del neutro	La corriente que circula por el neutro puede ser de 45 % de la corriente de fase.
15-33 %	Es necesario reducir la capacidad del cable en el neutro a un factor de 0.86. Es decir, para una corriente de 17 A se debe colocar un cable capaz de transportar 20 A.	La corriente en el neutro puede ser similar a la corriente de fase.
33-45%	La sección del cable de fase viene determinada por la corriente del neutro pero reducida a un factor de 0.86.	La corriente en el neutro puede ser similar a la corriente de fase

La solución que mayormente se aplica es un sobredimensionamiento de la sección del conductor del neutro con respecto a las secciones de cada fase (de acuerdo a la práctica es aconsejable que el neutro sea 1.7 veces mayor que de los conductores de fase,) (Suárez & Guillermo, 2010) y los equipos de protección de las cargas. Entonces se debe dimensionar teniendo en cuenta la corriente en el neutro.

Las soluciones frecuentemente utilizadas, aunque ya se mencionaron en los casos anteriormente, son:

- ✓ Utilizar un transformador triángulo-estrella, para evitar la circulación de armónicos de 3er orden hacia la red.
- ✓ Duplicar la sección del conductor neutro.
- ✓ Uso de filtros de rango 3 en el neutro
- ✓ Utilizar un conductor neutro separado para cada fase, aunque implica un mayor costo.

3.7 Direccionalidad

3.7.1 Método de desconexión de cargas a analizar

Este método consiste en desconectar la carga de la red que se considere un generador de armónicos significativos, para evaluar se procede a desconectar la carga, posteriormente se realiza las mediciones respectivas y se evalúa la magnitud de los armónicos. Dependiendo de los datos obtenidos se pueden definir algunas conclusiones y puede que haya la posibilidad de no proceder a realizar una segunda medición, por el contrario, se procede a conectar la carga a la red y se realiza una segunda medición en el punto evaluado anteriormente y evaluamos la magnitud de los armónicos. Con estos dos resultados se puede tener una respuesta más certera.

Del circuito mostrado en la Figura 47 la expresión matemática para el circuito con carga desconectada, la tensión armónica sería:

$$V_{h0} = Z_s I_{h0}$$

Circuito con carga conectada, la tensión armónica sería:

$$V_{hc} = \frac{Z_s Z_c}{Z_s + Z_c} I_{hc} = V_h - \frac{Z_c}{Z_s + Z_c} V_{h0}$$

Como ventaja solo se necesita realizar dos mediciones, es muy sencillo de aplicarlo debido a que no es necesario el uso de equipos que tengan que instalarse a la red, es muy efectivo para localizar cargas individuales sin tener que apagar todas las instalaciones acopladas al punto común (tablero de distribución). La desventaja de aplicar este método, está en tener que desconectar la carga para realizar las mediciones y eso implica que el proceso productivo se detenga por un periodo de tiempo lo que implica pérdida monetaria

para el cliente por lo que su uso dependerá de la situación que se presente y de la importancia del proceso, las mediciones realizadas son solo momentáneas y variará con la variación de las cargas que se conecten a la red, las impedancias Z_s y Z_c tiene que ser conocidas a precisión excepto cuando $|Z_s| \ll |Z_c|$, quedando la siguiente expresión:

$$V_h \cong V_h - V_{h0}$$

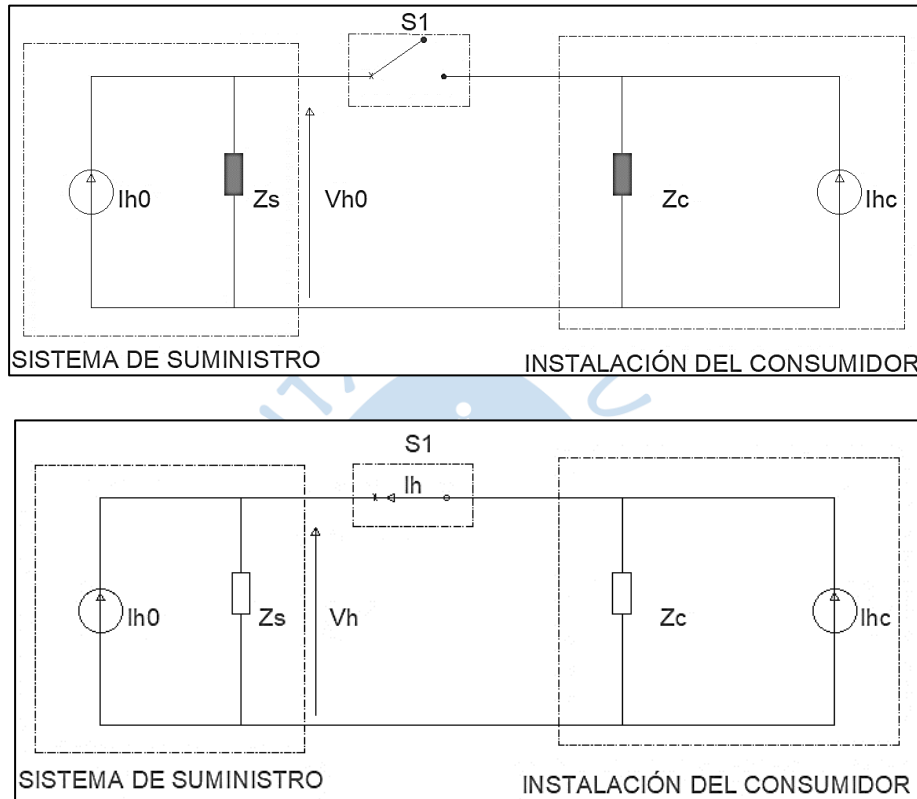


Figura 46. Evaluación del nivel de emisión ON y OF

3.7.2 Método de superposición de THD_v y THD_i

Este método es muy simple de aplicar y consiste en analizar las señales de tensión y corriente armónica o la THD_v y THD_i en un periodo de tiempo según las normativas existentes, mediante una superposición de graficas de tal manera que si ambas señales se asemejan, entonces la perturbación armónica de magnitud considerable es generada por la carga, debido a que la tensión y corriente, de acuerdo a la ley ohm, $V_h = I_h \cdot R_h$, son directamente proporcionales, por tanto, tensión y corriente armónica están muy relacionados y en base a esos se deduce lo anterior.

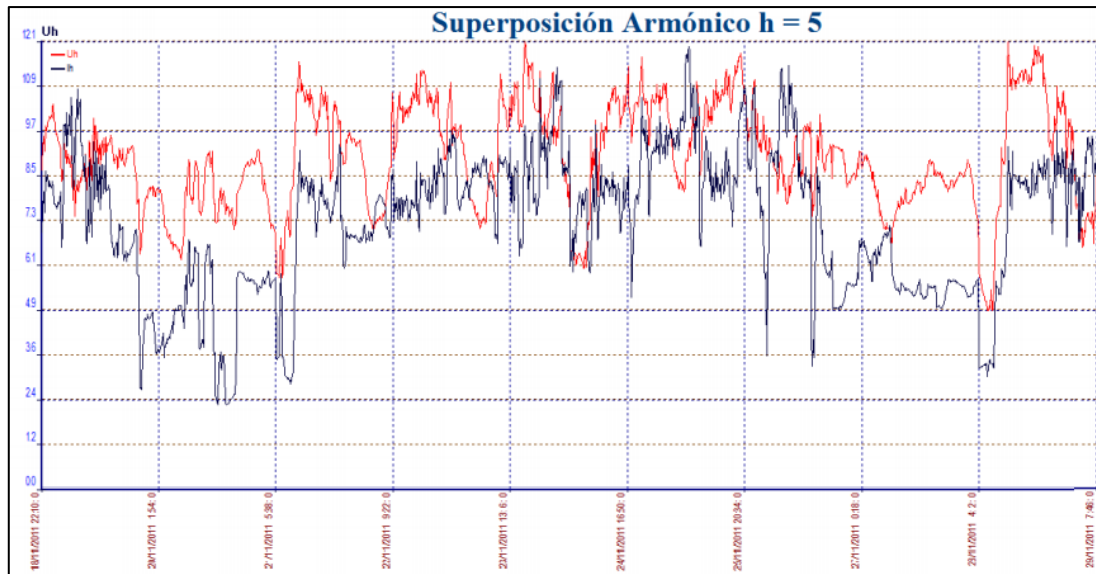


Figura 47. Superposición de armónicos de tensión y corriente de orden 5

3.7.3 Método de Emmanuel

Es un método práctico, consiste en separar los valores fundamentales de los armónicos de tal manera que se hace un estudio por separado que al final nos da un resultado que nos permite tomar la decisión correcta.

Entonces separamos la frecuencia, corriente y tensión fundamental de los armónicos, es decir:

$$I_T^2 = I_1^2 + I_H^2, \text{ para } I_H^2 = \sum_{h \neq 1} I_h^2$$

Para el caso de las potencias, tenemos:

$$S = VI^*$$

$$S^2 = S_1^2 + S_H^2$$

$$V^2 = V_1^2 + V_h^2, \text{ para } h \neq 1$$

$$S_1 = V_1 \cdot I_1, \text{ entonces } \bar{S}_1 = \bar{P}_1 + j\bar{Q}_1$$

Por lo tanto:

$$S_N = \sqrt{D_1^2 + D_V^2 + S_H^2}$$

Donde:

$$D_I = V_1 I_H$$

$$D_V = V_H I_1$$

$$S_H = V_H I_H$$

Siendo S_N la potencia aparente distinta a la frecuencia fundamental, es decir está en función de la corriente y tensión distorsionante. D_1 la potencia distorsionante de corriente, D_V la potencia distorsionante de la tensión y S_H la potencia aparente distorsionante (armónica); D_1 y D_V son potencias no activas en el que los KVA son contribuidos por producto de la interacción entre la tensión o corriente a la frecuencia fundamental y la corriente o tensión armónica distinta a la frecuencia fundamental. El término S_H contiene la potencia armónica P_H y la potencia armónica no activa contribuida por las tensiones y las corrientes. Por consiguiente, se tiene:

$$\frac{S_N}{S_1} = \sqrt{\left(\frac{V_1 I_H}{V_1 I_1}\right)^2 + \left(\frac{V_H I_1}{V_1 I_1}\right)^2 + \left(\frac{V_H I_H}{V_1 I_1}\right)^2}$$

Por tanto:

$$\frac{S_N}{S_1} = \sqrt{(THD_I)^2 + (THD_V)^2 + (THD_I \cdot THD_V)^2}$$

Ahora, si aproximamos S_N según los siguientes casos.

Tabla 38. Potencias armónicas

Aproximación	Restricción	Error
$S_N \approx THD_I \cdot S_1$	$THD_V < 5 \%$ $THD_I > 20 \%$	1 %, valido para la gran mayoría de cargas lineales.
$S_N \approx S_1 \cdot \sqrt{THD_I^2 + THD_V^2}$	$THD_V < 5 \%$ $THD_I < 20 \%$	15 %

Para determinar la responsabilidad de la carga o de la red, se aplica la siguiente comparación:

$THD_I < THD_V$, armónicos no significativos generados por la carga

$THD_I > THD_V$, armónicos de magnitud significativa generada por la carga

$THD_I \approx THD_V$, armónicos de magnitud significativas generados por la carga y la red.

Este método no implica tener que desconectar la carga del sistema eléctrico y tampoco es complicado de implementarlo y nos da el responsable de la generación de armónica, como desventaja no proporciona la cantidad de corriente armónica inyectada a la red; sin embargo, no es suficiente para tomar una decisión definitiva, es necesario aplicar otro método o forma que pueda corroborar el resultado. Entonces, para poder tomar la decisión correcta necesitamos al menos dos métodos para poder definir la direccionalidad de los armónicos.



Capítulo 4

Caso práctico: estudio de los armónicos en la Universidad de Piura

4.1 Caso de estudio

En esta sección evaluaremos el Bloque Administrativo que corresponde a una de las instalaciones de la Universidad de Piura Campus - Lima, se optó por esta instalación porque contiene equipos no lineales y con posible contenido de emisores de perturbaciones armónicas.

Datos de la Universidad de Piura: la Universidad de Piura Campus - Lima es una institución universitaria que fue aperturada en el 2006 en la calle Mártir José Olaya donde anteriormente funcionaba el coliseo Champagnat. Con una extensión de 28 000 m^2 .

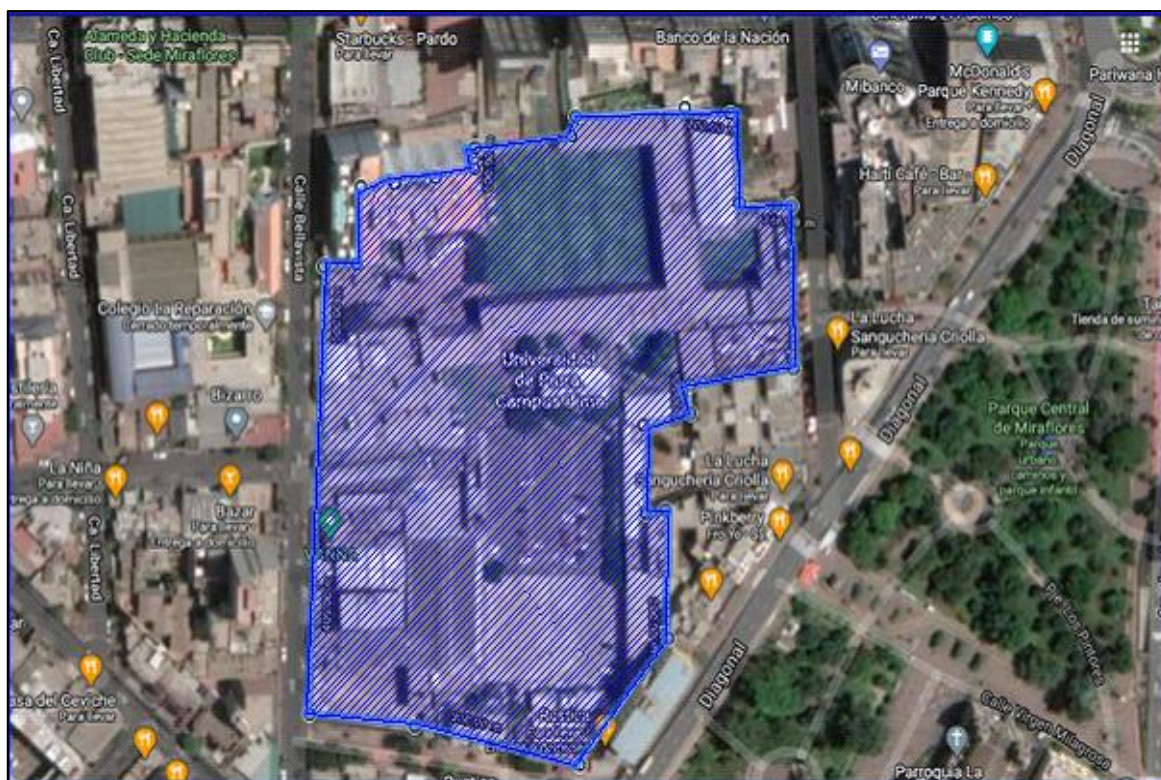


Figura 48. Área perimetral del campus Lima

Datos de la empresa suministradora de energía: la empresa que suministra energía eléctrica es Luz del Sur, con una potencia contratada de 500 KVA.

La Figura 49 representa el flujograma de trabajo que se realizará en este capítulo.

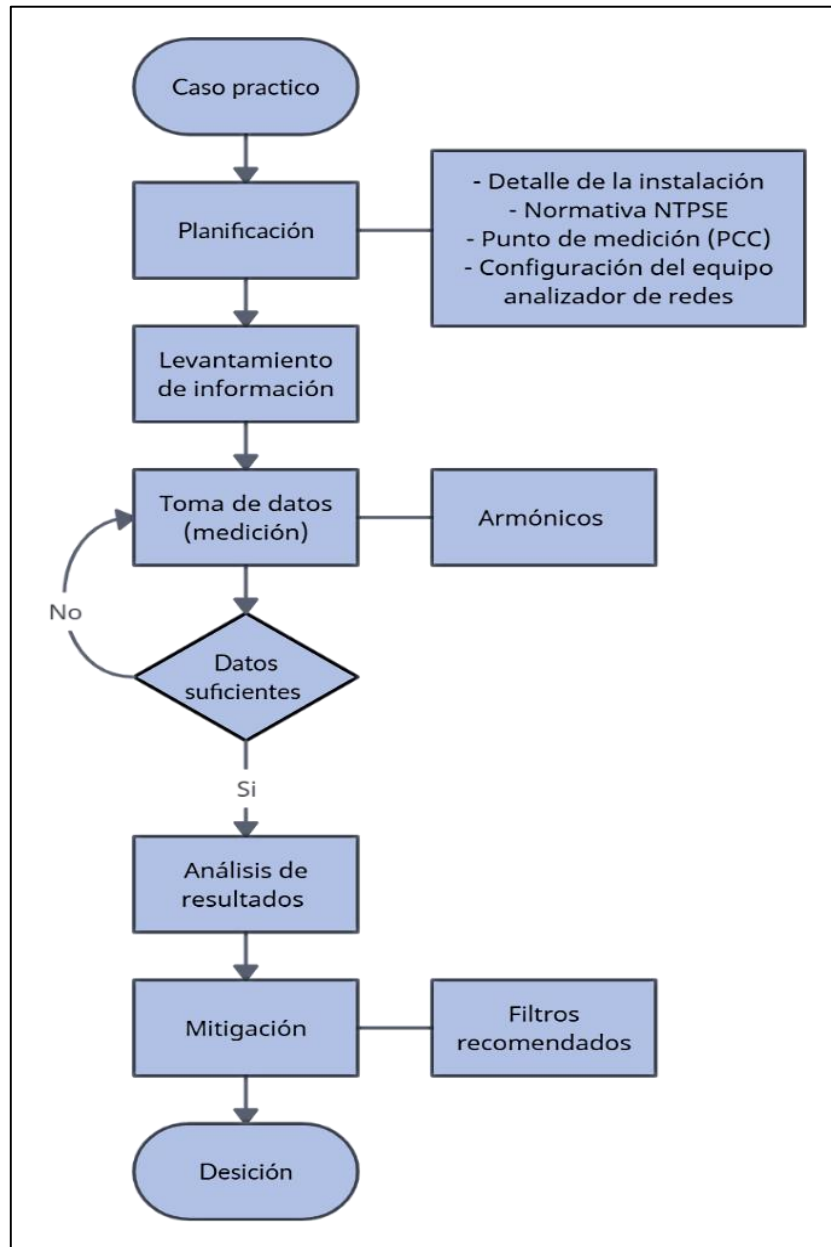


Figura 49. Flujograma de trabajo

Planificación: en esta etapa analizamos el problema, métodos, evaluamos los objetivos planteados y las estrategias formuladas para alcanzar los objetivos. Empezamos detallando la instalación del bloque administrativo como es equipos, planos eléctricos, etc.; luego las normativas que utilizaremos en base a lo investigado en capítulos anteriores; identificación del punto de medición y la configuración del equipo de medición como es el Analizador de Redes.

Levantamiento de información: recopilamos información base que nos permita identificar fallas anteriores del equipo que fueron registrados por el área de mantenimiento

Toma de datos (medición): el equipo Analizador de redes se deja instalado por un periodo de tiempo según la normativa en un lugar estratégico, para ello se configura el equipo para registrar perturbaciones armónicas, una vez registrada la información se procede a descargar y ordenar.

Datos suficientes: con la información evaluamos si hay algún cambio brusco, anomalías, datos que no son coherentes o la cantidad y tiempo de medición no son suficiente para determinar conclusiones adecuadas por varias razones como mal instalación del equipo, conexiones incorrectas, lugar de medición inapropiada, mal configuración del equipo Analizador de redes; por tanto, es necesario medir varias veces hasta obtener datos correctos y estar seguros que las mediciones son las apropiadas. Todo este análisis referenciado a las normativas. Entonces pasamos al siguiente punto.

Análisis de resultados: los resultados pasan a ser evaluado y analizados en base a normativas NTCSE, IEEE e IEC; con ello identificamos si están dentro los límites si en caso no se cumpliera procedemos a identificarlos.

Mitigación: con los armónicos identificados procedemos a seleccionar los tipos de filtros que mejor se adapten a nuestro caso tomando en consideración lo estudiado en los capítulos de este trabajo de tesis.

Toma de decisión: se selecciona el filtro y los equipos necesarios para mitigar los armónicos de corriente y tensión y otros parámetros que involucran a la calidad eléctrica.

4.2 Análisis de las instalaciones

Antes de verificar y realizar las mediciones de cualquier equipo en falla dentro de una industria, edificación, institución, entre otros; es recomendable preguntar a los responsables del mantenimiento u otro personal con el objetivo de recopilar la información necesaria de los equipos, de esa manera encontraremos las posibles causas que ocasionaron la falla y empezar a medir e inspeccionar la máquina y posteriormente dar solución lo más rápido posible. Entonces, se plantean un conjunto de métodos para dar con la solución antes de empezar las cuales se mencionan en los siguientes puntos:

Información documentada:

- Reporte del consumo eléctrico antes y después del problema (últimos 12 meses)
- Reporte de la empresa distribuidora o generadora de electricidad sobre el problema
- Contrato establecido entre la empresa Luz del Sur y la Universidad de Piura – campus Lima, potencia contratada, restricciones, condicionantes en cuanto a la energía.

- Reporte del área de mantenimientos sobre los equipos como transformadores, equipos críticos, etc.
- Tipo de conexión de la subestación
- Plano unifilar del sistema eléctrico de la empresa
- Identificación de las subestaciones

Identificar posibles efectos de los armónicos estudiados en capítulo anteriores, como:

- Sobrecalentamiento de los equipos: transformadores, motores eléctricos
- Calentamiento de los conductores
- Sobrecarga de equipos en las instalaciones
- Sobredimensionamiento transformador
- Deterioro del banco de condensadores
- Mala instalación eléctrica
- Desgaste de los diferentes equipos instalados
- Calidad de conductores

Probablemente en un futuro se pueda verificar estos efectos, pero por ahora no se ha encontrado casos como los ya mencionados, pero sería bueno realizar unas mediciones periódicas para obtener una base de dato en el registro.

Inspección de las instalaciones:

- El campus está conformado por Bloques:

A: Biblioteca

H: Medicina

B: Bloque B

I: Bloque A

C: Bloque Administrativo

J: Aula física, idioma y química

D: Losa Deportiva

K: Coliseo

E: Bloque H

L: Mezamine

F: Bloque C

M: Charlot

G: Sótano H (Lab. Medicina)

Cada una contiene interruptores termomagnéticos de acuerdo a la potencia instalada.

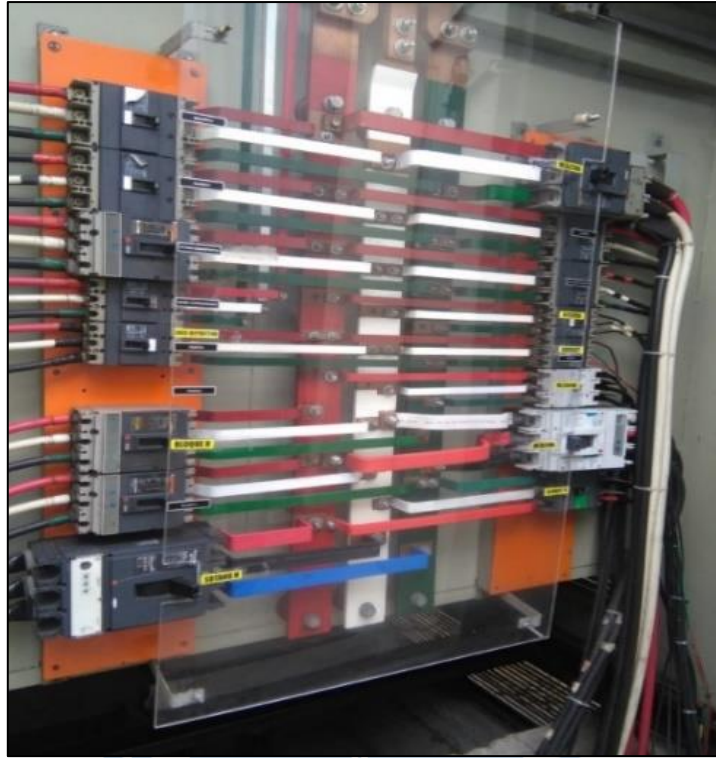


Figura 50. Tablero eléctrico de distribución

- Subestaciones:

El campus cuenta con una única estación ubicada en los exteriores del coliseo. En este caso un transformador trifásico de Media Tensión en aceite cuyas características de placa:

Tabla 39. Características del transformador trifásico

Tipo	En aceite		
Potencia aparente	500 KVA		
Media tensión	10 KV – 29 KV	Corriente en alta	28.9 A – 12.61 A
Baja tensión	230 V	Corriente en Baja	1255 A
Fase	3		
Hz	60		
Configuración	$D_{Yn5} - Y_{Nyn6}$		
T.C.C.	4.5 % (22.9 KV) - 4.1 % (10 KV)		
Temperatura	60/65° C		

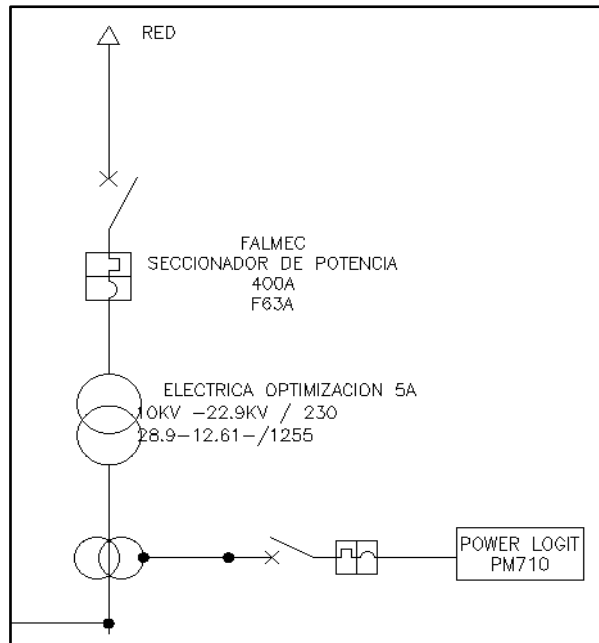


Figura 51. Diagrama unifilar en MT y BT

4.3 Equipos de la instalación

4.3.1 Características de los equipos

Interrupor termomagnético principal del área administrativo es de 250 A con un poder de ruptura de 85 kA.

Información de la instalación:

• Tipos de cargas

Esta implementada por cargas trifásicas, entre los equipos empleados se tiene electrobombas que operan en paralelo para brindar una mejor confiabilidad y está incorporado por un variador de frecuencia y un PLC para el control automático de bombeo ante una caída de presión en la red de agua. Equipos de aire acondicionado para oficinas.



Figura 52. Variador de frecuencia para electrobombas monofásicas



Figura 53. Acondicionador de aire modelo york de 3.6 kW

- Baterías de condensadores:

El sistema no cuenta con un banco de condensadores para la compensación de potencia reactiva.

4.3.2 Diagrama unifilar de las instalaciones

Se mencionan algunos circuitos que son parte del bloque administrativo y que pueden ser principales generadores de armónicos como aire acondicionado y Sistema estabilizado.

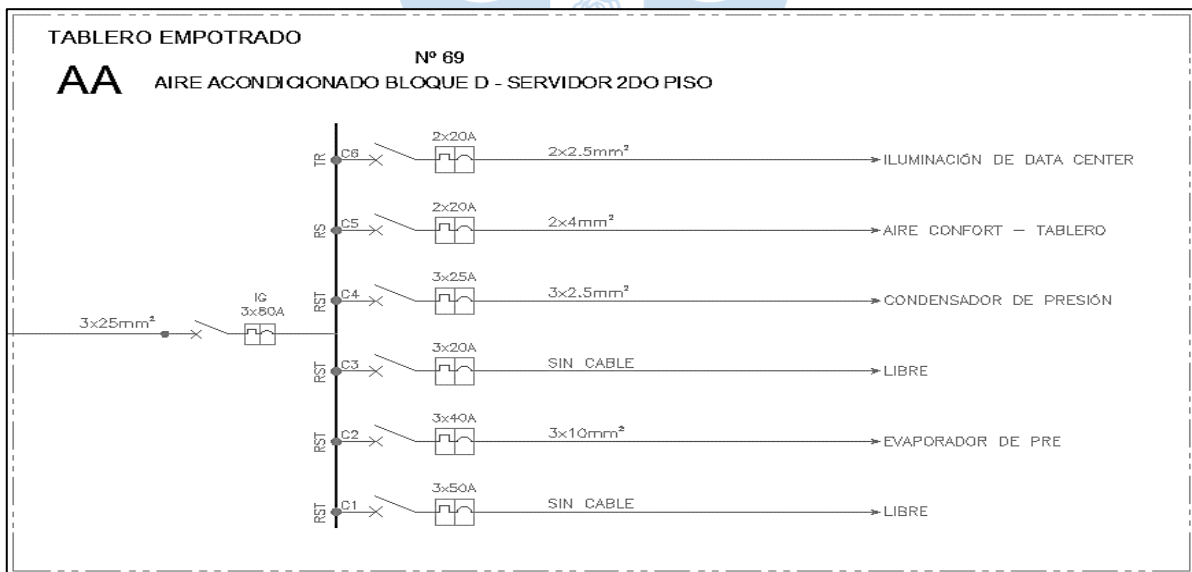


Figura 54. Diagrama unifilar de aire acondicionado

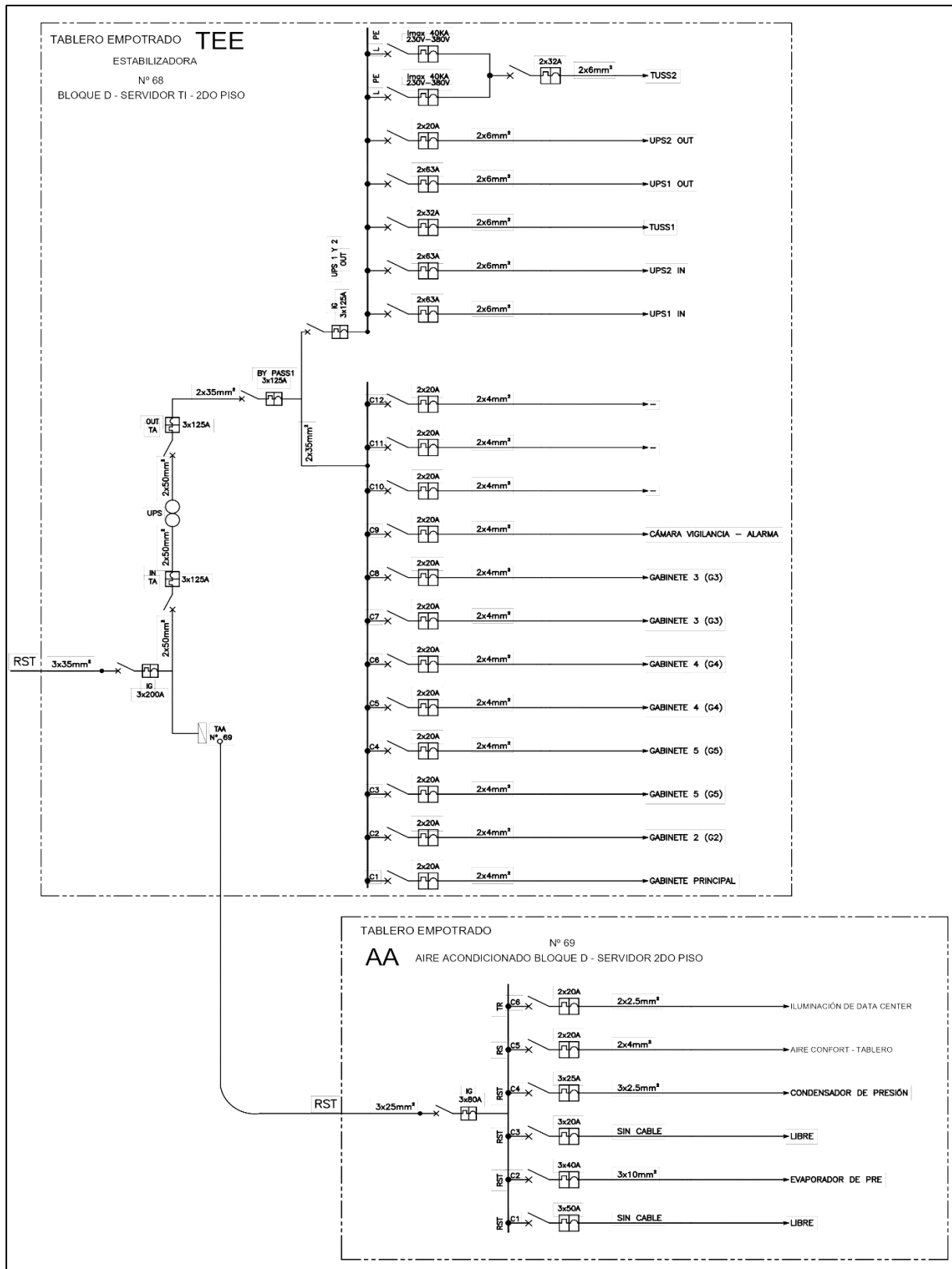


Figura 55. Diagrama unifilar de sistema de estabilización

4.4 Consideraciones de la NTCSE para las mediciones

La Norma Técnica de Calidad de Servicio Eléctrico (NTCSE) establece los siguientes aspectos a tener en cuenta para el proceso de medición y análisis de datos, las cuales se mencionan:

- **Periodos de Control:** El cliente que transigiera los límites establecidos por las normativas en los niveles de perturbaciones será evaluada en el punto de entrega del suministro de energía. En cuanto al control de la Calidad de Producto, esta se medirá en periodos mensuales.
- **Periodo de Medición:** Las mediciones de los parámetros eléctricos de la calidad de producto son realizadas independientemente por los diferentes equipos autorizados. Los parámetros serán medidos mínimo durante un periodo de 7 días calendarios sin interrupciones, excepto la frecuencia cuya medición es durante todo el periodo de control.
- **Intervalos de Medición:** para los parámetros de las perturbaciones, los valores instantáneos son medidos y promediados en intervalos de 10 minutos y para tensión y frecuencia por intervalos de 15 minutos.
- Cuando uno de los parámetros que definen la calidad sobrepasan los valores permitidos, automáticamente se considera a la energía de Mala Calidad
- La mala calidad afecta directamente al sistema, por lo tanto, el cliente recibirá amonestaciones constantemente sino se subsanan cuanto antes. cada parámetro es evaluada independiente y se aplican las compensaciones por separada de acuerdo a las normativas establecidas.

En resumen, se tendría lo siguiente:

Tabla 40. Condiciones de la NTPSE para la interpretación de mediciones

	Perturbación	<i>Flicker</i>	Frecuencia	Tensión
Rango de medición de Armónicos individuales	2° - 40°	-	-	-
Normativa aplicada	IEC	IEC	IEC	IEC
PST	-	≤ 1	-	-
Intervalo de medición	15 min.	10 min.	15 min. *	10 min
Periodo de medición	7 días	7 días	7 días	7 días

Nota. *Variaciones súbitas de frecuencia

4.4.1 Ubicación del analizador de redes (análisis de cada caso)

En muchas ocasiones no se obtienen resultados adecuados por una mala conexión o configuración de los equipos de medición o porque no se realizan las mediciones en el lugar correcto. Con respecto a este último, la normativa 519 - 1992 define el termino Punto de Acoplamiento Común (por sus iniciales en inglés PCC) para las mediciones de las perturbaciones armónicas. El PCC es un punto de maniobra donde se conectan todas las cargas y está conformado por una barra de cobre e interruptores termomagnéticas de corte o protección ante eventos fortuitos por sobrecorriente o cortocircuito. Por tanto, las mediciones de tensión y corriente trifásicas se realizan en el punto Administrativo (baja tensión).



Figura 56. Tablero General de distribución

En la Figura 57 se muestra un plano con los tableros que hay en el bloque administrativo.

4.5 Características del instrumento analizador de redes

Para medir todos los parámetros ya mencionados en los capítulos anteriores, se necesita un instrumento moderno, eficiente y práctico en la manipulación, y con una memoria que sea capaz de registrar los datos por largo plazo y su posterior procesamiento, entre otras características. Actualmente existen varios tipos de equipos según sea la aplicación para la que sean requeridos, y en muchas ocasiones queda limitada por la magnitud de la corriente o tensión del sistema eléctrico. La IEC 61000-3-2 indica las pautas y los requisitos como mínimo que debe tener al momento de adquirir un equipo eléctrico: dominio de frecuencia que aplique filtros digitales o la transformación discreta de Fourier, analizador de espectros con sintonización a la frecuencia que se requiera medir. Teniendo en consideración lo mencionado, el instrumento a utilizar para las mediciones es un Analizador de Redes o analizador de calidad de potencia trifásica portátil de la marca METREL.



Figura 58. Equipo Metrel MI 2883

Es importante mencionar algunas de las especificaciones técnicas del instrumento para tener en consideración al momento de utilizarlo.

Tabla 41. Datos del equipo

Marca	LOGITEC. Certificado N° 175241
Modelo	4
Empresa calibradora	4
Entradas de medida de corriente	> 1000
Entradas de medida de tensión	>1 año (Dependiendo de la tarjeta SD)
Máximo número de parámetros a grabar	1s, 3s, 5s, 10s, 1min, 2min, 5min, 10min, 15min, 30min, 1h, 2h
Máximo tiempo de registro	MicroSD 8GB, se puede ampliar hasta 32GB
Intervalo de grabación (según la normativa aplicada)	CAT IV: 600V CAT III: 1000V
Capacidad de memoria	USB o Ethernet
Categoría de sobretensión	PowerView
Comunicación	LOGITEC. Certificado N° 175241
Software	4

Además, cuenta con un software avanzado Powerview3 que permite un análisis detallado de los datos registrados.

Las normativas aplicadas para su diseño esta entre la IEC e IEEE

- EC/EN 61000-4-15
- IEC/EN 61000-4-30
- IEC/EN 61000-4-7
- IEC/EN 61000 series
- IEEE 1459
- IEEE 1448
- IEEE 519
- IEC/EN 50160

En cuanto al uso, es aplicado en cualquier sector industrial para los siguientes casos:

- Analizar las causas de fallas en las diferentes instalaciones
- Estudio de los armónicos presentes en sistema eléctrico
- Selección eficiente de los bancos de condensadores con el objetivo de compensar la reactiva.
- Corroborar la potencia contrata.

En base a los datos realizar auditorías en temas energéticas permite el registro de señales como:

- Distorsión armónica de corriente y tensión
- Factor de potencia
- Registro de eventos de tensión
- Frecuencia de red.
- Armónicos de tensión y corriente de orden 2 hasta 50.
- Potencia aparente, activa y reactiva
- Energía total, activa y reactiva
- Registro de eventos de otras señales (alarmas)
- Tensión fase-neutro o entre fases, según tipo de red: mide el Verdadero Valor Eficaz (TRMS), aplicable en instalaciones con cargas no lineales.
- Corriente de fase.

El sistema eléctrico está compuesto por transformadores que dependiendo de su configuración se realiza las mediciones entre la carga y el secundario del transformador. El instrumento se puede configurar de acuerdo a la conexión de nuestro sistema eléctrico, como podemos visualizar en la Figura 59, se muestran las conexiones para los diferentes casos del sistema eléctrico.

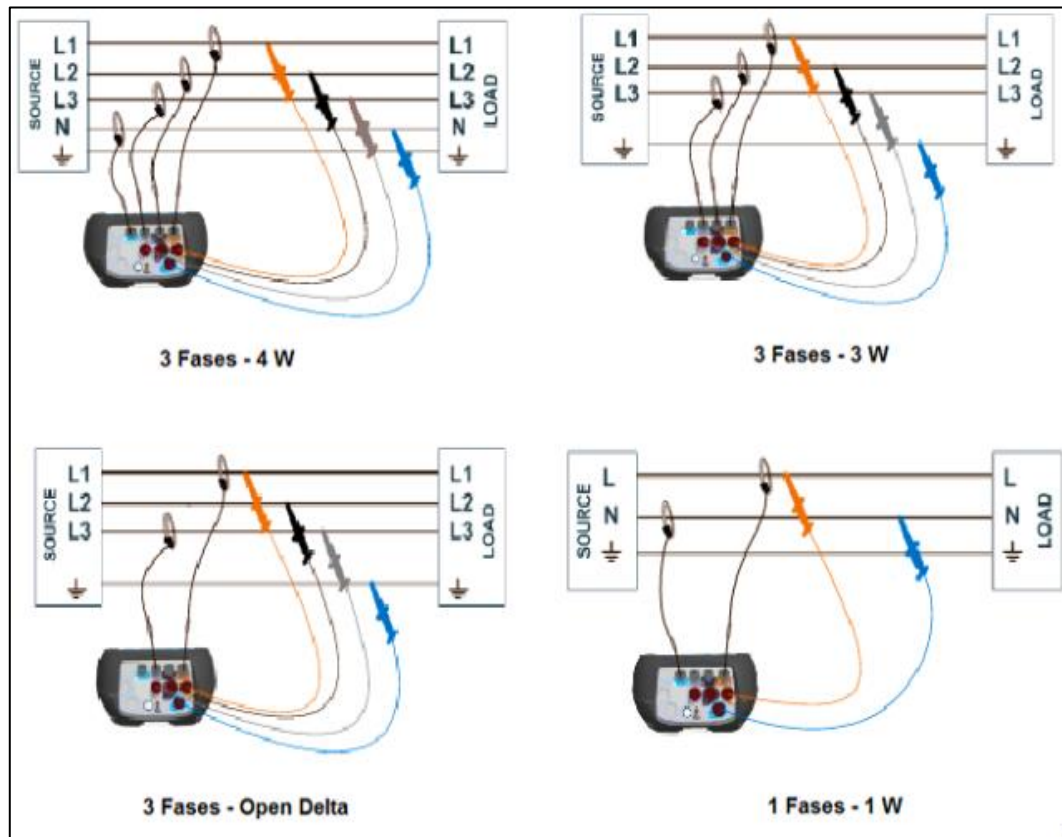


Figura 59. Formas de conexión del equipo

Describiremos alguno de las carpetas del instrumento para así prevenir daños internos, en este caso la carpeta de configuración del dispositivo, entonces ingresamos y modificamos los valores de acuerdo a nuestro sistema eléctrico. Es importante conocer el dato de placa del transformador para verificar la conexión y de acuerdo a esto modificarlo en el dispositivo en la parte de conexión que pueden ser de las siguientes fases: 1 W, 2 W, 3 W, 4 W, Open Delta; en la parte de pinza corriente fase y pinza corriente neutro se colca el valor que se muestra en las pinzas tal como se muestra en la Figura 60. Además, verificar la frecuencia del sistema que es de 60 Hz.



Figura 60. Configuración de parámetros del equipo

4.5.1 Configuración del equipo en el PCC

Hay que tomar todas precauciones del caso antes de realizar trabajos en una subestación, para ello el personal debe tener el implemento y los Equipos de Protección Personal (EPP):

- Zapatos dieléctricos de 1000 V para una subestación de 10 - 29.7 KV en media tensión.
- Guantes dieléctricos de 1000 V
- Casco
- Barbiquejo
- Herramientas para uso eléctrico completamente aislados: desarmadores.
- Protección ocular
- Señalización del entorno de trabajo
- Elaborar el Análisis de Trabajo Seguro (ATS): para identificar los riesgos y peligros tanto para trabajos en caliente y/o frío.

Se establece la configuración del sistema: sistema trifásico con conexión a tierra sin conexión neutra, con una tensión V_{L-L} de 230 V.

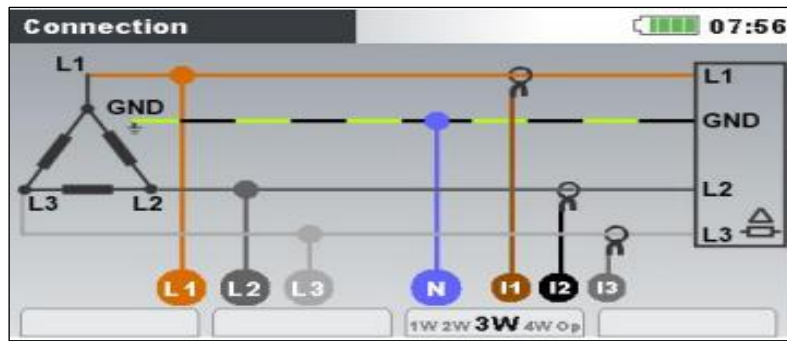


Figura 61. Configuración 3 W con conexión a tierra de los equipos

Esquemáticamente:

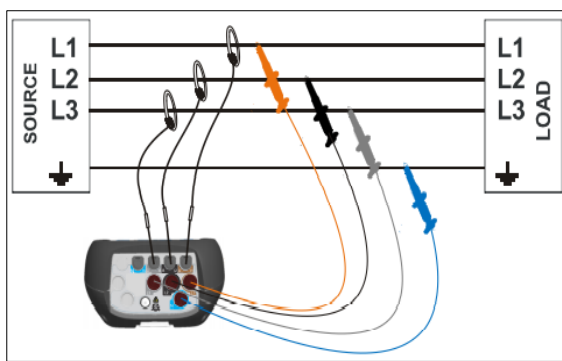


Figura 62. Selección de la conexión para la medición

Se procede a conectar las pinzas en los terminales del interruptor termomagnético general del área Administración. En la Figura 63 se muestra la conexión para medición de tensión y la Figura 64 para la medición de corriente.

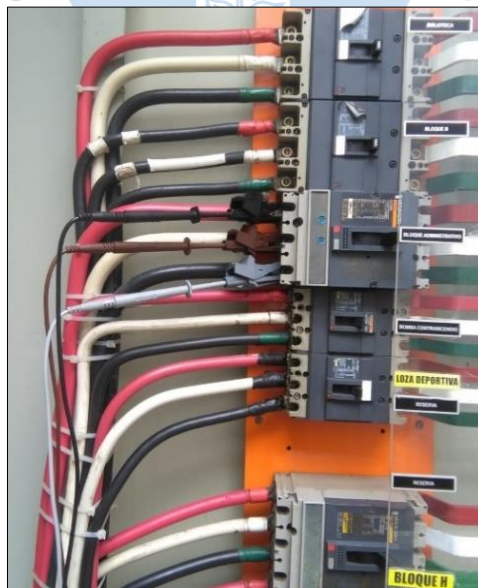


Figura 63. Instalación de equipo para la medición de parámetros de tensión

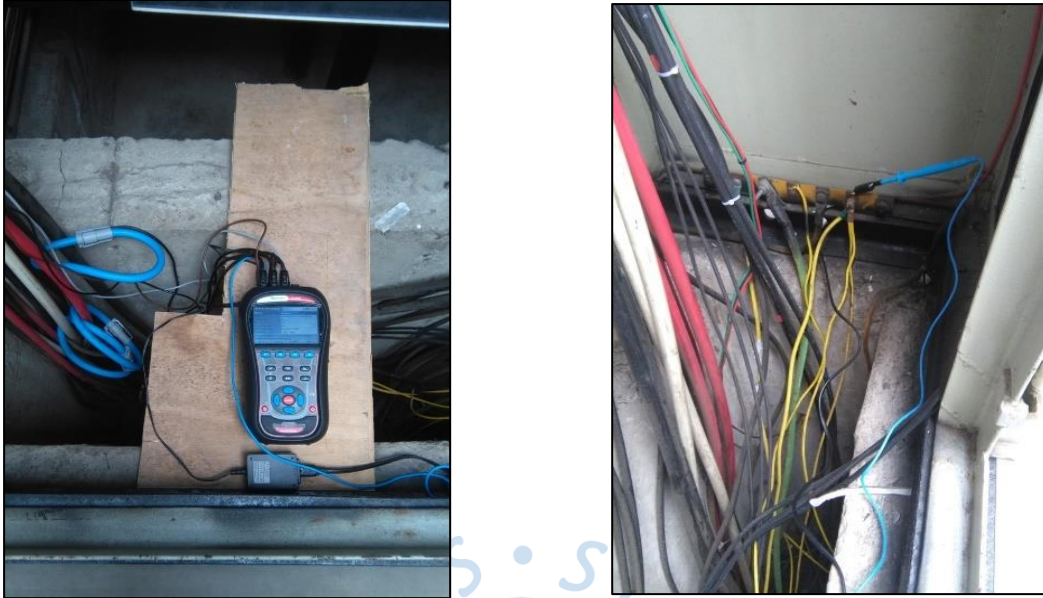


Figura 64. A la izquierda se muestra la instalación de equipo para la medición de parámetros de corriente, a la derecha la conexión a tierra

Corroboramos la conexión en la pantalla del dispositivo Metrel MI 2883:

Como observamos en la Figura 65 las tres fases R-S-T están en el orden establecido; por el contrario, el equipo muestra con un Aspa (x) cuando las fases no corresponden, de esa manera evitamos tomar datos incorrectos que alteran nuestros resultados. La normativa aplicada para la medición es la NTPSE (N°020 - 97 – EM).



Figura 65. Verificación de conexión del equipo corriente y tensión

4.6 Resultados y análisis de las mediciones

Obtención e interpretación de resultados:

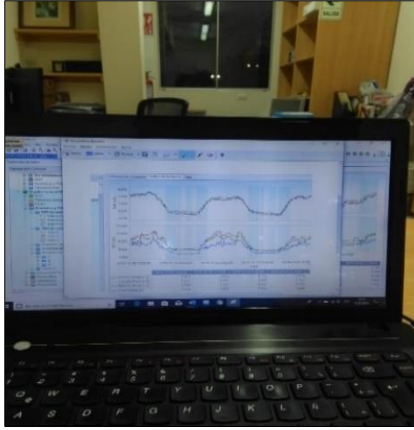


Figura 66. Analizando las mediciones obtenidas por el equipo Metrel MI 2883

4.6.1 Tensión

La tensión entre fases registradas:

Tabla 42. Parámetros de tensión

Símbolo	Nombre	L12	L23	L13	Unidad
V	Tensión	226.21	226.26	226.96	V

La forma de la tensión para cada instante tiempo entre línea – línea para L12, quedaría expresada:

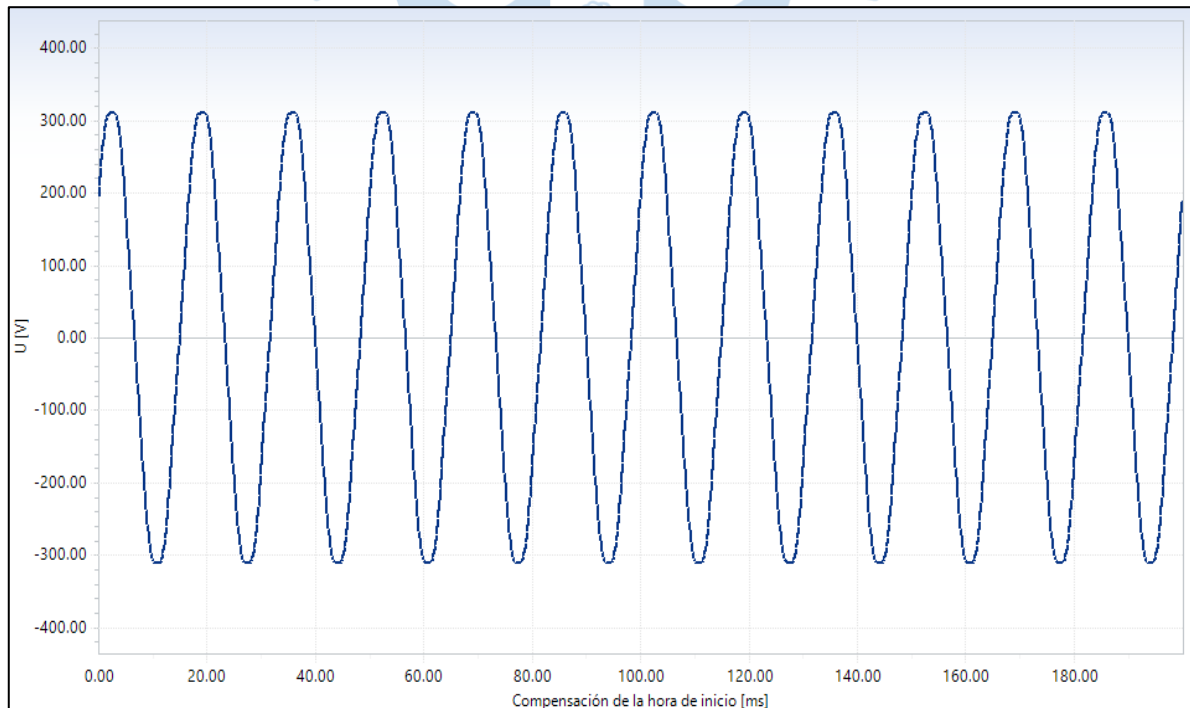


Figura 67. Forma de onda de la Tensión instantánea $V_{L-L} = V_{1-2}$.

4.6.1.1 Sobretensión

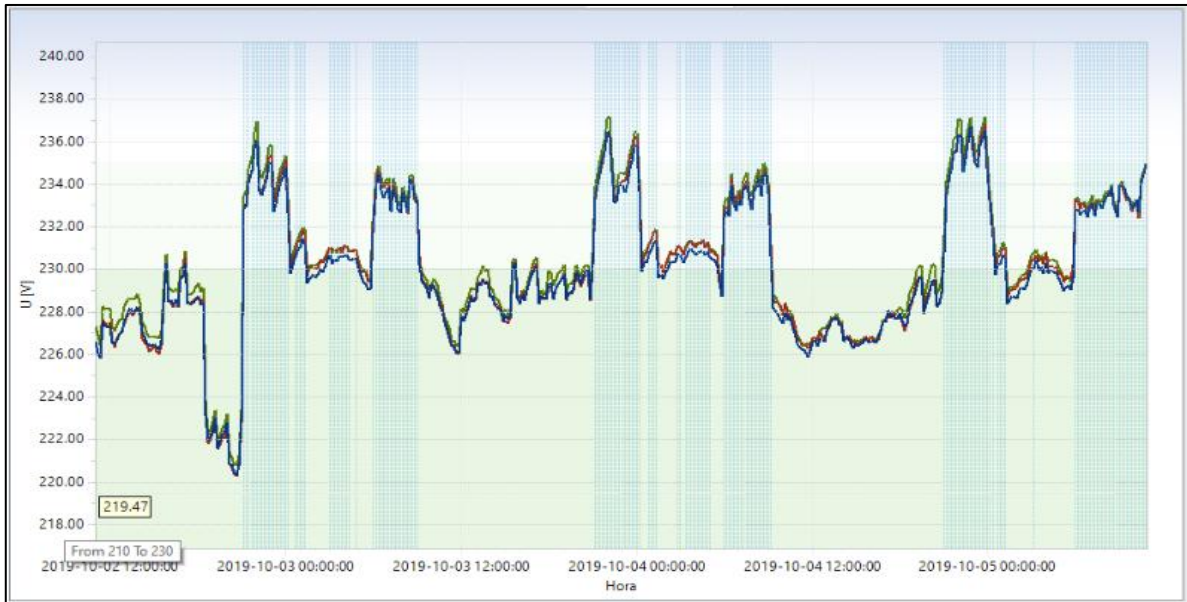


Figura 68. Tensión a lo largo del tiempo

Tabla 43. Datos significativos de sobretensión

Hora	U12 (min.)	U12 (med.)	U12 (max.)	U23 (min.)	U23 (med.)	U23 (max.)	U31 (min.)	U31 (med.)	U31 (max.)
	219.38	229.40	236.74	219.34	229.56	236.83	219.85	229.94	237.22
2/10/2019 20:20	219.52	220.16	220.8	219.5	220.05	220.7	220.03	220.64	221.17
2/10/2019 20:30	219.38	220	220.42	219.34	219.97	220.38	219.85	220.43	220.81
2/10/2019 20:40	219.54	219.96	220.36	219.4	219.91	220.26	219.9	220.45	220.84
3/10/2019 05:00	228.85	229.33	230.03	229.15	229.69	230.28	229.19	229.75	230.44
3/10/2019 05:10	228.76	229.24	229.69	229	229.53	229.95	229.22	229.66	230.06
3/10/2019 05:20	228.36	228.89	229.42	228.81	229.32	229.84	228.97	229.43	229.95
3/10/2019 17:00	228.73	229.25	229.96	228.89	229.35	230.1	229.26	229.7	230.4
3/10/2019 17:10	227.25	228.94	230.13	227.33	228.98	230.28	227.73	229.38	230.59
4/10/2019 22:50	234.35	235.7	236.74	234.4	235.8	236.76	234.74	236.21	237.14
4/10/2019 23:40	235.06	235.53	236.14	235.38	235.82	236.39	235.64	236.14	236.69
4/10/2019 23:50	233.46	234.63	236.51	233.76	234.9	236.83	234.09	235.26	237.22

Hora	U12 (min.)	U12 (med.)	U12 (max.)	U23 (min.)	U23 (med.)	U23 (max.)	U31 (min.)	U31 (med.)	U31 (max.)
	219.38	229.40	236.74	219.34	229.56	236.83	219.85	229.94	237.22
5/10/2019 00:00	232.13	234.16	234.73	232.37	234.33	235.1	232.73	234.75	235.38
5/10/2019 04:00	228.64	229.21	230.32	229.02	229.62	230.72	229.14	229.83	230.85
5/10/2019 04:10	228.72	229.22	229.82	229.02	229.53	230.1	229.32	229.83	230.39
5/10/2019 04:20	228.54	229.26	229.94	228.67	229.55	230.12	229.05	229.9	230.45

De acuerdo a la NTPSE establece un límite de $\pm 5\%V$, con una tensión teórica mínima y máxima de 218.5 V y 241.5 V respectivamente.

De la Tabla 43 se observa que la tensión mínima de 219.38 V es superior al límite y la tensión máxima de 237.22 V es inferior al límite establecido. Por tanto, si cumple con las sobretensiones es considerado una tensión de buena calidad.

4.6.1.2 Armónicos de tensión con la normativa NTPSE

Individual % V_i

Según la NTPSE indicada en la Tabla 28 los límites para cada armónico individual

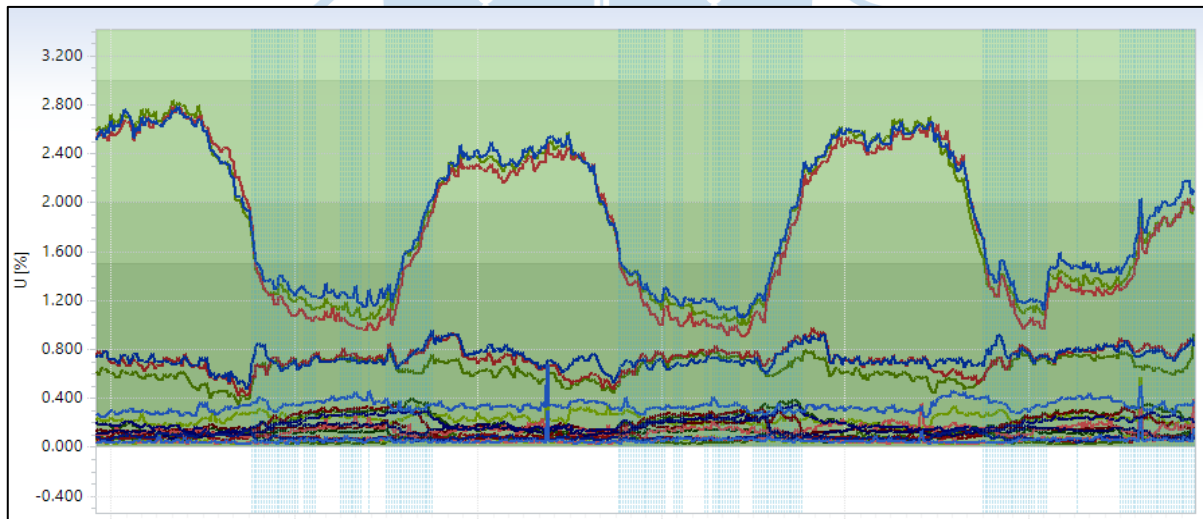


Figura 69. Armónicos de orden 2 a 13

Nota. Línea azul – L12, Línea verde – L31

De la Figura 69, observamos que los armónicos mantienen la magnitud entre las diferentes fases. La fase seleccionada para el análisis será L12, cuyos valores son los siguientes:

Tabla 44. Datos de la medición de armónicos de orden 0 - 50

Orden	Magnitud	Límite, media y baja tensión	Aplica	Orden	Magnitud	Límite, media y baja tensión	Aplica
a2	0.3130	2.00	Cumple	a26	0.0250	0.20	Cumple
a3	0.6900	5.00	Cumple	a27	0.0480	0.20	Cumple
a4	0.1850	1.00	Cumple	a28	0.0240	0.20	Cumple
a5	2.7890	6.00	Cumple	a29	0.0560	0.63	Cumple
a6	0.1350	0.50	Cumple	a30	0.0280	0.20	Cumple
a7	0.9600	5.00	Cumple	a31	0.0550	0.60	Cumple
a8	0.1440	0.50	Cumple	a32	0.0260	0.20	Cumple
a9	0.1630	1.50	Cumple	a33	0.0490	0.20	Cumple
a10	0.0990	0.50	Cumple	a34	0.0270	0.20	Cumple
a11	0.3460	3.50	Cumple	a35	0.0660	0.56	Cumple
a12	0.0620	0.20	Cumple	a36	0.0340	0.20	Cumple
a13	0.2490	3.00	Cumple	a37	0.0210	0.54	Cumple
a14	0.0440	0.20	Cumple	a38	0.0350	0.20	Cumple
a15	0.1250	0.30	Cumple	a39	0.0420	0.20	Cumple
a16	0.0390	0.20	Cumple	a40	0.0330	0.20	Cumple
a17	0.1420	2.00	Cumple	a41	0.0440	0.51	Cumple
a18	0.0280	0.20	Cumple	a42	0.0330	0.20	Cumple
a19	0.1350	1.50	Cumple	a43	0.0360	0.49	Cumple
a20	0.0280	0.20	Cumple	a44	0.0320	0.20	Cumple
a21	0.0840	0.20	Cumple	a45	0.0560	0.20	Cumple
a22	0.0290	0.20	Cumple	a46	0.0480	0.20	Cumple
a23	0.0820	1.50	Cumple	a47	0.0570	0.47	Cumple
a24	0.0280	0.20	Cumple	a48	0.0480	0.20	Cumple
a25	0.0700	1.50	Cumple	a49	0.0560	0.20	Cumple
a26	0.0250	0.20	Cumple	a50	0.0480	0.20	Cumple

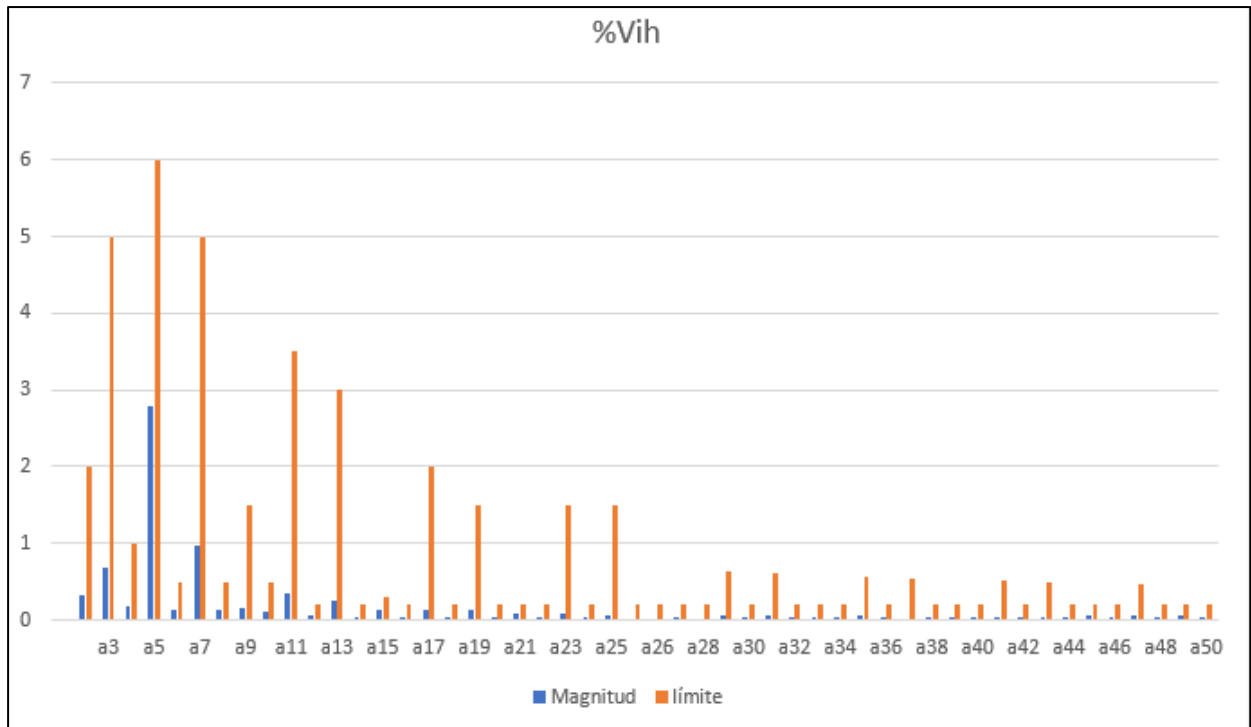
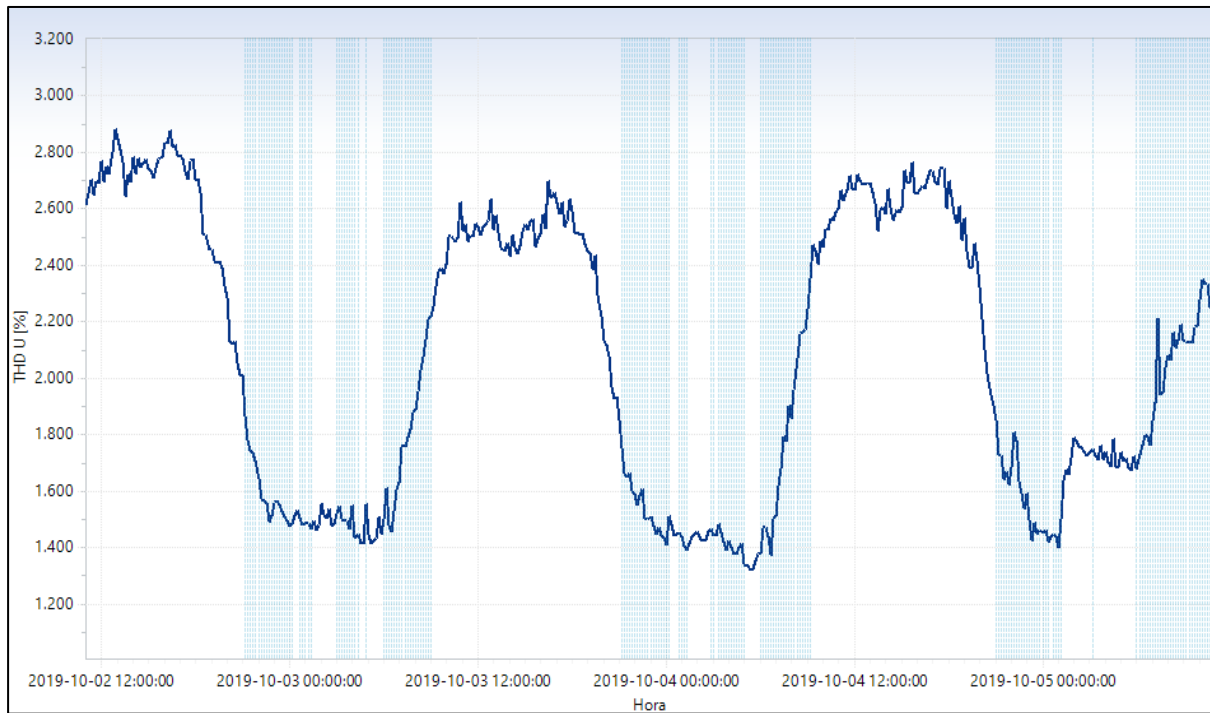


Figura 70. Gráfica de la corriente en comparación con la normativa NTPSE

La normativa indica los primeros 40 armónicos, para este caso consideraremos hasta el orden 50. Todos los valores $\% V_i$ están dentro de los límites definidos por la NTPSE. Evaluando los primeros armónicos más influyentes en la red:

- El transformador es trifásico con salida 230 V sin neutro, por tanto, la magnitud de los armónicos de 3er orden no será significativo, se evitan sobrecalentamiento del transformador, de conductores entre otros efectos mencionados en el Capítulo 3.
- No inyectará armónicos a la red reduciendo los efectos que pueden provocar en otros equipos conectados en el PCC.
- De la Figura 59, el armónico de 5to orden es el más significativo porque dentro del área administrativo hay equipos electrónicos que trabajan con reguladores e inversores por ejemplo Los variadores de frecuencia, UPS, aire acondicionado y equipo de bajo consumo como teléfonos móviles, luces led, laptops, entre otros.

Global % THD:**Figura 71.** Variación de la distorsión armónica total THDv%

Podemos ver como varia la THD durante el día, los picos bajos representan los armónicos en las noches de 20:00 h a 6:00 h y coincidente porque en esas horas los equipos electrónicos como fluorescentes, computadoras, fotocopias, aire acondicionado, variadores de tensión, cargados de celulares, cajeros automáticos, etc., están desactivados por tanto la emisión de armónicos es baja, sin embargo, durante el día a partir de las 06:00 h los armónicos empiezan a incrementarse debido al uso de los equipos electrónicos y se puede ver en la gráfica que crece rápidamente de 6:00 h a 10:00 h y se mantiene hasta las 20:00 h aproximadamente. Por ahora el límite se mantiene inferior a 6 % establecidos por NTPSE. Sin embargo, si aumentan las cargas no lineales podría saturar el sistema y la THD se verá afectada.

Tabla 45. Parámetros de tensión NTPSE

V	L12	L23	L31
THD %	2.887	2.871	2.908

Para la normativa IEEE 519 – 1992, establece los límites de distorsión armónica para baja y media tensión como:

Tabla 46. Parámetros de tensión IEEE 519 - 1992

Tensión en el PCC	Distorsión individual	Distorsión total de tensión
Hasta 69 kV	3 %	5 %

Los límites son inferiores a los límites establecidos; por tanto, cumple con lo establecido por la normativa norteamericana. En cuanto a la normativa europea IEC 61000-3-6, el límite establecido para el armónico es la siguiente:

Tabla 47. Parámetros de tensión IEC 61000 – 3 – 6

Orden de los armónicos (h)	Baja y media tensión		Aplica
	Nivel de compatibilidad	Valores indicativos de Niveles de planificación	
Armónicos impares no múltiplo de 3			
5	6	5	Cumple
7	5	4	Cumple
11	3.5	3	Cumple
13	3	2.5	Cumple
17	2	1.6	Cumple
19	1.5	1.2	Cumple
23	1.5	1.2	Cumple
25	1.5	1.2	Cumple
>25	0.2+1.3x25/n	0.2+0.5x25/n	Cumple
Armónicos impares múltiplo de 3			
3	5	4	Cumple
9	1.5	1.2	Cumple
15	0.3	0.3	Cumple
21	0.2	0.2	Cumple
>21	0.2	0.2	Cumple

Armónicos pares			
2	2	1.6	Cumple
4	1	1	Cumple
6	0.5	0.5	Cumple
8	0.5	0.4	Cumple
10	0.5	0.4	Cumple
12	0.2	0.2	Cumple
>12	0.2	0.2	Cumple
Distorsión armónica total THD	8	6.5	Cumple

4.6.2 Corriente

La corriente entre fases registradas:

Tabla 48. Parámetros de corriente

Símbolo	Nombre	I1	I2	I3	Unidad
I	Corriente	89.775	85.958	93.308	A

La forma de la corriente para cada instante tiempo entre línea – línea para I1, quedaría expresada:

En la Figura 72 podemos observar que, a diferencia de la señal de tensión donde se mantienen la forma senoidal, en la corriente la forma senoidal se distorsiona producto de la presencia de armónicos generados por las cargas no lineales instaladas en las diferentes áreas de la universidad, sin embargo, se mantiene en cierto grado dicha forma de onda.

4.6.2.1 Armónicos de corriente. La NTPSE no indica ninguna referencia sobre los límites para armónicos de corriente en general. Menciona que el control de los armónicos de corriente es bajo responsabilidad plena del propietario, es decir, ante algún problema de los equipos dentro de las instalaciones de una empresa, la empresa suministradora no se hará responsable por los daños ocasionados. Según lo investigado en el Capítulo 2, existen normativas que permiten medir e identificar los armónicos de corriente emitidos por las cargas, entre las mencionadas está la Normativa IEEE 519.

Individual %V_i

Según los datos obtenidos por el equipo analizador de redes, la corriente I_L máxima de una de las fases es $I_L = 93.308$ A, para determinar la corriente de corto circuito analizamos de la siguiente manera:

El interruptor termomagnético principal del bloque administrativo contiene las siguientes características:

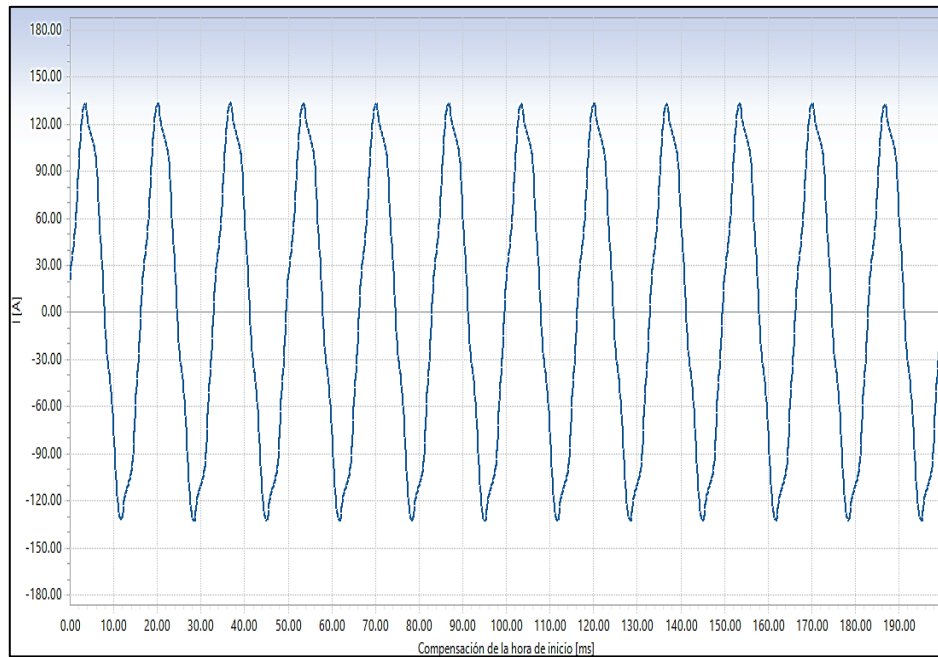


Figura 72. Forma de onda de la Corriente instantánea $V_{I-1} = V_{I-2}$.

Tabla 49. Datos de placa del interruptor automático principal del bloque administrativo

MERLIN GERIN NS250N U _i 750 V U _{imp} 8 kV	
U_e (V)	I_{cu} (kA)
220/240 ~	85
380/415 ~	36
440 ~	35
500 ~	30
525 ~	22
660/690 ~	8
$I_{cs} = 100 \% I_{cu}$	
IEC 947 – 2	

El poder de ruptura (I_{cu}) de un interruptor es mayor igual a la corriente de corto circuito (I_{cc}), por tanto, se elegirá el valor máximo del I_{cu} como I_{SC} para una tensión de 220/240 V cuyo valor es 85 kA.

$$relación = \frac{I_{cs}}{I_L} = 910.96$$

De la Tabla 27, el valor recae en la 4ta fila entre $100 < 1000$, entonces se tendrá:

Tabla 50. Límites de los armónicos para una corriente máxima de cortocircuito de 910.96

Límites de corriente armónica para carga no lineal en el punto de acoplamiento común con otras cargas, para voltajes entre 120 V-69 Kv						
Máxima distorsión armónica impar de la corriente, en % del armónico fundamental						
I_{SC}/I_L	< 11	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$35 \leq n$	TDD
$100 < 1000$	2	5.5	5	2	1	15
Nota: Los armónicos pares se limitan al 25 % de los límites de los armónicos impares mostrados anteriormente						
*Todo equipo de generación se limita a estos valores independientes del valor de I_{SC}/I_L que presente.						
I_{SC} : Corriente máxima de cortocircuito en el PCC.						
I_L : Corriente de demanda máxima de carga (a frecuencia fundamental) en el PCC.						
TDD: Distorsión total de la demanda en % de la demanda máxima.						
I_{SC}/I_L : Esta relación muestra el tamaño relativo de la carga en comparación con el sistema de utilidad y esta relación en el primario determina los límites actuales.						

Tabla 51. Comparativo entre el límite y la magnitud de los armónicos medidos por el analizador de redes

Orden L123		% THD _i	Límite	Cumple
		L1		
Orden < 11	I1 a2 [%]	11.31	12	Cumple
	I1 a3[%]	18.05	12	No cumple
	I1 a5 [%]	27.21	12	No cumple
	I1 a7 [%]	13.69	12	No cumple
	I1 a9 [%]	6.496	12	Cumple
11 = < Orden < 17	I1 a11 [%]	5.465	5.5	Cumple
	I1 a13[%]	5.983	5.5	No cumple
	I1 a15 [%]	2.838	5.5	Cumple
17 = < Orden < 23	I1 a17 [%]	3.673	5	Cumple
	I1 a19[%]	2.344	5	Cumple
	I1 a21 [%]	1.181	5	Cumple
	I1 a23 [%]	1.527	5	Cumple

	Orden L123	% THD _i	Límite	Cumple
L2				
Orden < 11	I2 a2 [%]	9.89	12	Cumple
	I2 a3[%]	21.24	12	No cumple
	I2 a5 [%]	27.75	12	No cumple
	I2 a7 [%]	22.38	12	No cumple
	I2 a9 [%]	6.172	12	Cumple
11 = < Orden 17	I2 a11 [%]	6.126	5.5	No cumple
	I2 a13[%]	8.701	5.5	No cumple
	I2 a15 [%]	4.738	5.5	Cumple
17 = < Orden < 23	I2 a17 [%]	2.219	5	Cumple
	I2 a19[%]	3.797	5	Cumple
	I2 a21 [%]	0.956	5	Cumple
	I2 a23 [%]	1.077	5	Cumple
L3				
Orden < 11	I3 a2 [%]	7.842	12	Cumple
	I3 a3[%]	8.644	12	Cumple
	I3 a5 [%]	22.67	12	No cumple
	I3 a7 [%]	11.552	12	Cumple
	I3 a9 [%]	5.678	12	Cumple
11 = < Orden < 17	I3 a11 [%]	5.646	5.5	No cumple
	I3 a13[%]	5.338	5.5	Cumple
	I3 a15 [%]	2.384	5.5	Cumple
17 = < Orden < 23	I3 a17 [%]	2.998	5	Cumple
	I3 a19[%]	1.242	5	Cumple
	I3 a21 [%]	0.615	5	Cumple
	I3 a23 [%]	1.002	5	Cumple

Tomando la línea L1, la distorsión individual máxima está fuera del límite para los armónicos de orden 3, 5, 7 y 13 con valores de 18.05 %, 27.21 %, 13.69 % y 5.983 % respectivamente. Respecto a la TDD %, se obtiene valores inferiores a 15 % establecido por la normativa.

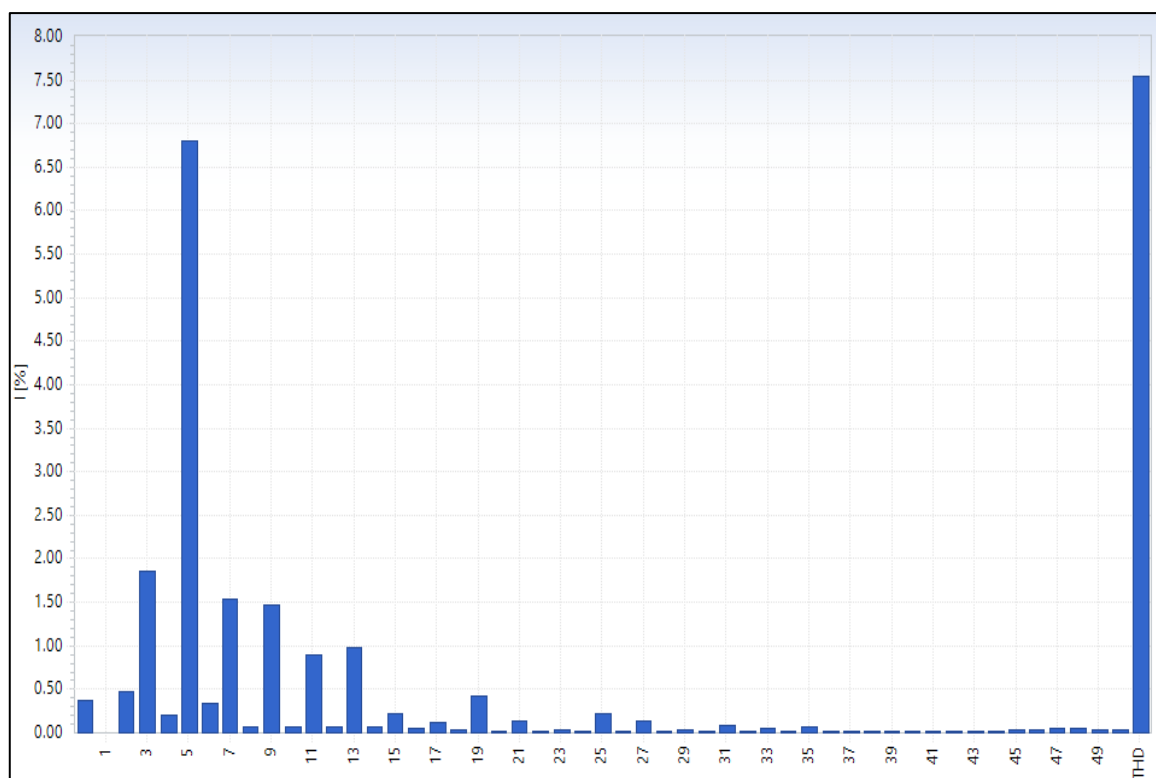


Figura 73. Representación de la magnitud de los armónicos de corriente

Tabla 52. Resultado de la Distorsión Total de la Demanda

TDD I1 [%]	TDD I2 [%]	TDD I3 [%]
9.25	11.504	10.447

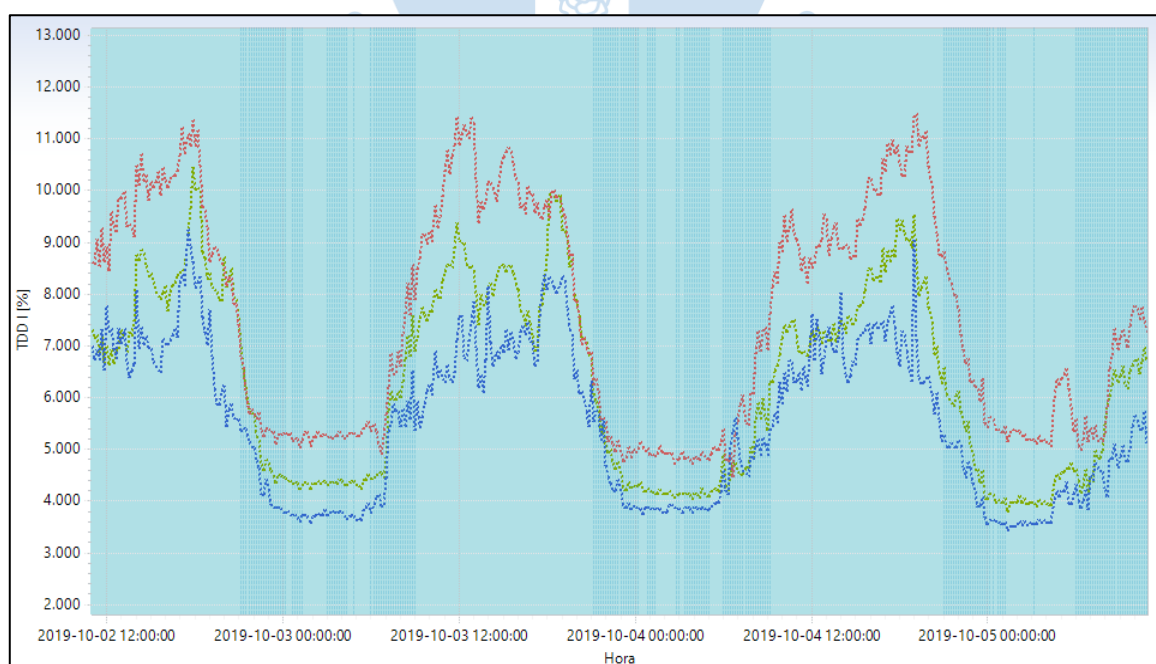


Figura 74. Gráfica de la TDD % a lo largo del tiempo

Nota. Línea azul – Línea TDDI1; Línea roja – Línea TDD I2 y Línea verde – Línea TDD I3

Global % THD

El analizador de redes muestra el siguiente dato en el tiempo:

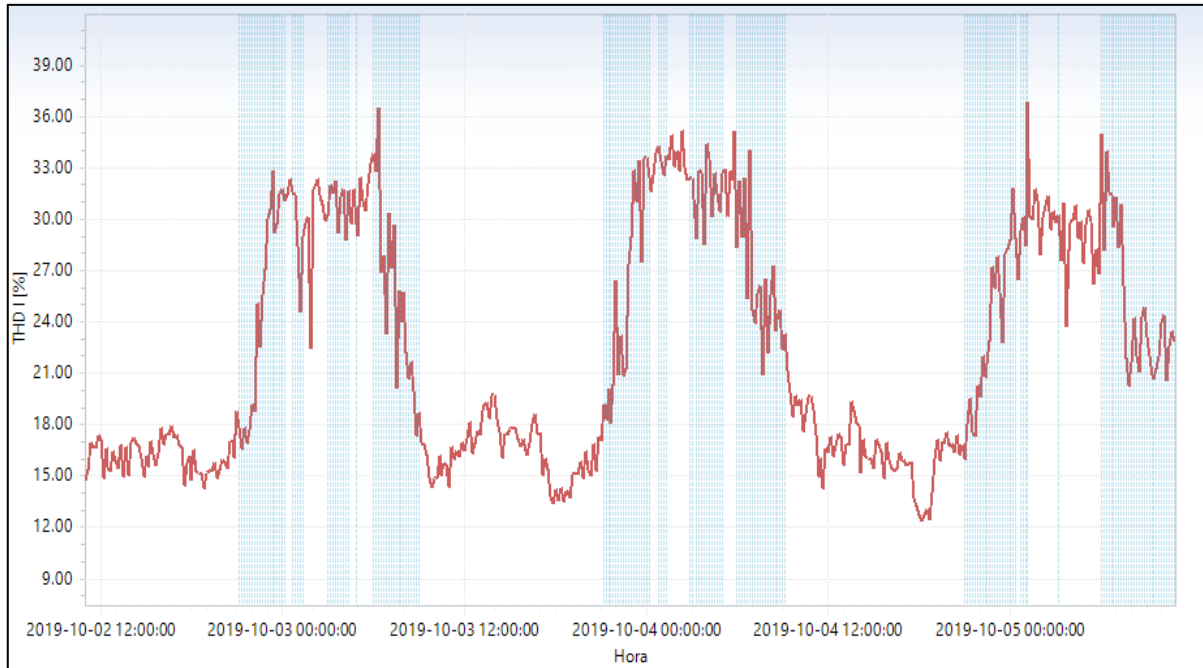


Figura 75. Variación de la distorsión armónica total THD1%

Podemos ver como varía la THDI durante los días, los picos altos representan los armónicos en las noches de 20:00 h a 9:00 h. Se tienen magnitudes de porcentajes elevados y se corrobora que el sistema está saturado de corrientes armónicas.

Tabla 53. Distorsión armónica de corriente en cada fase

I	L1	L2	L3
THD %	32.09	36.94	26.31

4.6.3 Filtros recomendados

De acuerdo a la medición realizada por medio del analizador de redes se detectó armónicos de corrientes significativos fuera de los límites según la normativa IEEE 519. En el Capítulo 3 se estudió los diferentes tipos de filtros para mitigar los armónicos, por consiguiente, se procederá a una evaluación del filtro adecuado para el caso de estudio en esta tesis.

Para este problema de perturbación armónica con THD de 36.94 emplearemos los filtros activos en paralelo con capacidad de añadir más filtros para reducir magnitudes significativas ante cualquier aumento de armónicos a largo plazo.

Las cargas que se conectan a este bloque son de potencias bajas; también mencionar que no se tiene el neutro conectado y simplifica la ubicación de los filtros porque no hay la necesidad de colocar filtros en cada ramal. También se indica que el uso de filtros activos en serie se emplea normalmente cuando tenemos armónicos de tensión. Por tanto, evaluaremos posibles filtros que se adecuen a nuestro sistema y que garanticen una óptima eficiencia y que sea económico.

4.6.3.1 Lifasa: SINAF M

- Consideraciones técnicas

Equipos de filtrados empleados para mitigar cargas generadoras de armónicos de instalaciones trifásicas de la industria, instituciones universitarias, comerciales o de servicio. Especialmente empleadas para cargas no lineales de baja potencia variadores de velocidad, ordenadores, luminarias.

- Características técnicas

Las características para equipos como variadores de velocidad, SAI, luminarias, fuentes estabilizadas, ordenadores, entre otras., son las siguientes:

- ✓ Modelo SINAFM348100W
- ✓ Corriente por fase 30A, 60A y 100A.
- ✓ Conexión: 3 hilos (tres fases) 400 – 480 V_(L-L) con +/- 5%; 4 hilos (tres fases y un neutro) 230V_(L-N) – 400 V_(L-L) +/- 5 % hilos
- ✓ Dimensión de tablero eléctrico: 745 x 439 x 288mm
- ✓ Material de tablero en plancha de fierro galvanizado
- ✓ Pintado electrostáticamente en polvo secado al horno.
- ✓ Color tablero RAL 7035
- ✓ Grado de protección IP 45
- ✓ Comunicación Etherned: TCP/IP, Modbus TCP

- Ventajas

- ✓ Fabricados en base a las Normativas:

Armónicos: N61000-3-4;

Compatibilidad electromagnética: EN61000-6-4:2007, EN61000-6-2:2006, IEC 55011:2011

- ✓ Reduce armónicos de $[\text{THD}]_i$ por debajo de 5% y $[\text{THD}]_v$ máximo de 25%
- ✓ Compensación de corriente armónica: desde 2° hasta 50° seleccionable

- ✓ Selección específica de armónico: desde 3° hasta el 25° armónico
- ✓ Mejora el factor de potencia del sistema
- ✓ Rápida respuesta ante transitorios: 0.1 ms

- Desventaja

- ✓ Se limite a sistemas trifásicos fase - fase a 220V sin neutro.

4.6.3.2 Circutor: Multinivel AFQm

- Consideraciones técnicas

Equipos de filtrado empleados para mitigar sistemas eléctricos con gran cantidad de cargas generadoras de armónicos sean en instalaciones monofásicas y trifásicas de la industria, instituciones universitarias, comerciales o de servicio, además brinda soluciones ante consumos de potencia reactiva. Especialmente empleadas para cargas no lineales de baja potencia.

- Características técnicas:

Las características para equipos como variadores de velocidad, SAI, luminarias, fuentes estabilizadas, aire acondicionado con variadores, ordenadores, entre otras., son las siguientes:

- ✓ Modelo AFQm-3WF-100M-480
- ✓ 3 hilos (tres fases) 208 - 480V_{L-L} con +/- 10%; 4 hilos (tres fases y un neutro) 208 V_{L-N} - 400V_{L-L} +/-10 % hilos
- ✓ Corriente por fase 30A, 60A y 100A.
- ✓ Tensión por fase: 400 - 480 ± 5 % (trifásico sin neutro) / 230 - 400 V ± 5 % (trifásico con neutro).
- ✓ Instalación en paralelo
- ✓ Dimensión de tablero eléctrico: 745x439x288mm
- ✓ Material de tablero en plancha de fierro galvanizado.
- ✓ Pintado electrostáticamente en polvo secado al horno.
- ✓ Color tablero RAL 7035
- ✓ Grado de protección IP 45
- ✓ Comunicación Ethernet: TCP/IP, Modbus TCP

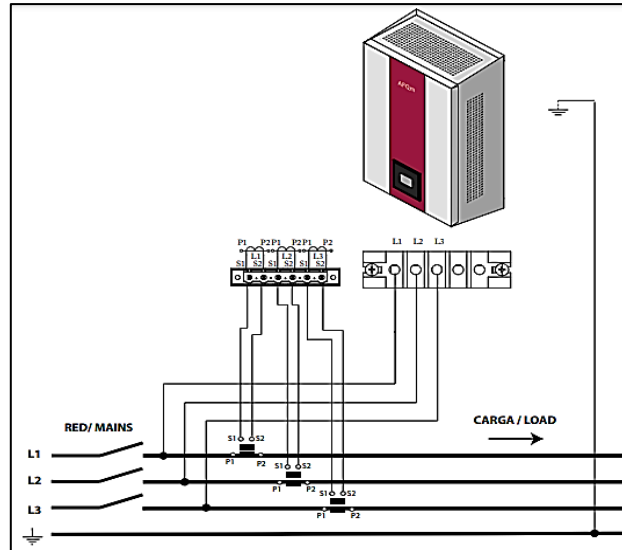


Figura 76. Medida trifásica con conexión a 3 hilos y medida de corriente en el lado de carga

Fuente: Circutor (2018) Armónicos: Problemática actual y su solución.

- Ventajas:

- ✓ Fabricados en base a las Normativas: para armónicos la N61000-3-4; para compatibilidad electromagnética la EN61000-6-4:2007; EN61000-6-2; IEC 55011:2011
- ✓ Filtrado de armónicos de THD_i por debajo de 5 % y THD_v máximo de 25 %
- ✓ Reducen los armónicos hasta el orden 50°
- ✓ Capacidad de seleccionar (sintonización) de frecuencias armónicas a filtrar con el objetivo de obtener una mayor eficiencia.
- ✓ Mejora el factor de potencia del sistema evitando penalidades por compensación reactiva.
- ✓ Rápida respuesta: 20 ms
- ✓ Permite un correcto equilibrio entre fases
- ✓ Evita la resonancia en la instalación en cualquier momento, es decir el filtro AFQm detecta cualquier resonancia en el sistema e inmediatamente se deshabilita hasta que desaparezca.

- Desventajas:

- ✓ Se limita por su elevado costo.

4.6.3.3 Schneider Electric: AccuSine PCSn

- Consideraciones técnicas:

Equipos de filtrado empleados para mitigar sistemas eléctricos con gran cantidad de cargas generadoras de armónicos sean en instalaciones monofásicas y trifásicas de la industria, instituciones universitarias, comerciales o de servicio, además brinda soluciones ante consumos de potencia reactiva. Especialmente empleadas para cargas no lineales de baja potencia.

Estos filtros miden la corriente de carga para luego calcular el error y posteriormente inyectan corriente necesaria para alcanzar los niveles permisibles de armónicos, equilibrado de cargas y compensación reactiva. Actúan rápidamente para proporcionar una respuesta de corrección y mitigación y para ello emplea la siguiente lógica discreta de control: la lógica discreta emplea la transformada rápida de Fourier (FFT) y medios digitales para medir amplitudes y ángulo de fase de cada rango armónico. Los modelos AccuSine PCSn y AccuSine PCS+ emplean esta lógica.

Schneider Electric emplea tres tipos de filtros AccuSine:

- ✓ AccuSine PCSn. Estos filtros activos son muy empleados para mitigar armónicos en edificios e instalaciones comerciales, se pueden incluir las instituciones universitarias como la Universidad de Piura.
- ✓ AccuSine PCS+. Estos filtros activos son muy empleados para mitigar armónicos en instalaciones industriales: plataformas petrolíferas, tratamientos de agua, plantas de procesamiento, HVAC, buques, etc.
- ✓ AccuSine PFV+. Estos filtros activos se aplican principalmente para compensar energía reactiva y soluciones específicas para mitigar armónicos en la industria pesada.

• Características técnicas:

Las características para equipos como variadores de velocidad, sistemas de alimentación interrumpida (UPS), fuentes estabilizadas, aire acondicionado con variadores, equipos de oficina (ordenadores, impresoras, servidores, monitores, etc.), aparatos electrodomésticos (televisores, hornos microondas, fluorescentes, lavadoras y secadoras, reguladores de luz); son las siguientes:

- ✓ Modelo AccuSine PCSn
- ✓ Topología de tres niveles: configurado con 12 IGBT (4 por fase)
- ✓ Conexión: 3 hilos (tres fases) $208 - 415V_{L-L}$ con $\pm 10\%$; 4 hilos (tres fases y un neutro) $208 V_{L-N} - 415V_{L-L} \pm 10\%$ hilos
- ✓ Corriente por fase 30A, 50A, 60A.
- ✓ Tensión por fase: $220 - 408 V \pm 10\%$ (trifásico sin neutro) / $220 - 408 V \pm 5\%$ (trifásico con neutro)
- ✓ Frecuencia 50/60Hz

- ✓ Instalación en paralelo
- ✓ Dimensión de tablero eléctrico: 265x440x265mm
- ✓ Material de tablero en plancha de fierro galvanizado
- ✓ Pintado electrostáticamente en polvo secado al horno.
- ✓ Color tablero RAL 7035
- ✓ Grado de protección IP 20
- ✓ Forma de control: Lazo abierto o cerrado
- ✓ Comunicación Ethernet: TCP/IP, Modbus TCP

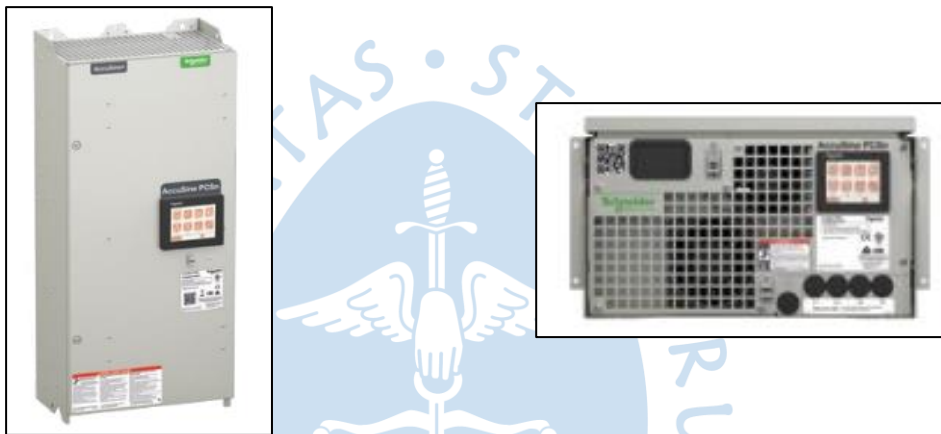


Figura 77. Accusine PCSn mural y módulo rack

Fuente: Circutor (2018) Armónicos: Problemática actual y su solución.

• Ventajas:

- ✓ Todos los modelos AccuSine realizan la corrección del factor de potencia con la finalidad de reducir el consumo de reactiva. Puede realizar de manera individual o simultánea.
- ✓ Los AccuSine PCS+ y PFV disponen de la función equilibrado de cargas (puede realizar de manera individual o simultáneo.), recordemos que un desequilibrio de fases de 3% puede generar un aumento de temperatura de 20% en equipos de inducción.
- ✓ Fluctuación de energía reactiva. Normalmente se da cuando se tienen instalados equipos de alta potencia como arcos eléctricos, calentadores rotativos, soldadura.
- ✓ Los grupos y los UPS, prolongaran su vida útil y un funcionamiento más fiable y eficaz Aporte en tiempo real de la corriente reactiva para los Blade servers.
- ✓ Fabricados en base a las Normativas:

Armónicos: N61000-3-4;

Compatibilidad electromagnética: EN61000-6-4:2007 (emisión), EN61000-6-2 (inmunidad), IEC 55011:2011

- ✓ Cancelación de espectros del H2 al H50
- ✓ Filtrado de armónicos de THD_i por debajo de 3% y THD_v máximo de 25%. Puede realizarlo de manera individual o simultaneo.
- ✓ Reducen los armónicos hasta el orden 50°
- ✓ Capacidad de seleccionar (sintonización) de frecuencias armónicas a filtrar con el objetivo de obtener una mayor eficiencia.
- ✓ Evita la resonancia en la instalación en cualquier momento, es decir detecta cualquier resonancia en el sistema e inmediatamente se deshabilita hasta que desaparezca.

- Desventajas:

- ✓ Se limita por su costo

4.6.3.4 TDK: AHF PQSine S Serie

- Consideraciones técnicas

También denominados limpiadores de redes que aseguran un correcto filtrado y buenos optimizadores de potencia muy empleados para mitigar armónicos producto de cargas no lineales de instalaciones monofásicas y trifásicas de la industria (ligera, moderada y pesada), edificios de oficinas como instituciones universitarias, centros comerciales.

Estos equipos analizan en conjunto las corrientes de fases y los armónicos asociados con el objetivo de generar una corriente de compensación de corriente para neutralizar los armónicos de corriente para así obtener una onda aproximadamente senoidal tal como lo visto en el Capítulo 3 en un caso práctico aplicado en un centro comercial. Además, trabaja al mismo tiempo corrigiendo el factor de potencia y la eficiencia de la red.

- Características técnicas

Las características para equipos como variadores de velocidad, sistemas de alimentación interrumpida (UPS), fuentes estabilizadas, data center, aire acondicionado con variadores, equipos de oficina (ordenadores, impresoras, servidores, monitores, etc.), aparatos electrodomésticos (televisores, hornos microondas, fluorescentes, lavadoras y secadoras, reguladores de luz), generación de energías renovables, sistemas de soldadura eléctrica, equipos utilizados en la industria ligera, moderada y pesada; son las siguientes:

- ✓ Modelo AHF PQSine S Serie.
- ✓ Topología de dos niveles: configurado con 6 IGBT (2 por fase)
- ✓ Topología de tres niveles: configurado con 12 IGBT (4 por fase)

- ✓ Conexión: 3 hilos (tres fases) 228 - 456 V_{L-L} ; 4 hilos (tres fases y un neutro) 208 V_{L-N} - 415 V_{L-L} +/-10 % hilos
- ✓ Corriente de compensación: 25 A, 35 A, 50 A, 60 A, 100 A, 150 A
- ✓ Frecuencia 50/60Hz
- ✓ Instalación en paralelo
- ✓ Dimensión de tablero eléctrico: 265x440x265mm
- ✓ Material de tablero en plancha de fierro galvanizado
- ✓ Pintado electrostáticamente en polvo secado al horno.
- ✓ Color tablero RAL 7035
- ✓ Grado de protección IP 20
- ✓ Forma de control: Lazo abierto o cerrado
- ✓ Comunicación Ethernet: TCP/IP, Modbus TCP

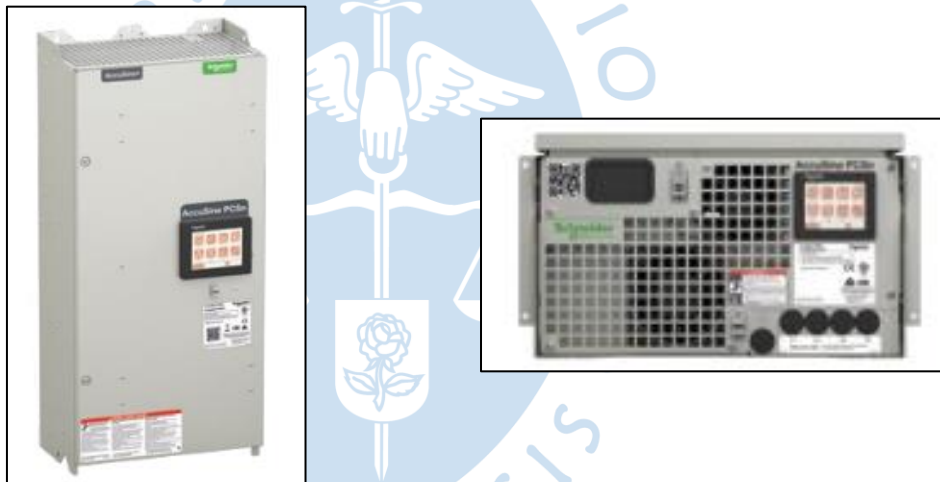


Figura 78. Accusine PQSine S Serie.y módulo rack

Fuente: Circutor (2018) Armónicos: Problemática actual y su solución.

- Ventajas

- ✓ Compensación de *Flicker*
- ✓ Compensación inmediata de potencia reactiva tanto inductiva como capacitiva
- ✓ Ofrece balance de fases del sistema
- ✓ Compuesta de módulos extensibles
- ✓ Detección inteligente y digital utilizando algoritmos de FFT y para la compensación reactiva
- ✓ Insensible a las condiciones de la red

- ✓ Compensación de armónicos de 2° hasta el orden 50°
- ✓ Capacidad de seleccionar (sintonización) de frecuencias armónicas a filtrar con el objetivo de obtener una mayor eficiencia.
- ✓ Tasa de filtración de armónicos superior al 97%
- ✓ Evita la resonancia en la instalación en cualquier momento, es decir detecta cualquier resonancia en el sistema e inmediatamente se deshabilita hasta que desaparezca.
- ✓ Capacidad de ajustar la compensación de reactiva desde -1 a 1
- ✓ Fabricados en base a las Normativas: IEEE 519.

• Desventajas:

- ✓ Se limita por su costo y consumo energía.

4.6.3.5 Resumen

Tabla 54. Cuadro resumen de los filtros evaluados

Características	Filtros activos			
	Lifasa: SINAF M	Circutor: Multinivel AFQm	Schneider Electric: AccuSine PCSn	TDK: AHF PQSine S Serie
Topología 6 IBT				
Topología 12 IGBT				
3 hilos (tres fases) 228 – 456 V _{L-L}				
4 hilos (tres fases un neutro) 208 V _{L-N} – 415 V _{L-L}				
Corriente compensación 30 A, 60 A, 100 A				
Corriente compensación 25A, 35A, 50A, 60A, 100A, 150 A				
Corriente compensación 30A, 50A, 60 ^a				
Instalación en paralelo				
Forma de control: Lazo abierto o cerrado				
Balance de fases				
Compensación de <i>Flicker</i>				
Compensación inmediata de potencia reactiva				
Compensación de armónicos 2° - 50°				
Insensibles a la condición de la red				

Características	Lifasa: SINAF M	Circutor: Multinivel AFQm	Schneider Electric: AccuSine PCSn	TDK: AHF PQSine S Serie
Capacidad de sintonización (seleccionar) frecuencias armónicas a filtrar				
Tasa de filtración de armónicos al 97%				
Evita la resonancia en cualquier momento				
Normativa IEEE 519				
Normativa IEC 55011:2011				
Normativa EN61000-6-4:2007				
Normativa EN61000-6-2:2006				
Normativa EN61000-3-4:2007				
Comunicación Ethernet (TCP/IP, Modbus TCP)				

Bajo
Medio
Alto

Tabla 55. Aplicaciones de los filtros

Características	Filtros activos			
	Lifasa: SINAF M	Circutor: Multinivel AFQm	Schneider Electric: AccuSine PCSn	TDK: AHF PQSine S Serie
Variadores de frecuencia	X	X	X	X
Sistemas de alimentación interrumpida (UPS)	X	X	X	X
Fuente estabilizada (data center)	X	X	X	X
Aire acondicionado con variadores		X	X	X
Equipos de oficina	X	X	X	X
Aparatos electrodomésticos	X		X	X
Sistemas de soldadura eléctrica				X
Equipos de la industria ligera			X	X
Equipos de la industria moderada				X
Equipos de industria pesada				X

4.6.4 Selección del coeficiente K del transformador

Tabla 56. Parámetros medidos por el analizador de redes

$I_h \%$	h	I_h^2	h^2	$I_h^2 * h^2$
100	1	1	1	1
18.05	3	0.03258025	9	0.2932223
27.21	5	0.07403841	25	1.8509603
13.69	7	0.01874161	49	0.9183389
6.496	9	0.004219802	81	0.3418039
5.465	11	0.002986623	121	0.3613813
5.983	13	0.003579629	169	0.6049573
2.838	15	0.000805424	225	0.1812205
3.673	17	0.001349093	289	0.3898878
2.344	19	0.000549434	361	0.1983455
1.181	21	0.000139476	441	0.061509
1.527	23	0.000233173	529	0.1233485
1.028	25	0.000105678	625	0.066049
$\sum_{h=1}^{h=25} I_h^2 \cdot h^2 = 6.391024218$				

De la ecuación 18,

$$k = \frac{\sum_{h=1}^{\infty} h^2 \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2}{\sum_{h=1}^{\infty} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2}$$

Remplazando los valores, se tiene los siguientes:

$$k = \frac{6.3910}{1.1393} = 4.26$$

En la Tabla 57, se muestra los niveles referenciales según las cargas a suministrar energía. El valor próximo a 4.26 es para un $k = 4$.

Tabla 57. Factor k para diferentes tipos de carga

Tipo de carga	Factor k
Lámparas incandescentes (sin dimmers de estado sólido), calefactores eléctricos resistivos (sin controles de calor de estado sólido), motores (sin controladores de estado sólido), transformadores de control, dispositivos electromagnéticos de control, motor generador (sin controladores de estado sólido)	1
Lámparas de descarga, UPS con filtros de entrada opcional, equipo de calefacción inductiva, PLC y controladores de estado sólido.	4
Equipos de telecomunicaciones, UPS sin filtro de entrada	13
Servidores de computadoras, controladores de estado sólido (variadores de frecuencia), conectores multiconductor para instalaciones de salud, escuelas, etc., conectores multiconductor para alimentadores en equipos de inspección o prueba o para líneas de producción.	20
Conectores multiconductor para circuitos industriales, médicos y laboratorios educacionales, conector multiconductor para circuitos comerciales en oficina, pequeños servidores.	30
Otras cargas identificadas como productores de grandes cantidades de armónicos.	40

Con un $K = 13$ se garantiza la capacidad del transformador para suministrar energía a cargas no lineales sin sobrecalentarse.

Comparando con los datos del analizador de redes:

No fue posible identificar el coeficiente K del transformador para corroborar con los cálculos y datos del Analizador de redes, porque el transformador instalado en la subestación es de Uso General; como solución inmediata se plantea el uso de un Transformador de aislamiento con factor $K = 4$, para el circuito del bloque administrativo. A continuación, se muestra los datos de estos tipos de transformadores de aislamiento

- Consideraciones técnicas

Evitar sobrecalentamiento por los armónicos generados por las cargas no lineales. Es decir que el transformador trabajara a la temperatura normal de operación.

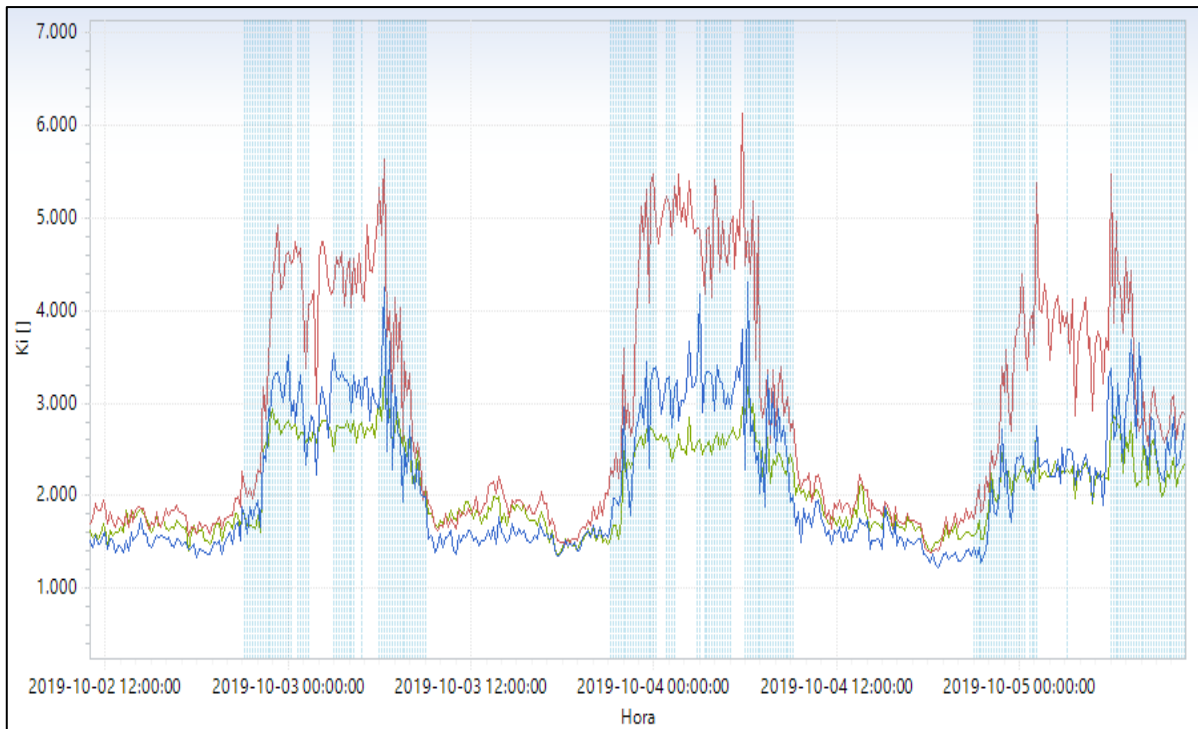


Figura 79. Gráfica del factor K para las tres fases

Fuente: Gouda, Amer & Salen (2011) Un estudio de las características del transformador de potencia de factor K mediante simulación de modelado.

Nota. Línea azul – Línea TDD I1; Línea roja – Línea TDD I2 y Línea verde – Línea TDD I3

• Características técnicas

Las características para equipos no lineales como variadores de velocidad, sistemas de alimentación interrumpida (UPS), fuentes estabilizadas, data center, aire acondicionado con variadores, equipos de oficina (ordenadores, impresoras, servidores, monitores, etc.), aparatos electrodomésticos (televisores, hornos microondas, fluorescentes, lavadoras y secadoras, reguladores de luz); son las siguientes:

- ✓ Modelo PERTEL.
- ✓ Núcleo: Hierro Silicoso
- ✓ Bobina: Jaula de Faraday
- ✓ Arrollamiento de aluminio
- ✓ Conexión entrada: 3 hilos (tres fases) 220/380/400/440 V_{L-L}
- ✓ Conexión salida: 3 hilos (tres fases) 220/380/400/440 V_{L-L}
- ✓ Frecuencia 60Hz
- ✓ Potencia nominal: 10KVA, 15KVA, 20KVA, 25KVA, 30KVA, - 300 KVA
- ✓ Dimensión: (460mm – 1100mm) x (300mm – 700mm) x (480mm – 1550mm)
- ✓ Factor de aislamiento: K=1, 4, 13, 20

- ✓ Factor de potencia: 0.8 ($K = 1, 4$); 0.99 ($K = 13, 20$)
- ✓ Temperatura máxima: 60°
- ✓ Eficiencia: 97%
- ✓ Nivel de ruido: 45dB



Figura 80. Transformador de aislamiento trifásico seco de factor k marca PERTEL

Fuente: Pertel (2020) Transformador de aislamiento trifásico secos de factor k marca Pertel.

- Ventajas

- ✓ Filtrado de armónicos de altas frecuencias
- ✓ Distribución de tensión
- ✓ Protección contra posibles sobretensiones y transitorios del lado de la red
- ✓ Aislamiento Galvánico entre circuitos de la carga y circuito de la red
- ✓ Eliminación de la estática del sistema en el lado de la carga
- ✓ Fabricados en base a las Normativas: IEC – 76 / NPT ITINTEC 370.002 (Especificaciones técnicas transformador trifásico)

- Desventajas:

- ✓ El uso por instalaciones puede aumentar el espacio de la subestación



Conclusiones

Existen varias normativas que son aplicadas de acuerdo a cada país según los factores ya sean geográficos, por la gran demanda, etc. Se estudió la normativa norteamericana (IEEE) y la europea (IEC) en las cuales se basa la NTPSE según los requerimientos estudiados y planteados por especialistas de las diferentes instituciones del Perú. Las normativas aplicadas brindan los valores mínimos que debemos cumplir y dependerá del caso que se analice. Para este caso práctico se aplicó la normativa NTPSE, a diferencia de las normativas IEC e IEEE, solo evalúa perturbaciones de tensión.

Los valores se mantienen dentro de los límites de la normativa NTPSE, sin embargo, puede resultar en algunos casos donde los valores no estén dentro de los límites de algunas normativas internacionales de calidad energética. Por ello es recomendable el uso de las normativas establecidas por cada país, en el caso del Perú se emplea la NTPSE, pero no es una limitante el empleo de otras normativas.

Cuando los valores se mantienen dentro de los límites establecidos, los equipos sensibles a los armónicos significativos, no se ven afectados en su funcionamiento, aunque pueden producirse algunos defectos con poca frecuencia no muy perceptibles como sobrecalentamientos momentáneos. Normalmente esto ocurre cuando hay una sobrecarga de equipos no lineales, en el caso de la Universidad de Piura donde los estudiantes usan frecuentemente equipos no lineales como laptops, celulares y los sistemas de cómputos que se alimentan por medio de fuentes estabilizadas, entre otros; a pesar de todo no hay una sobrecarga y los armónicos de tensión no exceden los límites.

Con el analizador de redes se puede observar cómo se ve afectada la onda senoidal de corriente por los armónicos, aunque aún se puede notar la forma senoidal. La solución a este problema es la implementación de filtros para amortiguar las corrientes dentro de los límites establecidos.

El cálculo de factor K para la selección del transformador de aislamiento es importante porque evita posibles sobrecalentamientos que reducen el tiempo de vida; si se incrementará el uso de equipos electrónicos en las otras instalaciones se tendría que considerar un posible cambio de transformador a largo plazo o dependiendo del tipo y la potencia de las cargas instalada. Las mediciones son importantes, para estos casos se deben realizarse

periódicamente cada 3 meses y tener un registro de los cambios de las perturbaciones de corriente para luego ser evaluado con el objetivo de garantizar una correcta calidad de la red eléctrica.

Las mediciones deben realizarse en los tableros eléctricos de cada área para analizar la emisión de armónicos de corriente y tensión para posteriormente tomar las medidas necesarias para mitigarlas. La instalación del equipo no es complicada siempre que se mantenga la seguridad y se emplee los recursos necesarios para trabajos en una subestación.

Aplicando la direccionalidad de los armónicos, la señal de corriente y la tensión son semejantes. La corriente (con cierto grado de distorsión) está desfasada respecto a la tensión, pero ambos mantienen la onda senoidal; queda demostrado que la emisión de armónicos es por parte de la universidad. La direccionalidad de los armónicos se emplea normalmente cuando los armónicos de tensión están fuera de los límites permitidos y no se define si las perturbaciones armónicas provienen de la red externa o son emitidos por las cargas no lineales de la universidad.

Mediante las mediciones realizadas por el analizador de redes se obtienen todos los parámetros importantes para su evaluación, además se evaluaron estos parámetros de calidad en base a las normativas NTPSE; también se aprendió a manipular el equipo Metrel IM 2883 para ser utilizado en los diferentes equipos y tableros de distribución en baja tensión con la asistencia de un responsable, y con los datos obtenidos los alumnos pueden interpretar los resultados ampliando sus conocimientos en la parte práctica.

Se decidió utilizar los filtros activos debido a que se tiene varios armónicos de corriente significativos (5° , 7° , 9° , 10° , 11° , 13° , 17°) y que se quiere mitigar todos ellos simultáneamente, para un filtro pasivo resultaría tedioso utilizarlo porque se emplearía un filtro para cada uno y además ocuparía demasiado espacio y alto consumo de energía. Los filtros activos son digitales y de fácil instalación, se puede monitorear remotamente con el objetivo de tener un mejor control, esto también ayudaría a los alumnos a evaluar el impacto de los armónicos en un sistema eléctrico con abundantes cargas no lineales.

Los filtros que mejor se adaptan para mitigar los armónicos de corriente del bloque administrativo son los AHF PQSine S serie (TDK) y AcuSine PCSn (Schneider Electric), estos filtros garantizan un alto desempeño de forma óptima y segura la compensación de los armónicos independientemente del número de cargas en el sistema eléctrico, compensación reactiva, balance de cargas, evita las resonancias, y son aplicados normalmente en el punto acoplamiento común (PCC) como es el caso práctico que se evaluó.

Los usuarios como centros comerciales, instituciones, edificaciones residenciales, entre otras, donde existan gran cantidad de cargas no lineales de baja potencia; las empresas de suministro eléctrico suelen entregar la configuración de los transformadores delta – estrella a 220 V_(L-L) evitando la conexión del neutro con el objetivo de evitar la introducción

de armónicos a la red, principalmente los de 3° y 5° orden. Si queremos reducir solo los armónicos tensión en este caso de orden 5°, podemos emplear filtros con factor de sintonización de 5 % a 7 %.





Referencias bibliográficas

- Academy of EMC. (s.f.). *EMC Standards*. Recuperado el 2020, de Academy of EMC - Education for professional engineers: <https://www.academyofemc.com/emc-standards>.
- Acevedo Ramírez, G. A., Esparza Gonzáles, M. S., & Olivares Galván, J. C. (2009). *Diseño de un Procedimiento de Cálculo de Conductores Bajo Efecto con Corrientes Armónicas*. Instituto Tecnológico de Aguascalientes. México: Conciencia Tecnológica - Redalyc. Recuperado el 2020, de <https://www.redalyc.org/pdf/944/94411773007.pdf>
- AENOR. (2003). *Part 2-2: Environment compatibility levels for low frequency conducted disturbances and signalling in public low voltage power supply systems*. Madrid, España: AENOR. Recuperado el 2020
- AENOR. (2006). *Part 3-2: Limits. limits for harmonics current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase)*. Madrid, España: AENOR. Recuperado el 2020
- Blooming, T., & Carnovale, D. (2006). *Application of IEEE Std 519 - 1992 Harmonic Limits*. Recuperado el 2020, de IEEE LAS Atlanta Section 52: https://ewh.ieee.org/r3/atlanta/ias/IEEE_519.pdf
- Carrillo Gonzáles, C. J. (2003). *Fundamentos del análisis de Fourier*. España: Dialnet. Recuperado el 2020, de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=232838>
- Circutor. (2018). *Armónicos: Problemática actual y su solución*. Recuperado el 2020, de Tecnología para la eficiencia energética: <http://circutor.es/es/productos/destacados/4194-armonicos-problematica-actual-y-su-solucion>
- Circutor. (2020). *Serie LR-LRB*. Obtenido de Circutor: <http://circutor.com/es/productos/compensacion-de-energia-reactiva-y-filtrado-de-armonicos/filtros-de-armonicos/serie-lr-lrb-detai>
- Collins, R. (2008). *IEEE Standard 1159 Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality A Status Update*. Recuperado el 2020, de IEEE T&D Conference: https://ewh.ieee.org/conf/tdc/IEEE_1159_Update_Collins__T&D_2008.pdf

- Colom Palero, R. J. (2001). *Estudio e implementación de la transformada Wavelet para la compresión de imágenes y video*. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Valencia. doi:10.4995/Thesis/10251/4261
- Córdova Zamorano, J. J. (2012). *Modelado de Series en Tiempo vía Redes Neuronales Wavelet Haar*. Tesis, Instituto Politécnico Nacional, Departamento de Control Automático, México. Recuperado el 2020, de <https://ctrl.cinvestav.mx/~yuw/pdf/DoTesJJCZ.pdf>
- Corporation Fluke. (2011). *Equipos de calidad de la energía eléctrica*. Recuperado el 2020, de Corporation Fluke: https://www.cedesa.com.mx/pdf/fluke/fluke_434II-435II_nota1.pdf
- Cunill, J. (2017). *Estudio y caracterización armónica de las lámparas fluorescentes compactas de baja potencia*. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Catalunya, Departamento de Ingeniería Eléctrica, España. Recuperado el 2020, de <https://www.tesisenred.net/handle/10803/461531>
- De Campos, A. (2018). *Normas IEEE y IEC sobre regulaciones en THD para sistemas de baja y media tensión*. ITESM. Informe. Recuperado el 2020, de https://www.academia.edu/37059611/Doc_Go_Net_ANGEL_DE_CAMPOS_Normas_IEEE_y_IEC_sobre_regulaciones_en_THD_para_sistemas_de_baja_y_media_tension
- Devia Narváez, D. F. (2011). *Modelado de un convertidor ca/cc trifásico para el análisis de la distorsión armónica*. Tesis, Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ingeniería. Recuperado el 2020, de <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/581391>
- División de Supervisión Regional. (2017). *Estadística de la calidad de tensión - Segundo semestre 2016*. Recuperado el 2020, de OSINERG: https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/electricidad/Documentos/CALIDAD/NTCSE/Osinergmin-Electricidad-Estadistica-Calidad-Tension-Rural.pdf
- Ducura Valenzuela, J. A. (2017). *Mitigación de perturbaciones en calidad de potencia en sistemas de distribución usando control distribuido*. Trabajo de investigación, Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Bogotá. Recuperado el 2020, de Repositorio Universidad Nacional de Colombia: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/63112>
- Edminister, J., & Nahvi, M. (1997). *Circuitos eléctricos* (Vol. III). Recuperado el 2020, de <https://es.scribd.com/doc/175461238/Electricidad-McGraw-Hill-Circuitos-Elctricos>
- FCEIA. (2006). *Teoría de circuitos: Capítulo 11*. Recuperado el 2020, de Universidad Nacional del Rosario: <https://www.fceia.unr.edu.ar/tci/utiles/index.htm>
- García, R. I. (2006). *Análisis wavelet aplicado a la medida de armónicos, interarmónicos y subarmónicos en redes de distribución de energía eléctrica*. Universidad de Cantabria,

Departamento de Electrónica y Computadores. Santander: Tesis en red. Recuperado el 2020, de <https://www.tesisenred.net/handle/10803/10636;jsessionid=A266566716BDC2F97B030453682882AB#page=1>

- Giovanni Parra, F., Obregón Merchán, J. A., & Augusto, H. S. (2 de mayo de 2013). *Implementación de un sistema de alimentación ininterrumpida, con visualización de parámetros eléctricos en LCD*. Recuperado el 2020, de Revistas: <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/REDES/article/view/6425/7970>.
- Gouda, O. E., Amer, G. M., & Salen, W. A. (2011). *Un estudio de las características del transformador de potencia de factor K mediante simulación de modelado*. Departamento de Ingeniería, tecnología y ciencia aplicada. Egipto: ETASR. doi:<https://doi.org/10.48084/etasr.59>
- Grainger, J., & Stevenson, W. (1994). *Power System Analysis* (Primera ed.). Recuperado el 2020, de <https://www.mheducation.com/highered/product/power-system-analysis-grainger-stevenson/9780070612938.html>
- Guirado Torres, R., Asensi Orosa, R., & Jurado Melguizo, F. (2006). *Tecnología Eléctrica McGraw-Hill*. Recuperado el 2020, de <https://www.mheducation.es/tecnologia-elctrica-9788448148072-spain-group>
- Halpin, S. (2005). *Comparación de los estándares armónicos IEEE e IEC*. Tesis, Universidad de Auburn, Departamento de Ingeniería Eléctrica e Informática, Estados Unidos. Recuperado el 2020, de <https://www.semanticscholar.org/paper/Comparison-of-IEEE-and-IEC-harmonic-standards-Halpin/2fa97ba3f8a06d41e301c01d96fd1079b7e67b03>
- Hanzeika, Z., & Bieri, A. (2004). *Armónicos-interarmónicos: Guía de calidad de la energía eléctrica. edit. por International Copper Institute (ECI)*. University of Science and Technololy. Recuperado el 2020, de <https://es.slideshare.net/hernvel/311-armonicosinterarmonicos>
- Hart, D. W. (1997). *Introduction to power electronics*. Nueva Jersey. Recuperado el 2020, de https://bibliobuscador.uah.es/primo-explore/fulldisplay?vid=34UAH_VU1&docid=34UAH_ALMA2144428900004214&lang=es_ES&context=L
- I.T.T. (2020). *Introducción a la Electrónica de Potencia: Inversores. Tema 11: Inversores*. Recuperado el 2020, de I.T.T. (S.E): https://www.uv.es/emaset/iep00/temas/IEP11_0607.pdf.
- Issouribehere, P., Issouribehere, F., & Barbea, G. (2009). *Aspectos de calidad de servicio en hornos de arco eléctrico como cargas en los sistemas de distribución*. Argentina: Revista

CIER N° 52. Recuperado el 2020, de http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/36369/Documento_completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Jiménez Molano, G. O. (2008). *Armónicos: Cálculo de la Potencia Reactiva para la Implementación de Bancos de Condensadores en Cargas Aisladas*. Tesis, Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación, Colombia. Recuperado el 2020, de <https://core.ac.uk/download/pdf/11051409.pdf>

Lamich, M. (2020). *Filtros Activos de Potencia*. Recuperado el 2020, de YUMPU: <https://www.yumpu.com/es/document/read/14370309/filtros-activos-de-potencia-jcee-upc>

Martínez Morato, D. (2012). *Estudio de armónicos y propuesta de soluciones en taller de chapistería de SEAT MARTOREL*. Tesis, Universidad Politécnica de Catalunya, Departamento de Ingeniería Eléctrica, España. Recuperado el 2020, de <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/15767>

METREL. (19 de Septiembre de 2011). *Calidad de la energía: análisis de potencia, armónicas y perturbaciones de red en sistemas trifásicos de distribución*. Recuperado el 2020, de SCRIBD: <https://es.scribd.com/document/65568473/Handbook-Power-Spa>

MINEM. (1997). *Normas Técnicas de los Servicios Eléctricos Decreto Supremo*. Norma Técnica. Recuperado el 2020, de http://www.minem.gob.pe/_detalle.php?idSector=6&idTitular=626&idMenu=sub114&idCateg=340

Molina, M. (2012). *Características de los armónicos generados por controladores de velocidad para motores de corriente directa y alterna*. Tesis, Instituto Politécnico Nacional, México. Recuperado el 2020, de <https://1library.co/document/myjo3o6z-caracterizacion-armonicos-generados-controladores-velocidad-motores-corriente-directa.html>

Montejo, L. A., & Suárez, L. E. (2020). *Aplicaciones de la transformada Ondícula ("wavelet") en ingeniería industrial*. Tesis, Departamento de Ingeniería. Recuperado el 2020, de https://www.famaf.unc.edu.ar/~torres/trabajosparapublicacion/23-simposio_homenaje_al_dr_carlos_prato/23-simposio_homenaje_prato-32.pdf

Motta, L., & Faúndes, N. (2016). *Active / passive harmonic filters: Applications, challenges & trends*. IEEE. Recuperado el 2020, de <https://ieeexplore.ieee.org/document/7783319?denied=>

MTE Corporation. (2012). *Reactor RLW*. Obtenido de MTE Corporation.

- Nieto, N., & Orozco, D. (2008). *El uso de la transformada wavelet discreta en la reconstrucción de señales senosoidales*. Scientia et Technica. Recuperado el 2020, de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4782789>
- Nuñez Gutierrez, C., Lira Pérez, J., Cardenas Galindo, V., & Alvarez Salas, R. (2009). *Control of a PWM Rectifier with Extended Functions in a Signal Digital Processor*. Departamento de Ingeniería. SCIELO. Recuperado el 2020, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1405-77432009000100006&lng=es&nrm=iso&tlng=en
- Ocampo, J. F. (2007). *Detección y posible identificación de fallas en motores eléctricos con base en el análisis de vibraciones*. Tesis, Universidad de las Américas Puebla, Departamento de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones, Puebla. Recuperado el 2020, de http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/ocampo_r_jf/.
- Oriol Boix, A. (1996). *Estudio y modelización en régimen permanente de cargas no lineales para el análisis armónico de redes eléctrica*. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Catalunya, Departamento de Ingeniería Eléctrica, España. Recuperado el 2020, de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=6358>
- Ortiz Fernández, A. (1998). *Ondículas: un modelo de enseñanza en matemática*. Artículo, Pontificia Universidad Católica del Perú, Departamento de ciencias. Recuperado el 2020, de <http://revistas.pucp.edu.pe/index.php/promathematica/article/view/8132>
- OSINERGMIN. (2012). *R.D N° 154-2012-EM/DGE*. Normas legales, Lima. Recuperado el 2020, de <http://www2.osinerg.gob.pe/ProcReg/VAD/VAD2013/Recursos/2-Sectores/Resoluci%C3%B3n%20Directoral%20N%C2%B0%20154-2012-EM-DGE.pdf>
- OSINERGMIN. (2019). *Calidad de producto: tensión*. Obtenido de OSINERGMIN: <https://www.osinergmin.gob.pe/empresas/electricidad/calidad/NTCSE/producto>
- Pérez, M. (2016). *Capítulo 6: Convertidores CA-CA*. Universidad Técnica Federeico Santa María, Departamento de Electrónica. Recuperado el 2020, de http://profesores.elo.utfsm.cl/~mpl/wpcontent/uploads/2016/11/elo381_capitulo_06_convertidores_AC-AC_v1.pdf
- Pertel. (2020). *Transformador de aislamiento trifásico secos de factor k marca Pertel*. Ficha técnica, Pertel. Recuperado el 2020, de <https://www.pertel.pe/wp-content/uploads/2020/01/FICHA-T%C3%89CNICA-TRAFO-TRIF%C3%81SICO-SECO-FACTOR-K-PERTEL.pdf>
- Ramírez Castaño, S. (2004). *Redes de Distribución de Energía* (Tercera ed.). Manizales, Colombia: Centro de Publicaciones Universidad Nacional de Colombia. Recuperado el 2020, de https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/7095/958-9322-86-7_Parte1.pdf?sequence=4&isAllowed=y

- Ramírez Castaño, S., & Cano Plata, E. (2006). *Calidad del Servicio de Energía Eléctrica* (Primera ed.). Manizales, Colombia: Centro de Publicaciones Universidad Nacional de Colombia. Recuperado el 2020, de https://www.researchgate.net/profile/Eduardo_Cano_Plata/publication/271197778_Calidad_del_servicio_de_energia_electrica/links/54c04b180cf28eae4a696908/Calidad-del-servicio-de-energia-electrica.pdf
- Reybell H., A. (2009). *Análisis de ferorresonancia en sistemas de distribución*. Tesis, Instituto Politécnico Nacional, Departamento de Ingeniería Mecánica, México. Recuperado el 2020, de <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/UNCP/3558>
- Rivero Trelles, M. (2008). *Regulación, control y protección de máquinas eléctrica. Apuntes de la asignatura*. Universidad de Cantabria, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética. Recuperado el 2020, de <https://bit.ly/3pesAxm>
- Rosales, O. (1995). *Estudion de frecuencias armónicas*. Tesis, Universidad Autónoma de Nuevo León, Departamento de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Nuevo León. Recuperado el 2020, de <http://eprints.uanl.mx/7617/1/1020115012.PDF>
- S. Osorio, A. (2006). *Algoritmo para detección de vibraciones anormales en maquinarias utilizando la transformada wavelet*. Tesis, Universidad de las Américas Puebla, Departamento de Ciencias, México. Recuperado el 2020, de http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/meie/osorio_s_a/
- Salvador G., D. (2014). *Calidad del Servicio Eléctrico en la Región Cajamarca*. Recuperado el 2020, de OSINERGMIN: <https://www.osinergmin.gob.pe/newweb/uploads/Publico/OficinaComunicaciones/EventosRealizados/ForoCajamarca/2/Calidad%20servicio%20electrico%20Cajamarca.pdf>
- Schneider Electric. (2018). *Detección y filtro de armónicos*. Recuperado el 2020, de Schneider Electric: http://automata.cps.unizar.es/bibliotecaschneider/BT/Guia/5_Armonicos.
- Seymour, J., & Horsley, T. (2005). *Los siete tipos de problemas en el suministro eléctrico*. Recuperado el 2020, de APC by Schneider Electric: <https://www.studocu.com/es-mx/document/instituto-tecnologico-de-celaya/fundamentos-de-termodinamica/resumenes/problemas-de-suministro/4108824/view>.
- Smith, S. (1999). *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing* (Segunda ed.). California: California Technical Publishing. Recuperado el 2020, de <https://ieeexplore.ieee.org/document/1489688/authors#authors>
- Suárez, J. A., & Guillermo, F. (2010). *Parámetros que afectan a la corriente de neutro en presencia de armónicos*. Artículo, Universidad Nacional de Mar del Plata,

Departamento de Ingeniería Eléctrica, Buenos Aires.
doi:doi:10.1612/inf.tecnol.4144it.08

- Tamayo, J., Salvador, J., Vásquez, A., & Vilches, C. (2016). *La industria de la electricidad en el Perú: 25 años de aportes al crecimiento económico del país* (Primera ed.). Magdalena del mar, Lima, Perú. Recuperado el 2020, de https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/Institucional/Estudios_Economicos/Libros/Osinergmin-Industria-Electricidad-Peru-25anios.pdf
- Tejada, A., & Llamas, A. (2010). *Efectos de las Armónicas en los Sistemas eléctricos*. Artículo, Instituto Tecnológico de Monterrey, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Monterrey. Recuperado el 2020, de <https://www.mty.itesm.mx/decic/deptos/ie/profesores/allamas/cursos/ueee/armonicas/07Efectarm.PDF>
- Tomás Supervielle, E. (2018). Nikola Tesla (padre de la tecnología moderna). *Revista de ingeniería y humanidades*, 104-117. Recuperado el 2020, de Revista de Ingeniería y humanidades: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6930597.pdf>
- Trinidad Torres, F. A. (2017). *Transformada de Fourier y su aplicación en procesamiento digital de imágenes*. Tesis, Universidad Autónoma de Puebla, Departamento de ciencias, Puebla. Recuperado el 2020, de <https://www.fcm.buap.mx/assets/docs/docencia/tesis/ma/FlorAngelicaTrinidadTorres.pdf>
- UNICAMP. (2018). *Electromagnetic Compatibility (EMC) Low-Frequency Standards*. Recuperado el 2020, de UNICAMP: <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/files/JEC.pdf>
- UNLS. (2013). *Resonancia en un circuito serie RLC*. Recuperado el 2020, de UNLS: <http://www0.unsl.edu.ar/~eyme2/laboratorios/lab6.pdf>
- Vetterli, M., & Kovacevic, J. (1995). *Wavelets and Subband Coding*. Nueva Jersey. Recuperado el 2020, de http://waveletsandsubbandcoding.org/Repository/VetterliKovacevic95_Manuscript.pdf
- Voltimum. (27 de Julio de 2016). *Parámetros a medir y analizar en el concepto power quality*. Recuperado el 2020, de Voltimum: <https://www.voltimum.es/novedades-tecnicas/parametros-medir-y-analizar>
- Yung, C. (2017). *El Entrehierro ¿Qué es y por qué es importante?* Recuperado el 2020, de Electrical Apparatus Service Association.